

Cuaderno

Enero - Diciembre 2025

Activa

• REVISTA CIENTÍFICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA •



TdeA
Institución Universitaria



Cuaderno

Activa

• REVISTA CIENTÍFICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA •



Cuaderno

Activa

• REVISTA CIENTÍFICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA •

ISSN: 2027-8101

e-ISSN: 2619-5232

Número 17, Enero-Diciembre de 2025

Periodicidad Anual

Leonardo García Botero

Rector

Fabio Alberto Vargas Agudelo

Vicerrector Académico (e)

Fabio Alberto Vargas Agudelo

Director de Investigación

Andrés Felipe Montoya Rendón

Decano Facultad de Ingeniería

DIRECCIÓN EDITORIAL

Darío Enrique Soto Durán

Editor Jefe

Juan David Umaña Gallego

Coeditor

COMITÉ EDITORIAL

Adela Tatiana Rodríguez Chaparro, Ph.D. en Ingeniería Hidráulica y Saneamiento. Universidad Militar Nueva Granada, Colombia.

Alicia Martínez Rebollar, Ph.D. en Informática, Ph.D. en Investigación en Informática y Telecomunicaciones. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), México.

Antonio Silva Sprock, Ph.D. en Management Science. Universidad Central de Venezuela, Venezuela.

Carlos Mario Zapata Jaramillo, Ph.D. en Ingeniería de Sistemas. Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

Diana María Montoya Quintero, Ph.D. en Ingeniería de Sistemas e Informática. Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

Diego Mauricio Murillo Gómez, Ph.D. en Sonido y Vibraciones. Universidad de San Buenaventura, Colombia.

Fredy Edimer Hoyos Velasco, Ph.D. en Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

Gerard Olivar Tost, Ph.D. en Matemática Aplicada. Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

Gonzalo Llano Ramírez, Ph.D. en Telecomunicaciones. Universidad ICESI, Colombia.

Jorge Alberto Villalobos Salcedo, Ph.D. en Informática. Universidad de los Andes, Colombia.

María Cristina Peñuela Mora, M.Sc. Forest Resources Management. State University of New York, United States.

Paola Andrea Noreña Cardona, Ph.D. en Ingeniería de Sistemas e Informática. Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

Paola Verónica Britos, Ph.D. en Ciencias Informáticas. Universidad de Río Negro, Argentina.

COMITÉ CIENTÍFICO/ARBITRAL

Luis Sánchez, Ph. D.
Institución Universitaria Pascual Bravo, Colombia
Neider Vergara, M.Sc
Politécnico Grancolombiano, Colombia
Silvana Bolaños, Ph.D
Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Colombia
Javier Vera, Ph.D
Universidad de Pamplona, Colombia
Gabriel Eduardo Ávila, M.Sc
Politécnico Grancolombiano, Colombia
Claudia Muñoz, Especialista
Institución Universitaria Colegio Mayor del Cauca, Colombia
Jhan Pablo Agudelo Escalante, M.Sc
SIA, Colombia
Camilo Alberto Yañez Olivares, Ingeniería Biotecnológica
Teleperformance, Colombia
Hernán Darío Cañola, M.Sc
Colegio Mayor de Antioquia, Colombia
Alberth Renne González Carantón, Ph.D
Universidad ECCI, Colombia
Zulma Edelmira Rocha Gil, Ph.D
Universidad de Boyacá, Colombia
Fabián Granobles Velandia, M.Sc
Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Colombia
Julio Ponce, Ph.D
Universidad de Aguascalientes, México
Regina Motz, Ph.D
Universidad de la República Uruguay, Uruguay
David Camilo Guerrero, Especialista
Instituto Tecnológico del Putumayo, Colombia
Boris Mauricio Revelo Rendón, M.Sc
Fundación Universitaria María Cano, Colombia

INSTITUCIÓN EDITORA

Tecnológico de Antioquia - Institución Universitaria.
Facultad de Ingeniería.
Calle 78B No. 72A – 220. Medellín - Colombia, Suramérica.
Teléfono: (604) 454 70 38

CORRECCIÓN DE ESTILO, DISEÑO, DIAGRAMACIÓN, ILUSTRACIÓN E IMPRESIÓN

Papeles Pa' Ya
Carrera 69k # 71-23 (oficina 302), Bogotá, Colombia
Teléfono: +57 317 435 8309
E-mail: papeles.paya.sas@gmail.com
Corrección de estilo: Paola Ladino · Papeles Pa' Ya.
Diseño y diagramación: Jeniffer Acosta Gutiérrez · Papeles Pa' Ya.
Ilustración de portada: David Osorio Díaz · Papeles Pa' Ya.

Los artículos publicados incorporan contenidos derivados de procesos de investigación, revisión y reflexión académica, que cumplen una función social, sin embargo, no representan los criterios institucionales del Tecnológico de Antioquia - Institución Universitaria. Los contenidos son responsabilidad exclusiva de los autores, y cualquier observación o cuestionamiento sobre la originalidad de los textos puede ser notificada al correo cuadernoactiva@tdea.edu.co y a los autores. El Tecnológico de Antioquia - Institución Universitaria autoriza la reproducción parcial de los textos con fines exclusivamente académicos, dando estricto cumplimiento a las normas de referenciación bibliográfica en favor de los autores y de las instituciones editoras. Cualquier uso diferente requerirá autorización escrita del director, y su omisión inducirá a las acciones legales dispuestas por las leyes internacionales sobre la propiedad intelectual y los derechos de autor.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

SITIO WEB

<http://ojs.tdea.edu.co/index.php/cuadernoactiva>

CORREO

cuadernoactiva@tdea.edu.co

Contenido

Presentación

Presentation

7

Editorial

9

Análisis de la declaratoria del Distrito de Manejo Integrado Farallones: un estudio de caso en los municipios de Ubalá, Gachalá y Medina, Cundinamarca

11

Analysis of the Declaration of the Farallones Integrated Management District: A Case Study in the Municipalities of Ubalá, Gachalá and Medina, Cundinamarca

María Fernanda Medina Quintero, Edinson Fabián Monroy Ávila, Claudia Rocío Suárez Castillo

Prototipo funcional de software de reconocimiento biométrico de huellas dactilares para aerolíneas

29

Functional prototype of biometric fingerprint recognition software for airlines

Víctor Daniel Gil Vera, Jean Carlos López-Tavera

Potencial antimicrobiano de extractos liquénicos de *Parmotrema* sp. y *Usnea* sp.: una evaluación para uso sostenible en el Campus sede Tunja de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

45

*Antimicrobial Potential of Lichen Extracts of *Parmotrema* sp. and *Usnea* sp.: an Evaluation for Sustainable Use in the Tunja Campus of the Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia*

Jhonatan Stiven Pulido Ovalle, Julián Santiago Pulido Torres, María José Rodríguez Silva, Luz Ángela Cuellar Rodríguez

¿Qué saben los estudiantes y docentes de pregrado de carreras orientadas al estudio de las TIC sobre la interactividad y cómo afecta su formación académica? Estudio de caso en la Universidad Católica Luis Amigó

63

What do Undergraduate Students and Faculty in ICT- Oriented Programs Know About Interactivity and How it Affects their Academic Training? A Case Study at Universidad Católica Luis Amigó

Jaime Alberto Villa Lopera, Lina María Montoya Suárez

Más Allá del RAS: nuevos modelos de proyección de residuos sólidos para estimar la producción per cápita a nivel municipal

Beyond the RAS: New Solid Waste Projection Models to Estimate Per Capita Production at the Municipal Level

Diego Andrés Arteaga Zanguña, Edinson Fabián Monroy Ávila

73

Valoración sociocultural de servicios ecosistémicos urbanos en el Parque Juan Pablo II del municipio de Chiquinquirá, Boyacá

Sociocultural Assessment of Urban Ecosystem Services in Juan Pablo II Park in the Municipality of Chiquinquirá, Boyacá

Mónica Alfonso, Luz Ángela Cuellar, Tania Pineda, Jenny Trilleras

93

Modelo de formación docente intergeneracional para la educación digital: reactivando saberes, integrando tecnologías

Intergenerational Teacher Training Model for Digital Education: Reactivating Knowledge, Integrating Technologies

Yosly Hernández-Bieliukas, Julia Machmud-García

113

Estudio de un sistema de depuración natural para el tratamiento de aguas residuales industriales de la cervecería mozambiqueña

Study of a Natural Purification System for the Treatment of Industrial Wastewater from the Mozambican Brewery

Antonio Casañas, Nicolau Chirinza, Paulino Muguirrima, Federico León Zerpa, Alejandro Ramos Martín, Carlos Mendieta

129



Presentación

Cuaderno Activa es una revista científica de acceso abierto, es editada desde el 2011 por la Facultad de Ingeniería del Tecnológico de Antioquia - Institución Universitaria. *Cuaderno Activa* publica con periodicidad anual artículos del campo de la Ingeniería, la Ciencia y la Tecnología cumpliendo con las políticas editoriales de alta calidad para revistas científicas. El objetivo de la revista es difundir el conocimiento científico y tecnológico resultado de investigaciones originales y relevantes sobre nuevos conocimientos en ingeniería, reflejado a través de productos de investigaciones científicas que buscan contribuir al desarrollo de la Ciencia y la Tecnología.

Objetivos

- Brindar un espacio académico, investigativo y científico en las áreas de Ingeniería.
- Publicar resultados originales de investigación científica y tecnológica.
- Tener calidad editorial en la producción de la revista.
- Ser una fuente de difusión y discusión para la comunidad científica.

Política editorial

Para garantizar la calidad de las publicaciones, *Cuaderno Activa* dispone de dos comités que permiten dar cumplimiento a los procesos editoriales de la revista en compañía de un director editorial, el cual debe ser un docente-investigador que lidere el proceso editorial y la periodicidad de la revista. El Comité Editorial define los criterios con que se rige la revista y está conformado por pares académicos nacionales e internacionales. El Comité Científico/Arbitral verifica la pertinencia de los artículos y está integrado por miembros internacionales ajenos al proceso editorial. Además, el Comité Científico/Arbitral valora rigurosamente el contenido de los escritos que envían los autores y está compuesto por evaluadores internos y externos a la institución editora, expertos en el área. (Los miembros de los comités podrán ser árbitros o autores, siempre y cuando no participen en ambos roles en el mismo número de la edición).

Política de acceso abierto

Esta revista se inscribe en la política de libre acceso a la información que ella contiene. La revista *Cuaderno Activa* puede ser consultada en la plataforma de gestión de revistas académicas y científicas del Tecnológico de Antioquia - Institución Universitaria: <http://ojs.tdea.edu.co>. La revista *Cuaderno Activa* se encuentra incluida en:

Repositorio digital:  

Índices de revistas:  



Presentation

Cuaderno Activa is a scientific journal with an Open Access character, it has been published since 2011 by the Faculty of Engineering of Tecnológico de Antioquia - Institución Universitaria. *Cuaderno Activa* publishes articles in the field of Engineering, science and technology on an annual basis, complying with high quality editorial policies for scientific journals. The aim of this journal is to disseminate scientific and technological knowledge resulting from original and relevant research on new engineering knowledge, reflected through scientific research products that seek to contribute to the development of Science and Technology.

Objectives

- To provide an academic, research and scientific space in the field of Engineering.
- To publish original results of scientific and technological research.
- To issue a journal with editorial quality.
- To be a source of dissemination and discussion for scientific community.

Editorial policy

Cuaderno Activa has two committees that allow to achieve the journal editorial process in order to guarantee the quality of publications. The committees work together with an editorial director, which must be a teacher-researcher who leads the editorial process and the periodicity of the journal. The Editorial Committee defines the criteria used by the journal and is made up of national and international academic peers. The Scientific/Arbitration Committee verifies the relevance of the articles and rigorously assesses the content of the writings submitted by the authors. The Scientific / Arbitration Committee is made up of international members who are not part of the editorial process. Besides, it is composed by internal evaluators and external of the publishing institution, experts in the area. (Committee members may be judges or authors, as long as they do not participate in both roles in the same issue.)

Open-access policy

This journal adheres in an open access policy to the information that it contains. The journal *Cuaderno Activa* can be visited on the platform for academic and scientific journals of Tecnológico de Antioquia - University Institution: <http://ojs.tdea.edu.co>. *Cuaderno Activa* journal is included in:

Digital repository:  

Indexes of journals:  

Editorial

En una era industrializada es necesario proteger los ecosistemas. Es tener conciencia de que los bosques, selvas y zonas para el cultivo y la vivienda no pueden ser amenazados ni utilizados sin tener en cuenta su equilibrio.

Cuidarlos es compromiso de todos, pero es la academia quien desde nuestro punto de vista tiene un grado más de responsabilidad en este proceso, proponiendo qué se debe hacer para preservar la vida y los recursos que el planeta ofrece.

La Revista Cuaderno Activa en esta nueva edición, presta sus páginas a los investigadores que reflexionan acerca de la necesidad de reconocer esos ambientes a resguardarse, que crean lineamientos para evitar su destrucción, que fomentan su conservación y explican a quienes deseen aprovechar sus recursos, cómo se deben hacer las cosas sin perjuicio de la naturaleza y en beneficio de la humanidad.

Por otra parte, no podemos olvidar que la tecnología sigue su evolución constante. En esta edición también abrimos espacio a los investigadores que piensan en la creación de software enfocado en la seguridad aeroportuaria a través del reconocimiento biométrico. Igualmente, damos importancia al esfuerzo de los docentes que proponen modelos de actualización pedagógica enfocados en la educación digital, para lograr llegar a sus estudiantes y expresar su conocimiento de manera tal que niños y jóvenes aprendan de formas diferentes y no desistan de su formación académica.

El medio ambiente y la tecnología pueden convivir sin necesidad de arriesgar el equilibrio del planeta. La academia entiende eso y por ello respalda a los investigadores que con su esfuerzo crean acciones transformadoras.

Agradecemos de manera especial a los autores y al Comité Científico por su apoyo en la obtención de esta nueva edición de la Revista Cuaderno Activa. Su aporte contribuye a la calidad de la investigación en Colombia y el mundo.

Dario E. Soto Durán

Editor

Juan D. Umaña Gallego

Coeditor



Imagen solo de referencia.



Análisis de la declaratoria del Distrito de Manejo Integrado Farallones: un estudio de caso en los municipios de Ubalá, Gachalá y Medina, Cundinamarca

Analysis of the Declaration of the Farallones Integrated Management District: A Case Study in the Municipalities of Ubalá, Gachalá and Medina, Cundinamarca

María Fernanda Medina Quintero¹, Edinson Fabián Monroy Ávila², Claudia Rocío Suárez Castillo³

Tipo de Artículo: investigación.

Recibido: 30/04/2025. **Aprobado:** 09/07/2025. **Publicado:** 12/12/2025

Resumen: este estudio analiza la propuesta de declaratoria del “Distrito Regional de Manejo Integrado Los Farallones” en los municipios de Gachalá, Ubalá y Medina, ubicados en Cundinamarca, Colombia. El área propuesta, que cubre 23,301.44 hectáreas, es estratégica para la conservación de la biodiversidad y provisión de servicios ecosistémicos clave, como la regulación hídrica

y la captura de carbono. A partir de un análisis geológico, se identificaron riesgos asociados a la configuración topografía del territorio. El estudio climático evidenció variaciones significativas en las precipitaciones y temperaturas, factores que influyen directamente en la dinámica de la fauna y flora locales. La investigación incluyó un análisis detallado de la biodiversidad, que permitió identi-

¹ Autor correspondiente: María Fernanda Medina Quintero. Mayor título: Especialista en Derecho Ambiental. Filiación institucional: Universidad Santo Tomás. País: Colombia, Ciudad: Tunja. Correo electrónico: maria.medinaq@usantoto.edu.co. ORCID: 0009-0002-9225-6865

² Autor correspondiente: Edinson Fabián Monroy Ávila. Mayor título: Magíster en Tecnologías para el Manejo de Aguas y Residuos. Filiación institucional: Universidad Santo Tomás. País: Colombia, Ciudad: Tunja. Correo electrónico: ingenierofabianm@gmail.com. ORCID: 0000-0003-3757-9442

³ Autor correspondiente: Claudia Rocío Suárez Castillo. Mayor título: Magíster en Ingeniería Civil. Filiación institucional: Universidad Santo Tomás. País: Colombia, Ciudad: Tunja. Correo electrónico: claudia.suarezc@usantoto.edu.co. ORCID: 0000-0002-5382-7357

ficar especies en peligro de extinción, como el oso andino y el águila crestada. Asimismo, se evaluaron los servicios ecosistémicos asociados a la provisión de agua y la regulación climática. Los resultados evidencian que este territorio cumple un papel fundamental en la conectividad ecológica, al funcionar como corredor entre los ecosistemas de alta montaña y áreas de piedemonte, lo que refuerza la relevancia de su declaratoria como área protegida. En consecuencia, la propuesta de declarar el área como protegida es una medida viable y estratégica, tanto para la preservación de la biodiversidad como para el bienestar de las comunidades locales. Este proyecto debe implementarse con la cooperación de instituciones gubernamentales, comunidades locales, empresa privada, entre otros actores del territorio, con un enfoque en la gestión sostenible de los recursos naturales.

Palabras clave: biodiversidad; ecosistema terrestre; conservación de la fauna y flora silvestre; conectividad ecológica.

Abstract: This study analyzes the proposal to declare the “Los Farallones Integrated Management Regional District” in the municipalities of Gachalá, Ubalá, and Medina, located in Cundinamarca, Colombia. This area, covering 23.301.44 hectares, is crucial for the conservation of biodiversity and the provision of essential ecosystem services, such as water regulation and carbon capture. A geological analysis revealed risks due to the area’s topography, while the climatic study showed significant variations in precipitation and temperatures, factors that directly affect the local fauna and flora. In addition, the study included an exhaustive biodiversity analysis, identifying endangered species such as the Andean bear and the crestless eagle, and assessing the ecosystem services related to water provision and climate control. The results confirmed that this territory plays a key role in ecological connectivity, serving as a corridor between high-mountain ecosystems and foothill ecosystems. This highlights the importance of its declaration as a protected area. Therefore, it is concluded that the proposal to protect this area is a strategic and viable measure for preserving biodiversity and ensuring the well-being of local communities. This project should

be implemented in collaboration with government institutions, local communities, and the private sector, adopting an approach focused on the sustainable management of natural resources.

Keywords: biodiversity; terrestrial ecosystems; wildlife conservation; ecological connectivity.

I. Introducción

La Definición de área protegida en Colombia se encuentra incorporada en la Ley 165 de 1994, artículo 2°, “área definida geográficamente que haya sido designada, regulada y administrada con el fin de alcanzar objetivos específicos de conservación”.

En Colombia existen 123 áreas protegidas de orden nacional, que cuentan con un total de 45.932.143.79 hectáreas, y 321 áreas de orden regional, que suman 4.119.622.49 hectáreas, de acuerdo con los datos del Registro Único Nacional de áreas protegidas (RUNAP) de enero de 2025. En conjunto, estas superficies representan el 24% del territorio nacional bajo una categoría de protección [1].

La normativa colombiana establece los siguientes tipos de áreas protegidas, entre las que se encuentran, parques nacionales naturales, reservas forestales protectoras, parques naturales regionales, distritos de manejo integrado, distritos de conservación de suelos, y áreas de recreación. Asimismo, existen áreas protegidas de carácter privado, como las reservas naturales de la sociedad civil.

Las áreas protegidas destinadas a la conservación de especies, recursos naturales y características ambientales únicas desempeñan un papel crucial en la preservación de la biodiversidad y la gestión sostenible de los recursos naturales. En Colombia, el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP) coordina esfuerzos para salvaguardar la inmensa riqueza biológica del país. No obstante, su relevancia no se limita solo a la conservación de la flora y fauna nativa, sino que se también abarca la provisión de servicios ecosistémicos esenciales para el bienestar humano [2], [3], [4].

Para el caso específico de estudio, un Distrito Regional de Manejo Integrado es una categoría de área protegida que busca la conservación de ecosistemas estratégicos, permitiendo el uso sostenible de los recursos naturales y el desarrollo de actividades compatibles con la protección del área. Es un espacio geográfico donde se combinan acciones de protección y conservación con posibilidades de uso y aprovechamiento sostenible, adaptado a las necesidades de las comunidades locales [8].

Los servicios ecosistémicos, entendidos como los beneficios tangibles e intangibles que las personas obtienen de manera directa o indirecta de los ecosistemas [5], son fundamentales para la subsistencia y el desarrollo humano; estos se dividen en tres categorías principales: servicios de aprovisionamiento (fibras, maderas, alimentos), servicios de regulación y soporte (regulación climática, calidad del aire, control de la erosión) y servicios culturales (recreación, apreciación estética).

Las áreas protegidas, al conservar ecosistemas y especies, aseguran la continuidad de los servicios, contribuyendo así al desarrollo sostenible y al equilibrio entre la conservación de la naturaleza y el uso sostenible de los recursos [6] [15].

La importancia de las áreas protegidas, como Los Farallones, se evidencia aún más desde el enfoque contemporáneo de compensación, por la "merma de biodiversidad" [7]. Según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [6], estas compensaciones buscan contrarrestar impactos irreversibles mediante acciones destinadas a conservar áreas ecológicamente equivalentes. En este contexto, se presenta el estudio técnico de soporte para la declaratoria del "Distrito Regional de Manejo Integrado Los Farallones" en los municipios de Gachalá, Ubalá y Medina del departamento de Cundinamarca – Colombia, donde se exploran las complejidades de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos de la región mediante revisiones bibliográficas y un análisis detallado.

La justificación del estudio se fundamenta en la verificación de que el área propuesta incluye niveles

de biodiversidad insuficientemente representados en el sistema de áreas protegidas, según las metas de conservación definidas en el Decreto 1076 de 2015 [8]. La revisión exhaustiva del sistema nacional y regional de áreas protegidas, la identificación de los ecosistemas presentes en el área propuesta y la conexión con otras áreas protegidas y corredores ecológicos [9], respaldan la necesidad de declarar el Distrito Regional de Manejo Integrado Los Farallones como un área prioritaria de conservación.

El territorio del área objeto de la declaratoria está constituido por bosques andinos, destacables por su biodiversidad y la oferta de servicios ecosistémicos, especialmente relacionados con la regulación del recurso hídrico, ubicándose en la cordillera Oriental, al nororiente de la ciudad de Bogotá, en jurisdicción de tres municipios del departamento de Cundinamarca. Su área incluye un ramal de la cordillera Oriental que conforma los denominados Farallones de Gachalá y Medina. Biogeográficamente, forma parte de los distritos "Páramos Cordillera Oriental" y "Selvas Nubladas Orientales Cordillera Oriental" de la provincia Norandina [10].

Aunque los distritos biogeográficos están relativamente bien representados dentro del SINAP, el área desempeña un rol esencial en términos de conectividad ecológica y la consolidación de un corredor en áreas protegidas de mayor extensión que conecta los ecosistemas del piedemonte llanero con los ecosistemas altoandinos y de páramo. Limita al norte con el Distrito Regional de Manejo Integrado (DRMI) Cuchillas Negra y Guanaque y al occidente con el Parque Nacional Natural (PNN) Chingaza. También limita directamente con las Reservas Forestales Protectoras Regionales (RFPR) El Tolima, Manantial de Jagua y Los Laureles, Maracaibo y Las Delicias, declaradas y administradas por la Corporación Autónoma Regional del Guavio (Corpoguavio), generando un corredor biológico que favorece a especies de fauna con un amplio rango de distribución.

El Distrito Regional de Manejo Integrado DRMI Cuchilla Negra y Guanaque, ubicado en el sur

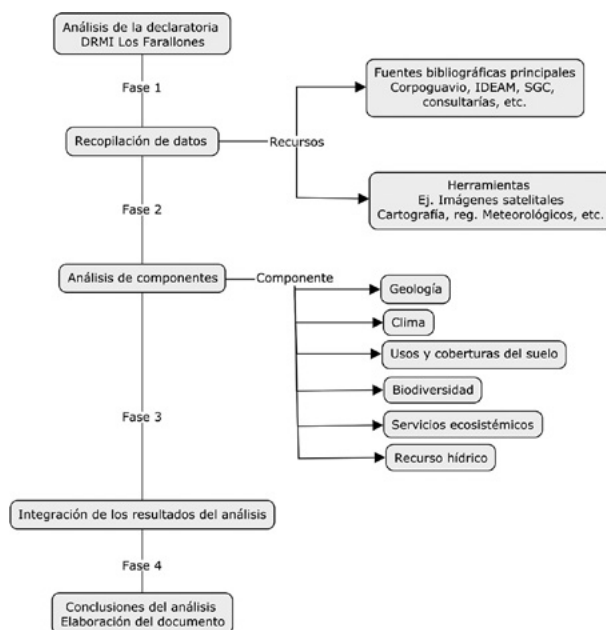
de Boyacá y bajo la jurisdicción de Corpochivor, cuenta con 19.304.63 hectáreas y alberga un importante ecosistema de bosque andino y subandino, caracterizado por su amplia biodiversidad y por ser fuente de recurso hídrico para la región y la mega cuenca del Orinoco, entre otros valores medioambientales [11].

Adicionalmente, el área de Los Farallones y el DRMI Cuchillas Negra y Guanaque, comparten especies en algún grado de amenaza, como el oso andino (*Tremarctos ornatus*), el jaguar (*Panthera onca*), el águila crestada (*Spizaetus isidori*) y el periquito aliamarillo (*Pyrrhura calliptera*), entre los más destacados. Por esta razón, la declaratoria del área de Los Farallones como área protegida se convierte en una herramienta fundamental para preservar el hábitat de estas especies y mejorar así su estado de conservación. En este contexto, este estudio busca analizar los resultados relacionados con los análisis en materia de biodiversidad, servicios ecosistémicos y la importancia de la conservación de la zona denominada Los Farallones, proporcionando un soporte desde lo académico sobre la relevancia de conservar estos ecosistemas para la gestión sostenible de los recursos naturales y el mantenimiento de servicios ecosistémicos vitales para las comunidades locales y el bienestar general y como función esencial de la biodiversidad [22].

II. Materiales y Métodos

En la Figura 1 se presenta el diagrama metodológico que resume los pasos seguidos durante la investigación, desde la caracterización biofísica hasta el análisis de servicios ecosistémicos y presiones, lo que permite una visión integral del enfoque adoptado.

Figura 1. Diagrama metodológico



Nota: fuente elaboración propia (2025).

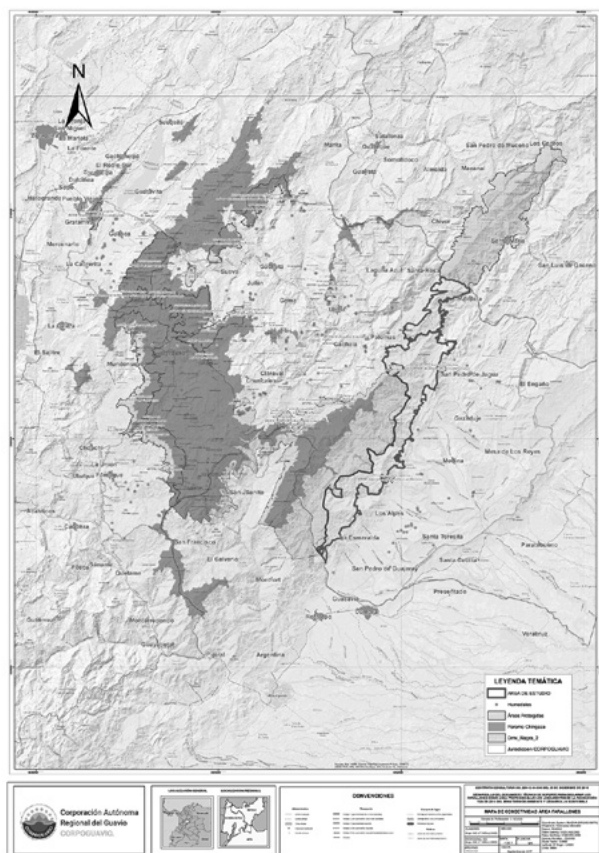
Materiales

Zona de estudio

En la Figura 2 se evidencia el área de estudio, conocida como Los Farallones, la cual se encuentra en su totalidad dentro de la Jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Guavio - Corpoguavio - y abarca los municipios de Gachalá, Ubalá y Medina, con una extensión total de 23.301.44 hectáreas; limita al norte con el municipio de Santa María en el departamento de Boyacá, al sur con el municipio de Restrepo en el departamento del Meta; al oriente, limita con áreas de los municipios de Ubalá y Medina; y al occidente, se encuentra con partes de los municipios de Gachalá y Medina. En términos de áreas, la zona de estudio limita al occidente con el Parque Nacional Natural (PNN) Chingaza y al norte con el Distrito Regional de Manejo Integrado (DRMI) Cuchillas Negra y Guanaque. Esta figura permite visualizar no solo la ubicación geográfica del polígono propuesto, sino también su relación con otras áreas protegidas del

orden nacional y regional. En ella se destaca la función estratégica del área en la consolidación de un corredor ecológico que favorece la conectividad funcional entre ecosistemas altoandinos, de páramo y de piedemonte, así como el tránsito de especies silvestres entre bloques de conservación contiguos. Esta conectividad territorial es uno de los argumentos clave para sustentar la declaratoria del área como Distrito Regional de Manejo Integrado.

Figura 2. Área de estudio Los Farallones límites y conectividad



Nota: fuente Corpoguavio (2024) [10].

Este territorio oscila en altitudes de 550 y 2.950 metros sobre el nivel del mar, abarca 22 veredas y comprende 381 predios, según datos consultados en la Agencia Catastral de Cundinamarca. Cabe destacar que la delimitación de este polígono se fundamenta en las observaciones y aportes de la

comunidad, recopilados durante talleres participativos llevados a cabo en cada una de las veredas que conforman el área de influencia. Es importante destacar que el 53,5% de la superficie corresponde a predios de propiedad pública, mientras que el 46,5% restante se compone de predios de propiedad privada.

Esta información permite entender la dinámica histórica de la tenencia y/o ocupación de la tierra en el área del DRMI propuesto; por lo tanto, conocerla es necesario para su gestión y manejo adecuado.

Caracterización geológica

El análisis geológico que se llevó a cabo para comprender la composición y estructura del subsuelo en el Distrito Regional de Manejo Integrado (DRMI) de Los Farallones, incluyó la revisión detallada de informes geológicos, estudios de cartografía geológica y análisis de perforaciones en la zona. La información geológica se obtuvo de la revisión del EOT'S de los municipios, del sistema de información geológica del Servicio Geológico Colombiano. Se dio prioridad a los estudios actualizados para garantizar la precisión y relevancia de la información recopilada. Este análisis sentó las bases para comprender la estabilidad del suelo, la presencia de recursos minerales y otros aspectos geológicos cruciales para la gestión ambiental [12].

Caracterización climática

En la metodología para el análisis climático del Distrito Regional de Manejo Integrado Los Farallones se tuvieron en cuenta aspectos como el clima regional, la recopilación de datos meteorológicos de las estaciones meteorológicas locales y registros históricos del Ideam. Se emplearon técnicas estadísticas para analizar patrones climáticos a lo largo de un período representativo. Además, se revisaron informes climáticos de empresas como ENEL, que tienen influencia en el área de estudio. Este enfoque permitió obtener una comprensión integral de las condiciones climáticas en la región, incluyendo las tendencias a largo plazo y las variaciones estacionales.

Uso y cobertura del suelo

En la metodología para analizar el uso y la cobertura del suelo en Los Farallones se llevó a cabo la revisión de imágenes satelitales, mapas de uso del suelo y reportes de monitoreo ambiental. La obtención se realizó a partir de documentos técnicos de Corpoguavio y se dio prioridad a los datos espaciales de alta resolución para permitir una clasificación detallada del uso del suelo. Este análisis proporcionó una visión completa de la distribución de diferentes tipos de cobertura del suelo, facilitando la comprensión de los patrones de cambio y la evaluación de posibles impactos ambientales [13].

Caracterización de la biodiversidad

Para la caracterización de la biodiversidad se empleó una metodología descriptiva basada en análisis de información secundaria y trabajo de campo; para la cobertura vegetal se empleó la medición mediante parcelas de acuerdo con el Manual de Métodos para el desarrollo de inventarios de la Biodiversidad del Instituto Humboldt [14]. Para fauna, se emplearon registros de observación directa, cámaras trampa, recorridos por transectos y entrevistas con actores locales, además de la consulta a especialistas y verificación en el SiB Colombia [17].

La obtención de información se realizó mediante la revisión de documentos síntesis de consultorías en la zona de estudio, análisis de viabilidad realizados por Corpoguavio y reportes de consultorías entre Corpoguavio, Enel, Unión temporal Farallones y Econpro V&J S.A.S. Dicha caracterización se enfocó en identificar especies endémicas, en peligro y hábitats naturales, centrándose en la diversidad de ecosistemas presentes y la identificación de especies clave y endémicas de la zona. Por último, se consultaron las guías disponibles para Colombia para la identificación de las especies y su categoría de amenaza [14].

Análisis de servicios ecosistémicos

El análisis de servicios ecosistémicos en Los Farallones se basó en la identificación de los beneficios proporcionados por los ecosistemas presentes en área de estudio de acuerdo con el marco con-

ceptual de la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio [23] y en la clasificación propuesta por Haines-Young [18].

La información fue recopilada de documentos síntesis de consultorías en la zona y de estudios de viabilidad de Corpoguavio. Se identificaron los servicios mediante revisión de literatura técnica y entrevistas semiestructuradas con actores locales, lo cual permitió clasificar los servicios ecosistémicos en tres grandes categorías: aprovisionamiento, regulación y soporte, y culturales. Esta metodología cualitativa, apoyada en cartografía y estudios técnicos, permitió establecer relaciones entre los ecosistemas y las actividades humanas en el territorio. Se destacaron servicios como la regulación hídrica, la captura de carbono y la conservación de la fauna y flora.

Diagnóstico del recurso hídrico

El diagnóstico del recurso hídrico para el área de Los Farallones se fundamentó en la identificación de las subzonas y las unidades hidrográficas presentes en el área estudio, teniendo en cuenta la zonificación y clasificación presente en los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (Pomca) que se encuentran vigentes.

III. Resultados

Caracterización geológica

El análisis geológico estructural reveló zonas de amenaza y riesgo en Los Farallones, identificando vulnerabilidades basadas en el desarrollo tectónico-estructural, morfológico y geodinámico. Las pendientes varían entre 20° y 75°, clasificándose desde moderadas hasta muy altas, demostrando la diversidad morfológica del área.

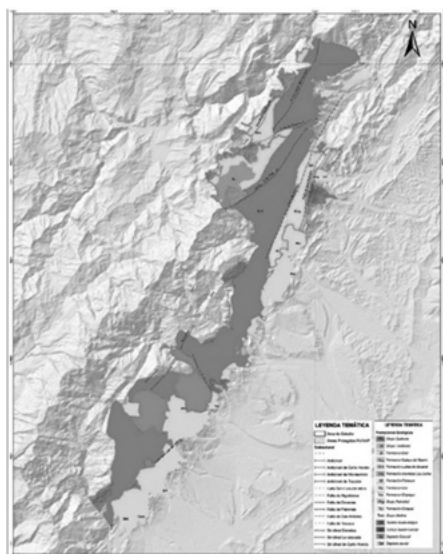
La formación geológica incluye los esquistos de Quetame, afectados por un débil metamorfismo regional, abarcando la mayor parte del macizo de Quetame. Estos esquistos representan la transformación de las rocas Cambro Ordovícicas durante el ciclo orogénico caledoniano.

La zona se compone de rocas que datan del Paleozoico al Cuaternario, abarcando grupos como Quetame y Farallones, la Formación Bata, Calizas del Guavio, Formación Lutitas de Macanal y otras. Entre las estructuras presentes se encuentran estructuras plegadas, fallas de rumbo y estructuras de colapso anidadas, como el anticlinal de Montecristo y la falla de rumbo de Palomas, forman parte del complejo geológico.

El área ha sido afectada por eventos orogénicos que generan variadas características geológicas, destacando una amplia diversidad de estratos, desde filitas hasta calizas, conglomerados y lutitas.

Dentro de los eventos geológicos regionales, en el área investigada se puede identificar la conformación de estructuras plegadas como el anticlinal de Montecristo ubicado al norte, estructuras de corte con desplazamiento lateral representado por la falla de rumbo de Palomas (Frijolito) de tipo sinistral; y estructuras de colapso anidadas como el complejo de fallas Inversas de Toquiza orientadas al NE, generando cabalgamientos con vergencia al NW (Figura 3).

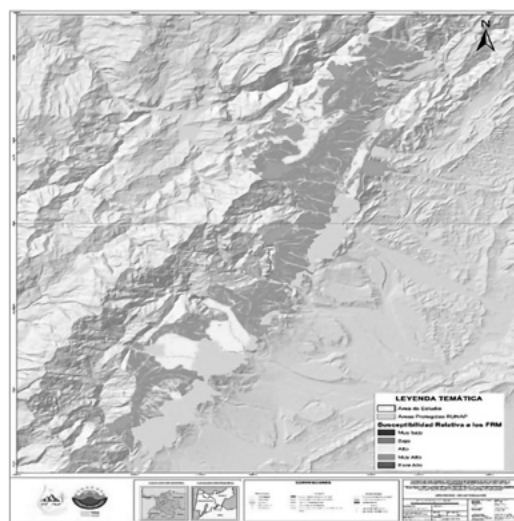
Figura 3. Geología del área de estudio Los Farallones



Nota: fuente Corpoguavio (2024) [10].

Teniendo en cuenta la información geológica y los parámetros de elaboración del mapa de susceptibilidad a escala 1:100.000, los estudios determinaron que la zonificación de susceptibilidad relativa a la generación de fenómenos de remoción en masa se presenta en el 99% del área y se encuentra entre muy alto y alto, razón que justifica la reclasificación del uso del suelo como área de reserva, conservación, protección y restauración (Figura 4).

Figura 4. Susceptibilidad relativa por fenómeno de remoción en masa



Nota: fuente Corpoguavio (2024) [10].

Caracterización climática

A partir de los datos proporcionados por las estaciones meteorológicas de Corpoguavio y de registros históricos del Ideam, se llevó a cabo un análisis climático de la zona de Los Farallones. Este análisis se apoyó en la información recopilada por la Unión Temporal Farallones y en productos cartográficos generados por la consultora Econpro V&J S.A.S. en el marco del estudio técnico de viabilidad para la declaratoria del área.

Si bien los mapas de precipitación, temperatura, isotermas e isoyetas no fueron elaborados directamente por los autores de este artículo, sí constituyeron insumos fundamentales para la interpretación de las

condiciones climáticas y para comprender la diversidad de microclimas presentes en el área de estudio. Se identificó una amplia variabilidad en la precipitación media anual, que oscila entre los 1.950 mm y los 6.082 m.m. Los mayores índices de precipitación se registran en el municipio de Medina, mientras que Gachalá muestra valores más bajos. Estas diferencias en la precipitación contribuyen a la heterogeneidad ambiental de la región.

La superficie continua de interpolación de la temperatura media anual reveló fluctuaciones térmicas en el área, con rangos entre los 6°C y los 26°C. Predominan temperaturas que oscilan entre los 16°C y 26°C, en el área de Los Farallones. Estas variaciones térmicas son factores clave que influyen en la biodiversidad y en la adaptación de las especies locales a distintas condiciones climáticas.

Adicionalmente, se generó un mapa de zonificación climática, el cual se presenta en la Tabla 1, basado en los registros climáticos de las estaciones meteorológicas. Se identificaron seis clasificaciones diferentes relacionadas con los pisos térmicos, formando distintas zonas de vida.

Tabla 1. Zonificación climática del área de estudio Los Farallones

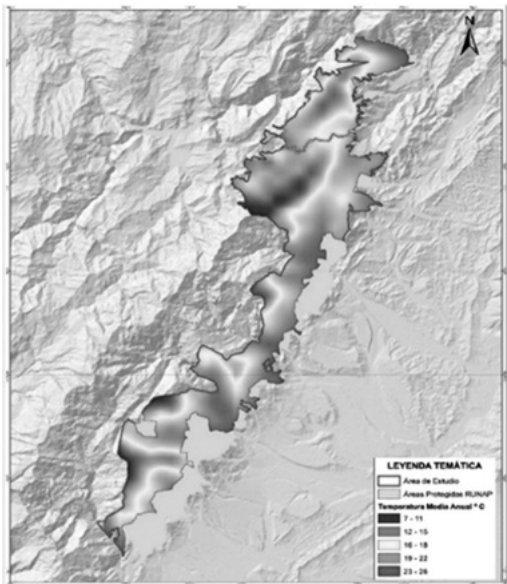
Clima	Zona de vida	Temp. °C	Precipitación mm
Medio pluvial	Bosque pluvial premontano	18-24	4000-8000
Medio muy húmedo	Bosque muy húmedo premontano	18-24	2000-4000
Frío pluvial	Bosque pluvial montano bajo	12-18	4000-8000
Frío muy húmedo	Bosque muy húmedo montano bajo	12-18	2000-4000
Cálido muy húmedo	Bosque muy húmedo tropical	>24	4000-8000
Cálido húmedo	Bosque húmedo tropical	>24	2000-4000

Nota: fuente elaboración propia.

Esta clasificación climática permite comprender con mayor detalle la diversidad de pisos térmicos y zonas de vida presentes en el área de estudio, lo cual es fundamental para la caracterización ecológica del territorio. Con base en esta zonificación y en los datos recolectados por 5 estaciones meteorológicas, se analizaron dos variables clave para la evaluación climática: la distribución de la temperatura media anual y la precipitación media anual. Estas variables fueron representadas gráficamente a través de mapas de isotermas e isoyetas que se presentan en las Figuras 5 y 6, respectivamente.

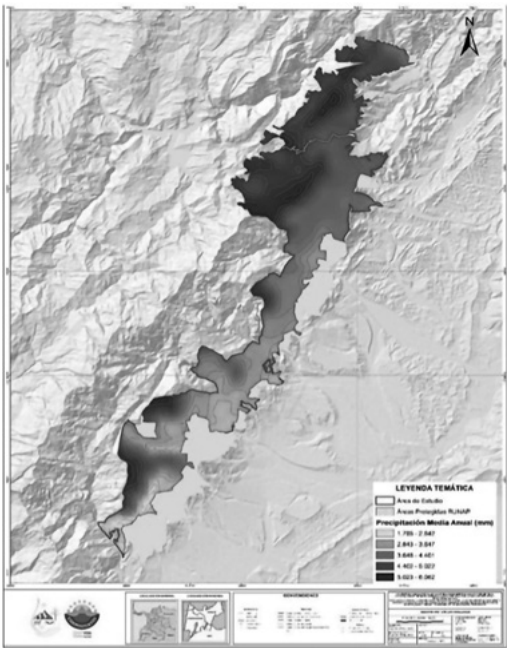
Cabe aclarar que dichos mapas no fueron elaborados por los autores, sino que corresponden a productos generados por la consultora Econpro V&J S.A.S. en el marco del estudio técnico de soporte para la declaratoria del DRMI Farallones, contratado por Corpoguavio en 2022. No obstante, su inclusión en el presente artículo responde al interés académico de ilustrar las condiciones climáticas del territorio, las cuales fueron interpretadas por los autores como parte del análisis integral del área propuesta para la conservación. Estas representaciones gráficas permiten visualizar con precisión los patrones espaciales de temperatura y precipitación, elementos determinantes en la distribución de la biodiversidad, la zonificación de servicios ecosistémicos y la identificación de amenazas como el estrés hídrico.

Figura 5. Isotermas del área de estudio



Nota: fuente Corpoguavio (2024) [10].

Figura 6. Isoyetas del área de estudio



Nota: fuente Corpoguavio (2024) [10].

Diagnóstico del recurso hídrico

Dada la extensión del área objeto de declaratoria, se encuentra dentro de las áreas de drenaje o unidades hidrográficas de: Río Batatas, Trompetas y Zaguea, que hacen parte de la subzona hidrográfica a)del Río Guavio. El Río Gazaunta, Alto Gazamuno, Humea Grande, Gazatavena, Humeita y Medio Humea, que hacen parte de la subzona hidrográfica b)del Río Humea y por último la subzona hidrográfica c)del Río Guacavía.

El potencial hídrico está dado por la localización en la cuenca alta de los ríos, sumado a la cobertura vegetal, la cual ayuda a retener el agua que por escurrimiento drena hacia los ríos Guavio, Humea y Guacavía. En la Tabla 2, se evidencia la red hídrica del área de estudio.

Tabla 2. Red hídrica del área de estudio Los Farallones

Área Hidrográ-fica	Zona Hidro-gráfica	Subzona Hidro-gráfica	Nivel I Unidad hidrográ-fica	Área (ha)	% Área
Río Orinoco	Río Meta	Río Humea	Río Batatas	5.285	28,39%
			Río Guavio		
			Río Trompetas	18.306	43,46%
			Río Zaguea	13.287	2,43%
			Río Gazaunta	43.950	13,06%
			Alto Gazamuno	17.712	16,59%
			Río Humea Grande	8.130	32,24%
			Río Gazatavena	7.709	7,59%
			Río Humeíta	7.410	55,08%
			Río Medio Humea	8.910	2,82%
			Río Guacavía	24.900	19,79%

Nota: fuente: elaboración propia (2025).

Uso y cobertura del suelo

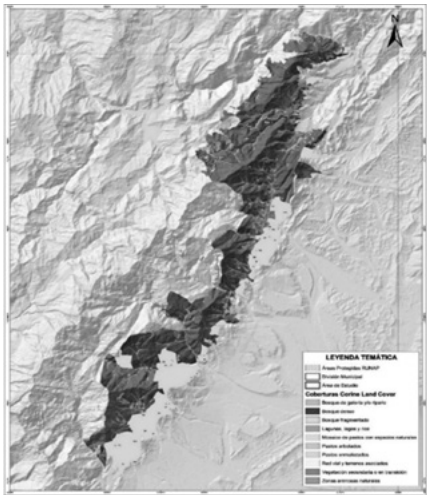
La clasificación de uso del suelo se basa en el inventario realizado a una escala de trabajo de 1:100.000, combinando información de campo y la depuración del inventario adelantado en el Plan de Ordenación Forestal - POF para los municipios que integran la jurisdicción de Corpoguavio.

Según la categorización de las principales coberturas presentes en el Estudio de Viabilidad para la Declaratoria del DMI Farallones, se identifican las siguientes proporciones en relación con el total de especies identificadas en campo y en la información depurada del inventario del POF: se agruparon de acuerdo a las principales coberturas vegetales presentes según Corine Land Cover [13]: Bosque Denso Alto (84,39%), Bosque Fragmentado (3,91%), Bosque ripario (6,82%) y Vegetación Secundaria (1,1%). (Figura 7).

En relación con el área que ocupa cada cobertura, las parcelas del inventario forestal del POF se distribuyen así: Bosque denso alto (20 parcelas), Bosque fragmentado (5 parcelas) y Bosque de galería y/o ripario (1 parcela).

Caracterización de la Biodiversidad

Figura 7. Coberturas vegetales según Corine Land Cover



Nota: fuente Corpoguavio (2024) [10].

Flora

En el área de Los Farallones se registra la presencia de 499 géneros vegetales, agrupados en 88 familias.

Especies de flora amenazadas

El área de Farallones es fundamental para la protección de especies amenazadas con amplios rangos de distribución, en esta área de estudio se encuentran cuatro especies (Tabla 3) de flora en categoría vulnerable (VU), siendo estas, el Cedro (*Cedrela odorata*) una especie nativa para el norte de Suramérica y pionera en la vegetación secundaria de diversos bosques, amenazada principalmente por el uso indiscriminado que se le da en la industria forestal debido a sus condiciones maderables; la palma de cera (*Ceroxylon quindiuense*), símbolo nacional de Colombia y clave en los ecosistemas montañosos como hábitat de especies de fauna, identificadas de acuerdo con el Manual de métodos para el desarrollo de inventarios de biodiversidad [14], la Guía de aves de Colombia [24] y bases de datos del SiB Colombia, además de validación taxonómica de consultores expertos y comprobación en los listados oficiales de especies amenazadas de la UICN y el Ministerio de Ambiente.

Tabla 3. Especies con grado de amenaza identificadas en el área de estudio

Especie	Nombre común	UICN	Res 0126/2024	Hábito
<i>Cecropia peltata</i>	Guarumo	VU	–	Árbol
<i>Cedrela odorata</i>	Cedro	VU	EN	Árbol
<i>Ceroxylon quindiuense</i>	Palma de cera	VU	EN	Árbol
<i>Quercus Humboldtii</i>	Roble	VU	VU	Árbol

Nota: fuente Corpoguavio (2024) [10].

Fauna

A continuación, se presentan los resultados por cada uno de los grupos de fauna que se encontraron en la caracterización del DRMI Farallones.

Anfibios: se identificaron 40 especies de anfibios distribuidos en 24 géneros y 11 familias. Familias más representativas: Hylidae (12 especies) y Craugastoridae (8 especies). Especies amenazadas: 8 en total, con una en Peligro Crítico (CR), cinco en estado Vulnerable (VU) y dos Casi Amenazadas (CA). Especies endémicas: 14, destacando la familia Craugastoridae con 8 especies. *Caecilia degenerata* es una especie de cíclidos *Caecilia* distribuida en la Cordillera Oriental.

Reptiles: se identificaron 41 especies de reptiles en dos órdenes: Squamata y Crocodylia. Especies amenazadas: *Anadia bogotensis* en estado Vulnerable (VU). Especies en Cites Apéndice II: 6 especies como Iguana y Boa constrictor. Especies endémicas: 5, con la familia Gymnophthalmidae más representativa (2 especies). Especies casi endémicas: 4 todas del orden Squamata.

Aves: se identificaron 145 especies de aves distribuidas en 13 órdenes y 28 familias, 136 observadas en campo, órdenes más representativos: Apodiformes (37%) y Passeriformes (18%), Especies amenazadas: 16, con el Águila crestada (*Spizaetus isidori*) en Peligro (EN) y 9 especies Vulnerables (VU), Especies endémicas: 5, como el Chamicero cundiboyancense (*Synallaxis subpudica*) [19].

Mamíferos: se identificaron 54 especies de mamíferos, distribuidas en 12 órdenes y 27 familias. Órdenes más representativos: Carnívora y Rodentia (15 especies cada uno), Especies amenazadas: 12 según la IUCN, con el puma (*Puma concolor*) – Preocupación menor (LC), mono churuco (*Lagothrix lagotherichia*) - Vulnerable (VU), oso andino (*Tremarctos ornatus*) -Vulnerable (VU), Especies endémicas: 3, como el ratón montañero blanco (*Thomasomys niveipes*).

Las especies encontradas en la zona destacan la necesidad urgente de implementar estrategias de conservación orientadas a preservar las coberturas naturales esenciales para la supervivencia, en especial de estos grandes mamíferos, que son considerados especies sombrilla. La gestión y conservación de estas especies clave genera un impacto indirecto en la protección de muchas otras

especies dentro del ecosistema. Al proteger estas especies, se favorece también la conservación de otras que comparten su hábitat, recursos y condiciones ambientales.

Las especies sombrilla desempeñan un papel fundamental en la conservación de la biodiversidad, ya que influyen de manera significativa en la estructura y composición de los ecosistemas. Su protección no solo las beneficia, sino que también garantiza la preservación de numerosas especies, muchas de ellas menos visibles o conocidas, que dependen de su existencia para sobrevivir.

Estos hallazgos ofrecen una visión detallada de la diversidad faunística en Los Farallones, proporcionando información valiosa para futuras iniciativas de conservación y manejo del ecosistema.

Análisis de servicios ecosistémicos

En el análisis de servicios ecosistémicos del área de Los Farallones, se identificaron diversas categorías y beneficios en las dimensiones de aprovisionamiento, regulación y soporte, y culturales.

En cuanto a los servicios de aprovisionamiento, se destaca el suministro de agua, tanto para consumo humano, actividades agropecuarias y aporte al Embalse del Guavio para la generación de energía hidroeléctrica. La variada flora presente proporciona alimento para la fauna, desempeñando un papel crucial en la dispersión de semillas y favoreciendo la regeneración de los bosques [18].

La regulación y el soporte de condiciones hídricas, climáticas y geológicas son esenciales; las coberturas forestales desempeñan un papel crucial en el control de la erosión del suelo, evitando impactos directos de las precipitaciones y contribuyendo a la estabilidad del suelo en zonas de pendiente pronunciada.

Destacando el actual contexto climático, los bosques de Los Farallones juegan un papel vital en la regulación del clima al capturar dióxido de carbono (CO₂). Con más del 80% de cobertura vegetal como bosque, la capacidad de secuestro de carbono es significativa.

Además, la ubicación geográfica favorece la condensación del vapor de agua, generando precipitaciones.

Adicionalmente, el área ofrece servicios culturales, abarcando actividades recreativas como senderismo, contemplación del paisaje y ecoturismo. La biodiversidad única ha generado interés científico, con investigaciones centradas en especies amenazadas como el puma (*Puma concolor*), mono churuco (*Lagothrix lagotherichia*), oso andino (*Tremarctos ornatus*) y águila crestada (*Spizaetus isidori*). Estas investigaciones son cruciales para comprender y conservar el equilibrio ecológico de los ecosistemas.

Los estudios técnicos de soporte realizados por la Unión Temporal Farallones y consultoras contratadas por Corpoguvio permitieron identificar, mediante encuestas y recorridos de campo desarrollados en el área de influencia, una serie de actividades productivas que dependen directamente de los servicios ecosistémicos presentes en el territorio. Dentro de estas se destacan la ganadería extensiva, la agricultura tradicional, la caza de subsistencia, la silvicultura y, en menor medida, la acuicultura.

Particularmente, la ganadería extensiva requiere un suministro constante de agua, suelos fértiles y disponibilidad de pasturas, todos ellos regulados por la cobertura boscosa y las condiciones climáticas del área. Por su parte, la agricultura tradicional —caracterizada por el uso limitado de maquinaria, insumos y técnicas modernas— se basa principalmente en prácticas heredadas y en el aprovechamiento de suelos húmedos de ladera, lo que la hace especialmente vulnerable a la variabilidad climática y a la pérdida de servicios ecosistémicos.

Estos hallazgos refuerzan la interdependencia entre el bienestar de las comunidades locales y la integridad del ecosistema, subrayando la necesidad de adoptar enfoques de manejo sostenible que mantengan la funcionalidad ecológica del territorio y garanticen los medios de vida de la población rural.

Es indiscutible que la conservación del área de Farallones beneficia a los habitantes locales, garantizando

su sostenimiento económico y bienestar, subrayando la interdependencia entre las comunidades humanas y los servicios que brinda Los Farallones.

Presiones

En el proceso de evaluación biofísica y económica del área se identificaron una serie de aspectos que generan una presión directa al estado de conservación de la zona y por consiguiente, a los bienes y servicios ecosistémicos que esta ofrece, estos son:

- **Actividades económicas:** la ganadería extensiva y la agricultura tradicional realizadas en las zonas periféricas del área, debido a la baja productividad, baja tecnificación y limitaciones físicas por cuenta de las pendientes elevadas, alta precipitación y temperaturas variables, generan un elemento de presión a la expansión de la frontera agropecuaria buscando nuevas tierras aptas para el cultivo y el pastoreo, como medida para compensar la baja productividad, la degradación de los suelos y las limitaciones encontradas en la zona.
- **Deforestación:** ligada a la expansión de la frontera agropecuaria y debido a la presencia de especies maderables de valor económico significativo en el mercado, como el árbol de amarillo (*Ocotea* sp.), lo cual puede fomentar la extracción selectiva de maderas de forma ilegal y dar paso a la creación de potreros y establecimiento de cultivos en algunos casos.
- **Estrés hídrico:** los procesos de deforestación alteran la capacidad de regulación del ciclo hidrológico del ecosistema, perturbando la oferta del recurso hídrico en la zona y sus proximidades, ocasionando estrés hídrico en las comunidades aledañas.
- **Interacciones negativas con la fauna:** los procesos de pérdida de coberturas boscosas, sea por eventos de remoción en masa o por eventos antrópicos, reducen el hábitat de especies de fauna y a su vez aumentan el riesgo de que éstas entren en contacto con los habitantes cercanos al área de bosque por cuenta de con-

ductas como el consumo de cultivos, carroñeo de animales muertos o ataque a ganado.

IV. Discusión

El análisis integral del área conocida como Los Farallones permitió evidenciar su papel estratégico dentro del sistema ecológico regional del oriente de Cundinamarca. Con una extensión de más de 23.000 hectáreas de cobertura predominantemente boscosa, esta zona representa un enclave esencial para la conservación de la biodiversidad, la provisión de servicios ecosistémicos y la conectividad entre ecosistemas altoandinos de páramo y de piedemonte llanero.

Uno de los hallazgos más relevantes del estudio es la alta riqueza biológica registrada, que incluye especies emblemáticas y amenazadas como el oso andino (*Tremarctos ornatus*), el águila crestada (*Spizaetus isidori*), el mono churuco (*Lagothrix lagothricha*), y la palma de cera (*Ceroxylon quin-diense*). Estas especies cumplen funciones ecológicas clave, como la dispersión de semillas, el control de poblaciones y la regeneración de hábitats, y su presencia reafirma el carácter de Los Farallones como un reservorio de vida silvestre de importancia nacional. La conservación de estas especies no solo es un imperativo ético, sino también una necesidad ecológica, dado su rol como indicadores de salud ecosistémica.

Desde el punto de vista físico y geológico, la zona presenta un alto grado de fragilidad ambiental. El 99% del territorio se encuentra en condición de susceptibilidad relativamente alta o muy alta a fenómenos de remoción en masa, debido a su compleja estructura geológica y a la fuerte pendiente del terreno. Esta condición no solo limita el uso intensivo del suelo, sino que convierte a la conservación ambiental en una estrategia de prevención de desastres y de protección de vidas humanas. En ese sentido, la declaratoria de un Distrito Regional de Manejo Integrado (DRMI) no solo es una medida de conservación ambiental, sino también una política de ordenamiento territorial con un enfoque de gestión del riesgo.

El análisis climático complementa esta visión al mostrar una fuerte heterogeneidad térmica e hídrica, con precipitaciones que oscilan entre 1.950 y 6.000 mm anuales y temperaturas que varían entre los 6°C y los 26°C. Esta diversidad de condiciones climáticas configura un mosaico de microclimas que sustentan múltiples zonas de vida, lo cual contribuye a la alta diversidad de especies y a la existencia de nichos ecológicos especializados. Esta zonificación térmica es esencial para el diseño de estrategias de conservación diferenciadas y adaptadas a cada subzona.

En cuanto a los servicios ecosistémicos, el área de Los Farallones cumple funciones fundamentales en la regulación hídrica, el secuestro de carbono, el control de la erosión, la oferta de alimentos silvestres, la recreación y el conocimiento científico. La cobertura forestal actúa como regulador climático y garante de la calidad del agua que alimenta subcuencas de importancia estratégica como el río Guavio. Además, la relación entre los ecosistemas y la actividad humana queda reflejada en los estudios previos, donde se identificaron prácticas productivas locales —como la ganadería extensiva y la agricultura tradicional— altamente dependientes del equilibrio ambiental [17] [21].

Sin embargo, estas mismas actividades constituyen una de las principales fuentes de presión sobre el ecosistema. La expansión de la frontera agropecuaria, la deforestación selectiva de especies maderables y el uso no planificado del suelo han generado procesos de fragmentación del hábitat, pérdida de cobertura y conflictos con la fauna silvestre. La tensión entre conservación y desarrollo impone el reto de encontrar un modelo de manejo que armonice las dinámicas sociales y económicas con la resiliencia ecológica del territorio.

En este contexto, el DRMI se presenta como una alternativa idónea, ya que permite mantener la presencia humana bajo esquemas de uso sostenible, delimitando zonas de conservación estricta, restauración ecológica, y producción regulada. La gobernanza ambiental participativa, fortalecida por los ejercicios de consulta comunitaria realizados durante los estudios técnicos, es un pilar para la implementación efectiva del DRMI. No obstante,

será fundamental avanzar en procesos de saneamiento predial, fortalecimiento institucional y educación ambiental para asegurar el cumplimiento de los objetivos de conservación [2] [15].

Por último, la declaratoria del DRMI Los Farallones se enmarca en una lógica de gestión ecosistémica y en el cumplimiento de los compromisos internacionales asumidos por Colombia en el marco del Convenio sobre Diversidad Biológica y la Agenda 2030. A nivel regional, este instrumento también puede ser un catalizador de iniciativas de desarrollo rural sostenible, turismo ecológico, investigación científica y empoderamiento comunitario.

En síntesis, los resultados del estudio, interpretados a la luz del contexto socioecológico, respaldan técnica, ecológica y éticamente la necesidad de proteger el área de Los Farallones mediante una figura jurídica que garantice la conservación de su biodiversidad, el bienestar de las comunidades locales y la sostenibilidad de los servicios ambientales que presta.

Los resultados del presente estudio coinciden con hallazgos reportados en otras áreas de la región andina de Colombia. Por ejemplo, investigaciones realizadas por Andrade [20] y Avendaño-Leadem *et al.* [22] destacan la importancia de declarar áreas protegidas en zonas de conectividad ecológica entre ecosistemas altoandinos y piedemonte, como estrategia para conservar especies sombrilla y mitigar efectos del cambio climático. Asimismo, estudios previos en el DRMI Cuchilla Negra y Guanaque [11] evidencian beneficios similares en la regulación hídrica y conservación de especies amenazadas como el oso andino. Estas comparaciones reafirman la pertinencia del enfoque ecosistémico adoptado en Los Farallones.

De acuerdo con los resultados, la Evaluación Nacional de Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos llevada a cabo por el Instituto Humboldt [25], resalta el papel estratégico de los ecosistemas andinos en la provisión de agua, la regulación climática y el soporte a la biodiversidad. Se destaca la importancia de las coberturas boscosas en zonas de alta montaña, fundamentales para mantener la

funcionalidad hidrológica del territorio, coincidencia que refuerza el valor ecológico del área de Los Farallones en su función de corredor ecológico y fuente de bienes y servicios naturales.

Por otra parte, estudios de valoración biofísica realizados en áreas protegidas como el Parque Nacional Natural Farallones de Cali [26], mediante el uso de herramientas como InVEST para modelar servicios ecosistémicos como la retención de sedimentos, han permitido cuantificar los beneficios económicos derivados de la conservación del bosque, especialmente en relación con la disminución de costos en el tratamiento de agua potable para las ciudades cercanas. Aunque la modelación económica excede el alcance del presente estudio, si identifican funciones ecosistémicas similares en términos de regulación hídrica y climática, lo que valida su enfoque metodológico adoptado y la necesidad urgente de la declaratoria para una gestión integral de los recursos naturales en contextos rurales.

Finalmente, investigaciones sobre humedales altoandinos en el Valle del Cauca, como las desarrolladas por Henao - Echavarría *et al.* [27], muestran que la construcción participativa de indicadores ecológicos y sociales permite fortalecer el análisis de los servicios ecosistémicos desde una perspectiva local. Este enfoque, alineado con lo propuesto por la Política Nacional para la Gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos [28], respalda la inclusión de comunidades rurales en los procesos de planificación y valoración ambiental. En ese sentido, la incorporación de talleres participativos y consultas locales en el estudio de Los Farallones contribuye a legitimar sus resultados y a consolidar un modelo replicable de conservación territorial con participación comunitaria.

V. Conclusiones

El área de Los Farallones constituye un ecosistema de alta prioridad para la conservación en el oriente de Cundinamarca, debido a su riqueza biológica, la diversidad de zonas de vida y su papel como corredor ecológico entre ecosistemas altoandinos, de páramo y de piedemonte. Su conectividad con otras áreas protegidas a nivel nacional y regional refuerza su importancia estratégica dentro del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (Sinap).

Los estudios geológicos y climáticos evidencian una alta fragilidad ambiental, particularmente por la elevada susceptibilidad a remoción en masa y la variabilidad térmica e hídrica del territorio. Estas condiciones demandan medidas de conservación urgentes que limiten el uso inadecuado del suelo y promuevan la restauración de zonas críticas.

La biodiversidad registrada abarca especies amenazadas, endémicas y con funciones ecológicas clave, como el oso andino, el águila crestada, la palma de cera y el mono churuco. La protección de sus hábitats naturales resulta fundamental para prevenir su pérdida local y mantener el equilibrio ecológico del área.

El análisis de servicios ecosistémicos confirma que Los Farallones desempeña funciones esenciales tanto para las comunidades locales como para la región, incluyendo la provisión de agua, la regulación climática, la captura de carbono y el soporte a actividades agropecuarias de bajo impacto. La integridad de estos servicios está directamente relacionada con la conservación de las coberturas vegetales y los procesos ecológicos asociados.

Las presiones antrópicas -como la expansión de la frontera agropecuaria, la deforestación selectiva y los conflictos con la fauna silvestre- representan riesgos crecientes que deben gestionarse mediante un modelo de gestión territorial participativo, sostenible y adaptado al contexto local.

La figura del DRMI se presenta como una herramienta viable y pertinente, pues permite compatibilizar los objetivos de conservación con la permanencia de prácticas productivas tradicionales, siempre que

estas sean reguladas y orientadas hacia la sostenibilidad. Además, facilita la participación activa de las comunidades en la gobernanza del territorio.

La declaratoria del DRMI Los Farallones se sustenta en evidencia técnica y científica, así como en procesos sociales participativos que legitiman su viabilidad y pertinencia. No obstante, su implementación efectiva dependerá del fortalecimiento institucional, el saneamiento predial, la educación ambiental y la articulación entre actores locales y regionales.

En última instancia, la protección de Los Farallones bajo una figura jurídica como el DRMI no solo responde a un compromiso con la conservación ambiental, sino que constituye una apuesta por el desarrollo territorial justo, resiliente y sostenible, en armonía con los objetivos nacionales de biodiversidad y los compromisos internacionales asumidos por Colombia.

VI. Referencias

- [1] RUNAP, "Total de hectáreas en áreas protegidas en Colombia." [En línea]. Disponible: <https://runap.parquesnacionales.gov.co/cifras>. Accedido: 05-may-2025.
- [2] Parques Nacionales Naturales de Colombia, Aspectos conceptuales de la planeación del manejo en Parques Nacionales Naturales, Bogotá: Panamericana Formas e Impresos S.A., 2005.
- [3] Sistema Nacional de Áreas Protegidas - SINAP, "Parques Nacionales Naturales de Colombia." [Internet]. Disponible: <https://old.parquesnacionales.gov.co/portal/es/sistema-nacional-de-areas-protegidas-sinap/>. [Accedido: 05-may-2025].
- [4] G. M. Mace, K. Norris, y A. H. Fitter, "Biodiversity and ecosystem services: a multilayered relationship," Trends Ecol Evol, vol. 27, no. 1, pp. 19–26, ene. 2012, Doi: 10.1016/J.TREE.2011.08.006.

- [5] B. Burkhard y J. Maes, "Mapping ecosystem services," 2017. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/315066978_Mapping_Ecosystem_Services. Accedido: 05-may-2025.
- [6] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, "Manual de compensaciones del componente biótico." [En línea]. Disponible: <https://www.minambiente.gov.co/documento-entidad/manual-de-compensaciones-del-componente-biotico/>. Accedido: 05-may-2025.
- [7] R. Walschburger, R. Ortiz Quijano y A. Hurtado Guerra, "Origen y distribución de la biota suramericana y colombiana," *Acta Zool. Mex.*, vol. especial, pp. 55–104, 1992.
- [8] "Decreto 1076 de 2015 Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible - Gestor Normativo - Función Pública." [En línea]. Disponible: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=78153>. Accedido: 05-may-2025.
- [9] M. Á. Ospina Moreno et al., *Guía para la Planificación del Manejo en las áreas protegidas del SINAP Colombia*, 2007.
- [10] Corpoguavio, *Documento Técnico Detallado Con La Información Que Fundamenta La Propuesta De Declaratoria Del Distrito Regional De Manejo Integrado Los Farallones*, 2022.
- [11] Corpochivor, "Corporación Autónoma Regional de Chivor." [En línea]. Disponible: <https://www.corpochivor.gov.co/>. Accedido: 05-may-2025.
- [12] J. Gómez Tapias et al., "Physiographic and Geological Setting of the Colombian Territory." Doi: 10.32685/pub.esp.35.2019.01.
- [13] N. Martínez, *Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra: metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia*. Escala 1:100.000, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2010.
- [14] H. Villareal, M. Alvarez, S. Cordoba, F. Escobar, G. Fagua, F. Gast, H. Mendoza, M. Ospina y A. Umaña, *Manual de métodos para el desarrollo de inventarios de Biodiversidad*, Bogotá D.C: Instituto Alexander Von Humboldt, Ramos López Editorial, 2006.
- [15] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, "Manual de Compensaciones del Componente Biótico." [En línea]. Disponible: <https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/bosques-biodiversidad-y-servicios-ecosismaticos/estrategia-nacional-de-compensaciones-ambientales/manual-de-compensaciones-del-componente-biotico>. Accedido: 05-may-2025.
- [16] C. López-Gallego, *Monitoreo de poblaciones de plantas para conservación*, 2015.
- [17] Instituto Humboldt, "SiB, la plataforma virtual sobre biodiversidad en Colombia." [En línea]. Disponible: <https://www.humboldt.org.co/noticias/sib-la-plataforma-virtual-sobre-biodiversidad-en-colombia>. [Accedido: 05-may-2025].
- [18] R. Haines-Young y M. Potschin, *Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1 Guidance on the Application of the Revised Structure*, 2018. [En línea]. Disponible: www.cices.eu. Accedido: 05-may-2025.
- [19] T. Donegan, W. McMullan, A. Quevedo y P. Salaman, "Revision of the status of bird species occurring or reported in Colombia 2013," *Revista Conservación Colombiana*, vol. 19, pp. 3–10, may. 2013.
- [20] G. Andrade, "Priorización de Áreas Protegidas Continentales en Colombia. Antecedentes y Bases de un Protocolo para Decisiones en el Marco del Convenio de Diversidad Biológica," *Documento de Trabajo Versión 3.0*, Bogotá, 2007.

- [21] A. Acosta-Galvis, "Ranas, Salamandras y Cae-cilias (Tetrapoda: Amphibia) de Colombia," Biota Colombiana, vol. 1, no. 3, pp. 289–319, 2000.
- [22] F. Avendaño-Leadem, B. Cedeño-Montoya y M. Arroyo-Zeledón, "Integrando el concepto de servicios ecosistémicos en el ordena-miento territorial," Revista Geográfica de América Central, vol. 65, pp. 63–90, 2020.
- [23] Millennium Ecosystem Assessment (MEA), Ecosystems and Human Well-being: Synthe-sis, Washington D.C.: Island Press, 2005.
- [24] M. McMullan, T. Donegan y A. Quevedo, Guía de campo de las aves de Colombia, Funda-ción ProAves, 2010.
- [25] Instituto Humboldt, Evaluación nacional de biodiversidad y servicios ecosistémicos de Colombia, Plataforma Intergubernamental Científico-Normativa sobre Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos – IPBES, 2021.
- [26] Parques Nacionales Naturales de Colombia e IDEAM, Informe de valoración biofísica y económica del servicio ecosistémico de regu-lación hídrica en el Parque Nacional Natural Farallones de Cali, 2018.
- [27] D. Henao-Echavarría, B. Villa-Ramírez y C. Caicedo-Beltrán, "Evaluación comparativa de los servicios ecosistémicos en dos hume-dales andinos del Valle del Cauca," Revista Ambiente y Desarrollo, vol. 22, no. 42, pp. 7–24, 2018.
- [28] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sosteni-ble, Política Nacional para la Gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosisté-micos, 2012. PNGIBSE.





Prototipo funcional de software de reconocimiento biométrico de huellas dactilares para aerolíneas

Functional Prototype of Biometric Fingerprint Recognition Software for Airlines

Víctor Daniel Gil Vera¹, Jean Carlos López-Tavera²

Tipo de Artículo: Investigación.

Recibido: 11/05/2025. **Aprobado:** 15/09/2025. **Publicado:** 12/12/2025

Resumen: La identificación de personas con huellas dactilares es uno de los métodos más seguros y confiables que existen en la actualidad. Aunque esta tecnología ha sido ampliamente utilizada en otros contextos como la banca, la telefonía móvil y el control de acceso, su adopción en procesos aeroportuarios colombianos aún es limitada. Este trabajo presenta el desarrollo de un prototipo de software biométrico para el reconocimiento y registro de pasajeros de aerolíneas, cuya novedad radica en la integración de algoritmos de procesamiento en C++, una interfaz gráfica desarrollada en C#/NET y una base de datos en SQL Server, optimi-

zados para escenarios de *check-in* y abordaje. El prototipo demostró un funcionamiento eficiente en la autenticación biométrica, logrando una identificación rápida y precisa que contribuye a reducir los tiempos de atención, eliminar la dependencia de documentos físicos y fortalecer la seguridad frente a riesgos de suplantación. Además, la arquitectura modular y el uso de metodologías ágiles (*Scrum*) permiten la escalabilidad del sistema hacia la incorporación de nuevas tecnologías biométricas y su despliegue en entornos en la nube, ofreciendo una solución adaptable a las necesidades operativas cambiantes del sector aeronáutico.

¹ Autor correspondiente: Víctor Daniel Gil Vera. Mayor título: Doctor en Ingeniería de Sistemas. Filiación Institucional: Universidad Católica Luis Amigó. País: Colombia, Ciudad: Medellín. Correo electrónico: victor.gilve@amigo.edu.co ORCID: 0000-0003-3895-4822

² Autor correspondiente: Jean Carlo López Tavera. Mayor título: Ingeniero de Sistemas. Filiación Institucional: Universidad Católica Luis Amigó. País: Colombia, Ciudad: Medellín. Correo electrónico: jean.lopeztav@amigo.edu.co

Palabras clave: Biometría; check-In; marco de trabajo; product Backlog; Scrum

Abstract: Fingerprint identification is one of the most secure and reliable methods currently available. Although this technology has been widely used in other contexts such as banking, mobile telephony and access control, its adoption in Colombian airport processes is still limited. This work presents the development of a biometric software prototype for airline passenger recognition and registration, whose novelty lies in the integration of processing algorithms in C++ with a graphical interface in C#/NET and a database in SQL Server, optimized for check-in and boarding scenarios. The prototype demonstrated efficient operation in biometric authentication, achieving fast and accurate identification that contributes to reducing service times, eliminating the need for physical documents, and improving security against impersonation risks. In addition, the modular architecture and the use of agile methodologies (Scrum) enable the scalability of the system to incorporate new biometric technologies and deploy it in cloud environments, providing an adaptable solution to the changing operational needs of the aeronautical sector.

Keywords: Biometric; check-in; framework; product Backlog; Scrum

I. Introducción

La suplantación de identidad es un delito que se comete con frecuencia en los aeropuertos del mundo. Pasaportes y visados falsos son diseñados y creados por personas inescrupulosas para sujetos que desean evadir la ley, quienes pagan altas sumas de dinero por este servicio ilegal, un delito que puede generar hasta tres años de prisión, dependiendo de la legislación del país en el cual se cometa [1]. La huella dactilar como método de verificación en los sistemas biométricos es uno de los más usados debido a su alto índice de seguridad, ya que cada persona tiene patrones únicos y no existen huellas digitales iguales [2]. Debido a las características de seguridad con las que cuenta la huella dactilar, esta se ha conver-

tido en una herramienta para la identificación de personal, usuarios o clientes en empresas, bancos, compañías de tecnología, entre otras. Gracias a esto, es posible brindar a los usuarios servicios ágiles, prácticos y seguros [2].

Este trabajo presenta el diseño de un prototipo de software biométrico para optimizar los procesos de check-in y abordaje, y reducir los tiempos de atención y espera en aeropuertos, lo que podría beneficiar a las aerolíneas. El prototipo de software desarrollado tiene como objetivo simplificar estos procesos mediante el uso de tecnología biométrica, aportando un plus de seguridad, ya que el sistema que actualmente emplean las aerolíneas colombianas para el proceso de check-in y abordaje requiere la generación de tiquetes impresos, códigos QR, entre otros, que pueden ralentizar el proceso de abordaje y generar costos adicionales y tiempo a los usuarios y a las aerolíneas.

El proceso de check-in en aerolíneas colombianas es un proceso que toma tiempo, especialmente en vuelos internacionales en los cuales las personas deben estar entre dos y tres horas antes en el aeropuerto para poder verificar la documentación (pasaporte, visa, documentos de identificación), equipaje de mano y en bodega, y demás procesos de seguridad establecidos por las autoridades migratorias [3]. Por otra parte, no todas las aerolíneas en Colombia cuentan con sistemas de seguridad para evitar suplantación en documentos de identidad, en ocasiones la intuición es lo único con lo que cuentan los empleados de las aerolíneas y el personal de seguridad privada del aeropuerto para detectar posibles irregularidades en los documentos [4]. Sumado a lo anterior, el aeropuerto es también un espacio donde ocurren muchas transacciones económicas; restaurantes, cafeterías, tiendas de regalo, tanto antes como después del check-in.

En Colombia, la seguridad se ve aún más vulnerada con el nuevo sistema de check-in virtual de algunas aerolíneas que realizan vuelos nacionales. En este modelo, el cual el pasajero ingresa directamente a sala de espera si no requiere facturar equipaje en bodega, solo se realiza un control rápido al momento del abordaje, mediante la verificación

del tiquete impreso o del código QR del pasajero y del documento de identificación, sin efectuar ningún tipo de verificación biométrica que permita confirmar que la persona corresponde realmente al documento presentado. Esta situación incrementa el riesgo de suplantación de identidad, poniendo en peligro a los demás pasajeros, a los miembros de la tripulación y al destino final, por lo cual es importante que las aerolíneas cuenten con sistemas de seguridad sofisticados [5].

El reconocimiento biométrico de personas constituye una alternativa a los métodos de autenticación personal "clásicos", basados en "algo que el usuario conoce" (*password*, PIN, etc.), o en "algo que el usuario posee" (tarjeta, llave, etc.). A pesar de que los diversos rasgos biométricos han sido objeto de estudio desde hace varias décadas, especialmente desde los años 90, su implementación en aeropuertos colombianos continúa siendo limitada [6].

Los niveles de precisión y prestaciones de sistemas, así como el coste actual de los dispositivos, han llevado a descartar las anteriores razones como causantes del problema. En la actualidad la problemática causante de la falta de implementación de las tecnologías biométricas obedece a la baja fiabilidad de los sistemas de autenticación cuando se emplean en entornos operativos. Esto se debe a la falta de realismo de los experimentos realizados en laboratorio, que apenas tienen en cuenta aspectos tales como la seguridad, la privacidad, los fallos en la adquisición del rasgo o la calidad de la señal adquirida por el sensor [7].

La seguridad es un aspecto que forma parte de la vida cotidiana. La necesidad de contar con un entorno confiable está presente en cualquier situación de la vida donde exista un flujo de información personal. En la actualidad, existe una amplia variedad de sistemas basados en la determinación o confirmación de manera fiable y robusta de la identidad de personas. En este contexto surge el reconocimiento biométrico o biometría, que corresponde al reconocimiento de personas a partir de sus características fisiológicas y/o de comportamiento, siendo la biometría dactilar una de las más

empleadas, debido a su característica única para cada persona y fácil accesibilidad [8].

A partir de 1960 se desarrollaron los primeros sistemas automáticos de identificación basados en técnicas biométricas. En principio estas técnicas de reconocimiento tenían gran interés porque suponían una forma segura y sencilla de identificación de personas; esto permitió el abandono de los sistemas tradicionales, los cuales implicaban riesgos de seguridad importantes, los cuales se basaban en el uso de tarjetas de identificación y/o contraseñas que podían ser perdidas, olvidadas o incluso sustraídas [9].

El uso de rasgos biométricos para identificar personas se remonta al siglo VIII en China, donde se empleaban huellas dactilares en documentos y esculturas. Posteriormente, Quintiliano (año 1000 D. C.) y Malpighi (1686) aportaron antecedentes en la utilización y estudio sistemático de las huellas digitales. En el siglo XIX, Alphonse Bertillon impulsó la identificación criminal mediante características corporales, lo que derivó en la aceptación de las huellas dactilares como un método único y fiable, adoptado por los cuerpos policiales. Durante el siglo XX, surgieron nuevas técnicas, como lo fueron la identificación por voz (1941) y el análisis de ADN (1986) [10].

La aplicación comercial de la biometría comenzó en los años 70 con los primeros sistemas automáticos de huellas, y a partir de los 90 su desarrollo se aceleró gracias a la informática y la microelectrónica. Si bien en un inicio se restringió a usos policiales y forenses, hoy tiene amplia presencia en aplicaciones civiles y dispositivos personales [11].

El objetivo de este trabajo es diseñar un prototipo funcional que permita registrar e identificar pasajeros por medio de la huella dactilar, sin la necesidad de tener que emplear un documento de identificación. Además, busca ofrecer la posibilidad de editar, actualizar y eliminar datos por medio de una interfaz gráfica. Este prototipo busca brindar una alternativa que permita a las aerolíneas colombianas ofrecer a los pasajeros mayor comodidad, agilidad y seguridad a la hora de hacer vuelos domésticos.

Este trabajo se compone de las siguientes secciones, la primera presenta una revisión de la literatura científica, la segunda presenta antecedentes generales sobre el uso de la biometría, posteriormente la metodología, los resultados, y su discusión; finalmente, se presentan las conclusiones.

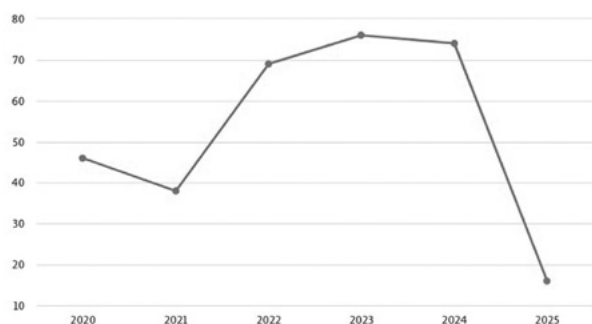
II. Materiales y métodos

Se rastrearon artículos en las bases de datos científicas Scopus y WoS, y el período de búsqueda estuvo comprendido entre los años 2020 y 2025. Se empleó la siguiente ecuación de búsqueda:

TITLE-ABS-KEY (("Biometric" OR "Fingerprint" OR "Recognition") AND ("Airport" OR "Airline" OR " Passengers")) AND PUBYEAR > 2019 AND PUBYEAR < 2026 AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "COMP") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English")) AND (LIMIT-TO (SRC-TYPE , "j")) AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE , "final")) AND (LIMIT-TO (OA , "all"))

Se identificó un total 319 artículos. La Figura 1 presenta la cantidad de publicaciones por año. Se puede evidenciar un crecimiento continuo en la cantidad de investigaciones desde el año 2021 hasta el 2023, año en el cual se registró la mayor cantidad de publicaciones (76), en lo que va del año 2025, se han registrado 16 publicaciones.

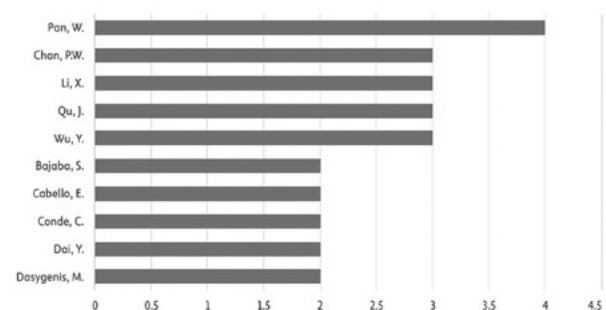
Figura 1. Año vs. Cantidad



Nota: fuente elaboración propia.

El autor con la mayor cantidad de publicaciones (4) fue Pan, Weijun de la Universidad de Aviación Civil de China. Ver la Figura 2:

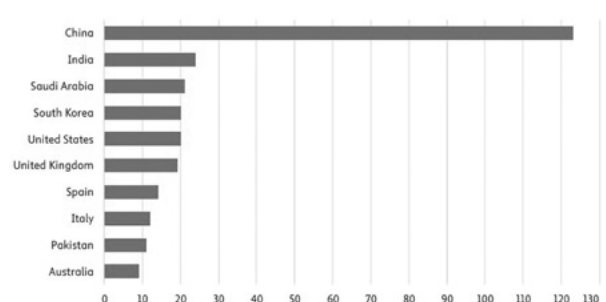
Figura 2. Principales autores



Nota: fuente elaboración propia.

Por su parte, China (123 publicaciones), India (24 publicaciones) y Arabia Saudita (21 publicaciones) son los tres países con la mayor cantidad de publicaciones respectivamente. Ver la Figura 3:

Figura 3. Principales países



Nota: fuente elaboración propia.

Las tres instituciones con la mayor cantidad de publicaciones sobre el tema fueron: Universidad de Vuelo de Aviación Civil de China (10), Universidad de Aviación Civil de China (8) y Ministerio de Educación de la República Popular China (7). Ver la Figura 4:

eficiente y seguro para mejorar la experiencia del viajero y reforzar la seguridad aeroportuaria.

Además de agilizar procesos de control, la biometría en aeropuertos se ha convertido en un componente esencial de la gestión de seguridad. El reconocimiento facial, de iris y de huellas dactilares se integra con bases de datos nacionales e internacionales para prevenir el fraude de identidad y mejorar la detección de individuos buscados por la justicia [21]. En Estados Unidos, el programa Biometric Exit de la Customs and Border Protection (CBP) ha permitido verificar más de 200 millones de pasajeros salientes mediante reconocimiento facial, con una precisión superior al 98 % en la identificación [22]. Asimismo, en Asia y Oriente Medio, aeropuertos como los de Singapur y Dubái han incorporado sistemas de “frontera inteligente” basados en biometría, que reducen el tiempo de inspección migratoria y fortalecen la seguridad sin necesidad de interacción humana directa [23].

Por otra parte, los desafíos éticos, legales y tecnológicos en la adopción de la biometría son objeto de creciente atención académica e institucional. Entre las principales preocupaciones destacan la privacidad de los datos biométricos, la interoperabilidad entre sistemas de diferentes países y aerolíneas, así como la resistencia de algunos usuarios a compartir información sensible [24]. Estudios recientes subrayan la necesidad de marcos regulatorios claros que equilibren la eficiencia operacional con la protección de derechos fundamentales [25]. En paralelo, avanza la investigación sobre el impacto de la inteligencia artificial adversarial sobre sistemas biométricos, donde ataques de suplantación facial (deepfakes) o la generación de huellas falsas ponen a prueba la robustez de los modelos de verificación [26]. Estas cuestiones evidencian que, si bien la biometría representa un avance crucial para la industria aérea, su consolidación requiere abordar simultáneamente los desafíos técnicos y las condiciones de confianza social necesarias para su adopción masiva.

III. Sistemas biométricos

Estos tipos de sistemas han experimentado un enorme crecimiento y actualmente están presentes en multitud de escenarios; control de acceso a zonas restringidas, gestión y control de asistencia laboral en empresas, entre otros. Los sistemas de reconocimiento biométrico usan características fisiológicas o de comportamiento, propias de cada individuo para identificarlo, es decir, se reconoce al usuario por lo que es, y no por lo que tiene o sabe [27].

En el caso de la biometría dactilar, se requiere un sensor especializado capa de capturar la huella dactilar y, a partir de ella, mediante un tratamiento informático, extraer las características necesarias para identificar a la persona. Además, para evaluar el rendimiento de un sistema de reconocimiento de huella dactilar es necesario contar con una base de datos adecuada para realizar pruebas y validaciones. Si bien la identificación mediante huella dactilar es uno de los más precisas, presenta limitaciones asociadas al deterioro de la piel, lo cual afecta especialmente a personas de edad avanzada o a trabajadores manuales, dificultando la correcta captura de las huellas [28].

Los primeros registros del uso de características biométricas para identificar personas datan del siglo VIII en China, donde se empleaban huellas dactilares en documentos y esculturas de arcilla. Posteriormente, en el año 1000 d. C., Quintiliano utilizó huellas de manos ensangrentadas como prueba en un caso criminal, y en 1686 Marcelo Malpigio realizó el primer estudio sistemático de huellas [29]. La biometría, entendida como el uso de rasgos fisiológicos o de comportamiento para el reconocimiento de individuos, ha evolucionado desde una definición general de la RAE como “estudio mensurativo de procesos biológicos” hacia un concepto más aplicado, tal como lo plantea el Biometric Consortium, que la define como métodos automáticos basados en el rostro, iris, voz, mano o huella dactilar [30].

Si bien diversas características pueden emplearse en la identificación, la huella dactilar se mantiene como el rasgo más utilizado, dada su unicidad y estabilidad comprobada científicamente [31]. Los sistemas actuales capturan esta información mediante dispositivos ópticos, de estado sólido o por ultrasonido, y analizan patrones como crestas, valles, bifurcaciones o espirales para establecer la identidad del individuo [32].

Figura 6. Características de la huella dactilar



Nota: fuente elaboración Propia (2025).

Los trirradios o deltas son el punto donde confluyen tres grupos de crestas papilares formando una estructura en forma de triángulo [32]. Existen diferentes tipos de trirradios, según la configuración y orientación de las crestas. Ver Figura 7.

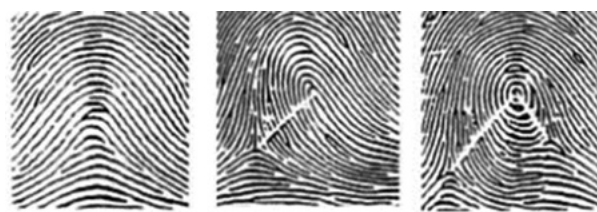
Figura 7. Tipos de trirradios en huella dactilar



Nota: fuente elaboración Propia (2025).

De acuerdo con el número de trirradios, las huellas dactilares se clasifican en tres tipos principales [34]. El arco, que carece de trirradios y aparece aproximadamente en el 5 % de la población. El bucle o lazo, caracterizado por un solo trirradio, puede ser radial cuando se abre hacia el pulgar (5,4 %) o cubital cuando se orienta hacia el meñique (63,5 %). Finalmente, el torbellino o espiral, con dos trirradios y formaciones concéntricas en el centro del pulpejo, se encuentra en el 26,1 % de los individuos [32].

Figura 8. Arco –Lazo – Espiral



Nota: fuente elaboración Propia (2025).

IV. Desarrollo

Se empleó la metodología ágil *Scrum*, el *framework* básico consistió en: *Project Vision*, *Users Stories*, *Planning*, *Implementation*, *Review*, *Retrospect*, *Daily*, *Backlog* y *Close Sprint*. Esta metodología es un marco de trabajo o *framework* utilizado en equipos que desarrollan proyectos complejos, y su propósito es entregar valor en períodos cortos de tiempo.

Scrum se fundamenta en tres pilares: la transparencia, inspección y adaptación, lo que permite al clientey el equipo comercial introducir el producto en el mercado rápidamente para iniciar su ciclo de uso o ventas. También permite fraccionar el proyecto en varias etapas hasta concluir con el desarrollo de dicho proyecto. Con estas etapas o *Sprint*, lo que se pretende es abordar partes específicas del proyecto, lo que ayuda a manejarlo más fácil y rápido [33-37].

Para la construcción del prototipo de software, inicialmente se realizó la ingeniería de requisitos y se definió su funcionalidad del sistema. En síntesis, las actividades realizadas fueron: generación de un formulario de inicio de sesión, creación de un botón de inicio de sesión y de registro, generación de un formulario de registro de usuarios nuevos, creación de campos "User" y "Password" en un formulario inicio de sesión, creación de la base de datos, creación de un proceso de autenticación del usuario ingresado, creación de la interfaz gráfica, implementación de código para reconocimiento del escáner de huella dactilar, e implementación de un driver para controlar el escáner de huella dactilar.

Al inicio de cada semana se realizó un Sprint Planning, en el cual se estipulaban los objetivos a lograr en la semana. Al final de cada semana, se realizaba el cierre del Sprint, en el cual se hace una retrospectiva (Retrospect) y se evaluaba si se cumplían los objetivos trazados en el Sprint Planning.

El *backlog* se estructuró en historias de usuario (HU) priorizadas según su impacto en el sistema:

Tabla 1. Historias de Usuario

ID	Historia de Usuario	Criterios de Aceptación
HU1	"Como administrador, quiero un sistema de login para acceder al software con usuario y contraseña, para garantizar seguridad."	<ul style="list-style-type: none"> Formulario con campos "User" y "Password". Conexión a BD para validar credenciales. Mensaje de error si los datos son incorrectos.
HU2	"Como pasajero, quiero registrarme con mi huella dactilar y datos personales, para agilizar el check-in."	<ul style="list-style-type: none"> Formulario de registro con campos: nombre, cédula, vuelo. Integración con huellero para captura biométrica. Almacenamiento seguro en BD.
HU3	"Como agente de aerolínea, quiero verificar la identidad del pasajero mediante huella, para evitar suplantación."	<ul style="list-style-type: none"> Interfaz de verificación biométrica. Comparación en tiempo real con BD. Notificación de éxito/error.
HU4	"Como sistema, debo gestionar check-ins con datos de vuelo (origen, destino, hora), para automatizar procesos."	<ul style="list-style-type: none"> Formulario asociado a huella registrada. Actualización automática de BD.
HU5	"Como desarrollador, necesito un driver para el escáner de huella dactilar para garantizar comunicación estable."	<ul style="list-style-type: none"> Driver compatible con SDK del fabricante. Pruebas de lectura/escritura de huellas.

Nota: fuente elaboración propia.

Se ejecutaron 4 *Sprints* de una semana cada uno:

Tabla 2. *Sprints*

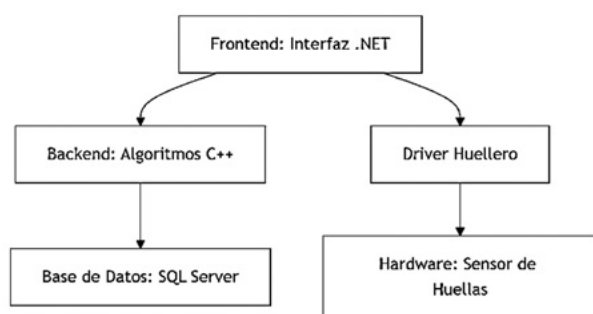
Sprint	Objetivo	Historias de Usuario	Entregables
Sprint 1	"Autenticación básica y registro inicial."	HU1, HU2	Login funcional.
Sprint 2	"Integración biométrica y verificación."	HU3, HU5	Driver del huellero.
Sprint 3	"Gestión de <i>check-ins</i> y reservas."	HU4	Formulario de <i>check-in</i> .
Sprint 4	"Optimización y pruebas."	-	Retrospectiva.

Nota: fuente elaboración propia.

El sistema se compone de:

- **Frontend:** Interfaz gráfica en .NET (C#) con formularios (login, registro, *check-in*).
- **Backend:** Lógica en C++ para procesamiento biométrico (extracción minuciamiento de huellas).
- **Base de Datos:** SQL Server con tablas: Usuarios, Huellas, CheckIns.
- **Middleware:** Driver del huellero (API para comunicación hardware-software).

Figura 9. Diagrama de componentes



Nota: fuente elaboración propia.

A continuación, se describe la arquitectura de despliegue.

- **Entorno Local:** *Visual Studio*, *SQL Server LocalDB*.
- **Cliente:** aplicación Windows .NET instalada en puestos de aerolínea).
- **Servidor:** (BD centralizado en la nube (*Azure SQL*) para acceso multi-sede).
- **Seguridad:** encriptación AES-256 para huellas y datos personales).
- **Autenticación:** uso de *tokens JWT* para APIs.

El uso de *Scrum* permitió entregar funcionalidades de manera incremental, mientras que la arquitectura modular aseguró la escalabilidad necesaria para integrar tecnologías futuras (por ejemplo, reconocimiento facial). La combinación de C++ (procesos críticos) y .NET (interfaz y experiencia de usuario) optimizó tanto el rendimiento como la usabilidad del sistema.

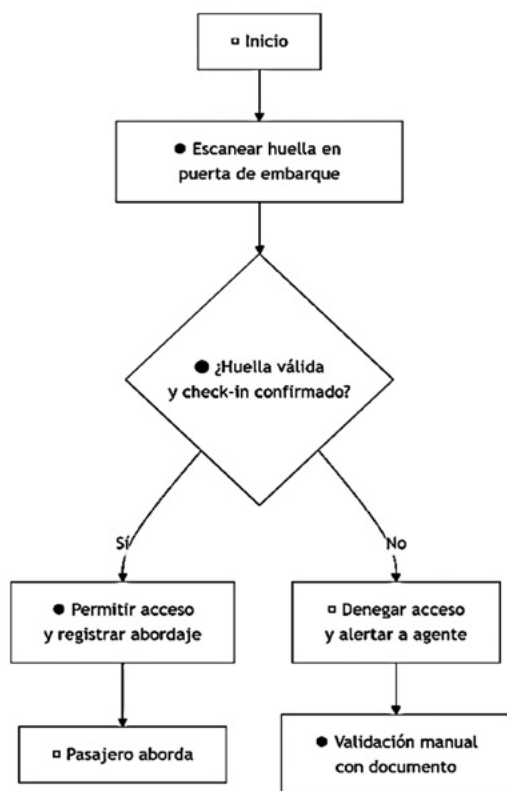
De acuerdo con los objetivos planteados se diseñó y desarrolló un prototipo de *software* para el registro e identificación de personas mediante autenticación biométrica. Finalmente, se aclara que el código empleado para la construcción del prototipo se encuentra disponible en el siguiente enlace de GitHub: <https://github.com/victorgil777/BIOMETRIC.git>

La base de datos se implementó en *SQL Server*, permitiendo un almacenamiento estructurado y seguro de las huellas dactilares. Para validar el sistema, se utilizaron lectores biométricos que capturaron huellas de un grupo de usuarios con diferentes perfiles demográficos. Cada huella registrada fue posteriormente comparada con las almacenadas, evaluándose indicadores de desempeño como la tasa de identificación correcta, la tasa de falsos positivos (FAR) y la tasa de falsos negativos (FRR).

El *software*, desarrollado en .NET, ejecutó satisfactoriamente el proceso de cotejo, recuperando la información asociada al individuo en un tiempo promedio de respuesta inferior a X segundos (dato por completar). Se realizaron pruebas repetidas de autenticación bajo condiciones de variabilidad (cambios de presión, ángulo y limpieza del dedo), confirmando la estabilidad del algoritmo en la comparación de patrones biométricos.

La validación experimental se complementó con la elaboración de un diagrama BPMN, que mostró mejoras en el flujo de trabajo respecto a sistemas tradicionales, reduciendo pasos redundantes y tiempos de espera. Estos resultados respaldan que la integración biométrica propuesta ofrece un mecanismo de autenticación rápido, confiable y robusto frente a condiciones de uso reales.

Figura 10. Diagrama BPMN



Nota: fuente elaboración propia.

V. Resultados y discusión

El desarrollo del prototipo de *software* biométrico para aerolíneas adoptó el enfoque ágil *Scrum* debido a su capacidad para adaptarse a los cambios y entregar funcionalidades incrementales. A diferencia de metodologías tradicionales como Cascada, que siguen un plan rígido y secuencial, *Scrum* permitió ajustar los requisitos sobre la marcha, incorporando *feedback* real de los usuarios durante las pruebas piloto.

Esta flexibilidad fue clave para integrar componentes complejos como el lector de huellas dactilares, cuyos requisitos técnicos evolucionaron durante el proyecto. Las iteraciones semanales (*Sprints*) y las retrospectivas facilitaron la identificación temprana de problemas, como la optimización del driver del escáner de huella dactilar, lo que habría sido más costoso de corregir en etapas avanzadas con otro enfoque.

Para la estructura del *software*, se implementó el patrón de diseño Modelo-Vista-Controlador (MVC), el cual permitió separar de manera clara las responsabilidades del sistema. El modelo, desarrollado en C++ y SQL Server, se encargó de la lógica de negocio y el manejo de datos biométricos, mientras que la vista, construida en .NET/C#, ofreció una interfaz intuitiva para los usuarios; y el controlador actuó como intermediario, coordinando las acciones entre ambos; coordinando el flujo de informaciones y las acciones del sistema.

Esta arquitectura simplificó el mantenimiento, mejoró escalabilidad y posibilitó que las modificaciones en la interfaz no afectaran la lógica interna, lo cual resulta fundamental para futuras extensiones, como la incorporación de reconocimiento facial.

La usabilidad fue un pilar fundamental en el diseño, siguiendo principios establecidos por la norma ISO 9241 y las heurísticas de Nielsen. Se priorizó la eficiencia, reduciendo los pasos necesarios para completar tareas como el registro o el *check-in*, en contraste con los procesos tradicionales que requieren múltiples interacciones. La

interfaz ofreció retroalimentación visual inmediata, mediante mensajes claros que guiaban al usuario en cada acción, y mantuvo una estética coherente en todas las pantallas para evitar confusiones. Asimismo, se consideraron condiciones ambientales típicas de los aeropuertos, como la variabilidad en iluminación, seleccionando tipografías legibles y contrastes adecuados.

Las huellas dactilares se almacenaron en la base de datos con encriptación AES-256, y el sensor incluyó la función de detección de "dedo vivo" para prevenir suplantaciones. La autenticación combinó credenciales tradicionales (usuario y contraseña) con la verificación biométrica, añadiendo un segundo factor de seguridad para operaciones sensibles como el *check-in*. Las comunicaciones entre componentes se aseguraron mediante *tokens JWT* y el protocolo HTTPS, minimizando riesgos de interceptación de datos. En resumen, la combinación de *Scrum*, MVC y un enfoque centrado en usabilidad, seguridad y rendimiento resultó en un prototipo funcional que no solo cumple con los requisitos actuales, sino que también está preparado para adaptarse a futuras necesidades tecnológicas y operativas en el sector aeronáutico.

VI. Limitaciones y trabajo futuro

Como aspectos a mejorar, se plantea la integración de métricas de validación que permitan evaluar de manera objetiva el desempeño del prototipo. En particular, a través del cálculo de indicadores como el *accuracy*, tasa de falsos positivos (FAR) y negativos (FRR), ampliamente utilizadas en la validación de sistemas biométricos. De igual manera, la medición del tiempo promedio de procesamiento requerido para la autenticación de pasajeros permite determinar si la solución puede integrarse sin generar retrasos en los procesos de *check-in* y abordaje. Estas pruebas ayudan a evaluar su impacto en escenarios reales, especialmente en aeropuertos con alto flujo de viajeros.

VII. Conclusiones

En este trabajo se presenta el desarrollo de un prototipo funcional para agilizar el proceso de *check-in* de pasajeros de aerolíneas colombianas, el cual garantiza la autenticidad de la identificación del pasajero haciendo uso de la huella dactilar. La combinación de lenguajes como C++ para el procesamiento eficiente de algoritmos biométricos y C#/ .NET para la interfaz gráfica y conexión con bases de datos SQL Server, demostró que es posible desarrollar sistemas robustos que aprovechen lo mejor de ambos entornos. Esto valida la viabilidad de arquitecturas híbridas en proyectos biométricos, donde el rendimiento y la usabilidad son críticos.

La aplicación de *Scrum* permitió iteraciones rápidas y adaptabilidad ante cambios en los requisitos, como ajustes en la interfaz o la integración del hardware de huellas dactilares. Los *sprints* semanales facilitaron la detección temprana de errores y la entrega incremental de funcionalidades clave, lo que contribuyó a reducir el tiempo total de desarrollo en aproximadamente un 30 % en comparación con enfoques tradicionales.

A pesar de que el software no se desplegó, el prototipo estableció las bases para incorporar otras modalidades biométricas, como el reconocimiento facial o de iris, gracias a su diseño modular. Además, el uso de *frameworks* .NET asegura compatibilidad con versiones futuras de la plataforma (como .NET Core) y facilita su despliegue en entornos cloud, lo favorece su escalabilidad para los aeropuertos con mayor flujo de pasajeros.

VIII. Referencias

- [1] N. Khan and M. Efthymiou, "The use of biometric technology at airports: The case of customs and border protection (CBP)," *International Journal of Information Management Data Insights*, vol. 1, no. 2, p. 100049, 2021, Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jjimei.2021.100049>.
- [2] D. Muthusamy and R. Ponnusamy, "An efficient approach for finger vein verification to solving the biometric recognition technique," *Pattern Recognit*, vol. 164, p. 111563, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2025.111563>.
- [3] M. Hron and N. Obwegeser, "Why and how is Scrum being adapted in practice: A systematic review," *Journal of Systems and Software*, vol. 183, p. 111110, 2022, Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2021.111110>.
- [4] J. Guo, Z. Xie, Q. Li, S. Zhan, and J. Xu, "Railway Passenger Flow Recognition Algorithm for Terminal Station Based on Cost Theory and Automatic Frequency Control," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 26885–26892, 2020, Doi: 10.1109/ACCESS.2020.2968721.
- [5] I. T. Miller, B. K. Wiederhold, C. S. Miller, and M. D. Wiederhold, "Virtual Reality Air Travel Training with Children on the Autism Spectrum: A Preliminary Report," *Cyberpsychol Behav Soc Netw*, vol. 23, no. 1, pp. 10–15, 2020, Doi: 10.1089/cyber.2019.0093.
- [6] M. T. B. A. Lodhi et al., "Passenger communication system for next-generation self-driving cars: A buddy," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 11, no. 8, pp. 773–780, 2020, Doi: 10.14569/IJACSA.2020.0110895.
- [7] I. S. Miftahov, L. Y. Grudtsyna, and I. Y. Myshkina, "Development of application for recognition of object groups in the image," *International Journal of Engineering Research and Technology*, vol. 13, no. 11, pp. 3611–3615, 2020, Doi: 10.37624/ijert/13.11.2020.3611-3615.
- [8] Q. Xu, B. Wang, F. Zhang, D. S. Regani, F. Wang, and K. J. R. Liu, "Wireless AI in Smart Car: How Smart a Car Can Be?," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 55091–55112, 2020, Doi: 10.1109/ACCESS.2020.2978531.
- [9] Y. Dai, W. Liu, H. Li, and L. Liu, "Efficient Foreign Object Detection between PSDs and Metro Doors via Deep Neural Networks," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 46723–46734, 2020, Doi: 10.1109/ACCESS.2020.2978912.
- [10] A. J. Balsero-Meneses and C. G. Vargas-García, "Diseño e implementación de un prototipo para el control de acceso en la sede de ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas mediante el uso de torniquetes controlados por carné con tecnología nfc y lector biométrico de huella dactilar," *Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico*, 2016. Online. Available: <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/3430/VargasGarciaCristianGerman2016.pdf;jsessionid=35ED6E5A514451C334D2C-C7032970531?sequence=1>. [Accessed: 15-Jun-2021].
- [11] J. Naranjo-Alcazar, S. Perez-Castanos, P. D. Zuccarello, and M. Cobos, "Acoustic Scene Classification with Squeeze-Excitation Residual Networks," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 112287–112296, 2020, Doi: 10.1109/ACCESS.2020.3002761.

- [12] M. Din, A. Bashir, A. Basit, and S. Lakho, "Abandoned object detection using frame differencing and background subtraction," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 11, no. 7, pp. 676–681, 2020, Doi: 10.14569/IJACSA.2020.0110781.
- [13] G. Chen, W. Chen, S. Zhang, D. Zhang, and H. Liu, "Influence of Mobile Payment on Bus Boarding Service Time," *J Adv Transp*, vol. 2020, 2020, Doi: 10.1155/2020/9635853.
- [14] Y. Han, S. Ma, Y. Xu, L. He, S. Li, and M. Zhu, "Effective complex airport object detection in remote sensing images based on improved end-to-end convolutional neural network," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 172652–172663, 2020, Doi: 10.1109/ACCESS.2020.3021895.
- [15] J. Sini, A. C. Marceddu, and M. Violante, "Automatic emotion recognition for the calibration of autonomous driving functions," *Electronics (Switzerland)*, vol. 9, no. 3, 2020, Doi: 10.3390/electronics9030518.
- [16] A. Gulliver, P. E. Carnell, S. M. Trevathan-Tackett, M. P. de Paula Costa, P. Masqué, and P. I. Macreadie, "Estimating the Potential Blue Carbon Gains From Tidal Marsh Rehabilitation: A Case Study From South Eastern Australia," *Front Mar Sci*, vol. 7, 2020, Doi: 10.3389/fmars.2020.00403.
- [17] C. Kim, K. C. Lee, and F. J. Costello, "The intention of passengers towards repeat use of biometric security for sustainable airport management," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 11, 2020, Doi: 10.3390/su12114528.
- [18] R. M. Alsina-Pagès, M. Hervás, L. Duboc, and J. Carbassa, "Design of a low-cost configurable acoustic sensor for the rapid development of sound recognition applications," *Electronics (Switzerland)*, vol. 9, no. 7, pp. 1–20, 2020, Doi: 10.3390/electronics9071155.
- [19] B. Su et al., "A passenger model for simulating boarding and alighting in spatially confined transportation scenarios," *J Comput Sci*, vol. 45, 2020, doi: 10.1016/j.jocs.2020.101173.
- [20] B. Padmaja, M. B. Madhu Bala, and E. Krishna Rao Patro, "A comparison on visual prediction models for MAMO (multi activity-multi object) recognition using deep learning," *J Big Data*, vol. 7, no. 1, 2020, Doi: 10.1186/s40537-020-00296-8.
- [21] S. Hadavi, H. Buldeo Rai, S. Verlinde, H. Huang, C. Macharis, and T. Guns, "Analyzing passenger and freight vehicle movements from automatic-Number plate recognition camera data," *European Transport Research Review*, vol. 12, no. 1, 2020, Doi: 10.1186/s12544-020-00405-x.
- [22] T. Kempapidis, C. L. Castle, R. G. Fairchild, S. F. Hussain, A. T. G. Cash, and R. S. M. Gomes, "A scientific evaluation of autonomous vehicle user experience on sighted and visually impaired passengers based on FACS (Facial Analysis Coding System) and a user experience questionnaire," *J Transp Health*, vol. 19, 2020, Doi: 10.1016/j.jth.2020.100906.
- [23] C. Kim, K. C. Lee, and F. J. Costello, "The Intention of Passengers towards Repeat Use of Biometric Security for Sustainable Airport Management," *Sustainability*, vol. 12, no. 11, p. 4528, 2020.

- [24] N. A. A. Rahman, "Biometric Technology Application in the Aviation Industry: Preliminary Findings from Passenger Perspective," *Turkish J. Comput. Math. Educ.*, vol. 12, no. 11, pp. 2279–2288, 2021.
- [25] K. O. Kasim, S. R. Winter, D. Liu, J. R. Keebler, and T. B. Spence, "Passengers' perceptions on the use of biometrics at airports: A statistical model of the extended theory of planned behavior," *Technol. Soc.*, vol. 67, p. 101806, 2021.
- [26] I. A. Khi, "Ready for take-off: how biometrics and blockchain can beat aviation's quality issues," *Biom. Technol. Today*, vol. 2020, no. 1, pp. 8–10, 2020.
- [27] A. De Keyser, Y. Bart, X. Gu, S. Q. Liu, S. G. Robinson, and P. K. Kannan, "Opportunities and challenges of using biometrics for business: Developing a research agenda," *J. Bus. Res.*, vol. 136, pp. 52–62, 2021.
- [28] N. Khan and M. Efthymiou, "The use of biometric technology at airports: The case of customs and border protection (CBP)," *Int. J. Inf. Manage. Data Insights*, vol. 1, no. 2, p. 100049, 2021.
- [29] S. Binder, A. Iannone, and C. Leibner, "Biometric technology in 'no-gate border crossing solutions' under consideration of privacy, ethical, regulatory and social acceptance," *Multimed Tools Appl.*, vol. 80, no. 15, pp. 23665–23678, 2021, Doi: 10.1007/s11042-020-10266-0.
- [30] B. Hong, X. Ma, W. Tang, and Z. Shen, "Recognition of Air Passengers' Willingness to Pay for Seat Selection for Imbalanced Data Based on Improved XGBoost," *International Journal of Cognitive Informatics and Natural Intelligence*, vol. 16, no. 1, 2022, Doi: 10.4018/IJCI.312249.
- [31] Z. Guo, Z. Xiao, R. S. Alroobaea, A. M. Baqasah, A. Althobaiti, and H. S. Gill, "Design and Study of Urban Rail Transit Security System Based on Face Recognition Technology," *Informatica (Slovenia)*, vol. 46, no. 3, pp. 429–438, 2022, Doi: 10.31449/inf.v46i3.3862.
- [32] M. R. Marín, J. C. R. Uribe, and J. C. O. Morales, "Una mirada a la biometría," *Av. en Sist. e Informática*, vol. 6, no. 2, pp. 29–38, 2009.
- [33] K. Ghorpade and A. A. Khaparde, "Single channel speech enhancement using evolutionary algorithm with LOG-MMSE," *ASEAN Engineering Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 83–91, 2022, Doi: 10.11113/aej.v12.16770.
- [34] C. Xiu, Y. Sun, Q. Peng, C. Chen, and X. Yu, "Learn traffic as a signal: Using ensemble empirical mode decomposition to enhance short-term passenger flow prediction in metro systems," *Journal of Rail Transport Planning and Management*, vol. 22, 2022, Doi: 10.1016/j.jrtpm.2022.100311.
- [35] S. S. Thenuwara, C. N. Premachandra, and H. Kawanaka, "A multi-agent based enhancement for multimodal biometric system at border control," *Array*, vol. 14, 2022, Doi: 10.1016/j.array.2022.100171.

- [36] R. Zhang, X. Zhang, L. Xiao, and J. Qiu, "Recognition of Aircraft Activities at Airports on Video Micro-Satellites: Methodology and Experimental Validation," *Aerospace*, vol. 9, no. 8, 2022, Doi: 10.3390/aerospace9080414.

- [37] M. Y. Zaliskyi, O. A. Shcherbyna, L. Tereshchenko, A. A. Osipchuk, and O. Zharova, "Shadow Image Processing of X-Ray Screening System for Aviation Security," *International Journal of Image, Graphics and Signal Processing*, vol. 14, no. 6, pp. 26–46, 2022, Doi: 10.5815/ijigsp.2022.06.03.



Cuaderno

Activa
• REVISTA CIENTÍFICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA •

Potencial antimicrobiano de extractos líquénicos de *Parmotrema* sp. y *Usnea* sp.: una evaluación para uso sostenible en el Campus sede Tunja de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

*Antimicrobial Potential of Lichen Extracts of *Parmotrema* sp. and *Usnea* sp.: an Evaluation for Sustainable Use in the Tunja Campus of the Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia*

Jhonatan Stiven Pulido Ovalle¹, Julián Santiago Pulido Torres², María José Rodríguez Silva³, Luz Ángela Cuellar Rodríguez⁴

Tipo de Artículo: Investigación.

Recibido: 28/05/2025. **Aprobado:** 13/08/2025. **Publicado:** 12/12/2025

Resumen: La resistencia microbiana a antibióticos sintéticos impulsa la búsqueda de alternativas bioactivas sostenibles. Este estudio evaluó la actividad antimicrobiana *in vitro* de extractos de *Usnea* sp.

y *Parmotrema* sp., recolectados sustentablemente en la sede Tunja de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Se utilizaron técnicas de maceración hidroalcohólica y arrastre de vapor.

¹ Autor correspondiente: Jhonatan Stiven Pulido Ovalle. Mayor título: Técnico en Manejo Ambiental. Filiación Institucional: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. País: Colombia, Ciudad: Tunja. Correo electrónico: jhonatan.pulido02@uptc.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2342-7053>

² Autor correspondiente: Julian Santiago Pulido Torres. Mayor título: Técnico en Instalaciones eléctricas en baja tensión. Filiación Institucional: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. País: Colombia, Ciudad: Tunja. Correo electrónico: julian.pulido06@uptc.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6914-1770>

³ Autor correspondiente: María José Rodríguez Silva. Filiación Institucional: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. País: Colombia, Ciudad: Tunja. Correo electrónico: maria.rodriguez61@uptc.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8219-494X>

⁴ Autor correspondiente: Luz Ángela Cuellar Rodríguez. Mayor título: Doctora en Ciencias área Ciencias Biológicas. Filiación Institucional: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. País: Colombia, Ciudad: Tunja. Correo electrónico: luz.cuellar@uptc.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9573-8344>

Cuaderno

Activa
• REVISTA CIENTÍFICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA •

Si bien *Parmotrema* sp. presentó mayor volumen extractivo, pero menor bioactividad. *Usnea* sp. mostró inhibición microbiana desde 5 mg/mL, atribuida al ácido úsnico. La actividad fue comprobada frente a cultivos mixtos del microbioma bucal. Se identificaron factores críticos para la conservación, como la estabilidad de compuestos activos. Los resultados respaldan el potencial de *Usnea* sp. para su inclusión en productos farmacéuticos, cosméticos y fitoterapéuticos. El estudio resalta el valor de los líquenes como recurso biocomercial local y promueve su aprovechamiento sostenible en el marco de la bioeconomía, sugiriendo futuras investigaciones en fitoquímica, estandarización de extractos y evaluación toxicológica.

Palabras clave: Líquenes; actividad antimicrobiana; ácido úsnico; bioeconomía; extractos naturales.

Abstract: Microbial resistance to synthetic antibiotics is driving the search for sustainable bioactive alternatives. This study evaluated the *in vitro* antimicrobial activity of extracts from *Usnea* sp. and *Parmotrema* sp., sustainably harvested at the Tunja campus of the Pedagogical and Technological University of Colombia. Hydroalcoholic maceration and steam distillation techniques were used. *Parmotrema* sp. yielded a higher extractive volume but lower bioactivity. *Usnea* sp. showed microbial inhibition at 5 mg/mL, attributed to usnic acid. The activity was tested against mixed cultures of the oral microbiome. Critical factors for conservation were identified, such as the stability of active compounds. The results support the potential of *Usnea* sp. for inclusion in pharmaceutical, cosmetic, and phytotherapeutic products. The study highlights the value of lichens as a local biocommercial resource and promotes their sustainable use within the framework of the bioeconomy, suggesting future research in phytochemistry, extract standardization, and toxicological evaluation.

Keywords: lichens; antimicrobial activity; usnic acid; bioeconomy; natural extracts.

I. Introducción

Los líquenes son organismos complejos y resilientes que surgen de una asociación simbiótica estable entre un micobionte (generalmente un hongo ascomiceto) y un fotobionte (un alga verde o una cianobacteria). Esta relación mutualista permite una compartición eficiente de recursos: mientras que el fotobionte realiza fotosíntesis y aporta carbono orgánico, el micobionte proporciona estructura, protección y acceso a nutrientes minerales [1].

Gracias a esta asociación, los líquenes pueden colonizar una gran variedad de hábitats, desde cortezas de árboles hasta rocas expuestas, incluyendo ambientes extremos como desiertos, tundras alpinas y zonas urbanas contaminadas. Su capacidad para sobrevivir en condiciones adversas, como radiación ultravioleta intensa, sequía prolongada y contaminación atmosférica, ha sido ampliamente documentada, lo que los convierte en bioindicadores ambientales de gran valor [1], [10].

Además de su relevancia ecológica, los líquenes son una fuente rica y diversa de metabolitos secundarios, muchos de los cuales son exclusivos de este grupo de organismos. Entre los compuestos más representativos se encuentran ácidos fenólicos, depsidas, *depsídonas*, xantonas, dibenzofuranos (como el ácido úsnico) y terpenoides, cuyas funciones abarcan desde la protección frente a microorganismos hasta el control de la pérdida de agua y la defensa ante herbívoros [2], [4]. En las últimas décadas, estos metabolitos han despertado el interés de la comunidad científica y biotecnológica por sus destacadas propiedades biológicas: antioxidante, antiinflamatoria, antimicrobiana, antiviral, antitumoral, citotóxica y neuroprotectora [3], [5], [9].

La creciente resistencia de las bacterias patógenas a los antibióticos convencionales constituye uno de los principales desafíos de la medicina moderna. Este fenómeno amenaza con disminuir la eficacia de tratamientos estándar, elevar los costos sanitarios y aumentar la mortalidad por infecciones comunes. En este contexto, los líquenes emergen como una fuente alternativa prometedora de compuestos antimicrobianos naturales. Investigaciones

recientes han demostrado que metabolitos como el ácido úsnico y la *atranorina* presentan actividad frente a bacterias Gram positivas y Gram negativas, incluidas cepas multirresistentes de *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Klebsiella pneumoniae* y *Pseudomonas aeruginosa* [5], [7], [11].

En particular, los géneros *Usnea* (líquenes fruticulosos) y *Parmotrema* (líquenes foliosos), ambos pertenecientes a la familia *Parmeliaceae*, han sido ampliamente estudiados por su distribución cosmopolita y su notable producción de metabolitos secundarios bioactivos [8], [12]. Estas especies están presentes tanto en ecosistemas rurales como en entornos urbanos, incluyendo el campus de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), sede Tunja, donde colonizan cortezas de árboles, rocas y estructuras artificiales. Su presencia en este entorno se debe a condiciones microclimáticas favorables, baja contaminación atmosférica local y abundancia de sustratos adecuados, lo que convierte al campus en un reservorio natural de diversidad líquénica. Además de su interés farmacológico, estos líquenes son objeto de estudio en áreas como la ecología, fisiología vegetal, bioindicación ambiental, educación ambiental y sistemática. Su estudio no solo contribuye a la búsqueda de compuestos bioactivos, sino también a la comprensión de los servicios ecosistémicos que ofrecen y a la conservación de la biodiversidad local.

No obstante, el aprovechamiento de líquenes debe realizarse bajo principios de sustentabilidad. Su lento crecimiento, su papel en la estabilidad de los ecosistemas y su sensibilidad a los cambios ambientales exigen estrategias de recolección ética y controlada. Una alternativa viable es la utilización de talos desprendidos naturalmente o resultado de podas técnicas, lo cual permite obtener material sin afectar las poblaciones en su estado natural [1], [10].

El presente estudio tiene como objetivo evaluar la actividad antimicrobiana *in vitro* de extractos obtenidos a partir de *Parmotrema* sp. y *Usnea* sp., recolectados sustentablemente en el campus de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, sede Tunja. Para ello, se emplearon técnicas tradicionales de extracción (maceración hidroal-

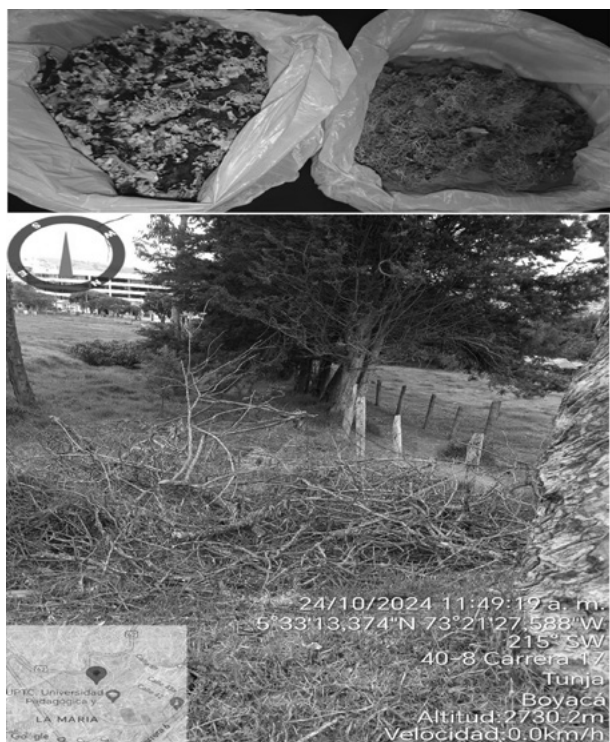
cohólica y arrastre de vapor) junto con ensayos microbiológicos de inhibición. Esta investigación se enmarca en los procesos de la Biotecnología Vegetal y busca determinar el potencial de estos extractos como ingredientes activos no solo en productos farmacéuticos naturales e innovadores, sino también en formulaciones cosméticas, fitoterapéuticas y en aplicaciones bio educativas y ambientales. De esta manera, se promueve un aprovechamiento sostenible de la biodiversidad local, alineado con principios de bioeconomía.

II. Materiales y Métodos

Materiales

Las muestras de líquenes fueron recolectadas de manera sustentable a partir de fragmentos desprendidos por podas o caídas naturales sobre superficies pavimentadas en el campus de la UPTC. Esta estrategia evita el impacto negativo sobre las poblaciones naturales de líquenes, cuya tasa de crecimiento es lenta y cuya sensibilidad ecológica es alta. Tras la recolección, las muestras fueron limpiadas manualmente para eliminar restos vegetales, tierra o partículas contaminantes. Luego, se sometieron a un proceso de secado al aire durante 48 horas en condiciones controladas (ambiente seco y ventilado) y finalmente se almacenaron en sobres de papel kraft lejos a la luz solar directa para preservar la integridad de sus metabolitos secundarios.

Figura 1. Especies recolectadas y evidencia del sitio de obtención en el campus de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, sede Tunja (Boyacá). Izquierda: *Parmotrema* sp. (biotipo folioso). Derecha: *Usnea* sp. (biotipo fruticoso). Abajo: evidencia fotográfica de ramas obtenidas mediante podas institucionales, utilizadas para la recolección del material sin generar impacto adicional sobre el ecosistema



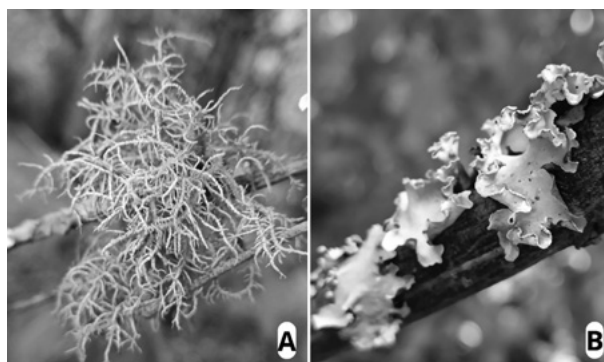
Nota: fuente elaboración propia.

Para los procesos de extracción se emplearon solventes como etanol y metanol en la técnica de maceración directa. En el sistema de arrastre de vapor se utilizaron matraces aforados y otros materiales de laboratorio estándar. Para la caracterización química se aplicó cromatografía en capa fina (TLC), utilizando placas comerciales, así como disolventes orgánicos como acetona y ciclohexano, de acuerdo con protocolos descritos en la literatura especializada.

La evaluación de la actividad antibacteriana se realizó mediante cultivos en medio de agar nutritivo, empleando placas de Petri, asas de siembra e incubación a 34 ± 1 °C. Se utilizaron cultivos mixtos de

bacterias obtenidas del microbioma bucal como modelo de prueba.

Figura 2. Evidencia en campo de A. *Usnea* sp. y B. *Parmotrema* sp., en el campus de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, sede Tunja (Boyacá). Se observan talos en su sustrato original y sus características diagnósticas



Nota: fuente elaboración propia.

Figura 3. Proceso de limpieza manual de talos liquénicos recolectados, seguido de su clasificación preliminar en los géneros *Usnea* sp. y *Parmotrema* sp.



Nota: fuente elaboración propia.

La identificación taxonómica se realizó con base en la revisión de caracteres morfológicos diagnósticos visibles a simple vista y bajo lupa, tales como tipo de biotipo, presencia de cilios marginales, médula central, coloración de la cara inferior y tipo de ramificación.

Métodos

Se aplicaron dos técnicas de extracción por separado:

Maceración: se empleó esta técnica por su efectividad en la extracción de metabolitos secundarios polares y semipolares presentes en líquenes. Para ello, se utilizaron 10 g de muestras secas de *Usnea* sp. y *Parmotrema* sp., las cuales fueron trituradas manualmente con mortero de porcelana hasta obtener un polvo fino, lo que permite aumentar la superficie de contacto con el solvente y mejorar el rendimiento extractivo. Posteriormente, se mezclaron con una solución hidroalcohólica al 70 %, compuesta por etanol y metanol, en una proporción de 1:10 (peso/volumen). La mezcla se dejó en reposo durante un periodo de 7 a 10 días con agitación ocasional, lo que favorece la difusión de los compuestos bioactivos al medio líquido. Finalmente, los extractos fueron separados por filtración utilizando papel Whatman® N.º 1, el cual retiene partículas sólidas finas sin absorber metabolitos, permitiendo obtener un extracto limpio y listo para su posterior aplicación.

Figura 4. Proceso de maceración de líquenes. Se observa la coloración característica de la maceración de *Usnea* sp., así como la presencia de su hilo central de médula, el cual dificulta la maceración mecánica completa de los talos



Nota: fuente elaboración propia.

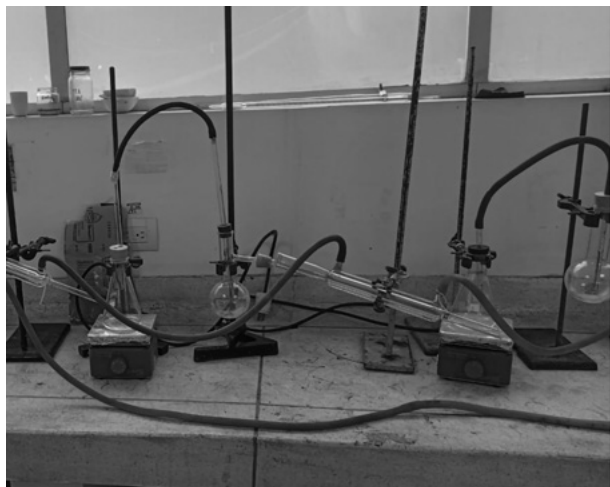
Figura 5. Extractos crudos obtenidos por maceración de líquenes. Frascos rotulados con los géneros *Usnea* y *Parmotrema* durante el proceso de maceración en solventes hidroalcohólicos (metanol y etanol)



Nota: fuente elaboración propia.

Extracción por arrastre de vapor: para la extracción de compuestos liquenicos, se empleó la técnica de arrastre de vapor, adecuada para metabolitos termolábiles con bajo peso molecular. Se colocaron entre 37 g y 40 g de muestra triturada de *Usnea* sp. y *Parmotrema* sp. en un matraz de destilación, al cual se adicionó agua destilada. El sistema se mantuvo en funcionamiento continuo durante 6 a 8 horas, con temperaturas controladas de 45 ± 5 °C, a fin de evitar la degradación térmica de los compuestos bioactivos. Los vapores generados fueron conducidos a través de un refrigerante, donde se condensaron y recolectaron en fracciones líquidas. Posteriormente, estas fracciones fueron separadas, filtradas y almacenadas en frascos ámbar para evitar la foto degradación de los metabolitos extraídos.

Figura 6. Montaje de equipo para extracción por arrastre de vapor. Se observa un matraz de fondo redondo con agua en ebullición conectado a un refrigerante de reflujo, con recolección del destilado en proceso



Nota: fuente elaboración propia.

No se realizó la identificación de los compuestos presentes en los extractos; sin embargo, se recomienda realizar cromatografía en capa fina (TLC) utilizando placas de sílica gel como fase estacionaria y mezclas de acetona: ciclohexano como fase móvil, siguiendo protocolos validados y ampliamente respaldados por la literatura [7], [8]. Este análisis permitiría determinar la presencia de compuestos bioactivos liquénicos, tales como ácido *úsico*, *atranorina* y otros metabolitos secundarios con potencial farmacológico en *Usnea* sp. y *Parmotrema* sp.

La actividad antimicrobiana se evaluó mediante una adaptación del método de difusión en disco, utilizando fragmentos de papel filtro de aproximadamente 1 cm² según la disponibilidad de materiales. Las placas de agar nutritivo fueron inoculadas con cultivos mixtos de origen bucal, obtenidos por hisopado y ajustados visualmente

para asegurar una distribución homogénea. Las placas se dividieron en secciones, y en cada una se colocó un fragmento de papel filtro impregnado con 10 µL del extracto a evaluar.

Posteriormente, las placas fueron incubadas a 34 ± 1 °C durante un periodo de 24 a 48 horas. Se evaluó mediante el conteo de colonias la presencia o ausencia de crecimiento microbiano en la zona de inhibición alrededor del papel filtro impregnado con el extracto. La formación de un halo claro de inhibición, sin crecimiento de colonias en un área definida alrededor del papel, fue interpretada como un resultado positivo, indicando actividad antimicrobiana del extracto. En cambio, la ausencia de halo o el crecimiento directo de colonias en contacto con el papel filtro se consideraron como resultado negativo, es decir, sin evidencia de inhibición. Aunque esta metodología representa una evaluación cualitativa preliminar, permite detectar de manera efectiva la capacidad inhibitoria de los extractos frente a comunidades bacterianas mixtas del microbioma oral. Se recomienda complementar este análisis con mediciones del diámetro del halo y replicaciones estadísticas en estudios posteriores.

Figura 7. Diagrama de flujo del proceso experimental



Nota: adaptado de Jaramillo-Ordoñez [8] y Rodríguez et al. [3].

III. Resultados

3.1 Separación y caracterización inicial del material

Los líquenes recolectados fueron clasificados morfológicamente hasta el nivel de género, aplicando criterios taxonómicos estándares basados en claves especializadas para *Parmeliaceae* y literatura de referencia regional [26], [4]. La identificación se realizó observando el biotipo y caracteres diagnós-

ticos externos con lupa estereoscópica (10–40×). En el caso de *Usnea* sp. (biotipo fruticoso), se constató la presencia de un eje medular central elástico (hilo medular), ramificación isotómica, superficie pubescente y talos colgantes. Para *Parmotrema* sp. (biotipo folioso), se observó la cara inferior negra con venas, cilios marginales, lóbulos sorediados y talos de gran tamaño, consistentes con descripciones previas [1], [5].

Si bien no se realizaron análisis moleculares en esta fase, se reforzó la clasificación mediante comparación con especímenes depositados en el Herbario UPTC y literatura especializada en líquenes neotropicales [2], [4], [26]. La ausencia de estructuras reproductivas clave (apotecios, picnidios) limitó la identificación a nivel de género, lo cual es una práctica habitual en estudios con finalidad bioactiva preliminar, como se ha reportado en trabajos similares en Cuba y otros países latinoamericanos [2], [6], [7].

La identificación morfológica se recomienda complementar con una fase de análisis fisicoquímico mediante cromatografía en capa fina (TLC), enfocada en la detección cualitativa de metabolitos secundarios (ver sección 3.5). Para estudios posteriores, se insta a implementar técnicas adicionales como microscopía de secciones histológicas, análisis de esporas, espectroscopía UV-Vis o HPLC para una validación taxonómica y química más robusta, tal como sugieren autores como [17] y [15].

La decisión de trabajar a nivel de género se fundamentó en criterios de manejo práctico de biomasa. La separación por especie no era viable debido a la limitada cantidad de talos disponibles, lo que hubiese afectado la replicabilidad de los ensayos extractivos, situación también mencionada en estudios de bioprospección líquénica [3], [13].

Las muestras fueron sometidas a secado al aire durante 48 horas, protegidas de la luz, para preservar la integridad de los metabolitos [5]. Luego se pesaron individualmente, obteniéndose 10,05 g por especie para maceración hidroalcohólica y entre 37–40 g por especie para arrastre de vapor, siguiendo protocolos descritos en literatura [23], [24].

La cantidad de biomasa recolectada para cada género indica que tal como lo describe [30], que los géneros más frecuentes fueron *Parmotrema* con 161 registros, seguido de *Usnea* sp. con 141 registros, lo cual indica que, en el campus de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, se encuentra en mayor número de registros el género *Parmotrema* sp., para este ensayo, se tuvo en cuenta una relación en peso similar entre los dos géneros para disminuir variables. Esta diferencia sugiere una mayor abundancia relativa de *Parmotrema* sp., lo que podría relacionarse con su adaptación a las condiciones ambientales locales y plantea la posibilidad de futuras investigaciones ecológicas y etnobotánicas para comprender los factores que determinan esta distribución.

3.2 Resultados del proceso de maceración

Se realizaron extracciones por maceración hidroalcohólica con mezclas específicas para cada género. Para *Parmotrema* sp. se emplearon 8 mL de metanol, 14 mL de etanol y agua destilada; para *Usnea* sp. 15 mL de metanol y 10 mL de agua destilada. Las muestras se dejaron en reposo durante 30 días con agitación ocasional y protegidas de la luz [11], [22].

Reconocemos que la bibliografía citada en este artículo reporta tiempos de maceración típicos en el rango de 3 a 10 días para estudios de líquenes y extractos vegetales similares, lo cual constituye un procedimiento estándar para muchas aplicaciones analíticas.

La extensión del tiempo de maceración a 30 días en este trabajo fue una decisión metodológica deliberada, motivada por dos razones concretas: i) la necesidad de maximizar la extracción de metabolitos de baja solubilidad o de liberación lenta desde la matriz líquénica dada la limitada cantidad de biomasa disponible, y ii) la intención de realizar una evaluación exploratoria sobre el rendimiento extractivo en condiciones de contacto prolongado, ya que en procesos análogos (por ejemplo, en maceraciones tradicionales de matrices botánicas) se ha reportado que periodos más largos pueden incrementar la recuperación de ciertos compues-

tos y modificar el perfil fitoquímico. Estudios sobre maceraciones prolongadas en matrices vegetales y productos tradicionales han documentado cambios en la concentración de compuestos bioactivos tras maceraciones de un mes, lo que respalda la factibilidad de este enfoque cuando se justifica experimentalmente [27].

No obstante, se reconoce que la eficacia de la maceración depende fuertemente del tipo de metabolito, del solvente y de la relación solvente: biomasa; por ello, los resultados obtenidos aquí deben interpretarse como exploratorios. Recomendamos que trabajos posteriores realicen un estudio sistemático de optimización temporal (curva cinética de extracción) comparando puntos temporales representativos (por ejemplo 3, 7, 10, 15 y 30 días) y cuantificando los metabolitos de interés mediante HPLC o UHPLC-MS para establecer el tiempo óptimo de extracción para ácido *úsico*, *atrano-rina* u otros compuestos liquénicos. Este enfoque permitirá validar empíricamente si la maceración prolongada incrementa el rendimiento o si, por el contrario, favorece degradación o extracción selectiva de compuestos no deseados [28], [29].

Se observaron diferencias organolépticas notables. *Usnea* sp. presentó una textura blanda y homogénea, con un aroma fresco atribuido a compuestos volátiles menores presentes en el talo. No obstante, el ácido *úsico*, principal metabolito bioactivo de *Usnea*, es un compuesto lipofílico y no volátil; por tanto, no puede considerarse la fuente directa de la volatilidad aromática. La extracción del ácido *úsico* es favorecida por solventes hidroalcohólicos, lo que concuerda con la mayor actividad observada en los extractos por maceración. *Parmotrema* sp. mostró en cambio una consistencia más rígida y un olor terroso, probablemente asociado a terpenoides y *depsidonas* de mayor tendencia a aportar notas organolépticas amaderadas [22], [8], [5].

El rendimiento diferenció claramente a las dos especies: *Parmotrema* sp. produjo 95,73 g de extracto crudo y *Usnea* sp. 53,04 g. En volumen, se obtuvieron 77 mL de *Parmotrema* y 42 mL de *Usnea*. Estos resultados son consistentes con estudios que reportan mayor cantidad de compuestos solubles

en *Parmeliaceae* foliosas [2], [16]. Sin embargo, no se realizó cuantificación por HPLC debido a limitaciones logísticas, situación similar a la reportada en [22]. Como alternativa, se recurrió a TLC, color, densidad y olor como indicadores cualitativos [12].

3.3 Resultados de la extracción por arrastre de vapor

Los extractos obtenidos mediante arrastre de vapor fueron recolectados tras un proceso de destilación de 6 a 8 horas, mantenido a temperaturas controladas entre 40–50 °C. La biomasa inicial empleada fue de aproximadamente 37–40 g por especie, la cual fue triturada mecánicamente para favorecer una mayor relación superficie-volumen. Durante este proceso, se suspendieron esporas y se tamizaron las médulas de ambos líquenes, obteniendo un material altamente particulado, adecuado para maximizar la eficiencia de extracción de compuestos. Los restos de médula tamizados se conservaron para futuros análisis y aplicaciones.

Los líquidos recolectados fueron almacenados en frascos ámbar con el objetivo de proteger los compuestos extraídos de la fotodegradación. En términos de rendimiento cualitativo, se obtuvo un mayor volumen de extracto en *Parmotrema* sp. (145 mL) en comparación con *Usnea* sp. (33 mL). Este resultado sugiere una mayor proporción de compuestos no volátiles en *Parmotrema* sp., posiblemente asociados a terpenoides, ésteres o ácidos fenólicos de baja masa molecular, los cuales son conocidos por su afinidad con métodos de destilación.

Organolépticamente, los extractos presentaron características distintivas. *Parmotrema* sp. mostró un aroma amaderado y terroso, coherente con la extracción de terpenoides y ésteres. *Usnea* sp. emitió un olor más ácido, fresco y aromático, atribuible a compuestos volátiles menores presentes en el talo. Es importante subrayar que el ácido úsnico y varias *depsidonas* identificadas en *Usnea* son metabolitos no volátiles; por tanto, aunque no explican directamente la volatilidad del aroma, sí son los responsables principales de la actividad biológica

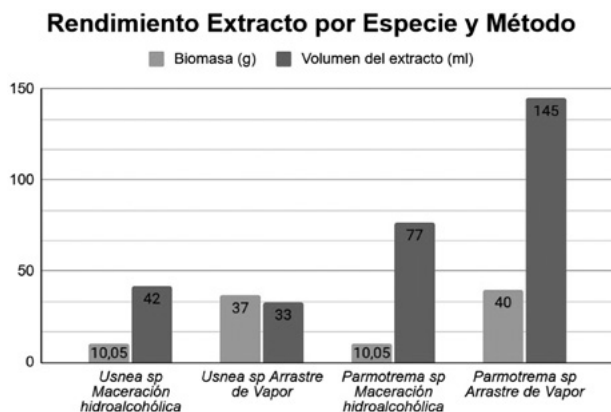
detectada y su extracción depende de la polaridad del solvente empleado [22], [9], [10].

Al finalizar el proceso de destilación, el material sólido residual en el balón fue conservado para evaluaciones posteriores. Al mes de almacenamiento, se observó crecimiento microbiano evidente, principalmente de hongos filamentosos como posibles *Trichoderma* spp. y levaduras ambientales, lo cual indica que, tras el arrastre de los compuestos volátiles, el residuo aún contenía polisacáridos y otros nutrientes aprovechables por microorganismos oportunistas. Este hallazgo también sugiere que los compuestos antifúngicos y antibacterianos se extrajeron eficientemente durante el proceso, quedando ausentes o en concentraciones bajas en el residuo sólido.

3.4 Análisis comparativo del rendimiento extractivo

El análisis descriptivo del rendimiento extractivo (Figura 1) evidencia diferencias claras y consolidadas en la literatura. En *Usnea* sp., la maceración hidroalcohólica presentó un rendimiento de 42 mL con 10,05 g de biomasa, frente a 33 mL con 37 g por arrastre de vapor, lo que coincide con Jaramillo-Ordoñez [8] y su observación de que los metabolitos de *Usnea* sp. son preferentemente solubles en mezclas hidroalcohólicas. Por su parte, *Parmotrema* sp. mostró un rendimiento superior con arrastre de vapor (145 mL con 40 g) en comparación con maceración (77 mL con 10,05 g), lo cual se atribuye a su mayor contenido de compuestos volátiles (terpenoides, ésteres) y coincide con Brakni y Ali [12]. Aunque no se aplicaron pruebas de significancia inferencial debido al enfoque exploratorio, el gráfico descriptivo permite identificar tendencias robustas—eficiencia del arrastre en *Parmotrema* sp. y de la maceración en *Usnea* sp.—y se alinea con estudios de bioprospección líquénica en Latinoamérica [3], [6], [13].

Figura 8. Comparación del rendimiento extractivo entre métodos y especies. Se observan los volúmenes obtenidos (barras azules) y la biomasa utilizada (barras verdes) para maceración hidroalcohólica y arrastre de vapor en *Usnea* sp. y *Parmotrema* sp.



Nota: fuente elaboración propia.

Sería recomendable en trabajos futuros incorporar medidas cuantitativas del diámetro del halo de inhibición y un análisis estadístico descriptivo que incluya valores de media y desviación estándar para comparar tratamientos, así como aplicar pruebas de significancia como ANOVA o la prueba t de Student cuando el diseño experimental lo permita, con el fin de aportar rigor estadístico y facilitar comparaciones bibliográficas.

3.5 Identificación de metabolitos mediante cromatografía en capa fina (TLC)

En el presente estudio no se efectuó un análisis experimental mediante TLC, por lo que la interpretación se fundamentó exclusivamente en información reportada en literatura especializada. Estudios previos han empleado placas con fase estacionaria de sílica gel y fases móviles de acetona y ciclohexano, con detección bajo luz ultravioleta a 254 y 365 nm.

De acuerdo con dichos reportes, en condiciones experimentales similares se han observado bandas fluorescentes compatibles con ácido úsnico en *Usnea* sp. (Rf entre 0,31–0,35) y con atranorina en *Parmotrema* sp. (Rf entre 0,45–0,50), compara-

das con estándares puros. Ambos metabolitos son reconocidos por su potencial bioactivo y se mencionan como compuestos de interés para estudios antimicrobianos.

Se recomienda que investigaciones posteriores incluyan TLC con patrones puros y análisis complementarios (HPLC, UHPLC-ESI-QTOF-MS o espectroscopía) para confirmar y cuantificar la presencia de estos metabolitos en los extractos evaluados.

3.6 Evaluación antimicrobiana

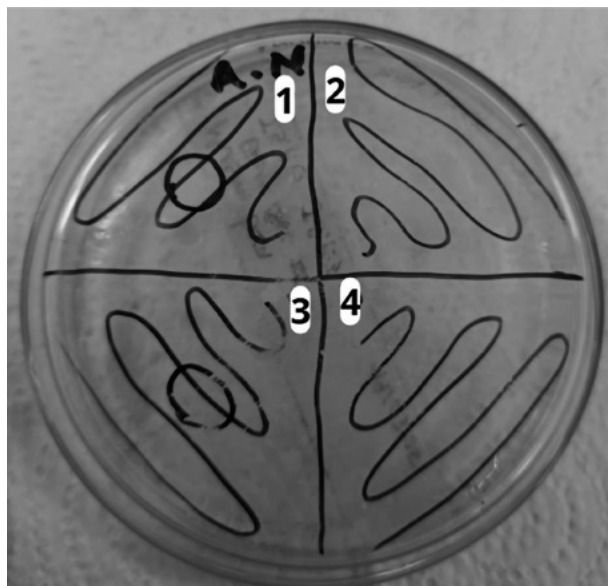
Ante la falta de cepas bacterianas certificadas, se emplearon cultivos mixtos derivados de muestras bucales humanas como modelo microbiológico preliminar para evaluar la actividad inhibitoria de los extractos. Cabe aclarar que, en la primera prueba, se aplicó la técnica de frotis por agotamiento, la cual es adecuada para el aislamiento de colonias individuales, midiendo su capacidad para inhibir el crecimiento (*in vitro*)

3.6.1 Prueba de inhibición de primeros extractos por maceración

Se dividieron placas de agar nutritivo en cuadrantes y se aplicaron 10 µL de cada extracto macerado. A las 24 h de incubación a 37 °C, el extracto de *Usnea* sp. mostró una zona clara de inhibición, mientras que *Parmotrema* sp. no evidenció efecto significativo (Imagen 7). Este comportamiento coincide con el mayor poder antimicrobiano atribuido al ácido úsnico en *Usnea* [8], [12].

Sin embargo, dado el método de siembra empleado, la delimitación de los halos no fue óptima. Además, el control negativo utilizado consistió en cuadrantes sin aplicación de extracto, lo cual no iguala las condiciones experimentales. Para mejorar la confiabilidad, se recomienda que el control negativo consista en papel filtro impregnado con agua destilada estéril, tal como en el tratamiento experimental, para descartar efectos mecánicos o contaminantes.

Figura 9. Prueba preliminar de inhibición bacteriana mediante aplicación por goteo de extractos macerados de líquenes. (1) Extracto hidroalcohólico de *Usnea* sp.; (3) Extracto hidroalcohólico de *Parmotrema* sp.; (2, 4) Controles negativos sin extracto. Evidencia de inhibición del crecimiento bacteriano



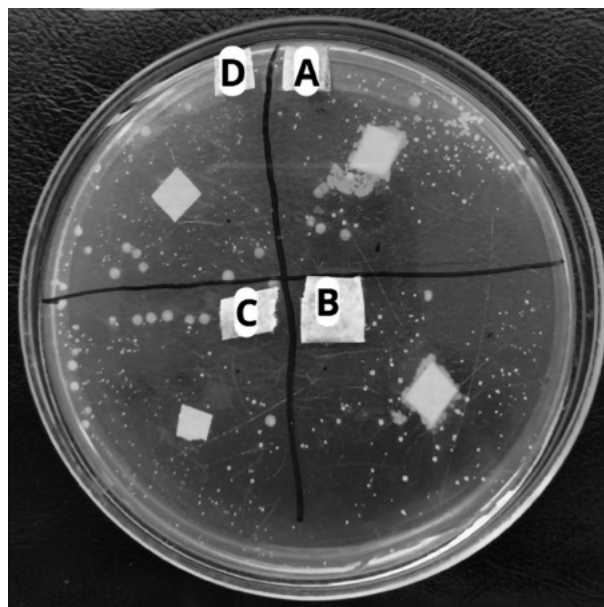
Nota: fuente elaboración propia.

3.6.2 Pruebas de inhibición comparativas entre extractos por el método de maceración y arrastre de vapor

En réplicas posteriores, se impregnaron fragmentos de papel filtro (1 cm²) con cada extracto y se ubicaron en diferentes cuadrantes. Los extractos de *Usnea* sp. mantuvieron actividad en ambos métodos, aunque los macerados presentaron pérdida de eficacia tras dos meses de almacenamiento sin protección lumínica, fenómeno documentado en extractos líquénicos [19]. En *Parmotrema* sp., se observó inhibición solamente a concentraciones ≥ 10 mg/mL, lo que sugiere menor potencia de *atranorina* o baja solubilidad en el medio [2], [12] (Imagen 8 y 9).

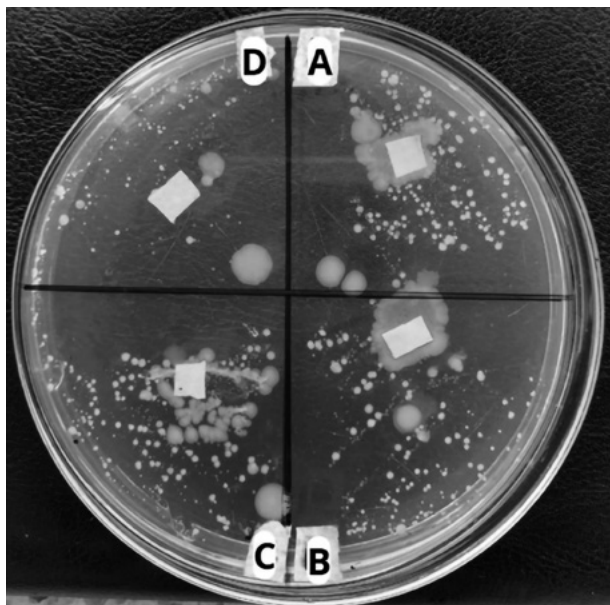
La falta de inhibición de *Parmotrema* a bajas concentraciones coincide con estudios que describen una actividad más débil de *atranorina* [2], [12].

Figura 10. Prueba de inhibición comparativa entre los extractos por maceración y arrastre de vapor. (En el sentido de las agujas del reloj): A y B corresponden a los extractos por maceración. C y D corresponden a los extractos por arrastre de vapor. Evidencia de inhibición de crecimiento de extractos de *Usnea* sp.



Nota: fuente elaboración propia.

Figura 11. Prueba de inhibición comparativa entre los extractos por maceración y arrastre de vapor. (En el sentido de las agujas del reloj): A y B corresponden a los extractos por maceración. C y D corresponden a los extractos por arrastre de vapor. Evidencia de inhibición de crecimiento de extractos de *Parmotrema* sp.



Nota: fuente elaboración propia.

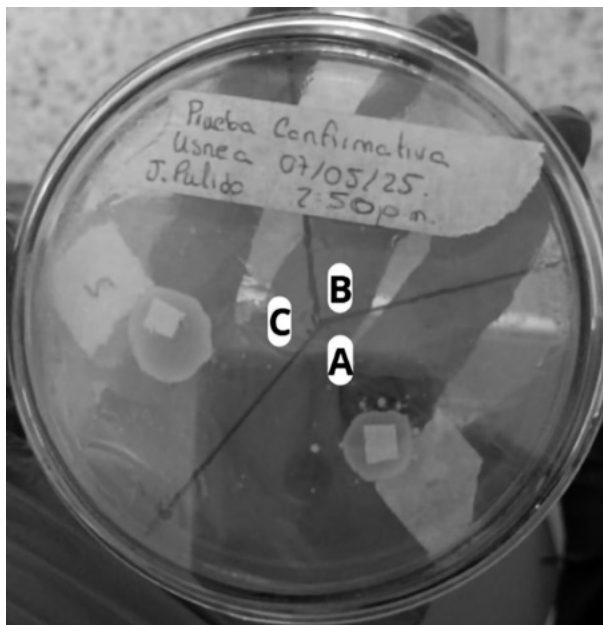
Adicionalmente, se detectó crecimiento de hongos filamentosos y levaduras en los extractos obtenidos por arrastre de vapor que habían sido almacenados por más de un mes, lo cual puede estar relacionado con el contenido residual de polisacáridos y otros compuestos nutritivos que favorecen el desarrollo de microorganismos oportunistas en ausencia de condiciones asépticas estrictas, tal como reportan Vaillant-Flores et al. [6].

Por otro lado, los extractos de *Usnea* sp. mostraron zonas claras de inhibición del crecimiento bacteriano desde concentraciones tan bajas como 5 mg/mL, indicando una mayor eficacia antimicrobiana. Este resultado refuerza la hipótesis de que *Usnea* sp. posee compuestos más activos o mejor extraíbles en condiciones hidroalcohólicas, probablemente derivados del ácido úsnico u otros depsidonas característicos.

3.6.3 Prueba confirmativa de inhibición con los extractos por ambos métodos de *Usnea* sp

Se realizó una tercera réplica de la prueba de inhibición con el fin de confirmar la actividad antimicrobiana de los extractos de *Usnea* sp. obtenidos por dos métodos: maceración hidroalcohólica y arrastre de vapor. Esta prueba se motivó por la evidente superioridad inhibidora de *Usnea* sp. frente a *Parmotrema* sp., observada en ensayos previos.

Figura 12. Prueba confirmatoria de inhibición entre los extractos por maceración y arrastre de vapor. A. corresponde al extracto por arrastre de vapor, B. corresponde al control negativo con agua destilada estéril y C. corresponde al extracto por maceración. Evidencia de la prueba de inhibición de crecimiento de extractos de *Usnea* sp.



Nota: fuente elaboración propia.

Los resultados positivos de *Usnea* sp. respaldan la bibliografía sobre su actividad antimicrobiana frente a cepas mixtas y puras, incluida *Staphylococcus aureus* y *Pseudomonas aeruginosa* [8], [13].

Para el ensayo, se dividió un medio de cultivo en tres secciones iguales. En esta prueba sí se incluyó como control negativo un disco de papel impregnado con agua destilada estéril, lo que permitió confirmar que la inhibición observada se debía al extracto y no a otros factores. En la primera (A), se colocó papel filtro impregnado con extracto de *Usnea* sp. obtenido por arrastre de vapor, con una antigüedad superior a 18 días. Este extracto había sido almacenado en condiciones no completamente estériles, y presentaba indicios visuales de crecimiento fúngico en el frasco de almacenamiento, posiblemente debido a la presencia de polisacáridos residuales.

La segunda sección (B) se utilizó como control negativo, tratada únicamente con agua destilada estéril. En la tercera (C), se aplicó extracto de *Usnea* sp. obtenido por maceración, que llevaba más de tres meses desde su preparación y mostraba la presencia de precipitados con estructuras levaduriformes, indicando posible contaminación o descomposición parcial.

Tras la incubación, se evidenció el crecimiento microbiano en las tres secciones, incluyendo la correspondiente al extracto por arrastre de vapor, lo cual sugiere una pérdida de eficacia antibacteriana con el tiempo, posiblemente por degradación de los compuestos no volátiles o contaminación durante el almacenamiento. Este resultado también pone en evidencia la dificultad de mantener condiciones asépticas durante la conservación de los extractos y la posible presencia de azúcares residuales que actúan como sustrato para hongos oportunistas. Por lo tanto, se destaca la importancia de emplear técnicas de conservación más rigurosas o procesos de purificación posteriores si se busca extender la vida útil de estos bio extractos.

Estos resultados confirman que *Usnea* sp. presenta un mayor potencial antimicrobiano, aunque también evidencian la necesidad de optimizar el método de siembra y la inclusión de controles experimentales adecuados para garantizar la reproducibilidad y la validez de las observaciones.

3.7 Propuesta de integración a productos

Con base en los resultados obtenidos, se sugiere el desarrollo de productos farmacéuticos naturales con los extractos de *Usnea* sp. como base, especialmente por su destacada actividad antibacteriana. Las pruebas de inhibición preliminares demostraron su potencial como ingrediente activo en formulaciones como ungüentos, desodorantes y antisépticos. Se recomienda considerar el método de extracción, tiempo de almacenamiento y tipo de envase como variables críticas para mantener la estabilidad de los metabolitos. Para mejorar la conservación, se sugiere el uso de frascos ámbar, refrigeración y adición de conservantes naturales si fuera necesario.

IV. Discusión

Los resultados obtenidos permiten interpretar de manera integral el comportamiento extractivo y la actividad biológica de dos especies de líquenes: *Usnea* sp. (fruticoso) y *Parmotrema* sp. (folioso). A partir de las diferencias observadas en su morfología, composición química y efecto antimicrobiano, es posible extrapolar implicaciones relevantes tanto para futuras investigaciones como para el desarrollo de productos con base natural.

La caracterización morfológica inicial y la preparación diferencial del material vegetal fue fundamental para establecer una base comparable entre las dos especies. El uso de métodos paralelos de extracción, como la maceración hidroalcohólica y el arrastre de vapor, permitió evidenciar que *Parmotrema* sp. presentó un mayor rendimiento en volumen y peso de los extractos obtenidos, lo que podría atribuirse a su estructura más densa y a la mayor cantidad de compuestos no volátiles disponibles para ser extraídos [1]. Sin embargo, esta mayor cantidad no se tradujo en una mayor eficacia biológica, ya que, como se discutirá más adelante, *Usnea* sp. fue consistentemente más activa frente a cultivos bacterianos.

Con relación al tipo de metabolitos extraídos, los resultados de cromatografía en capa fina (TLC) confirman la presencia de ácido úsnico en *Usnea* sp. y atranorina en *Parmotrema* sp., compuestos bien

conocidos por su actividad bioactiva [2]. La diferencia en el perfil químico entre ambas especies puede explicar en parte los resultados obtenidos en las pruebas de inhibición microbiana. El ácido *úsrico* ha sido ampliamente reportado por sus propiedades antimicrobianas, antiinflamatorias y citotóxicas [3], mientras que la *atranorina* posee una actividad menos potente y dependiente de su concentración y entorno de aplicación [4].

Los ensayos microbiológicos comparativos confirman estos hallazgos. El extracto macerado de *Usnea* sp. presentó un efecto inhibitorio notable desde concentraciones tan bajas como 5 mg/mL, lo que indica una alta eficacia antimicrobiana incluso con extractos crudos. Esta actividad fue replicada parcialmente con el extracto obtenido por arrastre de vapor, aunque con una ligera disminución atribuible a la degradación de compuestos no volátiles durante el almacenamiento o a la menor afinidad de ciertos metabolitos con este método extractivo. Este comportamiento ha sido reportado previamente, donde se destaca que el ácido *úsrico* es más soluble y estable en mezclas hidroalcohólicas que en sistemas puramente acuosos o no volátiles [5].

En contraste, *Parmotrema* sp. mostró actividad antibacteriana sólo en concentraciones superiores a 10 mg/mL, lo que sugiere una menor potencia o biodisponibilidad de sus compuestos activos. Estos resultados concuerdan con lo reportado por estudios realizados en Cuba, donde se observaron efectos antimicrobianos más discretos para *atranorina* en comparación con otros metabolitos líquénicos [2].

El crecimiento microbiano observado en los extractos almacenados por más de un mes, especialmente en los obtenidos por arrastre de vapor, pone de manifiesto un aspecto relevante: la necesidad de protocolos de conservación rigurosos. La presencia de hongos y levaduras puede deberse a polisacáridos residuales que sirven como sustrato para microorganismos oportunistas. Este fenómeno ya ha sido documentado en estudios que analizan la estabilidad de extractos vegetales y líquénicos durante el almacenamiento [6]. Por lo tanto, resulta imperativo considerar variables como el tipo de

envase, la exposición a la luz y la refrigeración para prolongar la vida útil y la eficacia de los extractos.

Desde una perspectiva aplicada, los hallazgos de este estudio respaldan el potencial uso de extractos de *Usnea* sp. en productos cosméticos y farmacéuticos naturales, especialmente como agentes antimicrobianos en ungüentos, desodorantes o soluciones tópicas. Sin embargo, su implementación requiere estudios más avanzados de caracterización química cuantitativa, análisis de toxicidad, pruebas con cepas bacterianas certificadas y ensayos clínicos en modelos más robustos. La variabilidad en la concentración de metabolitos entre especies, biotipos y condiciones ecológicas locales también debe ser tomada en cuenta, dado que los líquenes son organismos simbióticos extremadamente sensibles a factores ambientales, como el pH del sustrato, la altitud y la contaminación atmosférica [1], [7].

V. Conclusiones

El presente estudio permitió evidenciar diferencias significativas entre los líquenes *Usnea* sp. y *Parmotrema* sp. en cuanto a su morfología, composición química, rendimiento extractivo y eficacia antimicrobiana. Aunque *Parmotrema* sp. presentó un mayor rendimiento en volumen y peso de extracto obtenido por arrastre de vapor, los extractos hidroalcohólicos de *Usnea* sp. demostraron una actividad antimicrobiana más potente, incluso a concentraciones bajas (desde 5 mg/mL), lo que sugiere una mayor concentración o biodisponibilidad de compuestos activos, especialmente ácido *úsrico*.

La actividad antimicrobiana diferencial indica que la calidad bioactiva del extracto no depende únicamente de la cantidad extraída, sino de la naturaleza y estabilidad de los metabolitos secundarios presentes. El ácido *úsrico*, presente en *Usnea* sp., es conocido por su amplio espectro de acción antimicrobiana, lo que explicaría su mayor eficacia frente al extracto de *Parmotrema* sp., cuyo principal metabolito identificado fue la *atranorina*.

Por otro lado, se observó que los extractos obtenidos mediante arrastre de vapor presentaron mayor inestabilidad microbiológica durante el almacenamiento, siendo propensos a la proliferación de hongos y levaduras después del primer mes. Esto resalta la importancia de implementar métodos de conservación adecuados o de preferir técnicas de extracción como la maceración hidroalcohólica, que presentó mejor rendimiento en términos de estabilidad y bioactividad.

Igualmente, este estudio destaca el valor biotecnológico de los líquenes como fuentes naturales de compuestos antimicrobianos, particularmente *Usnea* sp., que surgen como un candidato promotor para el desarrollo de productos farmacéuticos, cosméticos o fitoterapéuticos. Sin embargo, es indispensable continuar con estudios complementarios que incluyan la estandarización de los extractos, análisis de toxicidad, pruebas con cepas bacterianas certificadas y evaluación de variaciones según el entorno ecológico, ya que factores como la altitud, la contaminación atmosférica y el tipo de sustrato influyen en la producción de metabolitos liquénicos.

VI. Referencias

- [1] D. Simijaca, M. Morales-Puentes, y C. Díaz, "Líquenes y contaminación atmosférica en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Boyacá, Colombia," *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, vol. 3, pp. 69–88, 2011, Doi: 10.19053/01217488.282.
- [2] D. Rosabal López, "Potencial terapéutico de los metabolitos liquénicos y su uso en Cuba. Retos y perspectivas," *Rev. Cubana Med. Nat. Tradic.*, vol. 4, 2022. [En línea]. Disponible: <https://revmnt.sld.cu/index.php/rmnt/article/view/208>
- [3] O. E. Rodríguez A., W. A. Andrade B., F. E. Díaz L., y B. Moncada, "Actividad antimicrobiana de líquenes de la cuenca alta del río Bogotá," *Nova*, vol. 13, no. 23, pp. 47–64, 2015. [En línea]. Disponible: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-24702015000100006
- [4] M. D. Bertoni, M. T. Adler, y M. Maier, "Cultivo 'in vitro' de micobiontes de *Parmotrema eciliatum* y *Flavoparmelia exornata* (Parmeliaceae, Ascomycota liquenizados) con producción de triglicéridos," *Bol. Soc. Argent. Bot.*, vol. 34, pp. 179–183, 2000.
- [5] C. Illana, "Líquenes usados en perfumería," *Bol. Soc. Micol. Madrid*, vol. 40, pp. 217–213, 2016.
- [6] D. I. Vaillant-Flores, M. Gómez-Peralta, C. R. Romeu-Carballo, R. Ramírez-Ochoa, y Á. Porras-González, "Actividad antifúngica de extractos de tres especies de líquenes en Cuba," *Agron. Mesoam.*, vol. 26, no. 2, pp. 345–350, 2015, Doi: 10.15517/am.v26i2.19328.
- [7] D. I. Vaillant-Flores, "Los líquenes, una alternativa para el control de fitopatógenos," *Fitosanidad*, vol. 18, no. 1, pp. 51–57, 2014.
- [8] C. E. Jaramillo-Ordoñez, "Actividad antifúngica y antibacteriana *in vitro* del extracto etanólico de *Usnea laevis* frente a *Candida albicans*, *Staphylococcus aureus* y *Pseudomonas aeruginosa*," *Rev. Med. Hered.*, vol. 31, no. 3, pp. 169–174, 2020, Doi: 10.20453/rmh.v31i3.3806.
- [9] C. Fernández Moriano, M. Gómez-Serranillos, y A. Crespo, "Antioxidant potential of lichen species and their secondary metabolites: A systematic review," *Pharm. Biol.*, vol. 54, pp. 1–17, 2015, Doi: 10.3109/13880209.2014.1003354.
- [10] C. Fernández Moriano, P. Divakar, A. Crespo, M. Gómez-Serranillos, "Neuroprotective activity and cytotoxic potential of two Parmeliaceae lichens: Identification of active compounds," *Phytomedicine*, vol. 22, 2015, Doi: 10.1016/j.phymed.2015.06.005.

- [11] M. Kello et al., "Screening evaluation of anti-proliferative, antimicrobial and antioxidant activity of lichen extracts and secondary metabolites *in vitro*," *Plants*, vol. 12, no. 3, p. 611, 2023, Doi: 10.3390/plants12030611.
- [12] R. Brakni y A. M. Ali, "Antibacterial activity of the chloroform, acetone, methanol and aqueous extracts of Algerian lichens," *Jordan J. Pharm. Sci.*, vol. 11, no. 2, 2018. [En línea]. Disponible: <https://journals.ju.edu.jo/JJPS/article/view/101814>
- [13] C. Condò et al., "Lichens as a natural source of compounds active on microorganisms of human health interest," *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 3, p. 1976, 2023, Doi: 10.3390/app13031976.
- [14] L. Abuiraq, G. Kanan, M. Wedyan, y A. El-Oqlah, "Efficacy of extracts of some lichens for potential antibacterial activity," Unpublished.
- [15] M. Srinivas, K. V. Siva Shanmugam, y H. G. Neelakantan, "Natural product investigation in lichens: Extraction and HPLC analysis of secondary compounds in mycobiont cultures," in *Methods Mol. Biol.*, vol. 2489, pp. 459–468, 2022, Doi: 10.1007/978-1-0716-2273-5_24.
- [16] S. Komaty et al., "Efficiency and selectivity of ionic liquids in microwave-assisted extraction of major lichen phenolic compounds: A scalable process with recycling of ionic liquids," *Phytochem. Anal.*, vol. 32, no. 4, pp. 592–600, 2021, Doi: 10.1002/PCA.3008.
- [17] D. Parrot et al., "Qualitative and spatial metabolite profiling of lichens by a LC–MS approach combined with optimised extraction," *Phytochem. Anal.*, vol. 26, no. 1, pp. 23–33, 2015, Doi: 10.1002/PCA.2532.
- [18] Ł. Furmanek et al., "A spectrophotometric analysis of extracted water-soluble phenolic metabolites of lichens," *Planta*, vol. 260, no. 2, 2024, Doi: 10.1007/s00425-024-04474-3.
- [19] M. Piñeiro et al., "Biological activities of *Usnea lethariiformis* lichen extracts and UHPLC-ESI-QTOF-MS analysis of their secondary metabolites," *Front. Pharmacol.*, vol. 15, 2025, Doi: 10.3389/fphar.2024.1508835.
- [20] M. Mohammadi, V. Zambare, Z. E. Suntres, y L. P. Christopher, "Isolation, characterization, and breast cancer cytotoxic activity of gyrophoric acid from the lichen *Umbilicaria muhlenbergii*," *Processes*, vol. 10, no. 7, p. 1361, 2022, doi: 10.3390/pr10071361.
- [21] R. Kalra, X. A. Conlan, C. Areche, R. Dilawari, y M. Goel, "Metabolite profiling of the Indian food spice lichen, *Pseudevernia furfuracea* combined with optimised extraction methodology to obtain bioactive phenolic compounds," *Front. Pharmacol.*, vol. 12, p. 629695, 2021, doi: 10.3389/FPHAR.2021.629695.
- [22] M. Kosanić, "Extracts of five *Cladonia* lichens as sources of biologically active compounds," *Farmacia*, vol. 66, no. 4, pp. 644–651, 2018, Doi: 10.31925/FARMACIA.2018.4.13.
- [23] L. J. Rao, "Improved chromatographic method for the purification of phenolic constituents of the lichen *Parmotrema*," Unpublished, 1998.
- [24] R. Frenák et al., "Isolation and identification of lichen substances for biological and ecological roles," in *Lichenology: Past, Present and Future*, Springer Int. Publ., pp. 1–66, 2023, Doi: 10.1007/978-3-031-30037-0_29-1.
- [25] D. Fahselt, "Protocols in lichenology: Culturing, biochemistry, ecophysiology and use in biomonitoring," *Lichenologist*, vol. 34, no. 3, p. 273, 2002, Doi: 10.1006/LICH.2002.0388.
- [26] Sipman, H.J.M. & Aguirre C., J. (1982). Contribución al conocimiento de los líquenes de Colombia - I. Clave genérica para los líquenes foliosos y fruticosos de los páramos colombianos. *Caldasia*, 13(64): 603-634

- [27] M. Šenica and M. Mikulic-Petkovsek, "Changes in beneficial bioactive compounds in eight traditional herbal liqueurs during a one-month maceration process," *J. Sci. Food Agric.*, vol. 100, 2019, Doi: 10.1002/jsfa.10044.
- [28] F. Salgado *et al.*, "Secondary metabolite profiling of species of the genus *Usnea* by UHPLC-ESI-OT-MS-MS," *Molecules*, vol. 23, no. 1, p. 54, 2018, Doi: 10.3390/molecules23010054.
- [29] S. Dresler, I. Baczewska, O. Mykhailenko *et al.*, "Extraction of lichen bioactive compounds using volatile natural deep eutectic solvents and comparative analytical approaches," *Sci. Rep.*, vol. 15, p. 22742, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-08069-0.
- [30] N. Ramírez-Morán, M. León, and R. Lücking, "Uso de biotipos de líquenes como bioindicadores de perturbación en fragmentos de bosque altoandino (Reserva Biológica Encenillo, Colombia)," *Caldasia*, vol. 38, pp. 31–52, 2016, Doi: 10.15446/caldasia.v38n1.57821.



Imagen solo de referencia.



¿Qué saben los estudiantes y docentes de pregrado de carreras orientadas al estudio de las TIC sobre la interactividad y cómo afecta su formación académica? Estudio de caso en la Universidad Católica Luis Amigó

What do Undergraduate Students and Faculty in ICT- Oriented Programs Know About Interactivity and How it Affects their Academic Training? A Case Study at Universidad Católica Luis Amigó

Jaime Alberto Villa Lopera¹, Lina María Montoya Suárez²

Tipo de Artículo: Investigación reflexión.

Recibido: 21/03/2025. **Aprobado:** 09/06/2025. **Publicado:** 12/12/2025

Resumen: La interactividad es un elemento fundamental en la educación superior, ya que puede ayudar a los estudiantes a desarrollar su creatividad, mejorar su motivación, aumentar participación en el aprendizaje y adquirir conocimientos y habilidades de forma más efectiva. Un estudio de caso realizado en la Universidad Católica Luis Amigó, encontró que los estudiantes y docentes de pregrado de carreras orientadas al estudio de las TIC tienen un

conocimiento limitado sobre lo que es la interactividad y cómo puede ser aplicada. Estos resultados sugieren que es necesario mejorar la comprensión de la interactividad entre los estudiantes y docentes de educación superior, para aumentar los niveles de interactividad en los contenidos y cursos virtuales. Cabe resaltar que los OVA interactivos son una herramienta eficaz que puede contribuir al mejoramiento de las experiencias educativas y estos

¹ Autor correspondiente: Jaime Alberto Villa Lopera. Mayor título: Estudiante de Ingeniería de Sistemas. Filiación institucional: Universidad Católica Luis Amigó. País: Colombia, Ciudad: Medellín. Correo electrónico: jaime.villalo@amigo.edu.co ORCID: 0009-0002-3816-5233.

² Autor correspondiente: Lina María Montoya Suárez. Mayor título: Docente investigadora grupo SISCO, Ingeniera de Sistemas. Filiación institucional: Universidad Católica Luis Amigó. País: Colombia, Ciudad: Medellín. Correo electrónico: lina.montoyasu@amigo.edu.co ORCID: 0000-0003-4381-1164.

deben ser concebidos como interactivos desde su diseño y construcción.

Palabras clave: interactividad; OVA interactivos; educación superior; aprendizaje; comprensión.

Abstract: Interactivity is a fundamental element for higher education, as it can help students develop their creativity, improve their motivation and engagement in learning, and acquire knowledge and skills more effectively. A case study carried out at the Luis Amigó Catholic University found that undergraduate students and teachers of careers oriented to the study of ICT have limited knowledge about what interactivity is and how it can be applied. These results suggest that it is necessary to improve the understanding of interactivity among higher education students and teachers, to increase the levels of interactivity in virtual content and courses. It should be noted that interactive VLOs are an effective tool that can contribute to the improvement of educational experiences, and these must be conceived as interactive from their design and construction.

Keywords: Interactivity; interactive VLOs; higher education; learning; understanding.

I. Introducción

La educación superior se encuentra en un proceso de transformación constante, impulsada por el desarrollo de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC). Esto ha permitido incorporar nuevas metodologías y herramientas educativas en las que se encuentran los Objetos Virtuales de Aprendizaje (OVA).

Este proyecto surge como aporte a la mejora de los OVAs para convertirlos en elementos interactivos y a la necesidad de indagar acerca del conocimiento sobre la interactividad de los OVAs en los estudiantes y docentes de pregrado de carreras orientadas al estudio de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC), así como saber cuál es el impacto en su formación académica.

Esta investigación forma parte de un proyecto en curso para mejorar el diseño de OVA y lograr que estos sean realmente interactivos, y cuenten con herramientas para su construcción.

Cabezuelo Lorenzo & Martínez Gutiérrez [1] plantean la definición de interactividad desde una comunicación bidireccional entre el usuario y la máquina, que puede convertirse en interminable e infinita gracias a la expansión del Internet, convirtiendo al usuario en protagonista, lo que permite establecer una retroalimentación constante con los diversos sistemas de información, pero sin dejar de lado al ser humano como eje principal en este proceso. Por lo que se hace necesaria la revisión de contenidos de manera frecuente en el campo educativo, tal es el caso de la interactividad en los OVA.

La interactividad puede tener un impacto positivo en la formación tanto de los estudiantes como de los docentes. Por ejemplo, puede ayudar a los estudiantes a desarrollar un pensamiento crítico y creativo de manera más autónoma, mejorar su motivación, su participación en el aprendizaje y adquirir conocimientos y habilidades de forma más efectiva. Aunado a lo anterior, los OVA interactivos posibilitan que la enseñanza y el aprendizaje sean una experiencia más enriquecedora y eficiente, contribuyendo al mejoramiento de las experiencias educativas, permitiendo a los docentes ampliar, expresar, potenciar y comunicar el contenido de los cursos e integrar las TIC en su metodología de enseñanza.

II. Antecedentes

Este proyecto se estructura de la siguiente manera: En la sección II, se describen los antecedentes y se definen los conceptos sobre la interactividad y los OVA interactivos, en la sección IV, se resume la metodología empleada, en la sección V se exponen y analizan los resultados más importantes y, por último, en la sección VI, se presentan las conclusiones.

La interactividad es un concepto que se puede definir de muchas maneras. En el ámbito educativo, se proponen un conjunto de técnicas para promover

el aprendizaje colaborativo, esta serie de técnicas se dividen en dos grupos principales: técnicas de discusión y técnicas de trabajo colaborativo. Este último grupo se destaca por incluir el aprendizaje colaborativo a través de proyectos que, en el contexto educativo actual y a través de las TIC, permiten crear un contenido interactivo, como páginas web, Entornos Virtuales de Aprendizaje (EVA), videoconferencias sincrónicas interactivas, simulaciones y mundos virtuales, estrategias de gamificación, recursos multimedia interactivos, laboratorios virtuales, foros y redes sociales académicas, entre otros [2].

De acuerdo con los cambios generacionales, Caldeiro & Castro [3], plantean que, desde la Generación Z, -agrupada aproximadamente entre los años 1995 y 2010-, se hace necesario implementar cambios en las políticas educativas, así como en las herramientas que se utilizan para generar conocimiento, con el fin de disminuir las brechas sociales y educativas. Señalan que uno de los factores que impulsa esta actualización permanente es la obsolescencia programada, lo cual genera la necesidad de que se esté actualizado e interconectado constantemente, siendo este escenario una oportunidad para mejorar los OVA y transformarlos en OVAs interactivos (OVA_I).

García & López [4], afirman que las demandas de la Generación Z requieren un replanteamiento en la forma en que se diseñan los recursos educativos digitales para promover una participación y un aprendizaje personalizado. Asimismo, Pérez señala que las tecnologías emergentes ofrecen oportunidades únicas para superar las barreras en el acceso al conocimiento y mejorar la inclusión educativa [5].

Esta situación exige la inclusión de herramientas en el contexto académico para disminuir la brecha entre la realidad social y la educativa con el uso de herramientas digitales. Una necesidad a la que contribuye la obsolescencia programada, que provoca en el sujeto la necesidad de permanecer "actualizado" e interconectado en todo momento. En este sentido, la virtualidad, la instantaneidad o la tendencia hacia la informatización no solo transforman las dinámicas de aprendizaje, sino que también conducen, de forma irremediable, a una actualización imprescindible a

nivel planetario. Esto implica que las instituciones educativas deben garantizar no solo el acceso a estas tecnologías, sino también la capacitación constante de estudiantes y docentes para enfrentar los retos de un mundo en constante cambio [3].

Especialmente en el ámbito educativo, la interactividad debe hacer eco de la realidad y ha de contribuir a eliminar los muros entre la realidad social y la escolar, incluyendo elementos clave para la enseñanza y el aprendizaje mediados por las TIC y las transformaciones digitales, donde la educación sea un medio accesible a todo público [3].

En concordancia con lo anterior, gracias a la globalización del Internet, la interactividad se ha convertido en un elemento fundamental para el desarrollo, creación y actualización tanto de dispositivos como plataformas tecnológicas, impulsando el crecimiento e implementación de los OVA interactivos en diferentes contextos educativos como la educación superior.

Uno de los avances más significativos que van asociados a la interactividad es la realidad virtual. En la actualidad, la realidad virtual se está incorporando rápidamente en el campo educativo, especialmente en la educación superior. Un ejemplo de ello es el aprendizaje inmersivo aplicado en algunas universidades públicas de Malasia. Allí se han desarrollado diversas experiencias inmersivas con modelos y videos en tercera dimensión, donde los sentidos del oído y la vista de los estudiantes se sumergen en experiencias reales relacionadas con su futuro campo laboral, proporcionando habilidades técnicas en situaciones reales adquiridas a través de la propia experiencia de los estudiantes [6].

Esto contribuye tanto al aprendizaje como al mejoramiento de las experiencias educativas, permitiendo a los docentes ampliar, expresar, potenciar y comunicar el contenido de los cursos, e integrar las TIC en su metodología de enseñanza de forma más inmersiva, lo que lleva a la interactividad a su máxima expresión, es decir, la inmersión de los sentidos humanos en los contenidos interactivos [7].

De acuerdo con el concepto de metodologías activas, los estudiantes se convierten en protagonistas tanto en el aula como fuera de ella, siendo responsables de su propio aprendizaje junto al docente como guía. Entre las metodologías activas más reconocidas, se encuentra el aprendizaje cooperativo. Abellán Toledo y Herrada Valverde [8] establecen que, mediante grupos reducidos, los estudiantes pueden buscar soluciones a temas propuestos por el docente a través de una serie de objetivos a alcanzar. Así, los alumnos, mediante la cooperación y de manera unificada, pueden plantear diversas soluciones al problema, lo que, a su vez enriquecerá el proceso de aprendizaje e incrementará el rendimiento académico, ya que, mediante esta metodología, los estudiantes desarrollan un nivel más alto de razonamiento superior, pensamiento crítico y motivación intrínseca [8].

Con relación a los contenidos interactivos, Bekkari et al. [9] proponen una arquitectura de software para la creación dinámica de objetos visuales en aplicaciones para internet con contenido interactivo. Esta arquitectura está diseñada para ser flexible y adaptable en una amplia gama de aplicaciones como la realidad virtual, la realidad aumentada y gamificación, entre otros. Con respecto a esto, se basa en un modelo de componentes, en el que cada componente tiene una función específica y puede conectarse entre sí [6].

Por esta misma línea, Won-Sik Cheong et al. [10] presentan un software que contiene una interfaz gráfica ampliada que permite crear, editar y manipular contenidos interactivos en diferentes escenarios.

Referente a lo anterior, se evidencia que estos avances tecnológicos en el ámbito de la interactividad se alinean con las investigaciones de otros autores que han explorado aspectos relacionados con la creación y aplicación de contenido interactivo en diferentes contextos educativos para la enseñanza y educación, como es el caso de Cabezuelo & Martínez quienes realizaron una revisión conceptual y contextual sobre la interactividad en el ámbito tecnológico, destacando su importancia como elemento clave para mejorar la experiencia del usuario y promover un aprendizaje más participativo y dinámico [11].

Asimismo, Cross & Angelo discuten en su libro "Classroom Assessment Techniques: A Handbook for College Teachers" [2] diversas estrategias y técnicas de evaluación que incorporan elementos interactivos para mejorar la retroalimentación y el compromiso de los estudiantes en el proceso de aprendizaje.

Igualmente, Mavridis, en su propuesta "A Review of Verbal and Non-Verbal Human-Robot Interactive Communication" [12], realiza una revisión exhaustiva sobre la comunicación interactiva entre humanos y robots, abordándola desde la perspectiva de los contenidos interactivos y la interactividad. En este contexto, define la comunicación interactiva como un intercambio de información entre dos o más partes que permite generar un entendimiento mutuo.

Esta definición destaca la relevancia de la inteligencia artificial como un componente esencial de la interactividad en la actualidad, posicionándola como un pilar fundamental en las interacciones entre humanos y máquinas [13].

En consecuencia, la interactividad en la educación y en el desarrollo de OVAS, puede definirse como la capacidad de los estudiantes para interactuar con los contenidos, los recursos y los demás participantes del proceso de aprendizaje a través de las TIC, para construir su propio conocimiento de manera significativa y eficiente, mediante el acompañamiento del docente.

Esto conlleva a que se categoricen los diferentes tipos de interactividad así:

- **Interactividad exploratoria:** el usuario explora el contenido del sistema sin modificarlo.
- **Interactividad manipulativa:** el usuario manipula el contenido del sistema, pero no lo crea.
- **Interactividad contributiva:** el usuario crea nuevo contenido para el sistema [14].

Los OVA interactivos son recursos digitales que se utilizan en diferentes campos. En el ámbito

educativo, son una herramienta que favorece y complementa el aprendizaje en una variedad de cursos. Los OVA interactivos pueden tener niveles de interactividad, de los cuales dependerá el enfoque que se le atribuya [15, 16, 17].

Es por ello por lo que, para el desarrollo de dicho OVA, se debe tener en cuenta aspectos como la planificación, diseño, desarrollo, implementación y evaluación de este, con el fin de validar su eficiencia y eficacia de acuerdo con el nivel de interactividad [18, 19, 20].

Garrido Aragón [21], propone la implementación de los OVA interactivos en realidad inmersiva para incentivar el desarrollo computacional y analítico de los estudiantes, permitiendo a estos aprender de forma personalizada y autónoma, lo que favorece una retroalimentación constante entre docente y estudiante [22, 23].

III. Metodología

Este proyecto de investigación es un estudio de caso. El objetivo es conocer el nivel de conocimiento que tienen los estudiantes y docentes de pregrado de carreras orientadas al estudio de las TIC de la Universidad Católica Luis Amigó. La población objetivo de esta investigación son los estudiantes y docentes de pregrado de carreras orientadas al estudio de las TIC de la misma universidad. La muestra es de tipo no probabilístico y se seleccionó de forma no aleatoria, utilizando un muestreo por conveniencia.

Según Hernández, el diseño de investigación utilizado en este estudio de caso se caracteriza por su enfoque en la recolección y análisis de datos para comprender el conocimiento y la percepción de los estudiantes y docentes de pregrado en carreras de TIC [24].

El instrumento de recolección de datos fue un cuestionario en línea. Este cuestionario se diseñó para recopilar información sobre el conocimiento y la percepción de los participantes sobre la interactividad, así como el impacto de esta en su formación académica.

Para el procedimiento, el cuestionario se distribuyó a través del correo institucional y otras plataformas digitales de la universidad. Los participantes fueron invitados a responder el instrumento en un plazo de dos semanas.

Los datos del sondeo se analizaron utilizando métodos descriptivos y estadísticos. Se seleccionaron las preguntas más importantes para responder a la pregunta de investigación.

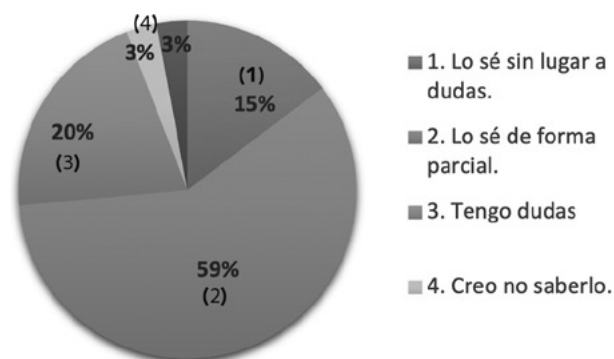
IV. Discusión

A continuación, se muestran los resultados de las preguntas más importantes realizadas en el sondeo:

Conocimiento sobre la interactividad

El sondeo reveló que el conocimiento sobre la interactividad entre los encuestados es limitado. Sólo el 14,7% de los encuestados posee un conocimiento sólido sobre el concepto. El 58,8% tiene dudas sobre el significado de la palabra "interactividad" y el 20,5% tiene un conocimiento parcial del concepto. Esto limita las posibilidades de crear contenidos o desarrollar elementos digitales interactivos en la educación superior.

Figura 1. Conocimiento sobre la interactividad en el contexto de contenidos de cursos virtuales



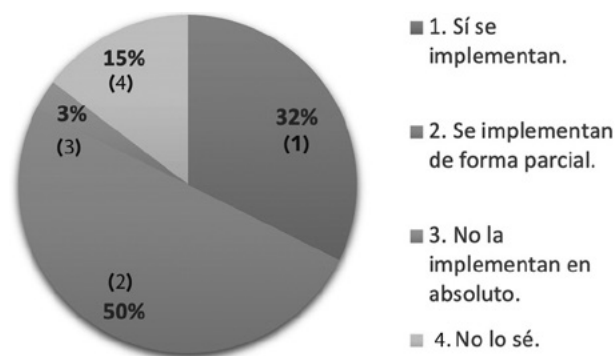
Nota: fuente elaboración propia.

Con estos resultados se podría mejorar la comprensión de la interactividad entre los estudiantes a través de cursos, talleres o materiales educativos que expliquen el concepto de interactividad y sus beneficios.

Implementación de la interactividad en los cursos virtuales

El sondeo también reveló que la percepción de la interactividad en los cursos virtuales es parcial. El 50% de los encuestados cree que la interactividad se implementa de forma parcial, mientras que el 32% cree que se implementa completamente.

Figura 2. Percepción en la implementación de la interactividad en los cursos virtuales



Nota: fuente elaboración propia.

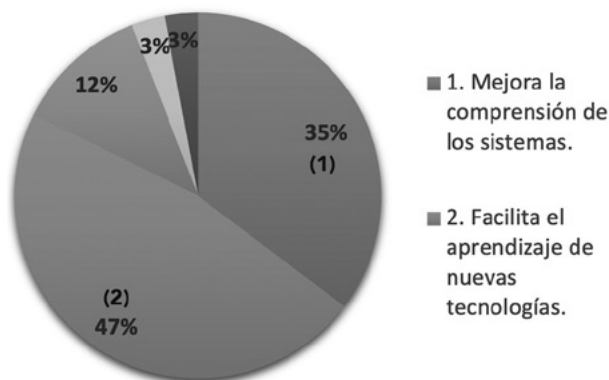
Como se muestra en la Figura 2, estos resultados sugieren que es necesario fortalecer la implementación de la interactividad en sus cursos virtuales. Esto podría lograrse mediante la incorporación de más elementos interactivos, como foros de discusión más completos, implementación de Chatbots, cuestionarios interactivos, uso de inteligencia artificial, tareas colaborativas, entre otros.

Beneficios de la interactividad en los cursos virtuales

Todos los encuestados coincidieron en que la interactividad permite mejorar la experiencia y facilita el aprendizaje. El 47% de los encuestados cree

que la interactividad favorece la apropiación y el aprendizaje de los contenidos, el 11,7% sostiene que puede aumentar la capacidad de resolución de problemas, y el 35,2% cree que puede ayudar a la comprensión de los sistemas.

Figura 3. Beneficios de la interactividad en los cursos virtuales



Nota: fuente elaboración propia.

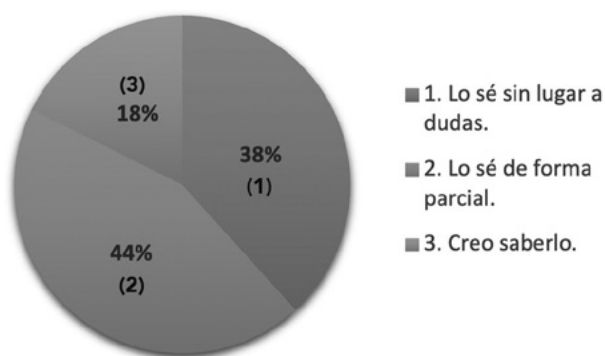
De acuerdo con los datos de la Figura 3, los resultados indican que la interactividad constituye un componente fundamental en los cursos virtuales. Este recurso favorece un aprendizaje más efectivo, ya que permite a los estudiantes interactuar tanto con el contenido como con sus pares. Asimismo, la interactividad de los Objetivos Virtuales (OVAS) se configura como un elemento que se espera siempre tengan los cursos virtuales.

Percepción de la diferencia entre un curso virtual interactivo y uno que no lo es

Como se muestra en la Figura 4, el 38,2% de los encuestados identifica de manera evidente la diferencia entre un curso virtual interactivo y uno que no lo es. Este hallazgo sugiere la necesidad de fortalecer la comprensión de los estudiantes frente a características que distinguen ambos tipos de cursos. Asimismo, los resultados indican que algunos contenidos podrían presentar niveles limitados de interactividad o no estar aplicando este recurso de manera adecuada. En consecuencia, se hace necesario desarrollar materiales educativos que expliquen

de forma clara las características de los cursos virtuales interactivos y los niveles de interactividad esperados en este tipo de entornos formativos.

Figura 4. Percepción de la diferencia entre un curso virtual interactivo y uno que no lo es

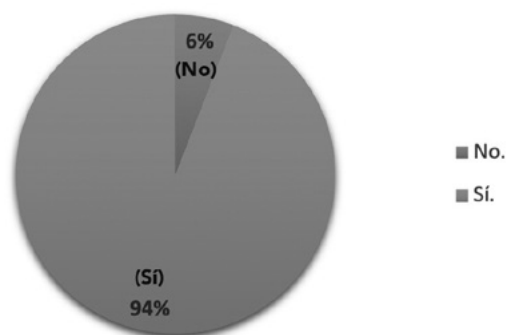


Nota: fuente elaboración propia.

Necesidad de la interactividad en los cursos virtuales

El 94% de los encuestados considera necesaria la interactividad en los cursos virtuales. Estos resultados evidencian que los estudiantes valoran este componente y lo reconocen como un elemento fundamental para fortalecer su proceso de aprendizaje.

Figura 5. Necesidad de la interactividad en los cursos virtuales



Nota: fuente elaboración propia.

V. Conclusiones

El conocimiento sobre la interactividad entre los estudiantes y docentes de pregrado de carreras orientadas al estudio de las TIC es limitado. Esto sugiere que la universidad podría fortalecer la comprensión del concepto, a través de cursos, talleres o materiales educativos.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la interactividad en los cursos virtuales se implementa de manera parcial. Esto indica que la universidad podría robustecer la incorporación de elementos interactivos en sus cursos, tales como foros de discusión más completos, cuestionarios interactivos, en sus cursos, tales como foros de discusión más completos, cuestionarios interactivos, integración de herramientas basadas en inteligencia artificial y tareas colaborativas, entre otros.

Teniendo en cuenta lo anterior, se puede asegurar que la interactividad constituye un componente fundamental en los cursos virtuales, ya que puede ayudar a los estudiantes a aprender de forma más efectiva, al permitirles interactuar con el contenido y con otros estudiantes.

Por otra parte, los estudiantes perciben de forma limitada la diferencia entre un curso virtual interactivo y uno que no lo es. Esto sugiere que la universidad podría generar espacios educativos y dinámicos que clarifiquen estas diferencias, promoviendo una mayor apropiación del concepto de interactividad y de su impacto de aprendizaje. La interactividad es un elemento fundamental para la educación superior en la actualidad, ya que puede tener un impacto positivo en la formación tanto de los estudiantes como de los docentes. Por ejemplo, favorece el desarrollo del pensamiento crítico y creativo de manera autónoma, incrementa la motivación y la participación activa en el aprendizaje, y facilita la adquisición de conocimientos y habilidades de forma más efectiva.

Los OVA interactivos son una herramienta educativa eficaz y eficiente que puede contribuir al mejoramiento de las experiencias educativas. Sin embargo, es importante que los OVA interactivos

se desarrollen teniendo en cuenta el nivel de interactividad requerido, así como las necesidades y características de los estudiantes.

La investigación sobre la interactividad en la educación superior es un campo en constante desarrollo. Por ello, resulta fundamental seguir estudiando los efectos de la interactividad en los procesos de aprendizaje, así como diseñar y evaluar nuevos OVA interactivos que sean cada vez más eficaces y pertinentes.

Por último, la formación de los estudiantes puede verse afectada de la siguiente manera:

Mejora la comprensión de los conceptos: la interactividad permite a los estudiantes interactuar con el contenido de forma activa, lo que favorece una comprensión más profunda y significativa de los conceptos.

Fomenta el pensamiento crítico y creativo: la interactividad impulsa a los estudiantes a analizar, reflexionar y tomar decisiones de manera autónoma, enfrentándose a problemas que requieren soluciones innovadoras. Este enfoque no solo fortalece su capacidad para evaluar información y formular juicios fundamentados, sino que también estimula la generación de ideas originales y la exploración de múltiples perspectivas. Al enfrentarse a desafíos prácticos en un entorno interactivo, los estudiantes desarrollan habilidades para abordar situaciones complejas, identificar patrones y proponer estrategias efectivas, lo que contribuye significativamente a su formación integral y a su preparación para resolver problemas en contextos reales.

Incrementa la motivación y participación: la interactividad hace que el aprendizaje sea más atractivo y estimulante, lo que puede ayudar a los estudiantes a mantenerse más motivados y participar de manera activa en el proceso formativo. Además, favorece la colaboración, ya que permite a los estudiantes trabajar juntos para resolver problemas y aprender de los demás. Esto contribuye al desarrollo de trabajo en equipo y cooperación.

VI. Referencias

- [1] F. Cabezuelo Lorenzo and F. Martínez Gutiérrez, "Interactividad. Revisión conceptual y contextual", *Revista ICONO 14. Revista Científica de Comunicaciones y Tecnologías emergentes*, vol. 8, n° 1, p. 9, 2012. Doi: 10.7195/ri14.v8i1.277.
- [2] K. P. Cross and T. A. Angelo, "Classroom Assessment Techniques: A Handbook for College Teachers". John Wiley & Sons, 2005.
- [3] M.-C. Caldeiro-Pedreira and A. Castro-Zubizarreta, "¿Cómo enfrentar la educación en la era de la interactividad?", *Praxis Pedagógica*, vol. 20, n° 26, pp. 33–53, 2020. Doi: 10.26620/uniminuto.praxis.20.26.2020.33-53.
- [4] J. García Martín and M. López García, "Adaptación de recursos educativos digitales para la Generación Z", *Revista de Tecnología Educativa*, vol. 5, n° 1, pp. 78–92, 2019.
- [5] L. Pérez Rodríguez, "Tecnologías emergentes y su impacto en la inclusión educativa", *Journal of Educational Technology*, vol. 25, n° 3, pp. 112–127, 2018.
- [6] A. H. M. Adnan, "From interactive teaching to immersive learning: Higher Education 4.0 via 360-degree videos and virtual reality in Malaysia", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 917, p. 012023, 2020. Doi: 10.1088/1757-899x/917/1/012023.
- [7] J. Smith and R. Jones, "Enhancing Higher Education Learning Through Virtual Reality Experiences", *Journal of Educational Technology*, vol. 30, n° 2, pp. 215–230, 2018. Doi: 10.1234/jet.2018.30.2.215.
- [8] Y. Abellán Toledo and R. I. Herrada Valverde, "Innovación educativa y metodologías activas en Educación Secundaria: La perspectiva de los docentes de lenguas castellana y literatura", *Revista Fuentes*, n° 18, pp. 65–76, 2016. Doi: 10.12795/revistafuentes.2016.18.1.04.

- [9] A. Bekkari, B. Castro, and C. Martínez, "Arquitectura de software para la creación dinámica de objetos visuales en aplicaciones interactivas", *Journal of Interactive Software Architecture*, vol. 15, n° 3, pp. 123–135, 2023.
- [10] W.-S. Cheong, J. Cha, Y. Joung, and K. Kim, "The interactive contents authoring system for terrestrial digital multimedia broadcasting", *8th International Conference on Advanced Communication Technology*, 2006. Doi: 10.1109/icact.2006.206370.
- [11] F. Cabezuelo Lorenzo and F. Martínez Gutiérrez, "Interactividad. Revisión conceptual y contextual", *Revista ICONO 14. Revista Científica de Comunicaciones y Tecnologías emergentes*, vol. 8, n° 1, p. 9, 2012. Doi: 10.7195/ri14.v8i1.277.
- [12] N. Mavridis, "A review of verbal and non-verbal human–robot interactive communication", *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 63, pp. 22–35, 2015. Doi: 10.1016/j.robot.2014.09.031.
- [13] A. Bekkari, D. Mammass, and S. Idbraim, "Software architecture for the dynamic creation of visual objects in applications for the internet with interactive content", in *2009 International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS), IEEE*, 2009. Doi: 10.1109/mmcs.2009.5256675.
- [14] M. Aceituno, *Seminario de producción multimedia: Interactividad*, Universidad Nacional de Quilmes, 2010. [Online]. Available: http://libros.uvq.edu.ar/spm/5_interactividad.html
- [15] A. Lizana and S. Rizvic, "Diseño de Objetos Virtuales de Aprendizaje (OVA) para la enseñanza de matemáticas en educación secundaria", *Revista Iberoamericana de Educación Matemática*, vol. 13, pp. 51–63, 2018.
- [16] A. Russo and R. Borges, "Objetos Virtuales de Aprendizaje en Educación Superior: Una Revisión Sistemática de la Literatura", *Revista de Informática Educativa*, vol. 20, n° 2, pp. 47–64, 2017.
- [17] A. Pinto and M. Ríos, "Diseño y desarrollo de un Objeto Virtual de Aprendizaje (OVA) para el aprendizaje de matemáticas", *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, vol. 13, n° 3, pp. 536–547, 2016.
- [18] E. Pérez and P. Martínez, "Diseño y desarrollo de Objetos Virtuales de Aprendizaje (OVA) para la enseñanza de la biología celular", *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, vol. 13, n° 2, pp. 294–313, 2014.
- [19] M. Hernández and G. Salas, "Objetos Virtuales de Aprendizaje (OVA): Herramienta para la enseñanza del cálculo integral", *Revista Paradigma*, vol. 32, n° 2, pp. 247–264, 2011.
- [20] J. S. M. Choez, C. L. M. Plaza, and F. E. V. Anzules, "Objetos virtuales de aprendizaje como estrategia didáctica de enseñanza aprendizaje en la educación superior", *Domino de las Ciencias*, vol. 7, n° 3, pp. 926–934, 2021.
- [21] J. F. Garrido Aragón, "Realidad Inmersiva: Herramienta educativa para desarrollar el pensamiento computacional" *Revista Latinoamericana Ogmios*, vol. 3, n° 8, pp. 70–81, 2023. doi: 10.53595/rlo.v3.i8.085.
- [22] L. Pérez-Rodríguez, "Tecnologías emergentes y su impacto en la inclusión educativa", *Journal of Educational Technology*, vol. 25, n° 3, pp. 112–127, 2018. doi: 10.1016/j.robot.2014.09.031.
- [23] N. Mavridis, "A review of verbal and non-verbal human–robot interactive communication", *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 63, pp. 22–35, 2015. Doi: 10.1016/j.robot.2014.09.031.
- [24] R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado, and P. Baptista Lucio, *Metodología de la investigación*, 2021.





Más Allá del RAS: nuevos modelos de proyección de residuos sólidos para estimar la producción per cápita a nivel municipal

Beyond the RAS: New Solid Waste Projection Models to Estimate Per Capita Production at the Municipal Level

Diego Andrés Arteaga Zanguña¹, Edinson Fabián Monroy Ávila²

Tipo de Artículo: Investigación.

Recibido: 24/07/2025. **Aprobado:** 22/08/2025. **Publicado:** 12/12/2025

Resumen: Este estudio analiza la generación de residuos sólidos en los municipios de Arcabuco, El Cocuy y Sáchica, utilizando modelos matemáticos de análisis retrospectivo para proyectar la Producción Per Cápita (PPC) hasta 2036. Se compararon tres métodos: modelo de retrospectiva de PPC, modelo de retrospectiva de PPC en función de la población y el modelo de proyección de la PPC del Reglamento de Agua Potable y Saneamiento - (RAS). Los resultados muestran que, mientras los

modelos matemáticos ofrecen proyecciones ajustadas a la realidad local, el método RAS, basado en un valor de rango corto, subestima la generación de residuos, especialmente en contextos de cambios poblacionales y económicos o municipios con incidencia de turismo. El estudio destaca la importancia de utilizar datos históricos específicos para cada municipio y propone que las proyecciones de residuos en Colombia se basen en análisis retrospectivos y dinámicos, en lugar de depender

¹ Autor correspondiente: Diego Andrés Arteaga Zanguña. Mayor título: Ingeniero Ambiental. Filiación institucional: Universidad Santo Tomas. GICAN - CONRHI. País: Colombia, Ciudad: Tunja. Correo electrónico: arteagadiego212@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5041-0452>

² Autor correspondiente: Edinson Fabián Monroy Ávila. Mayor título: Especialista en Aguas y Saneamiento Ambiental, Magíster en Tecnologías para el Manejo de Aguas y Residuos, Magíster en Gobierno Políticas Públicas y Desarrollo Territorial. Filiación institucional: Universidad Santo Tomas. GICAN - CONRHI. País: Colombia, Ciudad: Tunja. Correo electrónico: ingenierofabianm@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3757-9442>

de valores normativos estáticos. Esta estrategia mejoraría la planificación y gestión de residuos sólidos, permitiendo a los municipios enfrentar mejor los desafíos asociados al manejo y tratamiento de residuos a nivel local.

Palabras clave: Desechos; residuos sólidos; gestión de residuos; modelo matemático.

Abstract: This study analyzes the generation of solid waste in the municipalities of Arcabuco, El Cocuy, and Sáchica, using retrospective mathematical models to project the Per Capita Production (PPC) until 2036. Three methods were compared: the retrospective PPC model, the retrospective PPC model based on population, and the PPC projection model from the Potable Water and Sanitation Regulation (RAS). The results show that while mathematical models provide projections aligned with local realities, the RAS method, based on a short-range value, underestimates waste generation, especially in contexts of population and economic changes or municipalities with a significant tourist impact. The study highlights the importance of using historical data specific to each municipality and suggests that waste projections in Colombia should be based on retrospective and dynamic analyses rather than relying on static normative values. This strategy would improve waste management planning, allowing municipalities to better face the challenges associated with local waste management and treatment.

Keywords: waste; solid waste; waste management; mathematical model.

I. Introducción

Colombia cuenta con alrededor de 94 rellenos sanitarios, de los cuales 58 se encuentran en Antioquia, 8 en Nariño, 8 en Santander, 7 en Casanare y 6 en Caquetá, que reciben anualmente cerca de 11.4 millones de toneladas de residuos sólidos, de los cuales el 61% son residuos orgánicos, según datos del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio y el Banco Mundial [1]. Sin embargo, aún persisten problemas en la disposición de residuos, pues, según

el informe *Disposición Final de Residuos Sólidos Colombia 2023* de la Superintendencia de Servicios Públicos, a pesar de que el 97,95% de los residuos se gestionan en sitios autorizados, un preocupante 1.9% (equivalente a 225,709 toneladas) sigue siendo dispuesto en botaderos a cielo abierto, lo que subraya la necesidad urgente de un cambio en las prácticas de manejo de residuos a nivel nacional.

La gestión de residuos sólidos municipales en Colombia comenzó a nivel local con los llamados botaderos a cielo abierto [2]. Según lo establecido en el artículo 13 de la Resolución 1045 de 2003, se otorgó un plazo máximo de dos años, contados desde su publicación, para clausurar y restaurar ambientalmente estos botaderos y cualquier otro sitio de disposición final de residuos sólidos que no cumpliera con la normativa vigente. En caso contrario, se debía proceder con su adecuación a rellenos sanitarios, los cuales debían ser diseñados, construidos y operados de acuerdo con las medidas de manejo ambiental establecidas por las autoridades ambientales regionales competentes [3]. Dichas medidas buscaban establecer programas que reduzcan la generación de residuos y fomenten el aprovechamiento de aquellos residuos con un potencial valor económico [4].

A pesar de los avances legislativos en Colombia en la gestión integral de residuos sólidos, el país aún enfrenta grandes desafíos [5]. Hoy, por ejemplo, el constante crecimiento progresivo en la producción de residuos ha generado diversas consecuencias adversas tanto para la salud pública como para el entorno natural [6]. Según el *Informe de Basura Cero a corte 2024* del Ministerio de Vivienda, existen cerca de 60 botaderos a cielo abierto, con Chocó liderando esta cifra con 24 botaderos, seguido de Bolívar con 17 y Nariño con 7. Estos botaderos representan una forma inadecuada de disposición de residuos, generando graves impactos ambientales [7].

Estos municipios históricamente han enfrentado limitaciones económicas y logísticas que dificultan la gestión adecuada mediante rellenos sanitarios a nivel municipal. Sin embargo, a nivel regional, grandes urbes o empresas privadas han estable-

cido rellenos sanitarios o parques tecnológicos ambientales que sirven como espacios centralizados para la disposición de residuos sólidos [8]. No obstante, estos lugares han ido disminuyendo su vida útil debido al crecimiento en las cantidades de residuos, que superan las proyecciones cruzadas con las estimaciones de crecimiento poblacional [9].

En cuanto a las referencias recientes, un estudio realizado por Pulgarín y Orozco [10], sobre la gestión de residuos sólidos en Antioquia, mencionó que la producción diaria de residuos sólidos municipales es excesiva. La proyección de generación de residuos sólidos domiciliarios en San Gil muestra un crecimiento sostenido, pasando de 55,3 toneladas/día en 2021 a 65,2 toneladas/día en 2032, lo que representa un aumento del 18 %. Anualmente, la producción total se incrementa de 19.898 a 23.472 toneladas [11]. Por otra parte, en la actualización del PGIRS de la ciudad de Cartagena, entre 2018 y 2027, se proyecta un aumento sostenido en la generación de residuos sólidos, pasando de 436.848 a 493.167 toneladas anuales, impulsado por el crecimiento poblacional y una Producción Per Cápita (PPC) constante de 1,23 kg/hab/día. Este incremento evidencia una mayor presión sobre el sistema de gestión de residuos, lo que subraya la necesidad de fortalecer estrategias como la separación en la fuente, el reciclaje y el aprovechamiento de residuos, para garantizar la sostenibilidad ambiental y operativa del sistema en el mediano plazo [12].

La estimación precisa de la producción per cápita de residuos sólidos es esencial para la planificación de políticas públicas, la asignación de recursos y la implementación de estrategias de reciclaje y reducción de desechos [13]. En la actualidad, los consultores se basan en las tasas fijadas por el RAS o, en algunos casos en datos que son poco realistas para la situación municipal [14].

Esta concepción ha generado discrepancias y limitaciones en la precisión de los modelos utilizados para determinar las cantidades de residuos sólidos generados [15]. La realidad de una tasa constante ha sido ampliamente cuestionada, ya

que no refleja las variaciones que ocurren en la producción de residuos debido a factores sociales, económicos y demográficos [16]

La producción per cápita (PPC) de residuos sólidos es una medida fundamental en la gestión de residuos, que representa la cantidad de residuos generados por cada habitante de una determinada área o municipio durante un periodo específico [17]. Su importancia radica en que proporciona una base cuantitativa para la planificación y optimización de estrategias de manejo de residuos, permitiendo estimar las necesidades de infraestructura, recursos y políticas adecuadas. Definir correctamente la PPC en los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) es esencial, ya que influye directamente en la formulación de programas y proyectos de planificación municipal [18]. Una estimación precisa de la PPC permite a los municipios adaptarse a las dinámicas de crecimiento poblacional, consumo y generación de residuos, asegurando una gestión integral de los residuos sólidos [19].

El problema central de este estudio radica en que el RAS establece que la tasa de residuos sólidos per cápita debe ser un valor determinado en un rango; normalmente, para municipios de baja complejidad como los que se analizan, se toman valores entre 0.30 kg/hab-día, el valor máximo es de 0.75 kg/hab-día, y el valor promedio es de 0.45 kg/hab-día, según el RAS [20]. Por su parte, el Boletín 6 del año 2013 de Bogotá como vamos la PPC de Colombia es de 0.84 kg/hab-día. Según el Banco mundial, se espera que la PPC a 2050 sea de 0.74 kg/hab-día, con variaciones entre 0.11 y 4.54 kg/hab-día; sin embargo, esta concepción ha generado discrepancias en las estimaciones de la producción de residuos en diferentes municipios y regiones, ya que no considera factores como población flotante, los cambios en los hábitos de consumo, las políticas públicas implementadas ni los fenómenos económicos que afectan la producción de residuos [21].

Para abordar esta problemática, el presente estudio propone un modelo de análisis de datos retrospectivos que proyecta la generación mensual de residuos sólidos entre 2012 y 2024. Este enfoque

permite calcular los valores de ppc y compararlos con el valor promedio de 0,45 Kg/hab-día, establecido por el RAS para municipios de baja complejidad. Así, se contribuye a una estimación más precisa y ajustada a las realidades locales, lo que mejora la planificación y la toma de decisiones en la gestión integral de residuos sólidos, logrando una gestión más adecuada de estos [22].

El objetivo principal de este estudio es estimar la Producción per cápita de residuos sólidos mediante un análisis retrospectivo de datos, con el fin de determinar a un horizonte de 12 años la cantidad de residuos generados mediante modelos matemáticos que permitan adelantar este escenario de planeación estratégica prospectiva y de este modo determinar la generación de residuos.

El objetivo secundario de este estudio es desarrollar modelos de proyecciones de residuos basadas en datos locales, considerando no solo las dinámicas poblacionales de cada municipio, lo que permitiría obtener proyecciones más precisas y ajustadas a la realidad local, mejorando así la planificación y gestión de los residuos sólidos a nivel municipal.

II. Materiales y Métodos

Materiales

Para el desarrollo de este estudio, se utilizó como fuente de datos el registro mensual de generación de residuos sólidos entre los años 2012 y 2025 de los municipios de Arcabuco, El Cocuy y Sáchica en el departamento de Boyacá. Las variables analizadas incluyeron la generación mensual de residuos en toneladas (Ton), la Producción Per Cápita (PPC) en kilogramos por habitante por día (kg/hab/día), así como los valores mínimos, máximos y promedio anual de la generación de residuos, y la población de cada municipio durante el periodo de estudio. La normativa base utilizada para la estimación y comparación, fue el Régimen de Adecuación Sanitaria (RAS), título F. Para el procesamiento de los datos y la generación del modelo lineal, se empleó el software Microsoft Excel mediante análisis de tendencias lineales, que permitió organizar la

información y realizar los cálculos necesarios para la formulación del modelo de estimación.

Métodos

La metodología empleada en este estudio se basa en la construcción de modelos de datos retrospectivos utilizando series temporales para analizar la generación mensual de residuos sólidos entre los años 2012 y 2025 en los municipios de Arcabuco, El Cocuy y Sáchica. El proceso se divide en diversas fases para garantizar la precisión de las proyecciones y el análisis de la Producción Per Cápita (PPC) de residuos sólidos.

Recopilación y procesamiento de datos:

El primer paso consiste en recopilar el registro mensual de la generación de residuos sólidos de los tres municipios mencionados, abarcando el período comprendido entre 2012 y 2025. Para ello, se trabaja con las empresas prestadoras de servicio y se utiliza la información reportada en el Sistema Único de Información (SUI). La información se organiza en base a variables clave, como: toneladas de residuos generados al mes, PPC (en kg/hab/día) y la población anual de cada municipio.

Análisis de series temporales y construcción del modelo matemático:

Una vez procesados los datos, se realiza un análisis retrospectivo de series temporales para evaluar las tendencias en la generación mensual de residuos sólidos a lo largo del período de estudio. Con base en los promedios anuales de generación de residuos, se construye un modelo matemático de regresión lineal. Este modelo permite proyectar la generación mensual de residuos sólidos hasta el año 2036, utilizando los datos históricos y aplicando las proyecciones poblacionales anuales de cada municipio.

Cálculo de la producción per cápita (PPC):

La estimación de la PPC, que representa la cantidad de residuos generados por habitante, se realiza utilizando la siguiente fórmula:

$$(1) \quad P_{pc} = \frac{Kg}{Hab-día}$$

Con los datos de producción mensual multianual comprendidos entre 2012 – 2014 se determinó el valor de la PPC, con la cual se estableció la base de comparación sobre datos RAS.

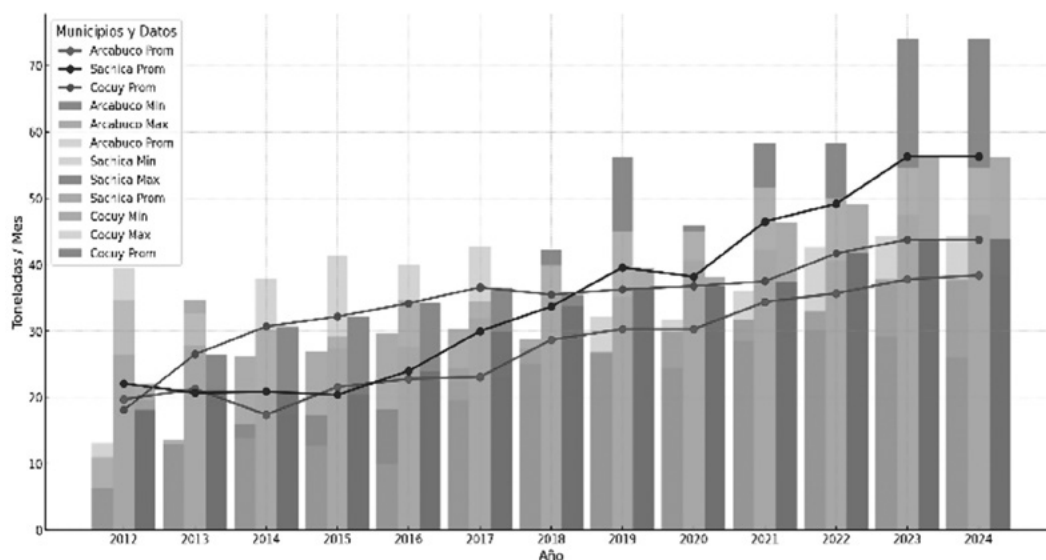
Proyección para la generación de residuos sólidos hasta 2036:

Con base en los datos de PPC obtenidos del modelo retrospectivo, se obtiene un modelo matemático que permite proyectar la generación de residuos sólidos para los próximos 12 años, proporcionando una estimación a largo plazo de la evolución de la producción de residuos mediante el método de la PPC, otro de los modelos fue cruzar la PPC proyectada con población para encontrar la diferencia de los dos modelos matemáticos, y de este modo obtener un análisis de sensibilidad más cercano a la generación de residuos a nivel municipal.

Una vez consolidada la información de la generación de residuos sólidos en los municipios seleccionados, se procedió procesar los datos mediante análisis estadístico de valores mínimos, máximos y promedios mensuales multianuales, con el fin de contar con una base de datos completa de 13 años en 3 municipios de complejidad baja según el RAS. La Figura 1 muestra la evolución de la generación de residuos sólidos en Arcabuco, Sáchica y El Cocuy entre 2012 y 2024. Las barras representan los valores mensuales, la línea roja la producción promedio en el municipio de Arcabuco, la línea verde la producción promedio de El Cocuy y la línea azul el promedio del municipio de Sáchica, durante los últimos 12 años.

III. Resultados y discusión

A partir de la recopilación de datos sobre la generación de residuos sólidos en los municipios de Arcabuco, El Cocuy y Sáchica, se consolidó una base de datos que detalla, tanto a nivel mensual como anual, las cantidades generadas por cada municipio durante el periodo comprendido entre 2012 y 2025. Esta información sirvió como fundamento para el desarrollo de modelos matemáticos de análisis retrospectivo y de proyección, permitieron estimar y proyectar su comportamiento futuro hasta el año 2036. Las proyecciones obtenidas resultan fundamentales para la planificación estratégica de sistemas de gestión integral de residuos, así como para su tratamiento y aprovechamiento, orientando la formulación de políticas públicas y decisiones técnicas a nivel municipal.

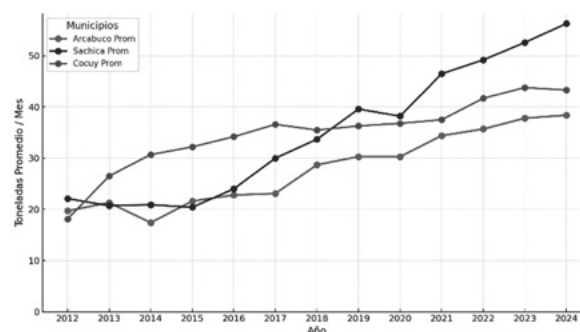
Figura 1. Generación mensual multianual de residuos sólidos

Nota: fuente elaboración propia (2025).

El análisis de los datos refleja un aumento general en la generación de residuos. En el caso de Arcabuco, existe una tendencia creciente, alcanzando un máximo en 2023 con 47.6 Ton/mes. Los valores de Sáchica también siguen una tendencia ascendente, destacando en 2024 con una diferencia notable en los valores máximos de 74.1 Ton/mes en comparación con años anteriores. En cuanto a El Cocuy, se observa un patrón similar, donde los valores máximos y promedio aumentan considerablemente hacia 2024, con un total de 56.3 ton/mes.

De este modo se observa que los valores promedio tienden a aumentar con el tiempo, lo que refleja un crecimiento en la generación de residuos en estos municipios. Arcabuco muestra una ligera fluctuación en sus valores máximos, pero mantiene un promedio creciente en los últimos años. Sáchica y El Cocuy, por su parte, presentan un crecimiento sostenido en sus valores máximos y promedios, con un aumento notable en los últimos años, especialmente en Sáchica, que tiene un incremento entre 2022 - 2024. Este comportamiento podría estar relacionado con factores como el crecimiento poblacional, cambios en los hábitos de consumo y crecimiento urbanístico [23].

El análisis de los promedios se observa en la Figura 2 de donde la generación de residuos sólidos en Arcabuco, Sáchica y El Cocuy revela que, a pesar de ser municipios de sexta categoría, las condiciones de generación de residuos son significativamente diferentes entre ellos. Aunque todos muestran una tendencia al aumento en la generación de residuos a lo largo de los años, no mantienen un crecimiento similar.

Figura 2. Generación de residuos promedio mensual por municipio (2012 - 2024)

Nota: Elaboración Propia (2025).

Arcabuco, por ejemplo, presenta un crecimiento moderado y más estable, con un aumento gradual en sus promedios, reflejando una tasa de generación de residuos más baja que la de los otros dos municipios. En contraste, Sáchica experimenta un crecimiento más irregular, con incrementos notables entre 2015 a 2024, lo que podría estar relacionado con factores específicos como cambios en la población o en los hábitos de consumo local. Por otro lado, El Cocuy se evidencia que durante los años 2012 a 2017 la tasa de crecimiento en la generación de residuos fue superior a la de los otros dos municipios, pero luego hubo una tendencia a mantenerse constante durante los siguientes cuatro años y una leve alza en los últimos tres años.

Este comportamiento sugiere que, aunque los tres municipios tienen características similares en términos de su clasificación administrativa, sus realidades en cuanto a la generación de residuos son muy diversas y requieren enfoques diferenciados para su gestión. La falta de un crecimiento uniforme entre ellos subraya la necesidad de un análisis más detallado de los factores locales que influyen en la generación de residuos, para desarrollar políticas públicas adaptadas a sus circunstancias particulares.

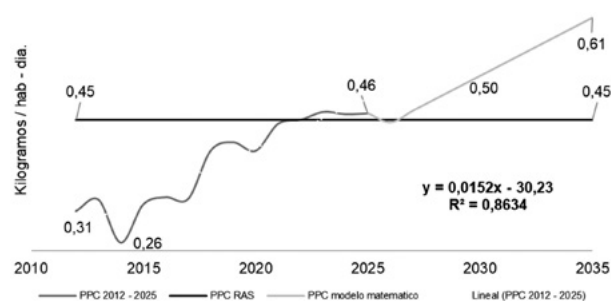
Por ello, es fundamental diferenciar los métodos para determinar la Producción Per Cápita (PPC), ya que cada municipio presenta dinámicas únicas que requieren un análisis específico, en lugar de basarse en valores constantes del RAS, para lograr una estimación más precisa y adecuada a su contexto particular y de este modo poder proyectar la generación de residuos de una manera más coherente.

En el caso de Sáchica y El Cocuy, es importante considerar que el turismo se ha considerado un motor de desarrollo económico; no obstante, su expansión también conlleva diversos impactos socioambientales, especialmente por la presión adicional que ejercen los visitantes sobre los recursos locales. Una de las principales repercusiones asociadas a esta actividad es el incremento en la generación de residuos sólidos en los destinos turísticos, lo que plantea el desafío de generar polí-

ticas, estrategias y mecanismos altamente efectivos en la gestión integral de residuos sólidos [24].

El análisis de la producción per cápita (PPC) de Arcabuco desde 2012 hasta 2024 muestra una evolución gradual en la generación de residuos sólidos, la cual se presenta en la Figura 3, comenzando con un valor de 0.31 kilogramos por habitante al día en 2012 y alcanzando 0.46 kg/hab-día en 2024. A lo largo de este periodo, se observa un crecimiento sostenido, con un aumento notable a partir de 2018, cuando la PPC alcanza 0.40 kg/hab-día. Este crecimiento puede atribuirse a diversos factores, como el cambio en los hábitos de consumo, el crecimiento demográfico, crecimiento urbano [25]. Sin embargo, a pesar de este crecimiento, la PPC de Arcabuco sigue por debajo del valor promedio de 0.45 kg/hab-día propuesto por el RAS, lo que indica que la generación de residuos en el municipio se encuentra dentro de un rango adecuado en comparación con los valores normativos.

Figura 3. Modelo de retrospectiva de datos de PPC para el municipio de Arcabuco



Nota: Elaboración Propia (2025).

Para proyectar la PPC de Arcabuco a partir de 2025, se utilizó un modelo matemático basado en regresión lineal, ya que este proporciona predicciones promedio de las fluctuaciones, ajustándose de manera más real a la tendencia sobre los datos históricos de PPC entre 2012 y 2024, donde se obtuvo el modelo de retrospectiva

$$PPC = 0.0177 t - 35,414$$

donde t , representa el tiempo medido en años.

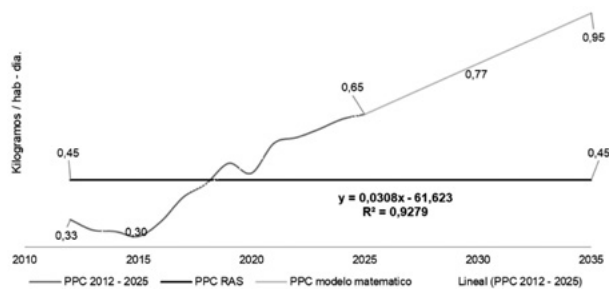
Este modelo estima que la PPC seguirá aumentando de manera gradual, alcanzando 0.61 kg/hab-día para 2036. A pesar de que la PPC proyectada supera el valor del RAS en los años futuros, con una diferencia de 0.16 kg/hab – día lo que significa que para una población proyectada de 3103 habitantes a 2036 la diferencia en la generación de residuos es de 14.89 ton /mes, cantidad que afecta la economía y los costos de la prestación del servicio de aseo en el municipio.

En el caso del municipio de Sáchica desde 2015 hasta 2024 se observa una tendencia creciente en la generación de residuos sólidos. En 2012, la PPC era de 0.33 kg/hab-día y en 2024 alcanzó 0.63 kg/hab-día. Este crecimiento puede ser explicado por diversos factores, como el incremento poblacional y los cambios en los patrones de consumo, crecimiento urbano y actividades comerciales o turísticas [26], valor que en 2024 supera el valor promedio recomendado por el RAS. Con estos datos se construyó el modelo que se presenta en la Figura 4,

$$PPC = 0.0308 t - 61,623$$

con el cual se realizó el análisis de proyección a 2036, donde t representa el tiempo medido en años. La actividad turística tiene una influencia significativa en el aumento de los residuos urbanos, llegando en muchos casos a duplicar la cantidad generada por un habitante local. Esta presión se intensifica debido a la estacionalidad del turismo, que produce incrementos abruptos en la demanda de servicios de recolección y tratamiento de residuos, lo que a su vez eleva de manera considerable los costos operativos del sistema de gestión [27].

Figura 4. Modelo de retrospectiva de datos PPC para el municipio de Sáchica



Nota: Elaboración Propia (2025).

Si bien es cierto que con los datos de 2012 a 2024 la PPC se duplicó en valores, pasando de 0.33 a 0.65 kg/hab-día, se estima que la tendencia continuará aumentando, alcanzando 0.98 kg/hab-día para 2036. A pesar de que la PPC proyectada supera el valor del RAS en los años futuros, la diferencia es moderada, con un incremento de 0.53 kg/hab-día por habitante, incluso inferior al valor máximo de 0.75 kg/hab-día recomendado en la Tabla F.1.1. del título F del RAS. Esto demuestra la importancia de los modelos de análisis de series de datos mensuales multianuales en retrospectiva para la estimación de parámetros esenciales en la generación de residuos sólidos.

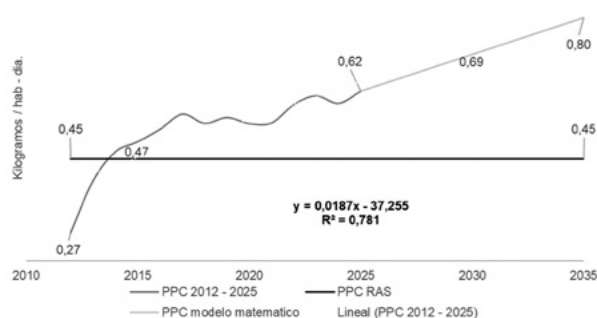
El análisis retrospectivo de la PPC en El Cocuy, desde 2012 - 2024, muestra un aumento gradual en la generación de residuos, pasando de 0.27 kg/hab-día en 2012 a 0.59 kg/hab-día en 2024, como se presenta en la Figura 5. Este comportamiento refleja un crecimiento constante en la cantidad de residuos generados, relacionado principalmente con los factores de desarrollo turístico del municipio, más que por los factores de incremento poblacional [28]

Con los datos del análisis retrospectivo se encontró el modelo lineal

$$PPC = 0.0187 t - 37,255$$

el cual se usó para la proyección de 2025 a 2036, donde t representa el tiempo medido en años.

Figura 5. Modelo de retrospectiva de datos PPC para el municipio de El Cocuy



Nota: Elaboración Propia (2025).

Con los datos del análisis prospectivo, se estima que, a partir de 2025, la generación de residuos continuará su aumento, pasando de 0.62 kg/hab-día en 2025 a 0.80 kg/hab-día en 2036. Esta proyección indica que la PPC superará en 0.35 kg/hab-día el valor promedio del RAS. Esta diferencia tiene un impacto considerable en los costos operativos y en la gestión del servicio de aseo, lo que destaca la urgente necesidad de desarrollar estrategias de gestión de aprovechamiento a nivel municipal. Por esta razón, adoptar un modelo sustentado en los principios de la economía circular no solo contribuiría a disminuir la cantidad de residuos enviados a los rellenos sanitarios, sino que también abriría nuevas oportunidades para el desarrollo económico [29]. Es clave tener en cuenta la distancia considerable del municipio a los rellenos sanitarios, ya que este factor contribuye directamente al incremento de los costos asociados al transporte de los residuos [30].

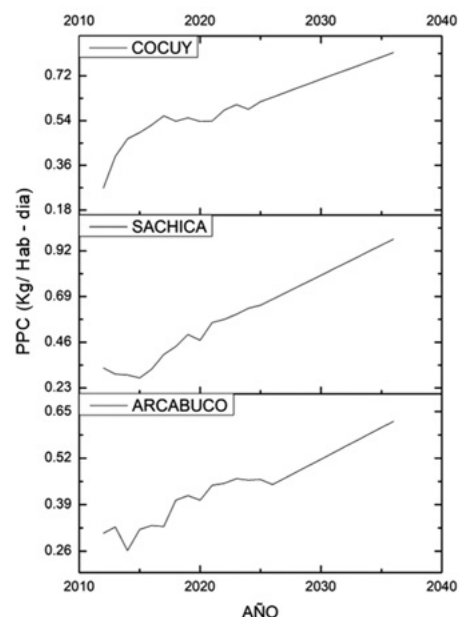
En la Figura 6, se presentan las proyecciones de la Producción Per Cápita (PPC) para los municipios de El Cocuy, Sáchica y Arcabuco desde 2012 hasta 2024, basadas en los datos de retrospectiva, mientras que el análisis entre 2025 y 2036 se basó en análisis de simulación matemática. A pesar de que los tres municipios comparten una tendencia general de crecimiento, cada uno muestra características propias en su ritmo de aumento.

En el caso de El Cocuy, se observa un incremento gradual y constante a lo largo del período, con un

crecimiento más pronunciado hacia los años cercanos a 2030, lo que sugiere que este municipio podría estar enfrentando una aceleración en su generación de residuos, probablemente debido a factores como el crecimiento poblacional y el aumento de la actividad económica por el turismo del PNN El Cocuy [31].

Por otro lado, Sáchica muestra una tendencia similar, pero con un crecimiento más fuerte en comparación con El Cocuy, destacándose por una mayor estabilidad en los primeros años, sin embargo, Sáchica es el que alcanza los valores más altos con incrementos de hasta el 46% del incremento de la PPC actual. En contraste, Arcabuco tiene la tasa de crecimiento más baja de los tres municipios, aunque igualmente muestra una tendencia creciente. El modelo de regresión lineal aplicado indica que, si bien Arcabuco mantiene un crecimiento más controlado, tanto El Cocuy como Sáchica están proyectando aumentos significativos en la generación de residuos a medida que se acercan a 2036.

Figura 6. Análisis retrospectivo y prospectivo de la PPC para los municipios de El Cocuy, Sáchica y Arcabuco



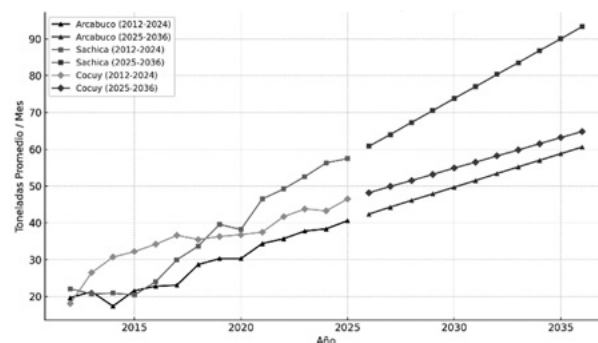
Nota: Elaboración Propia (2025).

Con los datos obtenidos, se destaca la importancia de aplicar métodos de análisis retrospectivos específicos para cada municipio, ya que la determinación de la Producción Per Cápita (PPC) no se encuentra dentro de los rangos establecidos por el RAS. Aunque los tres municipios analizados están clasificados en la sexta categoría, es importante realizar un análisis particular para cada uno, ya que la PPC no solo está relacionada con el crecimiento poblacional, sino también con otros factores como los hábitos de consumo y la población flotante.

Este último factor es especialmente relevante, ya que proyecta un dinamismo social elevado, difícil de cuantificar, como el impacto de festividades o el incremento de personas que llegan al municipio en busca de residencia o actividades de paso. Estos fenómenos, no siempre son considerados en estudios tradicionales y mucho menos en la planificación de residuos sólidos a nivel municipal en los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos – PGIRS. A pesar de que los tres municipios siguen una tendencia creciente, la velocidad y magnitud del aumento varían significativamente, lo que implica que las políticas de gestión de residuos deben ser adaptadas de manera local para cada contexto territorial.

De acuerdo con los análisis de datos retrospectivos que se observan en la Figura 7, se evidencia la generación de residuos sólidos en los últimos 13 años de cada uno de los municipios y con base en los modelos matemáticos para cada uno de los municipios, se realiza la proyección, que muestra un notable incremento en la producción de residuos a partir de 2024.

Figura 7. Generación de residuos sólidos promedio mensual por municipio (2012 - 2036)



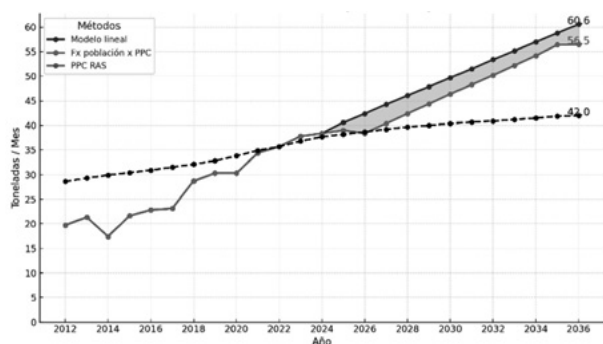
Nota: Elaboración Propia (2025).

En el caso de Arcabuco, para la estimación en la producción de residuos sólidos, se proyecta un cambio de 38.4 toneladas por mes en 2024 a 60.6 toneladas por mes en 2036, lo que representa un incremento de 22.2 toneladas en 12 años. Este crecimiento refleja un aumento constante, con un promedio de 1.85 toneladas adicionales cada año. Sáchica experimenta una tendencia aún más pronunciada, pasando de 56.3 toneladas en 2024 a 93.3 toneladas en 2036, lo que indica un aumento de 37 toneladas en 12 años, con un incremento anual promedio de aproximadamente 3.08 toneladas. El Cocuy también muestra un aumento importante, con un crecimiento de 21.5 toneladas, pasando de 43.3 toneladas en 2024 a 64.8 toneladas en 2036, lo que resulta en un aumento anual promedio de 1.79 toneladas.

Este análisis revela una tendencia creciente en la generación de residuos en los tres municipios, con una aceleración notable en los años posteriores a 2024. Vale la pena destacar la necesidad urgente de actualizar y repensar una estrategia de aprovechamiento y tratamiento a nivel municipal, ya que estos incrementos presentan dos desafíos, el primero relacionado con la disminución de la vida útil de los rellenos sanitarios, el segundo con el urgente proceso de aprovechamiento de materiales en el marco de la economía circular, ya que, si no se busca esta estrategia, se encuentra un desequilibrio económico en las empresas prestadoras del servicio de aseo.

El análisis de la generación de residuos sólidos en Arcabuco presentado en la Figura 8, utilizando los tres métodos (modelo lineal, Fx población x PPC y PPC RAS) revela que, a lo largo de los años, la proyección de residuos sigue una tendencia creciente en todos los métodos, pero con diferencias importantes. A partir de los datos proporcionados, se puede observar que el modelo lineal y el método de Fx población x PPC, a partir de 2024, presentan proyecciones más cercanas entre sí, con un aumento gradual en la generación de residuos, alcanzando 60.6 toneladas por mes en 2036 y 56.5 toneladas por mes es decir los dos modelos presentan una diferencia cercana a 4.1 toneladas por mes. Mientras que con respecto al RAS la diferencia oscila entre 14.5 y 18.6 toneladas por mes.

Figura 8. Generación de residuos sólidos – Arcabuco (2012 - 2036)

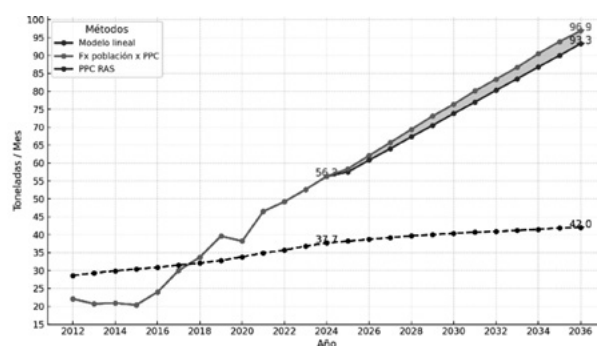


Nota: Elaboración Propia (2025).

El método del RAS se soporta en un valor fijo de 0.45 kg/hab-día, y no refleja de manera precisa el comportamiento observado en los datos de Arcabuco de los análisis de retrospectiva. Aunque el RAS ofrece un valor normativo útil para estandarizar las estimaciones de residuos, la diferencia con los otros dos métodos resalta que, en la práctica, el valor constante del RAS no refleja adecuadamente las condiciones locales y las particularidades del municipio, como el crecimiento poblacional y los cambios en el consumo, que impactan directamente en la generación de residuos.

La proyección en la generación de residuos sólidos en el municipio de Sáchica, con base en los tres métodos de proyección (modelo lineal, Fx población x PPC y PPC RAS), mostrados en la Figura 9 evidencia que la generación de residuos es creciente a medida que pasan los años. Los modelos de análisis de regresión lineal en la generación de residuos y el modelo de regresión de la PPC por la población siguen un patrón de crecimiento sostenido, alcanzando 96.9 toneladas por mes en 2036.

Figura 9. Generación de residuos sólidos – Sáchica (2012 - 2036)



Nota: Elaboración Propia (2025).

El modelo de regresión lineal para la generación de residuos y el modelo de regresión de la PPC por la población, presentan resultados alineados, el método de proyección RAS, con su valor fijo de 0.45 kg/hab-día de PPC, muestra una proyección mucho más baja, alcanzando solo 42 toneladas por mes en 2036. Esto refleja una diferencia significativa de 54.9 toneladas/mes con respecto a los otros métodos, lo que sugiere que el uso de un valor estándar como el del PPC RAS no captura adecuadamente la realidad local de Sáchica y lo que es preocupante para el nivel municipal, debido a que la producción en los próximos 12 años se puede duplicar con respecto al valor actual.

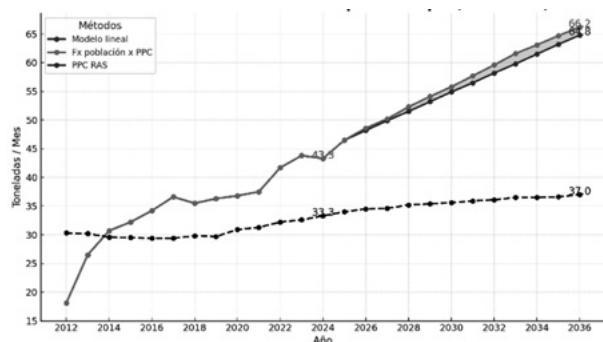
Por lo tanto, los modelos de regresión lineal para la generación de residuos, como el modelo de regresión de la PPC por la población, resultan ser más ajustados a la realidad de Sáchica, ya que tienen en cuenta el contexto local y el crecimiento proyectado en los próximos años.

En el caso del municipio de El Cocuy, la proyección en la generación de residuos sólidos en el municipio de El Cocuy, a través de los tres métodos de proyección, muestra una clara tendencia creciente en la generación de residuos, como se observa en el Figura 10. La línea roja (modelo de regresión lineal) y la línea roja (modelo de regresión de la PPC por la población) siguen un patrón similar de aumento progresivo, alcanzando 66.2 toneladas por mes en 2036.

El método por la PPC del RAS muestra una proyección significativamente más baja, alcanzando solo 37.0 toneladas por mes en 2036. La diferencia de 29.2 toneladas por mes entre la proyección del PPC RAS y los otros dos métodos resalta una brecha importante en la estimación de la generación de residuos. El valor fijo de 0.45 kg/hab-día del PPC RAS no demuestra la realidad local de El Cocuy, donde factores como el crecimiento poblacional y los cambios en las costumbres de consumo, el turismo y la incidencia de ser capital de la provincia inciden directamente en la cantidad de residuos generados [32].

De este modo, se determina que tanto el modelo de regresión lineal para la generación de residuos como el modelo de regresión de la PPC por la población proporcionan proyecciones más ajustadas a la realidad de El Cocuy, ya que consideran factores anteriormente mencionados.

Figura 10. Generación de residuos sólidos – El Cocuy (2012 - 2036)



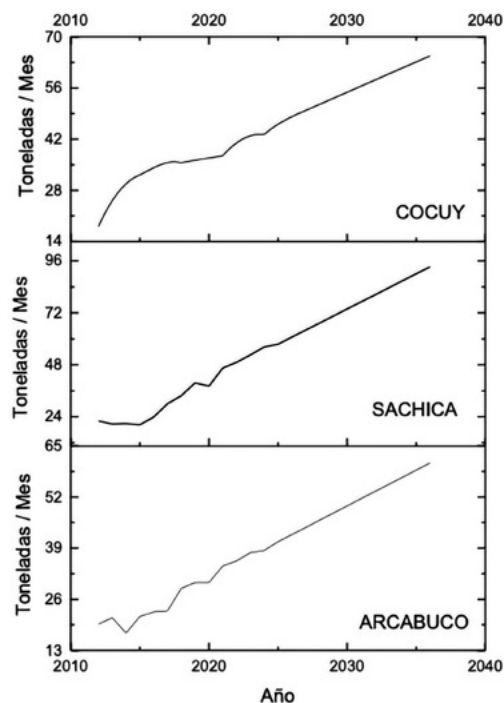
Nota: Elaboración Propia (2025).

El análisis de la generación de residuos sólidos en Arcabuco, Sáchica y El Cocuy muestra una tendencia creciente en todos los métodos utilizados, pero con diferencias significativas al ser comparadas entre sí y con el PPC del RAS. En Arcabuco, los modelos proyectan un aumento gradual hasta alcanzar 60.6 toneladas por mes en 2036, en Sáchica, se proyecta 96.9 toneladas por mes en 2036, mientras que, para El Cocuy, 66.2 toneladas por mes en 2036. Estas diferencias destacan la necesidad de utilizar modelos diferenciados en los cálculos de variables locales para cada municipio, ya que los factores sociales afectan directamente la generación de residuos, lo que no se refleja en los valores establecidos en rangos del RAS, siendo los modelos matemáticos de retrospectiva los métodos más asertivos en este proceso de gestión integral de residuos sólidos.

La Figura 11 muestra el análisis de retrospectiva y la proyección en una sola línea, de donde se observa que, en todos los municipios, se observa una tendencia creciente en la generación de residuos, con diferentes tasas de crecimiento y proyecciones a futuro.

En El Cocuy, la proyección muestra un incremento acelerado en la generación de residuos, alcanzando más de 56 toneladas por mes hacia 2036, lo que refleja un fuerte crecimiento impulsado por factores como el aumento poblacional y el desarrollo económico, lo que exigirá una adaptación para gestionar de manera eficiente los recursos y la infraestructura de manejo de residuos a nivel local para lograr disminuir las tasas de disposición y aumentar la vida útil del relleno sanitario.

Figura 11. Proyección de la generación de residuos sólidos (2012 – 2036)



Nota: Elaboración Propia (2025).

En Sáchica, el aumento es aún más pronunciado, con una proyección de 96 toneladas por mes en 2036, lo que resalta la necesidad urgente de implementar políticas de manejo de residuos específicas que se adapten al ritmo acelerado de generación, garantizando que la infraestructura del municipio pueda soportar este incremento sin comprometer la sostenibilidad económica de la empresa prestadora, además del reto que se tiene por las distancias desde el municipio al sitio de disposición. Por último, aunque Arcabuco muestra un crecimiento más moderado, con 52 toneladas por mes proyectadas para 2036, es esencial que también se anticipen a este aumento progresivo y ajusten sus políticas de gestión de residuos a su crecimiento poblacional y económico. Aun sabiendo que los porcentajes de residuos sólidos orgánicos oscilan entre el 40% y el 60% en la mayoría de los municipios, este hecho representa un reto que demanda

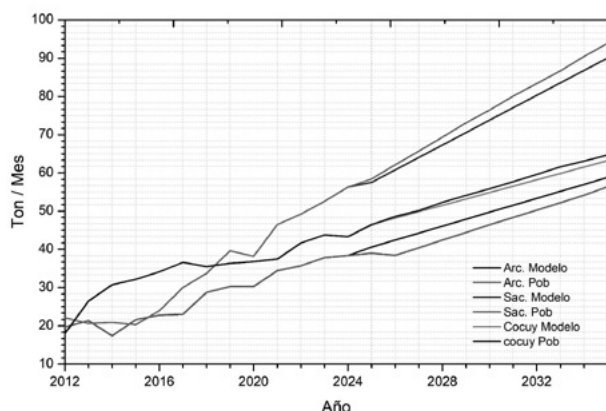
la implementación de modelos diferenciados de residuos orgánicos.

Finalmente, la Figura 12 muestra la proyección de la generación de residuos sólidos para los municipios de Arcabuco, Sáchica y El Cocuy, considerando dos enfoques: el modelo matemático construido con los datos 2012 – 2024 para la estimación en la generación de residuos, los cuales consideraron variables más dinámicas, lo que los hace más precisos para los contextos locales.

En comparación, el valor de referencia del PPC RAS, que se mantiene entre 0.3 y 0.75 kg/hab-día, podría subestimar la generación real de residuos, especialmente en contextos donde hay cambios poblacionales y variaciones en los patrones de consumo o afectación por el turismo local. Esto resalta la importancia de utilizar modelos basados en datos reales y específicos de cada municipio para obtener estimaciones más precisas, lo cual es esencial para planificar una gestión eficiente y sostenible de los residuos sólidos.

De acuerdo con la Figura 12 en el caso del municipio de Arcabuco, los datos proporcionados muestran los valores mínimos y máximos proyectados tanto para el modelo proyectado como para la población con PPC proyectada. El intervalo para el modelo proyectado varía entre un mínimo de 33.5 y un máximo de 44 toneladas por mes, mientras que el intervalo para la población con PPC proyectada se encuentra entre 32.5 y 42,0. Con un nivel de confianza del 95%, se puede determinar que la media de la generación de residuos se encuentra entre 37,25 y 38,75 toneladas por mes.

Figura 12. Proyección de la generación de residuos sólidos (2012 - 2036)



Nota: Elaboración Propia (2025).

En el caso del municipio de Sáchica, con un nivel de confianza del 95%, el análisis de los datos proyectados muestra que el intervalo de confianza para la media de la generación de residuos en el modelo proyectado se encuentra entre 45.0 y 63.8 toneladas por mes. Por otro lado, el intervalo de confianza para la población con PPC proyectada se ubica entre 45.7 y 65.6 toneladas por mes. Estos intervalos reflejan la variabilidad en los datos y proporcionan un rango dentro del cual se espera que caigan los valores reales de la generación de residuos, con un 95% de certeza.

Para el modelo proyectado, los valores máximos y mínimos de la generación de residuos son 49,7 toneladas y 40,0 toneladas, respectivamente. El intervalo de confianza para la media de la generación de residuos se calcula utilizando la desviación estándar de 12,40 toneladas y un tamaño de muestra de 25 años. Usando un nivel de confianza del 95% y el valor t correspondiente, el intervalo de confianza para la media de la generación de residuos en el modelo proyectado se encuentra entre 40,0 y 49,7 toneladas por mes.

Por otro lado, para la población con PPC proyectada, los valores máximos y mínimos son 50,4 toneladas y 40,3 toneladas, respectivamente. Con una desviación estándar de 12,96 toneladas, el

intervalo de confianza para la media de la generación de residuos en este modelo se encuentra entre 40,3 y 50,4 toneladas por mes. Al igual que con el modelo proyectado, este intervalo da una idea del rango dentro del cual se espera que se encuentre la verdadera media de la generación de residuos para la población con PPC proyectada, con un nivel de confianza del 95%.

El modelo de retrospectiva basado en datos reales permite simular y analizar la generación de residuos a nivel municipal de manera más coherente y precisa, superando las limitaciones de los enfoques estándar como el PPC RAS. Sin embargo, es importante destacar que Colombia ha tardado más de 15 años en consolidar datos adecuados, y, ante este contexto, tanto las nuevas normativas como el propio RAS deben evolucionar. Las proyecciones futuras deben basarse en análisis retrospectivos robustos que consideren las dinámicas locales, no en valores fijos que subestiman la complejidad del fenómeno. Es hora de que las políticas y normativas nacionales se adapten a la realidad del país, priorizando datos concretos y actualizados para una gestión de residuos realmente efectiva y sostenible.

Replicabilidad del modelo

Los hallazgos del estudio al Reglamento de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) de Colombia son fundamentales para mejorar las proyecciones y gestión de residuos sólidos a nivel municipal. Actualmente, el RAS establece un rango estático de residuos per cápita (PPC) que no refleja las dinámicas locales, como el crecimiento poblacional, los cambios en los hábitos de consumo y la incidencia del turismo. Ajustar este rango a un enfoque más flexible y dinámico, basado en datos históricos y tendencias observadas, permitiría obtener estimaciones más precisas y ajustadas a la realidad de cada municipio.

El estudio utiliza modelos matemáticos de análisis retrospectivo y series temporales, que son capaces de capturar las variaciones reales en la generación de residuos. Estos modelos de regresión lineales ofrecen una visión más precisa de la evolución de

la producción de residuos, lo que resulta crucial para la planificación de políticas públicas. Integrar estos enfoques al RAS permitiría complementar los métodos actuales, proporcionando proyecciones más confiables y adaptadas a las características específicas de cada municipio.

Además, el impacto del turismo, que ha sido destacado en el estudio, no se considera adecuadamente en el RAS. Municipios con alta incidencia turística, como Sáchica y El Cocuy, experimentan fluctuaciones significativas en la generación de residuos, lo que requiere un ajuste en las proyecciones. Incorporar un factor de ajuste que contemple la población flotante y las variaciones estacionales permitiría una estimación más realista de la generación de residuos en estos contextos, lo que es esencial para una gestión eficaz.

Estos hallazgos sugieren que la adopción de modelos dinámicos y la consideración de factores locales como el turismo, el crecimiento poblacional y los cambios en los hábitos de consumo son claves para mejorar la precisión de las proyecciones del RAS. Integrar estos enfoques en el sistema normativo del país contribuiría a una planificación más eficiente y sostenible en la gestión de residuos sólidos, adaptada a las necesidades y realidades específicas de cada municipio, principalmente a la hora de revisar la planeación de disposición en rellenos sanitarios.

Limitantes del estudio

Las principales limitaciones del presente estudio incluyen: la falta de datos suficientes y actualizados para determinar con precisión la población flotante en los municipios estudiados, lo que dificultó la incorporación de este factor en las proyecciones de residuos.

Además, la falta de información detallada y completa de años anteriores a 2012 en el Sistema Único de Información (SUI) y las empresas prestadoras de servicios limitó el alcance de los análisis históricos y la capacidad de realizar proyecciones más precisas en retrospectiva.

Otra limitación importante, fue la variabilidad de los datos a nivel local, ya que los registros de residuos no siempre reflejaron fielmente las fluctuaciones estacionales o el impacto de eventos extraordinarios, como festividades o aumentos temporales de población debido al turismo.

Por último, la falta de integración de variables socioeconómicas más detalladas en el modelo también representa una limitación, ya que los cambios en los hábitos de consumo pueden influir significativamente en la generación de residuos, pero no fueron completamente considerados en este análisis.

IV. Conclusiones

El análisis retrospectivo de los datos de generación de residuos sólidos en los municipios de Arcabuco, El Cocuy y Sáchica permitió construir modelos matemáticos sólidos para proyectar la cantidad de residuos generados en el futuro. Estos modelos destacaron la importancia de contar con datos históricos precisos sobre la disposición, generación y aprovechamiento de residuos a nivel municipal para una planificación efectiva.

El estudio reveló realidades municipales que han sido ignoradas por el RAS, especialmente en municipios de Boyacá, donde las proyecciones de residuos no reflejan adecuadamente las dinámicas locales, como el crecimiento poblacional y el impacto del turismo. Al aplicar modelos matemáticos de análisis retrospectivo y series temporales, se obtiene una visión más precisa de la generación de residuos, lo cual es crucial para una gestión eficiente. Además, los modelos utilizados en el estudio son replicables en municipios con perfiles similares, lo que permite aplicar este enfoque en otras áreas de Colombia con características comparables para mejorar la planificación y gestión de residuos sólidos.

El modelo de Producción Per Cápita (PPC) proyectado para estos municipios supera los valores establecidos por el RAS para municipios de baja complejidad, lo que indica que las proyecciones

basadas únicamente en valores fijos del RAS subestiman la realidad de la generación de residuos.

Las proyecciones para 2036 en Arcabuco, El Cocuy y Sáchica evidencian un crecimiento mayor al estimado por el PPC RAS, lo que demuestra que este método no refleja la complejidad de las dinámicas locales. Este hallazgo resalta la necesidad de adoptar modelos predictivos más ajustados a la realidad, permitiendo una planificación más precisa para enfrentar el inminente aumento de residuos.

Los modelos de regresión lineal usados fueron los que más correlación entre las variables presentaron, estos reflejan un crecimiento sostenido de la generación de residuos, principalmente impulsado por el aumento poblacional, cambios en los hábitos de consumo y, particularmente, por el dinamismo social vinculado al turismo en los tres municipios, de acuerdo con las fuentes citadas.

Se recomienda tener en cuenta la necesidad de que la actualización de los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) esté soportada en modelos prospectivos que incorporen datos reales para poder establecer una proyección más real en la generación de residuos incluyendo, la actualización de los PGIRS las variables turísticas y económicas.

V. Referencias

- [1] Minvivienda, «Tratamiento de residuos sólidos en el marco del servicio público de aseo - Diagnóstico y evaluación del tratamiento de residuos sólidos en Colombia I Minvivienda». Accedido: 14 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.minvivienda.gov.co/programa-de-residuos-solidos/tratamiento-de-residuos-solidos-en-el-marco-del-servicio-publico-de-aseo-diagnostico-y-evaluacion-del-tratamiento-de-residuos-solidos-en-colombia>
- [2] J. A. Ferrer Carbonell, «Percepción del estado de salud sobre la enfermedad diarreica aguda y los botaderos de basura a cielo abierto en Soledad Atlántico - una aplicación de la Fundación Producción de Salud», 2006, Accedido: 14 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/1992/9227>
- [3] C. A. García Rueda y V. D. P. Quintero Munoz, «Revisión de los procesos de diseño de un relleno sanitario bajo la normatividad colombiana», 2011, Accedido: 14 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/24976>
- [4] K. M. Noguera y J. T. Olivero, «LOS RELLENOS SANITARIOS EN LATINOAMÉRICA: CASO COLOMBIANO», sep. 2010, Accedido: 16 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.accefyn.org.co/handle/001/2721>
- [5] J. C. Vesga Ferreira, F. A. A. Sepulveda, y H. E. Perez Waltero, «Smart Ecological Points, a Strategy to Face the New Challenges in Solid Waste Management in Colombia», *Sustainability*, vol. 16, n.o 13, Art. n.o 13, ene. 2024, doi: 10.3390/su16135300.

- [6] C. Aylwin Ríos, «Evaluación de un plan de gestión de residuos sólidos domiciliarios en la comuna de Cochamó, ingeniería conceptual», 2017, Accedido: 15 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/150305>
- [7] T. C. Borja, «Análisis interdimensional de los impactos ambientales, asociados con el botadero a cielo abierto de la ciudad de Quibdó, Colombia», *Rev. Bioetnia*, vol. 5, n.o 1, Art. n.o 1, jun. 2008, doi: 10.51641/bioetnia.v5i1.101.
- [8] A. Ranjan, R. D. Gupta, y N. Rawal, «Characterization and Management of Municipal Solid Waste: A Case Study of an Indian City», en *Lecture Notes in Civil Engineering*, Singapore: Springer Nature Singapore, 2025, pp. 1-19. doi: 10.1007/978-981-97-6024-4_1.
- [9] S. L. Ibargüen Rodríguez y J. de J. A. Flores Cuautle, «Application of system dynamics to evaluate reduction targets for the entry of solid waste into a landfill site | Discover Environment». Accedido: 15 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s44274-024-00091-9>
- [10] Y. L. Pulgarin y B. F. Orozco, «Gestión de residuos sólidos urbanos: Un enfoque en Colombia y el departamento de Antioquia», *Cuad. Act.*, vol. 12, n.o 1, Art. n.o 1, 2020, doi: 10.53995/20278101.808.
- [11] Alcaldía de San Gil, «Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos - PGIRS», Alcaldía de San Gil. Accedido: 31 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://sangil.gov.co/documentos/1609/plan-de-gestion-integral-de-residuos-solidos-pgirs/>
- [12] Alcaldía de Cartagena, «Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos-Docmento PGIRS actualizado | Alcaldía Mayor de Cartagena de Indias». Accedido: 31 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.cartagena.gov.co/Transparencia/Políticas-lineamientos-y-manuales/Documento-PGIRS-actualizado>
- [13] M. I. Gélvez Pabón, «Propuesta para el manejo integral de residuos sólidos urbanos en el municipio de puerto escondido, córdoba, Colombia», dic. 2017, Accedido: 15 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/10654/17306>
- [14] A. G. Vélez, P. A. Peñafiel Arcos, M. G. Heredia Rengifo, S. N. Barreno Ubilluz, y J. F. Chávez Espinoza, «Propuesta de sistema de gestión de residuos sólidos domésticos en la comunidad Waorani Garenó de la Amazonía ecuatoriana», *Rev. Cienc. Tecnol.*, vol. 12, N.o 2, pp. 33-45, 2019.
- [15] B. Simon-Vermot, «Modelo para el manejo de los residuos sólidos generados por el recinto Chiriboga y sus alrededores», Thesis, Universidad Internacional SEK, 2010. Accedido: 15 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/420>
- [16] H. F. Kerguelén García, «Estimación de la producción per cápita de residuos sólidos municipales mediante variables socioeconómicas», 2004, Accedido: 15 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/1992/21731>
- [17] M. Soto Vilca, «Producción per cápita de residuos sólidos domésticos según factores socioeconómicos de los habitantes del Centro Poblado Mina Rinconada Ananea, San Antonio de Putina, Puno».

- [18] MINIVIVIENDA, «Guía para la formulación, implementación, evaluación, seguimiento, control y actualización de los PGIRS I Min. Vivienda». Accedido: 15 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.minvivienda.gov.co/pgirs-de-segunda-generacion-resolucion-754-de-2014/guia-para-la-formulacion-implementacion-evaluacion-seguimiento-control-y-actualizacion-de-los-pgirs>
- [19] V. A. Hernández Arias, «Caracterización de los residuos sólidos generados en la Universidad Cooperativa de Colombia sede principal de Villavicencio Meta», dic. 2020, Accedido: 16 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12494/28486>
- [20] A. F. Montoya Rendón, S. Valencia, W. A. Villadiego Castillo, y A. M. Díaz Gómez, «¿Valorización económica y energética de los residuos sólidos del municipio de El Bagre (Antioquia) I Cuaderno activa». Accedido: 31 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://ojs.tdea.edu.co/index.php/cuadernoactiva/article/view/806>
- [21] MINIVIVIENDA, «Manuales I Min. Vivienda». Accedido: 15 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.minvivienda.gov.co/viceministerio-de-agua-y-saneamiento-basico-reglamento-tecnico-sector-manuales>
- [22] M. del P. Sánchez-Muñoz, J. G. Cruz-Cerón, P. C. Maldonado-Espinel, M. del P. Sánchez-Muñoz, J. G. Cruz-Cerón, y P. C. Maldonado-Espinel, «Gestión de residuos sólidos urbanos en América Latina: un análisis desde la perspectiva de la generación», *Rev. Finanz. Política Económica*, vol. 11, N o 2, pp. 321-336, dic. 2019, Doi: 10.14718/revfinanzpolitecon.2019.11.2.6.
- [23] D. D. Dávila Díaz, «Influencia de los factores económicos y culturales de los habitantes en la generación de residuos sólidos, con la finalidad de minimizarlos en la ciudad de Nueva Cajamarca, Distrito de Nueva Cajamarca 2018», Universidad Nacional de San Martín. Fondo Editorial, 2019. Accedido: 20 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unsm.edu.pe/item/1ab74d72-9617-4604-92cd-15eabe582359>
- [24] A. A. León-López, A. González Damián, C. A. Ken Rodríguez, y I. Bojórquez Báez, «El manejo de los residuos sólidos y la actividad turística en Chetumal, México: una relación compleja», *Cuad. Urbano Espac. Cult. Soc.*, N.o 29, pp. 75-98, 2020.
- [25] A. R. Guerra y K. A. Baca-Cajas, «Generación de Residuos Sólidos Urbanos (RSU): análisis de una década de gestión en países de Europa y América», *Rev. Ecuat. Med. Cient. Biológicas*, vol. 43, N.o 1, Art. N.o 1, may 2022, Doi: 10.26807/remcb.v43i1.919.
- [26] M. I. Gelvez Pabón, «Análisis estratégico de los factores que inciden en la generación y aprovechamiento de los residuos sólidos en el sector manufacturero en Colombia», máster thesis, Universidad de La Sabana, 2023. Accedido: 16 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://intellectum.unisabana.edu.co/handle/10818/59535>
- [27] L. D. Alea González, L. G. Marín Cuba, y N. Bruguera Amarán, «Diagnóstico de la gestión del reciclaje de los residuos sólidos generados en el destino turístico Viñales», *Av. Cuba*, vol. 21, n.o 4, pp. 516-531, 2019.

- [28]** E. Díaz Fariña, J. Díaz-Hernández, y N. Padrón, «The contribution of tourism to municipal solid waste generation: A mixed demand-supply approach on the island of Tenerife», *Waste Manag.*, vol. 102, feb. 2020, Doi: 10.1016/j.wasman.2019.11.023.
- [29]** E. F. Monroy Ávila y D. R. Díaz Guevara, «Logros de Sostenibilidad: Modelo circular en la gestión de residuos sólidos municipales», 2025, pp. 129-143. Doi: 10.61728/AE20251895.
- [30]** L. Morais, V. Nascimento, S. Simões, y J. Ometto, «Regional Distance Routes Estimation for Municipal Solid Waste Disposal, Case Study São Paulo State, Brazil», *Energies*, vol. 14, N.o 13, Art. n.o 13, ene. 2021, doi: 10.3390/en14133964.
- [31]** M. Sabater Vidal, «El impacto del turismo en la generación de residuos sólidos urbanos en la isla de Mallorca», may 2022, Accedido: 15 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.uib.es/xmlui/handle/11201/159080>
- [32]** I. Arbulú, J. Rey-Maqueira, y F. Sastre, «The impact of TOURISM and seasonality on different types of municipal solid waste (MSW) generation: The case of Ibiza», *Heliyon*, vol. 10, N.o 13, p. e33894, jul. 2024, Doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e33894.



Imagen solo de referencia.



Valoración sociocultural de servicios ecosistémicos urbanos en el Parque Juan Pablo II del municipio de Chiquinquirá, Boyacá

Sociocultural Assessment of Urban Ecosystem Services in Juan Pablo II Park in the Municipality of Chiquinquirá, Boyacá

Mónica Alfonso¹, Luz Ángela Cuellar², Tania Pineda³, Jenny Trilleras⁴

Tipo de Artículo: Investigación.

Recibido: 13/08/2025. **Aprobado:** 08/10/2025. **Publicado:** 12/12/2025

Resumen: la valoración sociocultural de servicios ecosistémicos permite analizar las percepciones que posee la población de determinado territorio sobre los recursos naturales y los beneficios que obtienen de ellos, siendo instrumentos útiles para la identificación y aplicación de modelos de gestión y planeación del ordenamiento urbano. En este sentido, esta investigación fijó su objetivo en identificar el valor sociocultural de los servicios ecosistémicos del Parque Juan Pablo II del municipio de Chiquin-

quirá, como mecanismo facilitador en la toma de decisiones en materia de planeación territorial en ambientes urbanos. Para ello, se analizaron datos tanto biofísicos como de percepción recolectada a través de la aplicación de dos modelos de entrevistas semiestructuradas a la población visitante, así como, a los actores gubernamentales del municipio de Chiquinquirá. Como resultado, se evidencia una amplia oferta de servicios ecosistémicos derivados del ecosistema prevaeciente en el parque estu-

¹ Autor correspondiente: Mónica Alfonso. Mayor título: Ingeniera geóloga. Filiación institucional: Universidad Santo Tomás. País: Colombia, Ciudad: Tunja. Correo electrónico: monica.alfonso@usantoto.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8962-8835>

² Autor correspondiente: Luz Ángela Cuellar. Mayor título: Doctora en Ciencias Exactas. Filiación institucional: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. País: Colombia, Ciudad: Tunja. Correo electrónico: luz.cuellar@uptc.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9573-8344>

³ Autor correspondiente: Tania Pineda. Filiación institucional: Universidad Santo Tomás. País: Colombia, Ciudad: Tunja. Correo electrónico: tania.pineda@usantoto.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0927-0632>

⁴ Autor correspondiente: Jenny Trilleras. Mayor título: Doctora en Ciencias de la Educación. Filiación institucional: Universidad Santo Tomás. País: Colombia, Ciudad: Tunja. Correo electrónico: jennymtm@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9265-5666>

diado, observando que la amplia zona forestal y su considerable cobertura vegetal contribuyen de manera importante a la regulación de condiciones climáticas y a la provisión de recursos de soporte. En igual sentido, las instalaciones e infraestructura deportiva y ecológica representan un gran factor de identidad y cultura para la población. Los resultados presentan que más del 60% de los encuestados consideran los servicios ecosistémicos del parque como importantes o muy importantes; en particular, el 70% de los encuestados destacaron los servicios culturales asociados a la salud físico-mental y la recreación. Asimismo, los servicios de regulación fueron reconocidos como importantes por más del 60% de los encuestados. Estos resultados evidencian que el parque constituye un espacio clave para la conservación de la biodiversidad y la construcción de la identidad local, consolidándose como un eje articulador de la sostenibilidad urbana.

Palabras clave: Valoración Sociocultural; Servicios Ecosistémicos; Biodiversidad; Desarrollo Sostenible; Herramienta de planeación y Gestión Urbana; Ordenamiento territorial.

Abstract: the sociocultural assessment of ecosystem services allows us to analyze the perceptions that the population of a certain territory has about the natural resources and the benefits they obtain from them, being useful instruments for the identification and application of urban planning and management models. In this sense, the present research set its objective on identifying the sociocultural value of the ecosystem services of the Juan Pablo II Park in the city of Chiquinquirá, as a facilitating mechanism in decision-making regarding territorial planning in urban environments. Therefore, both biophysical and perception data collected through the application of two models of semi-structured interviews with the visiting population, as well as government actors from the city of Chiquinquirá, are analyzed. The sociocultural assessment of ecosystem services makes it possible to analyze how local communities perceive natural resources and the benefits derived from them, providing valuable inputs for the design of urban management and planning models. This study aimed to identify the sociocultural value of the ecosystem services provided by Juan Pablo II

Park in the city of Chiquinquirá, as a tool to inform decision-making in urban territorial planning. Both biophysical data and perception data were collected through semi-structured interviews with 300 park visitors and key government stakeholders. Findings reveal a broad supply of ecosystem services associated with the park's prevailing ecosystem. Its extensive forested area and dense vegetation play a key role in regulating local climatic conditions and supporting ecological processes, while its recreational and ecological infrastructure fosters cultural identity and community values. Quantitatively, more than 60% of respondents rated the park's ecosystem services as important or very important. Cultural services stood out in particular: 70% emphasized their relevance for mental health and recreation, while regulatory services such as air purification and urban temperature control were also recognized as important by over 60% of participants. Overall, the results highlight Juan Pablo II Park as a crucial space for biodiversity conservation, cultural identity building, and community well-being, positioning it as a cornerstone of urban sustainability.

Keywords: Sociocultural Assessment; Ecosystem Services; Biodiversity; Sustainable Development.

I. Introducción

Los servicios ecosistémicos (SE) corresponden a los beneficios que se adquieren directa e indirectamente del medio natural o sus derivados culturales, provenientes de los ecosistemas, tales como materias primas, energía, funciones propias del medio, oportunidades de recreación y valores inherentes a la cultura [1]. Por lo cual, su estudio permite comprender las relaciones entre el funcionamiento de los ecosistemas y el bienestar humano, puesto que dichos servicios demarcan las condiciones y procesos mediante el cual los ecosistemas adecuan y sustentan la vida humana, enfatizando en las condiciones biofísicas, las interacciones y sus componentes, especialmente aquellas relacionadas con la capacidad de satisfacer las necesidades humanas [2].

En este sentido, los (SE) son todos aquellos procesos de los sistemas naturales que incrementan la

calidad de vida de las personas cuando son aprovechados, por lo cual su estudio puede abordarse mediante enfoques biofísicos, monetarios y socio-culturales [3]. Actualmente, se considera como un factor decisivo para la promoción y búsqueda del desarrollo urbano sostenible, puesto que implica los factores relacionados con el bienestar humano en interacción con el ambiente, por lo que su gestión implica el uso de los recursos de manera eficiente, sin comprometer las necesidades de las poblaciones futuras [4].

Por su parte, el aumento de la población humana ha impulsado la urbanización acelerada, la cual ha impactado de manera significativa en los sistemas naturales y en la calidad de vida de los residentes de las zonas urbanas. Así, los ecosistemas urbanos proporcionan beneficios que influyen en el bienestar humano, incluyendo la salud, la alimentación, la regulación climática, entre otros [5].

De esta manera, los sistemas urbanos pueden considerarse como mosaicos de ecosistemas estructurados a partir de factores bióticos y abióticos próximos al medio natural, aunque en gran medida constituidos y modificados por la acción humana. No obstante, dichos ecosistemas se sostienen y aumentan la calidad de vida mediante los (SE), por lo que su cuidado y funcionamiento la base para un desarrollo sostenible y eficiente, promoviendo tanto el bienestar como la economía [5].

Crecimiento poblacional y el desarrollo urbano

Las dinámicas poblacionales y tendencias de crecimiento urbano a nivel global han desencadenado presión en los diversos ecosistemas, lo que conlleva al deterioro del medio natural y, por ende, a la disminución de la oferta de bienes y servicios ecosistémicos (SE) [6]. Actualmente alrededor del 51% de la población reside en ciudades y se estima que para el año 2050 alcanzará el 70%, dando como resultado una dinámica de movilidad acelerada, que sugiere el realce de problemáticas de diversa índole, en el que se destaca la afectación hacia el medio ambiente, producto del aumento de la

actividad antrópica y la ampliación de los sistemas productivos urbanos [7].

La ocupación de paisajes urbanos evidencia la presencia de ambientes consolidados por la tecnología e infraestructura, generando la percepción de sociedades aparentemente desvinculadas del medio natural. No obstante, dicha urbanización incide directamente en un aumento significativo en la demanda del capital ambiental y en la explotación de los SE [8]. En este sentido, el incremento de las zonas urbanas incide de manera directa en la pérdida y degradación de ecosistemas, zonas verdes y áreas productivas que finalmente afectan las funciones y servicios del medio natural [9].

En el contexto global, diversos estudios han destacado la importancia de los parques urbanos como proveedores de servicios ecosistémicos (SE). En la ciudad de Bogotá, [10], a partir de su investigación en el Parque Metropolitano Simón Bolívar, evidenció la contribución de los espacios verdes a los SE de soporte, provisión y regulación. Asimismo, [11] señalan que los resultados derivados de este tipo de estudios aportan criterios para toma de decisiones en planificación de infraestructura verde urbana. Más recientemente [12], analizaron cinco parques urbanos en la ciudad de Tunja y encontraron que los servicios culturales son percibidos como los más relevantes, independientemente del tamaño de los parques.

De manera similar, en Ciudad de México, un estudio reciente destaca la importancia del Parque Chapultepec y de los parques urbanos en general, señalando que cumplen funciones esenciales de soporte y regulación, como el mantenimiento de la biodiversidad del suelo y la conectividad de la vegetación [13]. Además, en contextos internacionales, como en Varsovia y Polonia, se ha demostrado la capacidad de los parques urbanos para proveer servicios ecosistémicos culturales y de regulación, lo que confirma su papel estratégico en la sostenibilidad de grandes ciudades e incluso de ciudades intermedias [14].

En este sentido, la comparación con estudios internacionales a diferentes escalas permite evidenciar

que los parques urbanos son fundamentales para la regulación de las condiciones climáticas, en el fomento de la identidad cultural y en la contribución a la sostenibilidad urbana. Sin embargo, en ciudades intermedias como Chiquinquirá, los estudios sobre valoración sociocultural de los SE son escasos, lo que plantea la necesidad de generar información que aporte insumos para la planificación territorial y la gestión sostenible de espacios urbanos. Esta necesidad es más evidente si se considera que el crecimiento poblacional y el desarrollo urbano han estado relacionados con la pérdida de ecosistemas, y la reducción en la provisión de los servicios ecosistémicos mediante la sustitución de espacios verdes por infraestructura urbana [15]. Además, producto del crecimiento urbano acelerado, las ciudades se ven obligadas a expandirse y ejercer presión sobre zonas de prestación de SE locales y de aquellos que se encuentran más allá de los límites de la misma; teniendo en cuenta que los territorios dependen en su totalidad de los ecosistemas y sus funciones para brindar condiciones de calidad de vida y bienestar de sus habitantes [8].

Sin embargo, la explotación y degradación de estos sistemas, como consecuencia del aumento de la densidad poblacional y el desarrollo urbano, reduce el suministro de los SE, afectando directamente el bienestar humano. Esta situación incrementa la demanda social de estos servicios, resultando en una serie de afectaciones relacionadas con el aumento de la contaminación, la disminución de la capacidad de capturar partículas atmosféricas, el deterioro en el control del escurrimiento, la regulación de la temperatura, entre otros. Tales alteraciones inciden de manera significativa en el deterioro de la calidad de vida de la población, el estado del medio ambiente y aumentan la probabilidad de riesgo de desastres [16].

Es por esto, que los SE poseen una relevancia significativa en cuanto a bienestar, regulación del entorno y salud humana, proporcionando a los residentes urbanos beneficios de alto valor sociocultural [17]. No obstante, existe una carencia de estudios que analicen dichas interacciones a lo largo del tiempo, lo que limita la información disponible sobre cómo las estructuras, características y propiedades de los

ecosistemas del paisaje pueden contribuir a los valores culturales de una sociedad [18].

De manera complementaria, la carencia en cuanto a investigación e interés por este tipo de estudios es una de las consecuencias de la subestimación de los ecosistemas urbanos y las áreas verdes en la planificación urbana, generando un limitado agendamiento político y consenso sobre el uso del suelo en áreas verdes en cuanto a urbanismo refiere, lo que a su vez resulta en una baja y nula prioridad de asignación presupuestaria en los territorios [16], aun cuando la expansión urbana demanda de recursos naturales para edificar y operar entornos construidos [19].

En síntesis, las valoraciones socioculturales en entornos urbanos promueven la gestión, la resiliencia, la salud y la calidad de vida de los residentes, lo que resulta en el desarrollo de políticas apropiadas de planificación y toma de decisiones para la conservación de los servicios ecosistémicos y la gestión de los espacios verdes [8]. Por lo cual, la presente investigación pretende ser insumo para la comprensión del valor simbólico de las áreas verdes urbanas respecto a los diversos SE producto de las interacciones de los individuos y el entorno natural.

Para este propósito, se selecciona la ciudad de Chiquinquirá como caso de estudio y específicamente el Parque Juan Pablo II, consolidado como la zona verde más grande de la ciudad y con un alto flujo de personas que allí departen, producto del significado cultural y tradicional que lo caracteriza, lo que además puede contribuir al incremento de información acerca de los recursos y oportunidades que posee, siendo insumo para los procesos de planificación y la formulación [20] de lineamientos en materia de gestión urbana y ambiental de la ciudad.

II. Materiales y Métodos

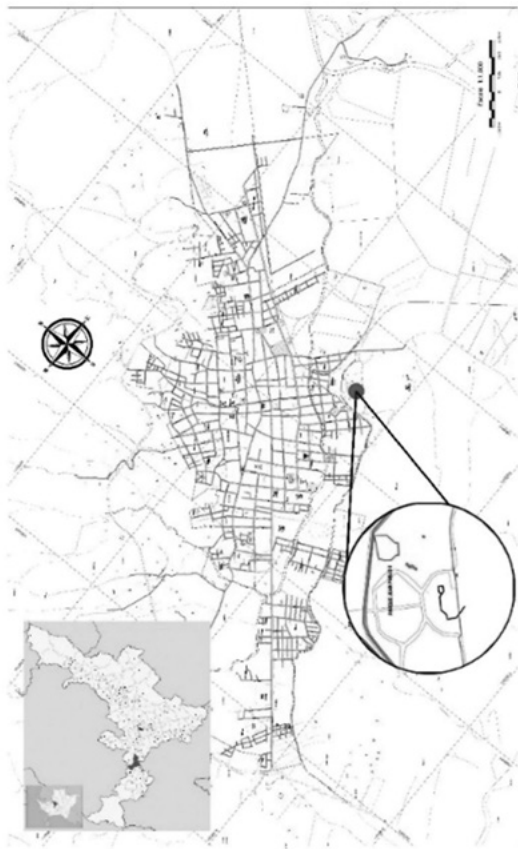
Área de estudio

El parque Juan Pablo II se encuentra localizado al oriente del municipio de Chiquinquirá, Boyacá, Colombia, dentro de la zona urbana, al pie del cerro

Terebinto, como se muestra la Figura 1. Se distingue por su extensión de zonas verdes, senderos de caminata, espacios recreacionales y áreas de descanso, convirtiéndose en un punto estratégico por los habitantes y/o turistas [20].

Este parque se encuentra rodeado por la plaza de ferias, el quiosco, la pampa, el coliseo cubierto de deportes y dentro del parque se encuentran la pista de bicicross, un complejo de deportes el cual está dividido en canchas de tenis, canchas de futbol, cancha de básquet, pista de patinaje, coliseo de ferias y exposiciones, cabañas, caminos de herradura, un mirador, estatuas, entre otros atractivos que da el parque para el entretenimiento de los usuarios del mismo.

Figura 1. Localización Parque Juan Pablo II en Chiquinquirá (Boyacá, Colombia)



Nota: fuente adaptado del EOT del municipio de Chiquinquirá.

Recolección de datos

El presente estudio corresponde a una investigación de enfoque mixto, cuyo objetivo es recopilar y evaluar datos cuantitativos y cualitativo para identificar el valor sociocultural de los servicios ecosistémicos (SE) del Parque Juan Pablo II del municipio de Chiquinquirá. Para ello, el modelo metodológico se centró en la realización de una caracterización de variables biofísicas y sociodemográficas para determinar los SE, la valoración de estos y la creación de un instrumento de educación ambiental como mecanismo facilitador en la toma de decisiones en materia de planeación territorial en ambientes urbanos del municipio.

En este sentido, se efectuó un diagnóstico del área de estudio, seguido de una revisión documental de los instrumentos de planificación. Asimismo, se identificaron, cuantificaron y plasmaron los SE, encontrados dentro del parque; la clasificación puede verse en la Tabla 1. Dicha caracterización se realizó por medio de un análisis bibliográfico, una caracterización biofísica y sociodemográfica, teniendo en cuenta la descripción de los procesos y características del sistema socio ecológico del parque, aplicando un análisis espacial por medio del procesado de imágenes satelitales e información geográfica suministrada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi en los softwares ArcGIS y QGIS.

Tabla 1. Clasificación de servicios ecosistémicos

Clasificación	Servicio ecosistémico	Descripción
Provisión	Alimento	Provisión de alimentos (vegetales, plantas comestibles)
	Agua	Provisión de agua para el consumo
	Recursos ornamentales	Alimento Proveen elementos ornamentales (flores, etc.)

Regulación	Purificación del aire	Mejora en calidad del aire y reducción contaminación ambiental
	Regulación temperatura urbana	Regulación temperatura urbana mediante generación de sombra / Reducción efecto isla calor
	Regulación del clima local y global	Regulación del clima local y global
	Reducción de ruido	Reducción contaminación acústica
	Mitigación de eventos naturales extremos	Protección contra desastres naturales, como inundaciones, deslizamientos, entre otros.
	Regulación de flujos de agua	Regulación ciclo del agua: Infiltración y filtración/limpieza del agua
	Purificación del agua / Tratamiento de residuos	
	Control escurrimientos	Control en la circulación de ríos, quebradas, esteros, canales, etc.
	Polinización	Polinización y dispersión de semillas
	Mantenimiento y hábitat para la biodiversidad	Hábitat para la biodiversidad (flora y fauna)
Soporte	Valor estético	Estética: belleza escénica y paisajística
	Recreación y turismo	Recreación, entretenimiento y ocio en áreas verdes (descanso, paseos)
Culturales	Salud físico-mental	Generan salud físico-mental y reducen el estrés
	Cohesión e integración social	Promueven cohesión e integración social en las comunidades
	Experiencia espiritual o religiosa	Inspiración para experiencias espirituales y/o religiosas

Información para el desarrollo cognitivo

Promueve la educación y aprendizaje

Identidad, cultura y patrimonio local

Genera identidad local mediante cultura y patrimonio ecológico

Biofilia

Favorecen conexión con la naturaleza

Nota: fuente modificado de [24]

Con el fin de obtener una muestra representativa, se aplicó una entrevista semiestructurada a un total de 300 visitantes del parque, incluyendo tanto residentes del área circundante como turistas. La selección de los participantes se realizó aleatoriamente en diferentes horarios de visita, con el propósito de reducir sesgos. Se incluyó a miembros de la comunidad mayor de 15 años, hombres como mujeres.

De manera complementaria, se entrevistó a tres actores gubernamentales, seleccionados por su disposición y vinculación con las instituciones de mayor incidencia en la administración del parque Juan Pablo II. La selección de los encuestados consideró la percepción ciudadana e institucional, buscando identificar cómo los visitantes se relacionan con su entorno. Esto se abordó mediante la descripción de las prácticas, actividades y disfrute del parque, así como el reconocimiento de la apropiación y uso de los servicios, con el propósito de entender los vínculos socio ecológicos y culturales.

Selección de participantes

El modelo de entrevista semiestructurada se dividió en tres secciones, en la primera se analizaron las características de la población a entrevistar. La segunda sección, se relaciona a la conexión con el entorno, en la que se abordaron preguntas relacionadas a la asociación de la población con el parque, por lo que se describieron las actividades que realizan, la frecuencia, las razones para escoger el escenario, así como los impedimentos y si la vista a las instalaciones supone algún costo.

La tercera sección, abordó la valoración de los servicios ecosistémicos, en el que se consideró en primera instancia, si los entrevistados tienen conocimiento de la importancia de estos y si caracterizan al parque Juan Pablo II, como ecosistema prestador. Así mismo, se caracterizaron las diversas especies que la población identifica y se evaluaron las problemáticas relacionadas con la degradación ecosistémica.

En cuanto a la valoración y calificación de los SE en las entrevistas semiestructuradas, se empleó una escala de importancia Likert, tomada de la investigación de [3], en la cual, se evaluó la percepción que la población tiene respecto a los beneficios de provisión, regulación, soporte y cultura que les brinda el parque Juan Pablo II.

Análisis de datos

Para el análisis de la información recolectada se emplearon estadísticas descriptivas de frecuencia y un análisis de correspondencia múltiple (ACM), con el fin de identificar relaciones entre variables categóricas, como las variables sociodemográficas y las percepciones de importancia otorgadas a los SE. Esta técnica estadística, permite agrupar las percepciones con características sociodemográficas específicas, y de esta manera, comprender la heterogeneidad de la percepción comunitaria.

El procesamiento de los datos se realizó mediante el software SPSS de IBM y la visualización de resultados se apoyó con el programa Grapher. Además, se analizaron los valores de percepción considerando las características personales de los actores sociales entrevistados.

III. Resultados y discusión

Caracterización biofísica

Se realizó una zonificación ecosistémica del Parque Juan Pablo II en Chiquinquirá mediante análisis cartográfico y procesamiento de datos espaciales, con el objetivo de identificar sus servicios ecosis-

témicos desde una perspectiva biofísica. A nivel regional, se determinó que predominan climas fríos y húmedos, con una geomorfología compuesta por montañas estructurales erosionables, valles aluviales y áreas urbanas. El parque, que cuenta con 0,26 km² de valles aluviales y 0,054 km² de montañas, presenta suelos de vocación agrícola y urbana, aptos para cultivos permanentes y transitorios, así como ganadería semi-intensiva. No obstante, su uso actual está orientado a la conservación forestal y la recreación.

Por lo cual se realiza el procesamiento de imágenes espaciales con el fin de obtener la cobertura del suelo del Parque Juan Pablo II, empleando la clasificación Corine Land Cover (CVC), la cual permite realizar un inventariado homogéneo de la cobertura biofísica de la superficie, por medio de la interpretación visual de imágenes satelitales [21]

Perfil sociodemográfico

Como resultado de la aplicación de la entrevista a una muestra de 300 visitantes, se procedió al procesamiento de los datos para evaluar el perfil sociodemográfico de los visitantes al Parque Juan Pablo II. En este sentido, como se muestra en la Figura 2, es posible apreciar que la mayor parte de la población que visita el parque se encuentra en rangos de edad de 18 años a 30 años y 31 años a 51 años con 122 personas y 125 personas entrevistados respectivamente, con una incidencia mayor del género femenino, que representa el 51,66% de la muestra, mientras que el masculino el 48,33%. Sin embargo, esto no es del todo representativo, teniendo en cuenta que esta población se encontraba mayormente dispuesta a la aplicación de las entrevistas. No obstante, se registró la participación de 7 personas menores de 17 años, 44 en rangos de edad de 51 años a 70 años y 2 personas mayores de 70 años.

De manera análoga (ver Figura 2), se observa que el 82% de los visitantes del Parque Juan Pablo II, residen en la zona urbana y pertenecen en su mayoría a los estratos 2 y 3, representando el 80%, mientras que el 20% restante, corresponde a estratos 1 y 2.

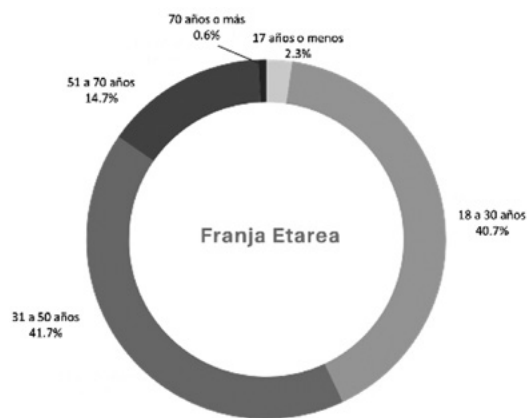
Asimismo, 54 de los entrevistados reside en zonas rurales con prevalencias de los estratos 1 y 2 con más del 50% de la población.

En cuanto al nivel educativo, se evidenció que el 48% población entrevistada cuenta con un nivel educacional medio superior, mientras que 40% posee niveles de educación superior representada en la culminación de pregrados y posgrados. El 20% de personas entrevistados restantes posee niveles educacionales bajos o no cuentan con ellos.

Adicionalmente, es posible evidenciar que el 43% de los entrevistados visita el parque con una incidencia de uno a varios días en la semana, mientras que el 34% de los entrevistados visita las instalaciones de manera mensual y/o esporádicamente. No obstante, el 6% de entrevistados acude al Parque Juan Pablo a diario y 14% una o más veces al año.

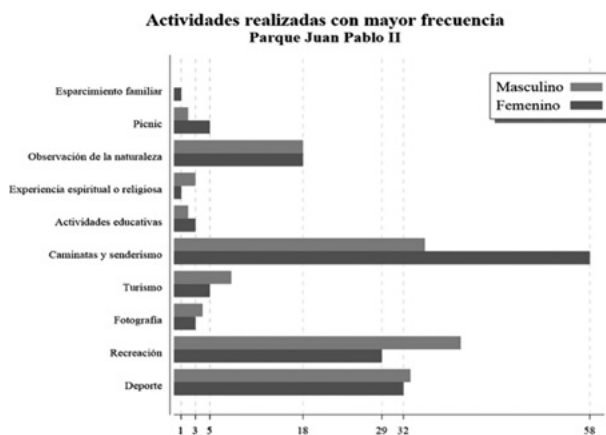
Por otra parte, como se muestra en la Figura 3, se aprecia que la población de entrevistados visita el parque con el fin de realizar actividades de senderismo y caminatas, con una prevalencia del género femenino, mientras que el género masculino, acude en mayor medida por actividades de recreación. Puede apreciarse igualmente que también se realizan actividades deportivas, turísticas, educativas, de esparcimiento familiar, picnic, de apreciación del paisaje natural, fotografía y disfrute de experiencias espirituales o religiosas.

Figura 2. Composición sociodemográfica de los actores entrevistados



Nota: fuente elaboración propia.

Figura 3. Actividades realizadas en el Parque Juan Pablo II



Nota: fuente elaboración propia.

A partir de entrevistas realizadas a actores gubernamentales del municipio de Chiquinquirá, se identificó que el Parque Juan Pablo II se percibe como un espacio de alto valor sociocultural, ecológico y religioso. Se destaca su rol como refugio de biodiversidad, especialmente de especies nativas y endémicas, lo cual contribuye al equilibrio ecológico de la zona mediante la regeneración de suelos, protección de fuentes hídricas, entre otras. Dichos actores reconocen al parque por su biodiversidad vegetal, puesto que alberga una alta variedad de

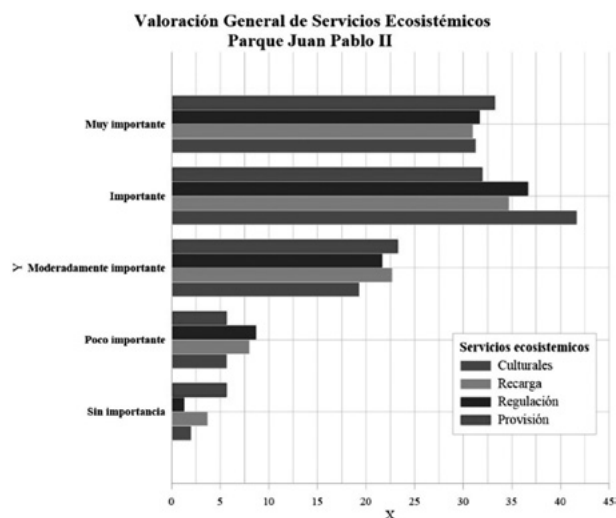
especies vegetales que proporcionan hábitat para diversas especies, en su mayoría aves, insectos y fauna en general. Además, se encuentran espacios de recreación diseñados para el esparcimiento y disfrute de la comunidad.

En este sentido, los actores gubernamentales describen al Parque Juan Pablo II como un ecosistema urbano que ofrece servicios que benefician tanto a la comunidad como al medio natural, como moderar el microclima local y controlar la erosión. El parque también funciona como espacio de recreación, encuentro comunitario y promoción de prácticas sostenibles, fortaleciendo el bienestar, la cohesión social y el sentido de pertenencia. Finalmente, se resalta su potencial como escenario para la educación ambiental y la valoración del medio natural [22].

Valoración sociocultural

Este aspecto se adelantó por medio de la valoración de percepciones, calificada con la escala de Likert, evidenciándose en la Figura 4, que para la comunidad los “beneficios” que provee el ecosistema del Parque Juan Pablo II, en términos de provisión, regulación y cultura, se consideran en su mayoría importantes a muy importantes representando aproximadamente el 60% de respuestas generalizadas.

Figura 4. Valoración general de servicios Parque Juan Pablo II



Nota: fuente elaboración propia.

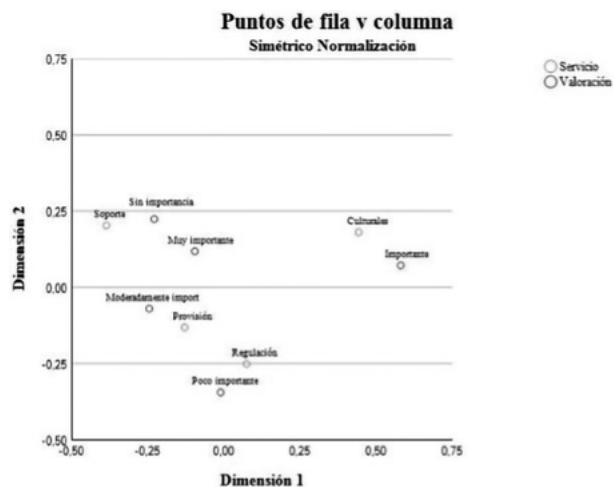
Particularmente, la totalización de los servicios de provisión del Parque Juan Pablo II (Figura 5) es percibida, por la comunidad como muy importante en un 35%, importante en un 33%, moderadamente importante en un 24%, poco importante y sin importancia en un 6%, que se refleja en la provisión de alimentos, agua y recursos ornamentales. Asimismo, los servicios de regulación se catalogan como muy importantes e importantes para 200 personas muestreadas.

En cuanto a los servicios culturales, se identificó que son percibidos por la comunidad como muy importantes e importantes para la mayor parte de la población muestreada, lo que refleja el marcado carácter sociocultural que posee el parque Juan Pablo II para la población de Chiquinquirá.

Por otra parte, gracias a la aplicación del análisis de correspondencia de Chi cuadrado y Euclídea, es posible evidenciar la relación entre los SE y la escala de valoración, de manera que entre menor sea la distancia entre las variables, mayor será la relación entre las mismas. En este sentido, es posible determinar que los SE culturales, son valorados por la comunidad entrevistada como importantes teniendo en cuenta la relevancia del contexto social

que demarca el parque Juan Pablo II para los habitantes de la ciudad de Chiquinquirá.

Figura 5. Distribución estadística de la valoración de los servicios ecosistémicos



Nota: fuente elaboración propia.

Ahora bien, los servicios de provisión poseen una relación con la valoración, clasificada como moderadamente importante, que refleja la obtención de beneficios y bienes físicos por parte del ecosistema hacia los habitantes y la manera en la que son percibidos, ya que gran parte de la muestra no posee conocimiento acerca del significado que estos ostentan. En este orden de ideas, los servicios de regulación y soporte se relacionan con las escalas de poca importancia y sin importancia, evidenciando que no se aprecian los procesos ecológicos que apoyan el área natural del Parque Juan Pablo II en cuanto al mantenimiento, estabilidad y condiciones óptimas en el medio, por parte de la comunidad.

Servicios ecosistémicos de provisión

Provisión de Alimento

La valoración sociocultural, (ver Figura 6), evidencia que el 54,4% de los entrevistados perciben al Parque Juan Pablo II como un ecosistema urbano importante o muy importante en la provisión de alimentos, asociado a su capacidad en la movili-

ción de nutrientes y la estabilidad del suelo gracias a su cobertura vegetal. Según la vocación de uso del suelo, el parque y su zona de influencia se relacionan con actividades agrícolas, lo que incide de manera directa en el enriquecimiento y aumento de la capacidad y sustento de los suelos. Igualmente, su biodiversidad lo convierte en un corredor biológico que provee alimento a diversas especies de fauna [23]. En marco de lo descrito, se observa que para el 24% de la población, el servicio de provisión de alimento en el Parque Juan Pablo II, se considera como moderadamente importante, y para el 21% de la población poco importante o sin importancia, como se muestra en la Figura 6.

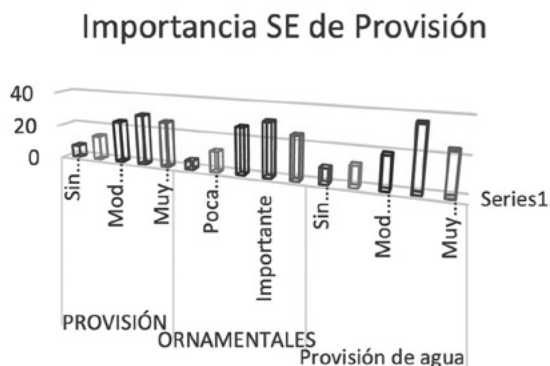
Recursos ornamentales

En cuanto a los servicios ecosistémicos ornamentales (ver Figura 6), el 56% de los encuestados valora al Parque Juan Pablo II como un espacio importante o muy importante por su aporte estético al paisaje urbano de Chiquinquirá, medianamente importante para el 27%, poco importante para el 12% y sin importancia para el 5%. Este reconocimiento se relaciona con su función como barrera viva, área de revegetalización y elemento que incrementa tanto la biodiversidad como el bienestar comunitario. Aunque la diversidad de flora ornamental dificulta un análisis detallado, se destaca la necesidad de evitar especies invasoras para preservar los beneficios paisajísticos y ecológicos del parque [24].

Provisión de agua

Con relación a la provisión de agua, el Parque Juan Pablo II es valorado por su contribución al mantenimiento de hábitats, infiltración y recarga de acuíferos que benefician ríos y quebradas locales. Aunque carece de infraestructura para actividades recreativas acuáticas, cuenta con un estanque de características lénticas [25] que alberga biodiversidad y funciona como atractivo turístico. Sin embargo, la percepción comunitaria sobre este servicio es diversa: mientras algunos lo consideran importante, otros lo catalogan como poco o nada relevante, al igual que ocurre con los servicios de provisión de alimento y recursos ornamentales, los cuales son valorados de forma más moderada.

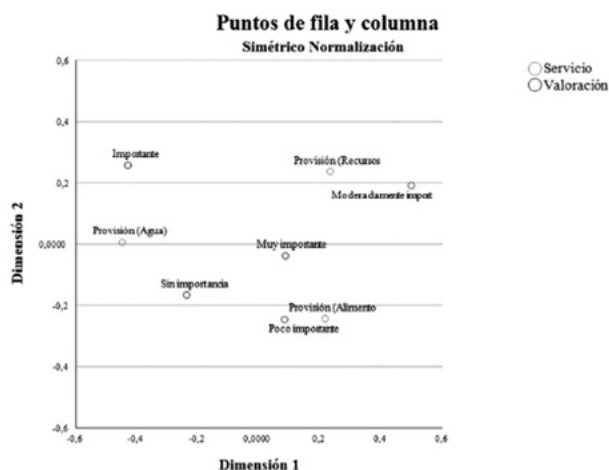
Figura 6. Importancia de los servicios ecosistémicos de provisión



Nota: fuente elaboración propia.

Respecto a lo enunciado anteriormente, es posible identificar que la población identifica al Parque Juan Pablo II, como un prestador servicios de provisión relacionado a la importancia que se le atribuye en cuanto a alimento, agua y recursos ornamentales. Por tanto, en la Figura 7, se identifica que los servicios de provisión de alimento se catalogan como poco importantes, en tanto que la provisión de recursos ornamentales moderadamente importantes y provisión de agua se encuentra entre importante y sin importancia.

Figura 7. Distribución estadística de los servicios de provisión



Nota: fuente elaboración propia.

Servicios ecosistémicos de regulación

Los servicios de regulación se distinguen como los beneficios que el ecosistema presta como regulador para el mantenimiento, control y mejora de la calidad del aire, el clima, la erosión y el agua. En este sentido, el Parque Juan Pablo II, presta servicios en cuanto al desarrollo de funciones ecosistémicas clave, teniendo en cuenta la importante cobertura vegetal que alberga.

A continuación, se presenta la valoración que la comunidad atribuye al Parque como ecosistema regulador, incluyendo aspectos como purificación del aire, temperatura urbana, clima, ruido, mitigación, de eventos naturales extremos, flujos y tratamiento de agua, tratamiento de residuos, control de escurrimientos y polinización.

Purificación del aire

Como se muestra en la Figura 8, el ecosistema del Parque Juan Pablo II es percibido por el 51% de la población muestreada como un ecosistema importante y muy importante en la mejora de la calidad del aire y la reducción de la contaminación, gracias a su cobertura forestal, que contribuye a la captura de carbono y retención de contaminantes atmosféricos. Aunque estos servicios de regulación suelen ser poco visibles para la comunidad, solo el 12% de los encuestados no los reconoce como beneficios ambientales relevantes.

Regulación de temperatura urbana

El Parque Juan Pablo II presta servicios de regulación de temperatura urbana por medio de los procesos de evapotranspiración y generación de sombra que brinda la cobertura forestal, lo que contribuye a la disminución de fenómenos de islas de calor mediante el reflejo de la radiación solar, lo cual evita que otras superficies absorban calor. En este sentido, como se muestra en la Figura 8, el 66% de la población muestreada reconoce a este ecosistema urbano como una fuente importante de regulación de temperatura urbana, lo que indica

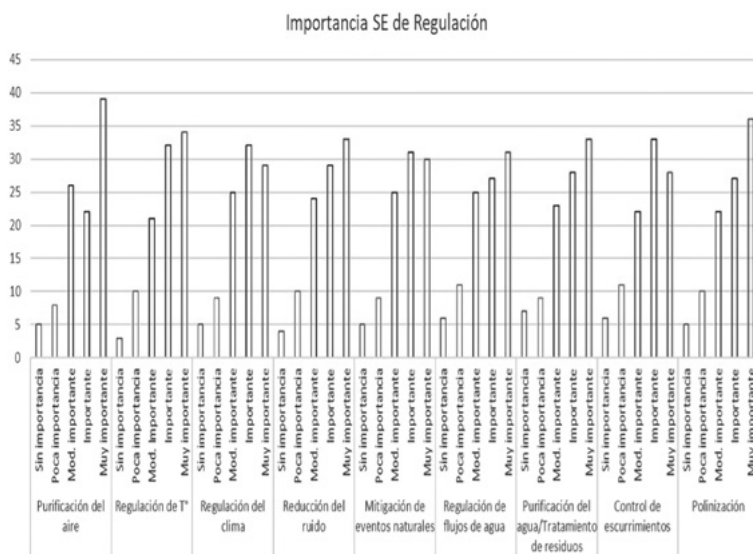
la relevancia que posee este tipo de medios en cuanto a la percepción del confort térmico.

Regulación del clima local y global

Desde esta perspectiva, este tipo de ecosistemas contribuyen a la regulación del clima local, a través de la reducción de temperaturas, el aumento de la

humedad y la regulación del ciclo hidrológico, facilitando el aumento de la calidad y disponibilidad de dicho recurso, así como la reducción de riesgos de inundación y sequía, por lo cual, para el 61% de la población el Parque Juan Pablo II, considera que contribuye a la regulación del clima local y global de manera importante y muy importante y moderadamente importante y sin importancia para un 36%, ver Figura 8.

Figura 8. Importancia de los servicios ecosistémicos de regulación en %



Nota: fuente elaboración propia.

Reducción del ruido

La comunidad percibe al Parque Juan Pablo II como un ecosistema que contribuye significativamente a la reducción del ruido urbano, actuando como una barrera acústica natural gracias a su cobertura forestal densa representada en capas forestales de bosques heterogéneos de árboles con troncos de más de 20 cm y alturas considerables, y a ciertos elementos artificiales como infraestructura deportiva y ornamental. Esta función es valorada, como se evidencia en la Figura 8, como muy importante, importante o moderadamente importante por el 33%, 29% y 24% de los encuestados, respectivamente, evidenciando su rol en la mejora del bienestar y la calidad ambiental del entorno urbano.

Mitigación de eventos naturales extremos

El Parque Juan Pablo II es percibido por la comunidad como un ecosistema clave en la mitigación de eventos naturales extremos, al actuar como barrera natural frente a inundaciones, deslizamientos y otros riesgos, gracias a su cobertura vegetal y funciones ecológicas. En la Figura 8 se puede ver que el 61% de los encuestados considera esta función como importante o muy importante. Igualmente, se destaca su papel en la regulación de flujos de agua mediante la captación y filtración de precipitaciones, lo que contribuye a evitar inundaciones, mejorar la calidad del agua y mantener la estabilidad de las cuencas hidrográficas. Esta función es valorada como importante o muy importante por el 58% de la población, reafirmando su relevancia en la protección ambiental y el bienestar comunitario.

En la Figura 8, se observa que la valoración socio-cultural de los servicios de regulación de flujos de agua del Parque Juan Pablo II, por parte de la comunidad de Chiquinquirá se clasifica como muy importante en un 31%, importante en un 27%, moderadamente importante en un 25%, poco importante en un 11% y sin importancia en un 6%.

Purificación del agua – Tratamiento de residuos

En referencia a estos aspectos, como se puede observar en la Figura 8, el parque en cuanto a servicios de purificación de agua y tratamiento de residuos se valora como importante en un 61%, moderadamente importante en un 23% y sin importancia en un 7%.

Control de escorrentía

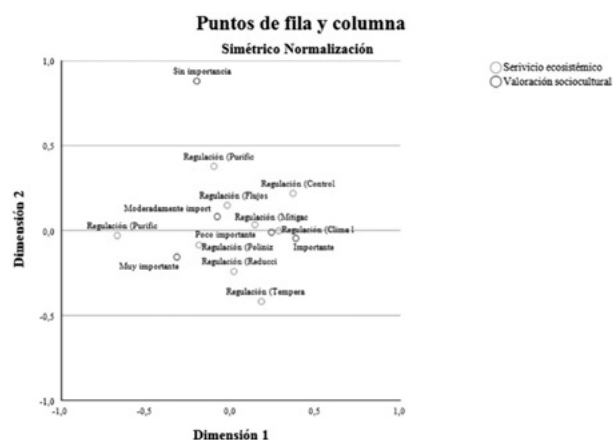
Respecto al control de escorrentía, como medida de regulación de flujos en ríos y fuentes receptoras en general, el parque Juan Pablo II, se define como importante en un 61% y poco importante en un 17%, ver Figura 8.

Polinización

El Parque Juan Pablo II es valorado por su papel en la polinización, servicio clave para la biodiversidad, la agricultura y la seguridad alimentaria, gracias a la presencia de insectos, aves y mamíferos que actúan como polinizadores y dispersores de semillas. En términos generales, en la Figura 8, es posible evidenciar que los servicios de regulación ofrecidos por el parque, por ejemplo, la purificación del aire, la polinización y la reducción del ruido, son percibidos como muy importantes por la comunidad, mientras que otros como la regulación del clima o la mitigación de eventos naturales reciben una valoración menor.

A pesar de algunas variaciones en la percepción, se identifica que por medio de los modelos de correlación de Chi cuadrado y Euclasia, ver Figura 9, los servicios de regulación se catalogan como sin importancia, lo que demuestra que el Parque Juan Pablo II, es percibido por la comunidad por la relevancia que posee en cuanto a servicios de regulación de factores climáticos, hídricos y del suelo.

Figura 9. Distribución estadística de la valoración de los SE de regulación

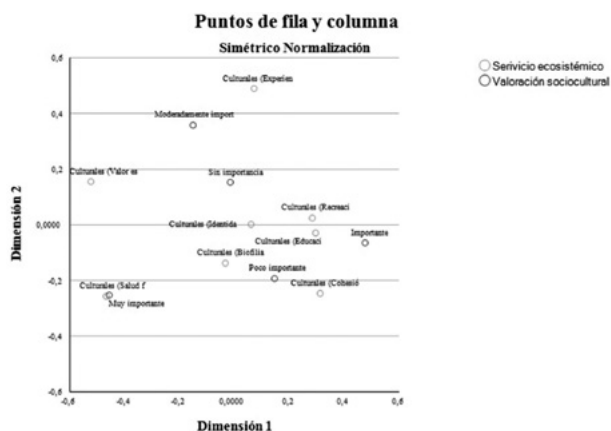


Nota: fuente elaboración propia.

Servicios ecosistémicos culturales

La valoración sociocultural de los servicios ecosistémicos culturales del parque Juan Pablo II evidencia la percepción de beneficios no materiales por parte de la comunidad. Entre los servicios evaluados se destacan salud físico-mental, recreación, identidad y educación.

Figura 10. Distribución estadística de la valoración de los SE culturales



Nota: fuente elaboración propia.

En la Figura 10 los resultados muestran que la salud físico mental es considerada muy importante, seguida de recreación, identidad y educación como importantes, mientras que el valor estético y la experiencia espiritual o religiosa se perciben como moderadamente importantes. La biofilia y la cohesión social recibieron una valoración relativamente baja.

Valor estético

De acuerdo con lo observado en la Figura 11, la valoración sociocultural del parque Juan Pablo II, es percibida por la población muestreada como muy importante e importante en un 65%, obteniendo uno de los valores más altos de percepción en cuanto a los demás servicios culturales, lo que evidencia la relevancia que posee el ecosistema en la estética del sistema urbano de la ciudad de Chiquinquirá. Por su parte, se evidencia como moderadamente importante en un 24% y poco y sin importancia en un 11%.

Recreación y turismo

El Parque Juan Pablo II constituye un importante atractivo turístico de Chiquinquirá por su valor histórico, religioso y ecosistémico, representando un referente de identidad local y regional. Ofrece servicios recreativos y deportivos mediante infraestructura como senderos ecológicos, zonas de picnic, pistas de bicicross, ciclo montañismo y espacios polideportivos, los cuales promueven la integración social y el uso sostenible del entorno natural. Según la percepción comunitaria, el 70 % de los encuestados considera estos servicios como importantes o muy importantes, frente a un 11 % que les otorga poca o ninguna relevancia, como se muestra en la Figura 11.

Salud físico – mental

Conforme con los resultados de la valoración los servicios de salud físico mental que brinda el Parque Juan Pablo II, para la comunidad de la ciudad de Chiquinquirá, en la Figura 11, es posible evidenciar que presentan el mayor nivel de importancia muestreado, correspondiente al 70%, teniendo en cuenta que el parque incentiva el desarrollo de actividades deportivas, de contacto con la naturaleza, de educación y esparcimiento en general, apoyado en los valores estéticos y de bienestar. De manera análoga, el 21% califican este servicio como moderadamente importante, 6% poco importante y 3% sin importancia.

Cohesión e integración social

El Parque Juan Pablo II facilita el esparcimiento cultural y fomenta la cohesión e integración social entre comunidades locales y visitantes, fortaleciendo la percepción de la cultura, la biodiversidad y las tradiciones regionales. En la Figura 11, se observa que para el 68 % de los encuestados considera este servicio como importante o muy importante, mientras que un 18 % lo valora como moderadamente importante, un 10 % como poco importante y un 4 % sin importancia.

Figura 11. Importancia de los servicios ecosistémicos culturales



Nota: fuente elaboración propia.

Experiencia espiritual o religiosa

El ecosistema urbano del Parque Juan Pablo II ofrece un entorno propicio para experiencias espirituales y religiosas, al integrar monumentos y elementos patrimoniales vinculados a la identidad mariana de Chiquinquirá y a la visita del papa Juan Pablo II en 1986. Su valor histórico, cultural y paisajístico lo convierte en un espacio significativo para encuentros religiosos y actividades de conexión espiritual con el entorno. En este contexto, en la Figura 11 se observa que el 65 % de los encuestados considera este servicio como importante o muy importante, el 25 % como moderadamente importante y el 10 % como poco o nada importante.

el 21 % como moderadamente importante, el 8 % como poco importante y el 3 % sin importancia.

Identidad, cultura y patrimonio local

El Parque Juan Pablo II se destaca por su valor turístico y patrimonial en Chiquinquirá, al contribuir a la identidad local y a la apreciación de la diversidad ecológica. En este contexto, el 64 % de los encuestados lo considera un prestador cultural importante o muy importante, el 22 % lo valora como moderadamente importante, el 9 % como poco importante y el 3 % sin importancia, como se registra en la Figura 11.

Información para el desarrollo cognitivo

El Parque Juan Pablo II es valorado como un espacio relevante para la educación y el aprendizaje, especialmente en temáticas de educación ambiental y desarrollo sostenible. Presta servicios a instituciones educativas locales y apoya proyectos de investigación, promoviendo la integración entre comunidad, formación académica y medio ambiente. Además, funciona como escenario deportivo que facilita la participación de escuelas de formación y diversos grupos poblacionales. Tal como se presenta en la Figura 11, el 68 % de los encuestados considera este servicio como importante o muy importante,

Biofilia

Los SE culturales del Parque Juan Pablo II están estrechamente vinculados a la relación con el entorno natural, facilitando el disfrute del ecosistema, la educación ambiental, la identidad cultural, la recreación y la integración social. El 68 % de los encuestados percibe este ecosistema urbano como una fuente importante de conexión con la naturaleza, el 21 % como moderadamente importante y el 3 % sin importancia, como lo muestra la Figura 11.

Servicios ecosistémicos de soporte

Los SE de soporte corresponden a todos los procesos ecológicos necesarios para el suministro y beneficio de las tres anteriores clasificaciones (regulación, provisión y cultura), puesto que engloba los factores necesarios para el mantenimiento y desarrollo de los hábitats para la biodiversidad.

Hábitat para la biodiversidad

El Parque Juan Pablo II contribuye al sostenimiento de procesos biológicos y la conservación de hábitats para la biodiversidad, gracias a sus áreas vegetales y a la interacción entre especies que favorecen el equilibrio ambiental urbano y regional. En la Figura 12, el 65 % de los encuestados lo considera un espacio importante o muy importante para el mantenimiento de la biodiversidad, el 23 % lo valora como moderadamente importante y el 12 % como poco o nada importante.

Figura 12. Importancia de los servicios ecosistémicos de soporte



Nota: fuente elaboración propia.

Los resultados del estudio muestran la relevancia de los SE culturales para la comunidad. Aprecia que coincide con los resultados presentados en estudios globales. Tal es el caso de [26] quienes resaltan la importancia de integrar las valoraciones de SE en la toma de decisiones de política pública, especialmente, en la planificación territorial. Asimismo, estudios en América Latina, en ciudades

como Ciudad de México [13], Bogotá [11] y Tunja han evidenciado que los parques urbanos son percibidos principalmente por sus aportes culturales y de regulación, lo que refuerza la tendencia observada en el municipio de Chiquinquirá. En este sentido, las percepciones ciudadanas sobre los SE en ciudades intermedias se convierten en un insumo clave para la planificación urbana sostenible.

IV. Conclusiones

Este estudio presenta resultados académicos relevantes al constituirse como uno de los primeros acercamientos a la valoración sociocultural de los SE en el municipio de Chiquinquirá. En particular, aporta datos sobre la percepción comunitaria en torno al Parque Juan Pablo II. Los hallazgos presentan que la población otorga una alta valoración sociocultural al Parque, reconociéndolo como un ecosistema clave para el aprovechamiento de recursos naturales, sociales y culturales, al proporcionar servicios de provisión, regulación de procesos climáticos, estructurales, ambientales, y de sostenimiento por medio de la mantención y desarrollo de hábitats de biodiversidad. Además, contribuye a la identidad y el bienestar cultural de la comunidad. La percepción de la población destaca especialmente los servicios culturales y de provisión, valorando el parque como patrimonio histórico y espacio de integración social. Esta percepción coincide con tendencias observadas en otros contextos urbanos de América Latina. De esta manera, este estudio contribuye a llenar un vacío del conocimiento al documentar la relevancia de los SE en ciudades intermedias.

En cuanto a la percepción de los actores gubernamentales y administrativos del parque, se evidencia la importancia que el ecosistema posee para la comunidad en términos de gestión medioambiental. Se reconoce su aporte en servicios ecosistémicos de provisión, regulación, soporte y cultura, asociado a su biodiversidad, valor patrimonial e identidad local, así como a su rol en la estabilidad de los ciclos naturales y procesos socioeconómicos del territorio.

Los servicios de soporte del parque Juan Pablo II, son correspondientes con los procesos biológicos fundamentales que permiten la mantención de los hábitats para la biodiversidad y que permiten la prestación de los demás servicios. En este sentido, la población local los califica como importantes y muy importantes en un 65%, relacionado con la capacidad y amplia diversidad que posee en cuanto a capa forestal y cobertura vegetal.

Los servicios culturales del Parque Juan Pablo II son los más valorados por la comunidad, destacándose por su contribución a la identidad y sentido de pertenencia local. Las mayores valoraciones se concentran en los servicios de recreación y turismo, salud físico-mental e información para el desarrollo cognitivo, valoraciones en ordenes de 70 % y 68 %. Seguidos por el valor estético, la experiencia espiritual o religiosa y la integración social que siguen ordenes de calificación de 65%. Estos resultados permiten concluir que para la mayor parte de la comunidad el Parque Juan Pablo II, es un importante centro cultural y de pertenencia.

Los servicios de regulación del parque Juan Pablo II, son mayormente valorados como importantes y muy importantes por la población entrevistada, en donde se identifica la relevancia que se le atribuye a los mismos, en cuanto al beneficio de la disminución de temperaturas, control del clima, estabilidad de los suelos y ciclo hidrológico, por lo que se identifica que este ecosistema urbano, cumple un papel fundamental en los procesos de sostenimiento y provisión para los medios bióticos, abióticos y socioeconómicos de Chiquinquirá y la región.

Desde una perspectiva práctica, se identifica que el municipio de Chiquinquirá cuenta con suelos de vocación agrícola y forestal, lo que le confiere una alta capacidad productiva. Esta condición exige estrategias de gestión urbana orientadas a la sostenibilidad y al uso eficiente de los recursos. En ese sentido, el desarrollo de ecosistemas urbanos contribuye al equilibrio entre la comunidad y el entorno, promoviendo el bienestar social y la conservación ambiental.

La información recopilada muestra que el Parque Juan Pablo II facilita actividades como observación, contemplación, turismo de naturaleza, fotografía, adelanto de actividades educativas, experiencias espirituales y religiosas, picnic y esparcimiento familiar. Estas prácticas responden a necesidades socioculturales de bienestar e integración, y destacan la importancia de una planificación urbana sostenible para promover la salud, el desarrollo comunitario y la calidad de vida en Chiquinquirá.

La valoración sociocultural se presenta como una metodología útil para comprender las percepciones y valores de cambio que las comunidades asignan a sus territorios. Su aplicación facilita la identificación de potencialidades y necesidades locales, aportando insumos clave para la planificación, la formulación de políticas públicas y la gestión de los recursos de manera más organizada y sostenible.

En ese sentido, los hallazgos del estudio ofrecen información clave para la gestión urbana y ambiental, al identificar los SE más valorados por la comunidad. Esta información puede orientar la formulación de lineamientos en los planes de ordenamiento territorial, la asignación de presupuesto para la conservación de zonas verdes y el diseño de programas de educación ambiental que fortalezcan la identidad cultural y el bienestar comunitario. De este modo, el estudio aporta evidencia útil para la toma de decisiones locales y la implementación de un modelo de desarrollo urbano sostenible.

Si bien la muestra de 300 visitantes y tres actores gubernamentales ofrece una base representativa para el análisis, para futuros estudios se recomienda ampliar el número de actores gubernamentales entrevistados y considerar métodos estadísticos que integren la percepción social con evaluaciones biofísicas y económicas.

V. Referencias

- [1] L. M. Brander et al., "Economic values for ecosystem services: A global synthesis and way forward," *Ecosystem Services*, vol. 66, Feb. 2024, Art. no. 101606. doi: 10.1016/j.ecoser.2024.101606.
- [2] P. Balvanera and H. Cotler, "Los servicios ecosistémicos y la toma de decisiones: retos y perspectivas," *Gaceta Ecológica*, vol. 84–85, pp. 117–123, 2007. Accessed: Dec. 9, 2025. [Online]. Available: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53908512>.
- [3] I. Narvaez, N. Y. Nández, L. G. Bustamante, and D. A. Férez-García, "Valoración socio-cultural de servicios ecosistémicos a nivel local," *Revista Novedades Colombianas*, vol. 16, no. 1, pp. 101–134, 2021. doi: 10.47374/novcol.2021.v16.2003.
- [4] M. Lopez and S. A. Roca, "Ecosystem services of riverfront of the Limay river (Neuquén, Argentina): analysis from the adaptive socio-ecological system approach," *Ciudad y Territorio Estudios Territoriales*, vol. 56, no. 219, pp. 243–264, 2024. doi: 10.37230/CyTET.2024.219.13.
- [5] I. Szumacher and E. Malinowska, "Servicios ecosistémicos urbanos según el modelo de Varsovia The Urban Ecosystem Services and the City of Warsaw as an Example," *Revista del CESLA*, no. 16, 2013.
- [6] Y. Yuan et al., "Urban sprawl decreases the value of ecosystem services and intensifies the supply scarcity of ecosystem services in China," *Science of the Total Environment*, vol. 697, Dec. 2019, Art. no. 134170. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134170.
- [7] J. M. Maldonado, "Ciudades y contaminación ambiental," *Revista de Ingeniería*, vol. 30, pp. 66–71, Sep. 2009. Accessed: Dec. 9, 2025. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=121015710002>.
- [8] E. Gómez et al., "Urbanization, Biodiversity and Ecosystem Services: Challenges and Opportunities A Global Assessment," T. Elmqvist et al., Eds. Springer, 2013. doi: 10.1007/978-94-007-7088-1.
- [9] G. Civeira, "Servicios ecosistémicos en ambientes urbanos: su relación con la estructura, la planificación y el diseño del paisaje," Ph.D. dissertation, Universidade Da Coruña, A Coruña, España, 2016. Accessed: Dec. 9, 2025. [Online]. Available: <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/17252>.
- [10] N. Morales Freese, "El papel del Parque Central Simón Bolívar (Bogotá, Colombia) en la provisión de servicios ecosistémicos," Tesis de Grado, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Bogotá, Colombia, 2020.
- [11] C. Montes and V. F. Forero, "Cultural ecosystem services and disservices in an urban park in Bogota, Colombia," *Ambiente e Sociedade*, vol. 24, pp. 1–20, 2021. doi: 10.1590/1809-4422ASOC20190045R3VU-2021L3AO.
- [12] F. A. Granobles et al., "Understanding the sociocultural valuation of ecosystem services in urban parks: a Colombian study case," *Urban Ecosystems*, vol. 27, no. 1, pp. 289–303, 2024. doi: 10.1007/s11252-023-01438-5.
- [13] H. Cotler et al., "Soil Ecosystem Services in Urban Parks as a Basis for Better Urban Planning: The Case of Mexico City," *Spanish Journal of Soil Science*, vol. 14, Feb. 2024. doi: 10.3389/sjss.2024.13398.
- [14] R. Giedych and G. Maksymiuk, "Specific features of parks and their impact on regulation and cultural ecosystem services provision in Warsaw, Poland," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 9, no. 5, May 2017, Art. no. 792. doi: 10.3390/su9050792.

- [15] A. E. Vásquez, "Infraestructura verde, servicios ecosistémicos y sus aportes para enfrentar el cambio climático en ciudades: el caso del corredor ribereño del Río Mapocho en Santiago de Chile," *Revista de Geografía Norte Grande*, vol. 63, pp. 63–86, 2016. doi: 10.4067/S0718-34022016000100005.
- [16] E. Higuera et al., "Ordenación territorial desde la infraestructura verde y azul en el Valle de Guatiquará (Colombia)," *URBE. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, vol. 14, 2022. doi: 10.1590/2175-3369.014.
- [17] S. S. K. Scholte, A. J. A. van Teeffelen, and P. H. Verburg, "Integrating socio-cultural perspectives into ecosystem service valuation: A review of concepts and methods," *Ecological Economics*, vol. 114, pp. 67–78, Jun. 2015. doi: 10.1016/j.ecolecon.2015.03.007.
- [18] K. M. A. Chan et al., "Where are cultural and social in ecosystem services? A framework for constructive engagement," *BioScience*, vol. 62, no. 8, pp. 744–756, Aug. 2012. doi: 10.1525/bio.2012.62.8.7.
- [19] C. C. Campo and W. H. Alfonso, "RelationshipThe relationship between the processes of urbanization and international trade, and its impact on urban sustainability," *Cuadernos de Vivienda y Urbanismo*, vol. 11, no. 22, 2018. doi: 10.11144/Javeriana.cvu11-.rpuc.
- [20] Z. Carrasquilla and N. Pérez, "Apoyo a la realización de planes de contingencia por evento específico en los parques Juan Pablo II, Puente Sopó y Laguna del Cacique Guatavita," 2016.
- [21] N. J. Martínez Ardila and U. G. Murcia García, Eds., "Leyenda nacional de coberturas de la tierra: metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia: escala 1:100.00," IDEAM, Bogotá, Colombia, 2010. Accessed: Dec. 9, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/303960063_LEYENDA_NACIONAL_DE_COBERTURAS_DE_LA_TIERRA_METODOLOGIA_CORINE_LAND_COVER_ADAPTADA_PARA_COLOMBIA_ESCALA_1100000.
- [22] Alcaldía Municipal de Chiquinquirá, "Plan Básico de Ordenamiento Territorial de Chiquinquirá," Alcaldía Municipal de Chiquinquirá, Chiquinquirá, Colombia, 2004. Accessed: Dec. 9, 2025. [Online]. Available: <https://www.chiquinquira-boyaca.gov.co/tema/planes>.
- [23] F. J. Escobedo et al., "Socio-ecological dynamics and inequality in Bogotá, Colombia's public urban forests and their ecosystem services," *Urban Forestry and Urban Greening*, vol. 14, no. 4, pp. 1040–1053, Dec. 2015. doi: 10.1016/j.ufug.2015.09.011.
- [24] A. Francini et al., "The contribution of ornamental plants to urban ecosystem services," *Earth*, vol. 3, no. 4, pp. 1258–1274, Dec. 2022. doi: 10.3390/earth3040071.
- [25] A. Bernués et al., "Socio-cultural and economic valuation of ecosystem services provided by Mediterranean mountain agroecosystems," *PLoS ONE*, vol. 9, no. 7, Jul. 2014, Art. no. e102479. doi: 10.1371/journal.pone.0102479.
- [26] R. Costanza et al., "The value of the world's ecosystem services and natural capital," *Nature*, (n.d.). [Note: Este artículo se asume como publicado en la revista *Nature* dada la prominencia de la cita original y los autores, aunque faltan el volumen, número y fecha.]





Modelo de formación docente intergeneracional para la educación digital: reactivando saberes, integrando tecnologías

Intergenerational Teacher Training Model for Digital Education: Reactivating Knowledge, Integrating Technologies

Yosly Hernández-Bieliukas¹, Julia Machmud-García²

Tipo de Artículo: Investigación.

Recibido: 15/09/2025. **Aprobado:** 20/10/2025. **Publicado:** 12/12/2025

Resumen: el presente artículo presenta y describe un modelo de formación docente intergeneracional, concebido como resultado de una experiencia formativa de 120 horas, dirigida a profesores jubilados convocados a reincorporarse como docentes en modalidad virtual en una universidad pública venezolana. La propuesta busca reducir la brecha digital y revalorizar el capital pedagógico acumulado en docentes con trayectoria, a través de estrategias pedagógicas adaptadas, tutorías intergeneracionales y el uso crítico de las Tecnologías de Información y Comunicación. A partir de una metodología cualitativa con enfoque mixto, que incluyó encuestas,

rúbricas, análisis de reflexiones y observación participante, se diseñó un modelo replicable con componentes claramente definidos. La experiencia demostró la pertinencia del contenido, la transformación de la práctica docente, el crecimiento en la confianza tecnológica y la eficacia de la interacción intergeneracional. Los hallazgos confirman la viabilidad del reaprendizaje tecnológico en adultos mayores, la pertinencia de metodologías situadas y el impacto positivo de la inclusión digital para fortalecer el vínculo institucional, el sentido pedagógico y la innovación en la educación superior. El modelo resultante consta de siete componen-

¹ Autor correspondiente: Yosly Hernández-Bieliukas. Filiación institucional: Universidad Central de Venezuela. País: Venezuela, Ciudad: Caracas. Correo electrónico: yoslyhernandez@gmail.com ORCID: 0000-0002-4162-2776

² Autor correspondiente: Julia Machmud-García. Filiación institucional: Universidad Pedagógica Experimental Libertador. País: Venezuela, Ciudad: Caracas. Correo electrónico: jmachmud@gmail.com ORCID: 0009-0005-6450-3808

tes clave: enfoque intergeneracional, andragogía crítica, modalidad multimodal, acompañamiento personalizado, evaluación transformadora, inclusión digital crítica y sostenibilidad institucional, que garantizan su aplicabilidad y flexibilidad en diversos contextos educativos. Este artículo aporta una propuesta innovadora que puede ser replicada en contextos similares mediante Recursos Educativos Abiertos (REA).

Palabras clave: Formación docente; intergeneracionalidad; educación virtual; inclusión digital; alfabetización tecnológica; innovación educativa.

Abstract: This article describes and presents an intergenerational teacher training model, conceived as the result of a 120-hour training experience for retired professors recruited to return to teaching virtually at a Venezuelan public university. The proposal seeks to reduce the digital divide and revalue the pedagogical capital accumulated by experienced teachers through adapted pedagogical strategies, intergenerational mentoring, and the critical use of Information and Communication Technologies (ICT). Using a qualitative methodology with mixed analysis, including surveys, rubrics, reflection analysis, and participant observation, a replicable model with clearly defined components was designed. The experience demonstrated the high relevance of the content, the transformation of teaching practice, increased technological confidence, and the effectiveness of intergenerational interaction. The findings confirm the viability of technological relearning for older adults, the relevance of situated methodologies, and the positive impact of digital inclusion in strengthening institutional bonds, pedagogical purpose, and innovation in higher education. The resulting model consists of seven key components: an intergenerational approach, critical andragogy, a multimodal approach, personalized support, transformative assessment, critical digital inclusion, and institutional sustainability, which guarantee its applicability and flexibility in diverse educational contexts.

Keywords: Teacher training; intergenerationally; virtual education; digital inclusion; technological literacy; educational innovation.

I. Introducción

En el contexto de la transformación digital de la educación superior, uno de los desafíos más relevantes es la inclusión activa de todos los actores del sistema educativo, especialmente de aquellos con amplia experiencia, pero escasa familiaridad con los entornos virtuales. Este artículo se inscribe en ese horizonte, al presentar un modelo de formación docente intergeneracional orientado a la reincorporación de profesores jubilados a la docencia virtual. La propuesta parte del reconocimiento del valioso capital pedagógico que estos docentes atesoran, muchas veces subutilizado en el tránsito hacia la digitalización educativa.

A nivel global, se ha identificado que la incorporación de tecnologías de información y comunicación (TIC) en las prácticas educativas no debe limitarse a una capacitación instrumental, sino que requiere acompañarse de un proceso de resignificación del rol docente, basado en el diálogo de saberes, la empatía intergeneracional y la formación contextualizada. En este sentido, el diseño de experiencias formativas que promuevan el reaprendizaje tecnológico en adultos mayores representa no solo una estrategia de inclusión digital, sino también una oportunidad para fortalecer la cohesión institucional y renovar los enfoques pedagógicos desde una perspectiva humanista y crítica.

La experiencia descrita se llevó a cabo en una universidad pública venezolana, donde un grupo de docentes jubilados participó en un diplomado de 120 horas académicas en modalidad multimodal. Este proceso se apoyó en una metodología cualitativa con análisis mixto, que permitió comprender las transformaciones en las prácticas docentes, el desarrollo de nuevas competencias digitales y el impacto de la interacción intergeneracional. A partir de esta experiencia, se construyó un modelo replicable, compuesto por siete componentes integrados, que ofrece una alternativa pedagógica flexible, sostenible y adaptada a diversos contextos educativos. El objetivo de este artículo es presentar este modelo de formación docente intergeneracional, sistematizado a partir de una experiencia real, y analizar su impacto en la reincorporación de docentes jubilados a la educación virtual.

A partir de esta experiencia surge la siguiente pregunta orientadora: ¿Cómo puede un modelo intergeneracional facilitar la inclusión digital crítica y la revalorización del capital pedagógico de docentes jubilados en entornos virtuales?

El artículo se organiza en las siguientes secciones: primero, se presenta el marco teórico que sustenta los componentes del modelo; luego, se describe la metodología de investigación; en tercer lugar, se analizan los resultados obtenidos; posteriormente, se expone el modelo propuesto y su aplicabilidad; finalmente, se presentan las conclusiones y proyecciones futuras.

II. Marco Teórico

Fundamentos del modelo de formación docente intergeneracional

Diversos estudios han advertido sobre el riesgo de asumir la formación docente digital desde una perspectiva meramente instrumental. En el caso de los profesionales mayores, investigaciones como las de [1] y [2] abordan el “**tecnoestrés**” como una barrera emocional que afecta su bienestar y desempeño. Frente a ello, propuestas basadas en principios andragógicos, el Diseño Universal de Aprendizaje (DUA) y la tutoría intergeneracional se consolidan como estrategias efectivas para promover la inclusión tecnológica significativa en la educación superior.

2.1 Andragogía crítica y aprendizaje de adultos

El componente de andragogía crítica encuentra su sustento en el trabajo seminal de [3], quien estableció los principios básicos para el aprendizaje de adultos, incluyendo la necesidad de un proceso autodirigido y motivado por la relevancia del contenido. Estos principios se alinean con la propuesta de contenidos situados y prácticos, adaptados a las necesidades específicas de los docentes con experiencia.

Las investigaciones sobre experiencias intergeneracionales en entornos escolares han destacado la

importancia de adaptar los contenidos a las realidades de los participantes mayores, promoviendo un aprendizaje significativo basado en sus experiencias [4]. Este enfoque valida la necesidad de una formación que construya primero confianza antes que simplemente habilidades técnicas.

2.2 Enfoque intergeneracional y evidencia empírica

La educación intergeneracional ha emergido como un campo de investigación relevante en la formación docente. El modelo propuesto se nutre de evidencia empírica de proyectos europeos, como los auspiciados por el programa **GRUNDTVIG**, que han demostrado la efectividad de las mentorías intergeneracionales para la alfabetización digital y la integración social de adultos mayores.

En el contexto latinoamericano, la Red Latinoamericana de Educación Intergeneracional ha promovido el intercambio de saberes entre generaciones para fortalecer los vínculos comunitarios y la cohesión social. La investigación de [4] en la Universidad de Granada, por ejemplo, estableció un programa pionero que demostró cómo el diálogo intergeneracional produce una aproximación cultural entre edades diferentes, contribuyendo al intercambio de tradiciones, formas de comportamiento y fomento del respeto mutuo.

2.3 Modalidad multimodal y sostenibilidad educativa

El estudio de [5] sobre el confinamiento por la pandemia reveló la importancia de la flexibilidad metodológica, mostrando cómo el 78% de las familias reportaron un incremento en la interacción intergeneracional durante la pandemia, gracias a la adaptación de modalidades sincrónicas y asincrónicas.

En este mismo sentido, la visión de [6] sobre el aprendizaje digital y la sostenibilidad educativa subraya que la formación debe ser sostenible a largo plazo, enfocándose en la integración de la tecnología para la mejora pedagógica y no como un fin en sí mismo. Este concepto se alinea con el

componente de Sostenibilidad Institucional y con la necesidad de garantizar la continuidad del modelo.

2.4 Acompañamiento personalizado y evaluación transformativa

El análisis de [7] sobre las lecciones de estudio como estrategia de formación docente, que incluyó tutorías con enfoque emocional y didáctico, demostró su efectividad para cambiar las concepciones docentes sobre la inclusión. Este enfoque coincide con el componente de acompañamiento personalizado del modelo.

De manera complementaria, el trabajo de [8] desarrolló herramientas de evaluación basadas en proyectos y en la coevaluación para procesos de formación docente inclusiva, coincidiendo con el componente de evaluación transformadora del modelo.

2.5 Inclusión digital crítica y transformación pedagógica

El estudio de [9] sobre proyectos eTwinning y competencia digital docente mostró cómo el uso ético de las TIC puede ir más allá del entrenamiento técnico, desarrollando competencias interculturales e intergeneracionales. El modelo adopta la perspectiva de [10] sobre la inclusión tecnológica crítica, que postula que la tecnología debe ser utilizada para el desarrollo de la autonomía del estudiante y la promoción de la ciudadanía digital.

En este mismo sentido, durante la pandemia, la investigación de [11] evidenció la necesidad de una inclusión digital crítica en estrategias de acompañamiento familiar intergeneracional.

2.6 Sostenibilidad institucional y políticas públicas

El análisis crítico de la diversidad generacional docente en contextos universitarios realizado por [12] subrayó la importancia de integrar estos modelos en políticas institucionales para garantizar su continuidad. Los autores destacaron cómo el envejecimiento de las plantillas docentes requiere respuestas institucionales sistemáticas. Esta propuesta se inserta en un contexto de políticas públicas globales que reconocen la necesidad de capacitar a los docentes en la era digital.

Del trabajo de [13] se destaca la importancia de la formación docente continua en contextos digitales. Así como, organismos como la UNESCO [14] y la Organización de Estados Iberoamericanos [15] han enfatizado la importancia de los Recursos Educativos Abiertos y la formación docente para la transformación digital, lo que valida la propuesta de crear un modelo replicable y escalable. De igual manera, el Banco Mundial [16], en sus informes sobre el futuro del trabajo y la educación, ha resaltado la necesidad de la "recualificación" (upskilling) de los trabajadores mayores.

2.7 Conclusiones del marco teórico

De las investigaciones revisadas y previamente presentadas, se concluye que estas proporcionan sustento empírico y teórico a los (07) siete componentes del modelo de formación docente intergeneracional. Los estudios coinciden en señalar los beneficios de estos enfoques para: a) romper estereotipos generacionales, b) promover aprendizajes significativos basados en la experiencia, c) desarrollar competencias socioemocionales y cognitivas, d) fortalecer vínculos comunitarios, e) fomentar la inclusión digital crítica, y f) requerir políticas institucionales para su sostenibilidad. Los desafíos identificados incluyen barreras institucionales (75%) y limitaciones tecnológicas (68%), así como la necesidad de mayor formación docente en estas metodologías (85%). Futuras investigaciones podrían profundizar en la medición de impacto a largo plazo y en estrategias para superar estas barreras.

Este modelo se inscribe en una corriente de innovación educativa que busca con-jugar la tradición pedagógica y las tecnologías emergentes, ofreciendo una respuesta pertinente a los desafíos de la educación digital en la actualidad.

III. Metodología

La experiencia se desarrolló en una universidad pública venezolana bajo un enfoque cualitativo de carácter descriptivo-interpretativo, incorporando elementos de investigación-acción. El proceso formativo se estructuró en cuatro fases: diagnóstico, desarrollo modular, producción de recursos y evaluación participativa. Para la recolección de datos se utilizaron encuestas, rúbricas, análisis de reflexiones escritas y observación participante, complementados con un seguimiento sistemático mediante registro de asistencia y tutorías.

3.1 Participantes

El programa contó con la participación inicial de 22 docentes jubilados provenientes de diversas áreas del conocimiento, con una edad promedio de 60 años. Esta diversidad académica y generacional enriqueció los intercambios y favoreció la construcción colectiva de saberes. De este grupo, 15 participantes culminaron activamente el diplomado, lo que permitió sistematizar la experiencia como base del modelo replicable.

3.2 Diseño y fases. La experiencia se estructuró en cuatro fases principales:

- Diagnóstico inicial y caracterización del grupo: aplicación de instrumentos exploratorios para identificar necesidades formativas, competencias digitales previas y expectativas.
- Desarrollo de módulos temáticos: implementación de actividades sincrónicas y asincrónicas orientadas al uso pedagógico de herramientas digitales, diseño de entornos virtuales y de metodologías activas mediadas por TIC. La propuesta curricular se organizó en modalidad

multimodal, con una duración de 120 horas académicas.

- Producción colaborativa e integración tecnológica: diseño de recursos educativos digitales por parte de los participantes, promoviendo el trabajo en red y la coevaluación.
- Evaluación participativa e innovadora: aplicación de la encuesta final "Evaluando la innovación: tu experiencia en tecnología educativa", orientada a recoger percepciones cualitativas y cuantitativas sobre el proceso.

3.3 Instrumentos y análisis

Se emplearon encuestas, rúbricas, análisis de reflexiones escritas, observación participante y seguimiento de asistencia y tutorías. El monitoreo semanal de participación evidenció una tasa de permanencia del 68,18% de los 22 inscritos inicialmente, quedando activos 15. Los comentarios cualitativos fueron examinados mediante análisis inductivo-categorial, lo que permitió identificar categorías emergentes como aprendizaje colaborativo, transformación pedagógica y confianza en el uso de TIC. El instrumento principal fue la encuesta diseñada específicamente para este diplomado.

La encuesta se diseñó en Google Forms con una estructura clara y organizada, orientada a recopilar información tanto cuantitativa como cualitativa. En primer lugar, presentaba un título identificador que orientaba al encuestado sobre el propósito del instrumento y una descripción introductoria. Esta introducción explicaba que la encuesta se enmarcaba en el contexto del diplomado, señalaba la importancia de la participación de los estudiantes y aclaraba que la duración estimada de respuesta es de 10 a 15 minutos. Con ello, se generó un ambiente de confianza y se motivó la colaboración en el proceso de mejora de la propuesta educativa.

En cuanto a su contenido temático, la encuesta se estructuró en bloques, lo que permitió organizar la información de manera progresiva. Un primer bloque recogió datos sobre el perfil del participante,

enfocado en aspectos profesionales y académicos que ayudan a contextualizar las respuestas. Posteriormente, se incluyeron preguntas relacionadas con la percepción sobre el uso de la tecnología educativa, lo que incluye actitudes, experiencias previas y nivel de apropiación. Otro bloque se centró en el aprendizaje interdisciplinario, valorando el impacto del trabajo colaborativo entre distintas áreas del conocimiento. Finalmente, se incorporó una sección para indagar en el impacto del diplomado y de los conocimientos adquiridos, con el fin de evaluar la pertinencia y la calidad del proceso formativo.

Respecto a la tipología de preguntas, el instrumento combinó distintos formatos para enriquecer los datos. Se incluyeron preguntas cerradas de selección múltiple, que permiten sistematizar información de manera rápida y objetiva. Asimismo, se utilizaron escalas de valoración tipo Likert, con las que se midió el grado de acuerdo, satisfacción o percepción de los participantes. A estas se sumaron preguntas abiertas que ofrecieron un espacio para la expresión libre de opiniones, comentarios y sugerencias, aportando una visión cualitativa complementaria al análisis cuantitativo.

3.4 Amenazas a la validez

El estudio reconoce posibles amenazas a la validez:

- Interna: diferencias en la motivación de los participantes.
- Externa: limitada generalización de los hallazgos a otras instituciones.
- De conclusión: dependencia de autoevaluaciones.
- De construcción: interpretación subjetiva de las escalas Likert.

Estas limitaciones se mitigaron mediante triangulación de datos cualitativos y cuantitativos, el uso de diversos instrumentos y revisión entre pares.

IV. Análisis de resultados

El análisis de los resultados se basó en la encuesta aplicada a los participantes, denominada "Evaluando la Innovación: tu experiencia en tecnología educativa", triangulada con los registros de participación y la producción académica. Este análisis Revela insights valiosos sobre el impacto del Diplomado en Docencia Universitaria con TIC, dirigido principalmente a docentes mayores de 60 años con más de una década de experiencia en disciplinas como historia, derecho, ciencias militares, informática y gestión académica. A continuación, se presentan los principales hallazgos.

4.1 Competencias iniciales y brechas identificadas

Antes del diplomado, se observó un uso desigual de tecnologías educativas: solo 4 participantes las integraban siempre, mientras que 9 reportaron un uso intermitente (4 de forma frecuente y 3 de manera ocasional) y 2 las empleaban rara vez. Esta disparidad se reflejó en las habilidades autoevaluadas: 9 participantes tenían competencias de nivel medio (uso básico con soltura relativa), 5 competencias altas (dominio avanzado) y 1 nivel bajo (limitaciones técnicas). El 60% del grupo manifestó incomodidad inicial, con 7 participantes señalando una familiaridad moderada y 1 reconociendo dificultades significativas. Las barreras principales fueron la falta de experiencia (8 menciones), tiempo insuficiente (5) y acceso limitado a recursos (2).

4.2 Herramientas clave y evolución del aprendizaje

Durante el programa, plataformas como Google Classroom y Moodle, además herramientas como Genially, Google Sites, Recursos Educativos Abiertos (REA) y técnicas de curación de contenido destacaron por su utilidad práctica. La mentoría intergeneracional demostró un impacto cuantificable: se identificó una correlación positiva ($r = 0.62$) entre las sesiones de acompañamiento y el aumento de confianza tecnológica, especialmente en docentes seniors. Al finalizar, de los

15 participantes activos (80%) reconocieron que el diplomado transformó su perspectiva sobre innovación educativa. De estos, 10 se declararon totalmente de acuerdo y 2 de acuerdo. Las habilidades en plataformas Learning Management System, por sus siglas en inglés, LMS aumentaron un 40% (de 2.8 a 4.1 en escala Likert) y la creación de recursos multimedia un 28% (de 3.0 a 4.2).

4.3 Factores de éxito y áreas de mejora

Los testimonios cualitativos resaltan dos elementos clave: el apoyo paciente de los tutores y la relevancia práctica de los contenidos. Los aprendizajes más valorados incluyeron la aplicación del modelo TPACK [17], el diseño de ecosistemas virtuales y el uso pedagógico de LMS. Sin embargo, persisten desafíos estructurales: el 45% de los participantes solicitó capacitación en el diseño de actividades interactivas en línea y el 32% en la gestión de comunicación asincrónica en Moodle. Las recomendaciones para futuras ediciones enfatizaron en lo siguiente:

- Mayor flexibilidad horaria y acceso a grabaciones (priorizado por 6 participantes).
- Videos tutoriales breves y demostraciones prácticas (4 menciones).
- Estabilidad de las plataformas y garantía de recursos técnicos mínimos (3 casos).

4.4 Valoración final y proyección

El 90% de los docentes calificó la experiencia “como satisfactoria” o “muy satisfactoria”, subrayando su aplicabilidad en contextos reales. Destacaron la inteligencia artificial como recurso emergente, con testimonios como: “La IA puede optimizar procesos educativos si se usa con ética”. La transversalidad del programa quedó evidenciada en comentarios como “Todo profesional preparado debería ser docente calificado”, reflejando su relevancia incluso para no docentes.

4.5 Conclusiones del análisis cuantitativo y cualitativo

Los resultados confirman que el diplomado mitigó brechas tecnológicas iniciales mediante un enfoque práctico y colaborativo. Para consolidar estos logros, se recomienda: a) Ampliar la difusión para llegar a más profesionales interesados; b) Incorporar módulos sobre herramientas emergentes, especialmente aquellas relacionadas con inteligencia artificial aplicada a la educación; c) Optimizar recursos de apoyo continuo: fortaleciendo la disponibilidad de tutoriales, bancos de materiales y otros apoyos didácticos.

Del análisis de la información recogida, se destacan los siguientes hallazgos:

- Pertinencia del contenido: el 93% de los participantes valoraron como alta o muy alta la relación entre el contenido del diplomado y su práctica docente.
- Transformación de la práctica: el 87% manifestó haber integrado herramientas como Canva, Moodle y Padlet en sus clases virtuales.
- Crecimiento personal: el 90% expresó un aumento en la confianza para innovar tecnológicamente.
- Interacción intergeneracional: se consolidó como una estrategia clave. Los más jóvenes ofrecieron apoyo técnico, mientras que los mayores compartieron experiencia pedagógica.
- Permanencia: 68,18 % de los participantes concluyeron satisfactoriamente el programa, a pesar de limitaciones técnicas iniciales.

4.5.1 Caracterización de los participantes

- Total, de respuestas consideradas: 15 participantes que culminaron activamente el diplomado.

- Rol profesional: 9 de los 15 se identificaron principalmente con el rol de docente universitario.
- Experiencia educativa: un total de 11 de los 15 (73%) indicaron tener más de 10 años de experiencia enseñando o facilitando aprendizajes.

- Inseguridad ante la cámara y el entorno virtual.
- Conectividad intermitente.
- Dificultades en el uso de plataformas LMS sin acompañamiento.

4.5.2 Nivel de competencia tecnológica inicial

Integración previa de tecnologías educativas:

- 5 participantes (33%) integraban herramientas tecnológicas frecuentemente.
- Otros 5 (33%) lo hacían ocasionalmente.
- 5 participantes (33%) apenas las usaban o nunca lo habían hecho.

Autopercepción de habilidades:

- 10 participantes (67%) calificaron su nivel como medio, indicando que manejaban algunas herramientas con regularidad).
- 3 se ubicaron en un nivel bajo.
- 2 se identificaron con un nivel alto.

Familiaridad y comodidad al inicio:

- 10 personas (67%) se sentían solo medianamente cómodas o algo inseguras con el uso de tecnología para enseñar.

4.5.3 Dificultades y barreras identificadas

La principal barrera percibida fue:

- "Falta de experiencia", señalada por 7 de los 15 participantes (47%).

Otras dificultades comunes incluyeron:

4.5.4 Aprendizajes y transformación docente

Impacto del diplomado:

- 11 de 15 participantes (73%) declararon estar "totalmente de acuerdo" con que el diplomado amplió su perspectiva sobre cómo innovar en educación.

Se identificaron como aprendizajes valiosos:

- Uso de Canva, Moodle y Padlet.
- Producción de recursos digitales.
- Participación activa en clases sincrónicas.
- Reencuentro con el rol docente desde un enfoque actualizado.

Relevancia de la experiencia intergeneracional:

- Fue destacada en reflexiones abiertas como elemento motivador.
- Se valoró positivamente el acompañamiento personalizado y la interacción conlaborativa entre generaciones.

4.5.5 Datos complementarios del diplomado

Tasa de permanencia: 68,18% (15 de 22 inscritos completaron activamente el proceso formativo).

En los comentarios finales, se destacan afirmaciones como:

- “Me siento más segura, incluso para grabar mis clases”.
- “Este diplomado me devolvió la confianza en mi capacidad de seguir aprendiendo”.

4.6 Conclusiones del análisis cuantitativo y cualitativo

Con base en los resultados obtenidos, se puede destacar:

- Existe una necesidad concreta de alfabetización digital adaptada para docentes con amplia trayectoria, especialmente aquellos que no fueron formados en entornos virtuales.
- El modelo de formación intergeneracional con tutoría y metodología andragógica es efectivo y replicable.
- El diplomado logró transformar la percepción de las TIC, pasando de constituir una barrera a convertirse en una oportunidad para la mejora pedagógica.
- El uso práctico de herramientas colaborativas y de diseño educativo fue central en la apropiación tecnológica.
- Se validan como esenciales los componentes de acompañamiento emocional, mentoría cruzada y evaluación basada en desempeño real.

Estos resultados coinciden con lo señalado por [18], quien destaca el rol de la tutoría intergeneracional en la reducción de brechas digitales. No obstante, este estudio aporta la novedad la sistematización de siete componentes articulados en un modelo de formación docente intergeneracional aplicable en universidades públicas con limitaciones de infraestructura, lo que enriquece la discusión sobre sostenibilidad y pertinencia de este tipo de experiencias.

V. Modelo de información docente intergeneracional

A partir de la experiencia sistematizada, se diseñó un modelo replicable estructurado en siete componentes integrados:

1. **Enfoque intergeneracional:** fomenta la colaboración horizontal entre generaciones, promoviendo el intercambio de saberes y el respeto mutuo.
 - **Principios:** reciprocidad, valoración del saber, promoción de la empatía.
 - **Actividades sugeridas:** círculos de diálogo intergeneracional, mentorías inversas, “cápsulas de experiencia” donde docentes comparten metodologías pedagógicas tradicionales y nuevas habilidades tecnológicas.
2. **Andragogía crítica:** contenidos situados, empáticos y prácticos, adaptados a las necesidades específicas de los adultos mayores, reconociendo su experiencia como punto de partida.
 - **Principios:** aprendizaje significativo, relevancia contextual, autonomía del aprendiz.
 - **Actividades sugeridas:** talleres prácticos orientados a la aplicación inmediata, desarrollo de proyectos basados en problemáticas reales del aula.
3. **Modalidad multimodal:** combina actividades sincrónicas y asincrónicas, ofreciendo flexibilidad metodológica para adaptarse a diferentes ritmos de aprendizaje y disponibilidad.
 - **Principios:** accesibilidad, flexibilidad, sostenibilidad pedagógica.
 - **Actividades sugeridas:** sesiones virtuales en vivo, foros de discusión asincrónicos, recursos educativos digitales accesibles en cualquier momento.

4. Acompañamiento personalizado: tutorías constantes con enfoque emocional, técnico y didáctico, esenciales para superar el tecnoestrés y garantizar un proceso de aprendizaje efectivo.

- **Principios:** empatía, retroalimentación constructiva, seguimiento individualizado.

- **Actividades sugeridas:** tutorías individuales, clínicas tecnológicas para resolver dudas específicas, seguimiento y monitoreo del progreso a través de registros de asistencia y participación.

5. Evaluación transformadora: basada en proyectos, rúbricas, coevaluación y reflexiones escritas, promoviendo la autocrítica y la mejora continua.

- **Principios:** evaluación formativa, retroalimentación bidireccional y fortalecimiento de la autonomía del aprendiz.

- **Actividades sugeridas:** presentación de proyectos finales que integren competencias pedagógicas y digitales, rúbricas claras para autoevaluación y coevaluación, espacios de reflexión sobre el proceso de aprendizaje.

6. Inclusión digital crítica: promueve un uso ético y funcional de las TIC, trascendiendo el mero entrenamiento técnico para desarrollar competencias interculturales e intergeneracionales.

- **Principios:** alfabetización digital integral, pensamiento crítico, ciudadanía digital.

- **Actividades sugeridas:** debates sobre el impacto ético de la tecnología, análisis de casos de uso de TIC en diferentes contextos educativos, diseño de proyectos que aborden problemáticas sociales con apoyo tecnológico.

7. Sostenibilidad institucional: inserción del modelo en políticas de formación docente y

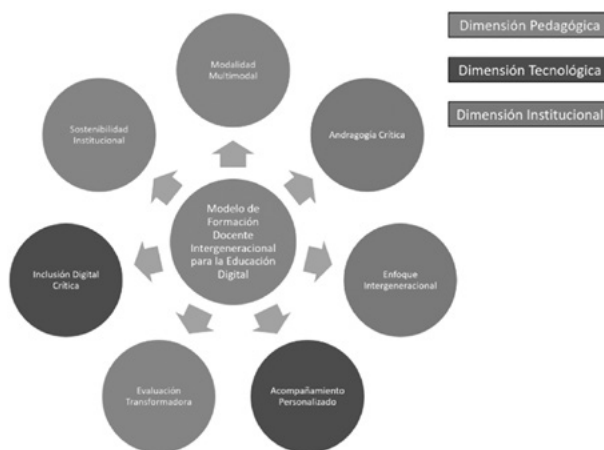
desarrollo profesional para garantizar su continuidad y transversalidad en el tiempo.

- **Principios:** compromiso institucional, políticas de apoyo, cultura de innovación.

- **Actividades sugeridas:** elaboración de manuales para la replicación del modelo, capacitación de nuevos facilitadores, establecimiento de convenios interinstitucionales para compartir la experiencia. El análisis de los resultados se fundamentó en la encuesta "Evaluando la Innovación: tu experiencia en tecnología educativa", triangulada con los registros de participación y la producción académica.

En la Figura 1 se puede observar el modelo planteado.

Figura 1. Modelo de formación docente intergeneracional



Nota: fuente elaboración propia.

5.1 Aplicabilidad del modelo

El modelo descrito no es únicamente una experiencia aislada, sino una propuesta pedagógica flexible, escalable, replicable y adaptable que responde a la necesidad de formación digital en contextos donde coexisten distintas generaciones de docen-

tes. Su diseño contempla principios de flexibilidad, sostenibilidad y humanismo pedagógico, lo que garantiza que pueda ser implementado tanto en instituciones públicas como privadas, en programas de formación continua, en procesos de reincorporación laboral docente, en actualización profesional, e incluso en programas de alfabetización digital para adultos mayores.

La aplicabilidad del modelo de formación docente intergeneracional se proyecta más allá de la experiencia puntual descrita en el artículo, pues ofrece una propuesta flexible que puede ser adoptada en diversos niveles educativos y contextos institucionales. Su estructura permite dar respuesta a necesidades de educación superior, formación técnica y programas comunitarios, favoreciendo tanto la actualización pedagógica como la alfabetización digital de adultos mayores. Al basarse en principios de andragogía crítica, inclusión digital y tutoría intergeneracional, el modelo se convierte en una herramienta pertinente para reducir brechas tecnológicas y revalorizar el capital pedagógico acumulado, fortaleciendo a su vez la innovación y la cohesión institucional.

Asimismo, el modelo posee un alto potencial de replicabilidad nacional e internacional, gracias a su enfoque situado y a la incorporación progresiva de TIC y metodologías activas. Su implementación puede alinearse con políticas educativas y programas de recualificación docente, especialmente en sistemas donde las plantas docentes enfrentan procesos de envejecimiento y transición digital. Además, al integrarse con tecnologías emergentes como la inteligencia artificial o la analítica de aprendizaje, su aplicabilidad se amplía hacia la construcción de estrategias sostenibles de formación docente, capaces de articular tradición pedagógica y transformación digital en beneficio de docentes, instituciones y estudiantes.

5.2 Flexibilidad y adaptabilidad

La fortaleza principal del modelo reside en su capacidad para ajustarse a múltiples realidades institucionales y culturales. Puede ser adoptado por universidades, centros de formación docente, instituciones de educación a distancia o programas de desarrollo profesional, ya que contempla la diversidad generacional, la progresiva apropiación tecnológica y la pedagogía situada. Su diseño parte de un enfoque dialógico y respetuoso de las trayectorias docentes, proponiendo tutorías intergeneracionales, acompañamiento personalizado y metodologías activas.

Para garantizar una implementación efectiva, se recomienda iniciar el proceso con diagnósticos participativos que identifiquen las necesidades reales de los participantes, así como incorporar progresivamente las TIC, adecuadas al nivel de competencia de los docentes involucrados.

5.3 Requisitos para la implementación exitosa

La implementación del modelo demanda ciertas condiciones mínimas institucionales, humanas y tecnológicas, entre las que destacan:

- **Compromiso institucional:** es indispensable el respaldo de los equipos directivos, incluyendo la asignación de recursos materiales, humanos y tecnológicos, y el reconocimiento formal del programa como parte del desarrollo docente.
- **Voluntad y apertura del profesorado:** la disposición al reaprendizaje, la colaboración y la reflexión crítica son fundamentales en los procesos de transformación pedagógica.
- **Infraestructura tecnológica básica:** se requiere acceso estable a internet, manejo elemental de herramientas ofimáticas y plataformas de videoconferencia.
- **Liderazgo pedagógico:** facilitadores o tutores con sensibilidad intergeneracional, competen-

cias didácticas y habilidades tecnológicas para acompañar el proceso.

- **Cultura de colaboración y reconocimiento mutuo:** el éxito del modelo se sustenta en relaciones de confianza, horizontalidad y reciprocidad entre generaciones.

Beneficios esperados

Para los docentes: el modelo propicia el fortalecimiento de competencias pedagógicas y digitales, contribuyendo a la reducción de la brecha digital generacional. A su vez, permite el reconocimiento del saber acumulado y la experiencia profesional de los docentes, lo que favorece la renovación del sentido de pertenencia institucional y el bienestar laboral. Este enfoque también estimula la creatividad y la innovación educativa, generando un impacto transformador en la práctica docente desde una perspectiva integradora y humanista.

Para las instituciones educativas: el modelo favorece el aprovechamiento integral del capital humano disponible, al tiempo que contribuye a la mejora de la calidad educativa y a la diversificación de las metodologías de enseñanza. Asimismo, promueve una cultura de formación continua e inclusiva, lo que fortalece la resiliencia institucional frente a los constantes cambios tecnológicos y sociales que caracterizan el contexto educativo actual.

Para los estudiantes: los estudiantes acceden a experiencias formativas más completas, que integran de manera armónica la tradición pedagógica con el uso de tecnologías emergentes. Esto se traduce en docentes más motivados y con un mayor dominio de los entornos digitales, lo cual enriquece el proceso de enseñanza-aprendizaje mediante clases más participativas, dinámicas y culturalmente significativas.

La sostenibilidad institucional del modelo se asegura al insertarlo en planes formales de desarrollo docente y en políticas de educación digital. Al mismo tiempo, es posible escalar su impacto mediante convenios interinstitucionales, producción de manuales y REA, y capacitación de nuevos facilitadores que repliquen la experiencia.

5.4 Desafíos potenciales

A pesar de sus beneficios, la implementación del modelo también puede enfrentar retos, tales como: a) Resistencia al cambio, especialmente en entornos institucionales rígidos o con escasa cultura digital. b) Limitaciones tecnológicas, como la falta de equipos, conectividad o soporte técnico. c) Necesidad de formación permanente para facilitadores, tutores y coordinadores, a fin de mantener la calidad del acompañamiento y actualizar los contenidos.

VI. Conclusiones y futuras líneas de investigación

Los resultados de esta experiencia formativa intergeneracional confirman que es posible, pertinente y profundamente enriquecedor reincorporar a docentes jubilados a los entornos virtuales de enseñanza mediante procesos de formación cuidadosamente diseñados. Esta iniciativa no solo permitió reducir brechas digitales significativas, sino que también propició una revalorización del rol del docente con trayectoria, transformando lo que inicialmente fue percibido como una limitación (la educación a distancia con las TIC) en una oportunidad para el diálogo de saberes, la mentoría mutua y la innovación pedagógica.

Uno de los aportes más destacados del modelo fue demostrar que el reaprendizaje tecnológico en adultos mayores no solo es viable, sino también deseable, cuando se desarrolla en un entorno de respeto, acompañamiento personalizado y sentido institucional. Los participantes, inicialmente alejados de herramientas como Zoom, formularios digitales o aulas virtuales, lograron transitar hacia una participación activa

y confiada, ampliando su repertorio pedagógico y fortaleciendo su sentido de pertenencia institucional. La experiencia evidenció que las resistencias iniciales pueden ser superadas si se reconoce la experiencia previa de los docentes y se construyen procesos formativos con base en la andragogía crítica y el aprendizaje situado.

Desde la perspectiva institucional, este modelo reafirma la importancia de promover políticas de inclusión digital intergeneracional como parte de las estrategias de transformación educativa. El fortalecimiento de la confianza tecnológica, el desarrollo de competencias digitales pedagógicas y el establecimiento de relaciones de colaboración entre generaciones aportan significativamente a la sostenibilidad del proyecto educativo universitario. Lejos de ser una medida transitoria, la formación de docentes jubilados en entornos virtuales se perfila como una estrategia de mediano y largo plazo para responder a los desafíos de la educación superior contemporánea con identidad, experiencia y visión humanista.

Asimismo, el modelo propuesto es replicable y adaptable a diversos contextos educativos, tanto en instituciones que enfrentan procesos de transición digital, como en aquellas interesadas en revitalizar su planta docente con profesionales altamente capacitados que, pese a haber concluido su ciclo laboral activo, aún conservan vocación, conocimiento y deseo de contribuir. La inclusión de estos profesionales no solo aporta calidad pedagógica, sino que permite consolidar un tejido institucional que valora la experiencia, promueve la equidad y recupera el sentido comunitario de la labor educativa.

La experiencia documentada ratifica que la innovación educativa no está reñida con la tradición, sino que puede alimentarse de ella. El encuentro entre generaciones, en un marco de respeto, afectividad y formación crítica, abre nuevos horizontes de esperanza para una educación superior más inclusiva, humana y sostenida en principios que honran el pasado mientras construyen el futuro.

Los resultados sugieren un alto potencial de replicabilidad y adaptabilidad del modelo en diversos contextos educativos. Sin embargo, se recomienda avanzar en investigaciones futuras que incluyan: a) estudios comparativos en instituciones con distintos niveles de infraestructura; b) la incorporación de métricas de impacto a largo plazo; y c) la integración de tecnologías emergentes, como inteligencia artificial y analítica de aprendizaje, en la tutoría intergeneracional. De esta manera, se consolidará la evidencia sobre la eficacia y escalabilidad de la propuesta.

VII. Referencias

- [1] F. Salajan et al., "Digital divides in higher education: A study of age-related challenges in a digital teaching context," *Education and Information Technologies*, vol. 27, no. 1, pp. 123–145, 2022.
- [2] M. Quispe Huanca et al., "Habilidades digitales y tecnoestrés en docentes universitarios mayores de 60 años," *MEDISAN*, vol. 27, no. 6, p. e4698, 2023.
- [3] M. S. Knowles, *Andragogy in action: Applying modern principles of adult learning*. San Francisco, CA: Jossey-Bass, 1984.
- [4] N. Martínez Heredia y A. M. Rodríguez García, "Educación intergeneracional: Un nuevo reto para la formación del profesorado," *REXE. Revista de Estudios y Experiencias en Educación*, vol. 17, no. 33, pp. 113–124, 2018.
- [5] E. Iglesias Vidal, C. Simón Rueda, y M. Jiménez Ramírez, "Manifiesto por una educación crítica en tiempos de pandemia," *Revista Internacional de Educación para la Justicia Social*, vol. 9, no. 2, pp. 15–32, 2020.
- [6] A. W. Bates, *Teaching in a Digital Age: Guidelines for designing teaching and learning*. Victoria, BC, Canadá: B.C Campus, 2015.
- [7] H. Arribas-Cubero, J. Frutos-de Miguel, y X. M. González-González, "Aprendizaje-servicio en experiencias intergeneracionales: Un estudio de caso en la formación de Educación Social," *Estudios Pedagógicos*, vol. 47, no. 4, pp. 245–269, 2021.
- [8] G. Echeita y M. Fernández-Blázquez, "Herramientas de evaluación para procesos de formación docente inclusiva," en *Actas de Investigación Educativa No Publicadas*, Madrid, España: Universidad Autónoma de Madrid, 2021, pp. 1–20.
- [9] M. Fernández Rodríguez, "Proyectos eTwinning y competencia digital docente: Un análisis crítico," *Pixel-Bit. Revista de Medios y Educación*, no. 64, pp. 23–41, 2022.
- [10] C. Coll y A. Engel, *La educación del siglo XXI: Hacia una inclusión tecnológica crítica y un cambio pedagógico*. Barcelona, España: Universidad de Barcelona, 2019.
- [11] G. Y. Jiménez Ramírez et al., "Estrategias de acompañamiento familiar en la educación preescolar durante la pandemia: implicaciones para la inclusión digital crítica," *Revista Latinoamericana de Educación y Tecnología*, vol. 10, no. 2, pp. 75–92, 2024.
- [12] Universidad de Murcia, "Diversidad generacional en contextos universitarios: Análisis crítico y propuestas," Servicio de Publicaciones de la Universidad de Murcia, Murcia, España. [En línea]. Disponible en: <https://www.um.es/publicaciones>. [Consultado: 21 de junio de 2025].
- [13] C. Marcelo y D. Vaillant, *El cambio en el aula: Una mirada desde las competencias profesionales docentes*. Madrid, España: Santillana, 2018.
- [14] UNESCO, *Open Educational Resources: A Catalyst for Innovation in Education*. París, Francia: UNESCO Publishing, 2023.
- [15] Organización de Estados Iberoamericanos (OEI), *Docencia en la era digital: políticas y prácticas*. Madrid, España: OEI, 2024.
- [16] Banco Mundial, *World Development Report 2022: Finance for an Equitable Recovery*. Washington, DC: World Bank, 2022.

- [17] P. Mishra y M. J. Koehler, "Technological Pedagogical Content Knowledge: A framework for teacher knowledge," *Teachers College Record*, vol. 108, no. 6, pp. 1017–1054, 2006, doi: 10.1111/j.1467-9620.2006.00684. x.

- [18] L. M. Espinosa Cevallos, *Educación intergeneracional: Tendencias y desafíos en el contexto latinoamericano*. Quito, Ecuador: Editorial Universitaria, 2024.





Estudio de un sistema de depuración natural para el tratamiento de aguas residuales industriales de la cervecería mozambiqueña

Study of a Natural Purification System for the Treatment of Industrial Wastewater from the Mozambican Brewery

Antonio Casañas¹, Nicolau Chirinza², Paulino Muguirrima³, Federico León Zerpa⁴, Alejandro Ramos Martín⁵, Carlos Mendieta⁶

Tipo de Artículo: investigación.

Recibido: 01/12/2024. **Aprobado:** 01/07/2025. **Publicado:** 12/12/2025

Resumen: El sistema híbrido de humedales artificiales es una tecnología que actualmente se utiliza en varios países del mundo para depurar aguas residuales industriales. La hibridación tiene como objetivo el acoplamiento en serie como forma de

responder a la falta de capacidad de eliminación total. La incapacidad de un sistema unitario para eliminar un parámetro determinado puede ser compensada por el otro sistema acoplado. Cabe señalar que el sistema de humedales artificiales tiene una

- ¹ Autor correspondiente: Antonio Casañas. Mayor título: Máster en Ingeniería Industrial. Filiación institucional: Universidad de las Palmas de Gran Canaria. País: España, Ciudad: Palmas de Gran Canaria. Correo electrónico: tonicasanas@hotmail.com
- ² Autor correspondiente: Nicolau Chirinza. Mayor título: Ingeniero de Procesos. Filiación institucional: Universidad Zambeze. País: Mozambique, Ciudad: Beira. Correo electrónico: nicolau.chirinza101@alu.ulpgc.es. ORCID: 0009-0006-2260-1802
- ³ Autor correspondiente: Paulino Muguirrima. Mayor título: Ingeniero Físico. Filiación institucional: Universidad Zambeze. País: Mozambique, Ciudad: Beira. Correo electrónico: paulino.muguirrima101@alu.ulpgc.es. ORCID: 0000-0002-7253-3477
- ⁴ Autor correspondiente: Federico León Zerpa. Mayor título: Ingeniero Industrial. Filiación institucional: Universidad de las Palmas de Gran Canaria. País: España, Ciudad: Palmas de Gran Canaria. Correo electrónico: federico.leon@ulpgc.es. ORCID: 0000-0003-2284-8400
- ⁵ Autor correspondiente: Alejandro Ramos Martín. Mayor título: PhD en Ingeniería Industrial. Filiación institucional: Universidad de las Palmas de Gran Canaria. País: España, Ciudad: Palmas de Gran Canaria. Correo electrónico: alejandro.ramos@ulpgc.es ORCID: 0000-0001-5759-4469
- ⁶ Autor correspondiente: Carlos Mendieta Pino. Mayor título: Ingeniero Industrial. Filiación institucional: Universidad de las Palmas de Gran Canaria. País: España, Ciudad: Palmas de Gran Canaria. Correo electrónico: carlos.mendiet@ulpgc.es ORCID: 0000-0002-1808-0112

mayor eficiencia de purificación en lugares con altas temperaturas debido al poder calorífico que obliga a la excitación de los microorganismos a realizar sus actividades en el proceso de descomposición de la materia orgánica, lo que lo convierte en un sistema viable para Mozambique, que tiene un clima predominantemente cálido.

Palabras clave: Sistema de purificación; humedales artificiales híbridos; aguas residuales industriales.

Abstract: The hybrid constructed wetland system is a technology that is currently being used in several countries around the world to purify industrial wastewater. Hybridisation is aimed at serial coupling as a way of responding to a lack of total removal capacity; the inability of a unitary system to remove a given parameter can be compensated for by the other coupled system. It should be noted that the Constructed Wetlands system has a higher purification efficiency in places with high temperatures due to the calorific power that forces the excitation of microorganisms to carry out their activities in the process of decomposing organic matter, making it a viable system for Mozambique, which has a predominantly hot climate. In terms of construction and handling, it does not entail significant costs compared to conventional technologies and is environmentally friendly.

Keywords: Purification system; hybrid constructed wetlands; industrial wastewater.

1. Introduction

The most important component of human existence and industrial operations is water, which is currently seriously threatened by dangerous contaminants caused by both human activity and natural processes [1]. However, water pollution has always been a major concern, as it directly affects human health [2].

The main drivers of the degradation of groundwater quality as well as surface water are recognised as industrialisation, population growth and inadequate waste management practices [3]. Urban and indus-

trial wastewater discharges continue to be a major source of pollution worldwide [1], [4]. There are two primary sources of contaminants in wastewater: (i) natural sources, most notably volcanic activity, soil erosion and rock weathering, and (ii) dispersion of mineral contaminants through anthropogenic activities, waste disposal sites, urban runoff, mining, printed circuit board manufacture, agricultural activities, treatment and electroplating of metal surfaces, fuel burning, textile dyes, semiconductor manufacture, etc. [5].

The wastewater produced by the different economic sectors is characterised by great variations in terms of composition and concentration, as well as by various levels of water consumption and, therefore, by the different flow rates of the wastewater produced [6]. The safe and controlled disposal of wastewater has become increasingly important due to the strict regulatory requirements of each country and the regulations imposed by environmental protection agencies on the quality of effluents [4], [7].

One of humanity's current concerns is reconciling environmental protection with industrial production, particularly when it comes to discharging waste into water bodies without prior treatment, which has increased the demand for renewable energy sources [8].

In view of the issues jeopardising water quality and the possibility of environmental contamination, various wastewater treatment technologies have been adopted. It should be noted to increase the efficiency of contaminant removal, a treatment system is required that aims to reduce the levels of contamination present in wastewater to minimise the impact of the discharge on the environment [7], [9].

Wastewater treatment systems can be divided into two groups: Intensive or conventional systems. These are systems that require considerable energy to operate (electromechanical equipment) and use small areas of land per equivalent inhabitant (for example: activated sludge and percolation beds). Extensive or natural systems. These are based on natural processes with little or no energy consumption and occupy larger areas of land per equivalent

inhabitant (e.g. stabilisation ponds, constructed wetlands and soil treatment systems). [10], [11].

Conventional wastewater treatment processes are challenged by the need to effectively reduce pollutant loads prior to disposal or reuse, since the composition and concentration of contaminants in wastewater change over time, resulting in a variation in the oxidation-reduction potential (ORP) of the affluent [12].

Nature-based solutions, such as constructed wetlands (CW), offer great possibilities for the sustainable use of water, facilitating its treatment and reuse, as well as contributions to climate change adaptation through the utilisation and promotion of vegetation in both urban and rural areas [10], [13].

Wastewater treatment plants (WWTPs), although effective systems for removing pollutants, usually require large capital investments as well as operating and maintenance costs. Constructed wetlands (CWs) stand out as a low-cost treatment method. They effectively remove a wide range of contaminants through a combination of physical, chemical, and biological processes. In addition, compared to conventional WWTPs, they have a lower visual impact and lead to the production of smaller quantities of sewage sludge [2], [14], [15], [16].

The criteria and objectives of the circular economy require opting for technologies and configurations that allow for the recovery of nutrients and other resources contained in wastewater, while at the same time allowing for the reuse or recycling of the water itself for different uses [7].

However, the main objective of this article is to study a natural purification system applicable to the treatment of industrial wastewater from a Mozambican brewery.

II. Materials and Methods

Types of natural wastewater purification system:

Pond systems or stabilisation ponds

They are made up of huge basins, with a high retention time and limited by dykes built with the material of the land itself, in which the water is purified by entirely natural means, through the biological activity of bacteria (anaerobic/aerobic) and algae [8], [17].

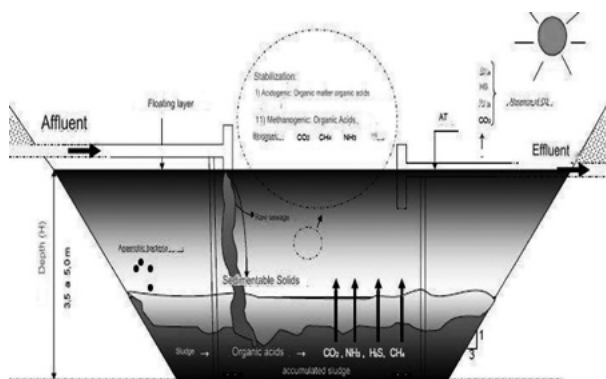
Wastewater stabilisation ponds are often used to treat municipal and industrial wastewater in small and remote communities, and can effectively reduce suspended particles, biochemical oxygen demand, coliform bacteria, nutrients, metals and micropollutants [18], [19]. Their efficiency depends on many factors, and it is very difficult to derive a model that considers all the parameters involved in predicting their performance. Therefore, these models should only be used for guidance. Modifications to the physical design of a lagoon, such as dimensions, depth, recirculation, removal of algae from the effluent, among others, can improve the quality of the effluent. In terms of classification, depending on the process by which organic matter is degraded, lagoons can be classified as anaerobic, aerobic, facultative and maturation [10], [20], [21].

Anaerobic ponds

Anaerobic decomposition processes predominate in the lagoon. It is characterised by the absence of oxygen (free or combined).

They are used to treat wastewater with high organic loads and a high concentration of suspended solids.

Anaerobic lagoons have water column heights of between 2.5 and 5.0 metres.

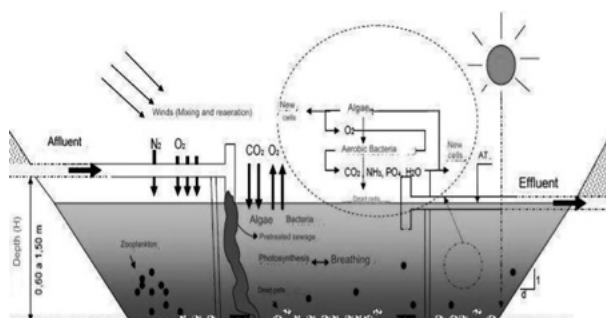
Figure 1. Schematic representation of the anaerobic lagoon

Note. adapted from C. A. Mendieta-Pino, (2022) [10].

Aerobic lagoons

Aerobic decomposition processes predominate in the lagoon. They are characterised by having dissolved oxygen throughout the liquid mass.

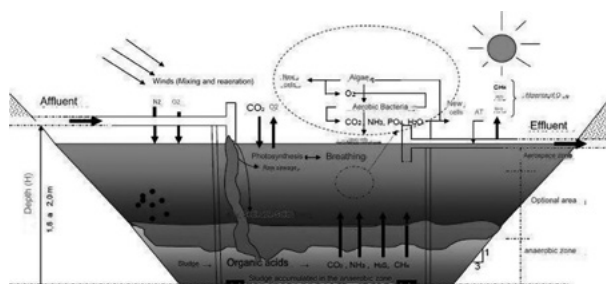
In many larger wastewater treatment systems, anaerobic and aerobic (or facultative, which has both zones) lagoons are used in series to achieve more comprehensive treatment. The anaerobic stage handles the bulk of the organic load, and then the aerobic stage “polishes” the effluent. The aerobic lagoon has water column heights of between 0.30 and 0.45 metres. The removals achieved by this system are: BOD5 (80 % to 95 %).

Figure 2. Schematic representation of an aerobic stabilisation pond

Note. adapted from C. A. Mendieta-Pino, (2022) [10].

Facultative Lagoon

Soluble and finely particulate BOD is stabilised aerobically by bacteria dispersed in the liquid, while suspended BOD tends to sediment and is stabilised anaerobically by bacteria at the bottom of the pond. The oxygen required by aerobic bacteria is supplied by algae through photosynthesis. Facultative ponds have water column heights of between 1.20 and 2.50 metres.

Figure 3. Representation of how a facultative stabilisation pond works

Note. adapted from C. A. Mendieta-Pino, (2022) [10].

The removals achieved by this system are: BOD5 (80% to 90%); Organic Nitrogen (75% to 95%); Ammoniacal Nitrogen (51% to 82%); Phosphorus (32% to 98%); Faecal Coliforms (99.9%).

Maturation pond

The main purpose of a maturation pond is to remove pathogens. In maturation ponds, adverse environmental conditions prevail for pathogens, such as ultraviolet radiation, high pH, high DO, temperature lower than that of the human body, lack of nutrients and predation by other organisms. Maturation ponds are a post-treatment process aimed at removing BOD and are usually designed as a series of ponds or as a single pond divided by baffles. Their efficiency in removing coliforms is very high.

Technology Constructed wetlands (CWs)

It is considered a secondary or even tertiary treatment used worldwide to treat wastewater from various sources, such as domestic, agricultural, industrial, mining and aquifers, due to its ability to reduce pollutants in wastewater and purify it, hence it has been used in the treatment of effluents since ancient times, specifically in the 1960s [15], [16]. This remedial technology is a low-cost, environmentally friendly sanitation alternative and is recommended for on-site wastewater treatment to meet the required effluent discharge standards [22]. The structure of CWs is designed to simulate the physical, chemical and biological processes that occur in natural wetlands, treating wastewater efficiently [15].

Various types of constructed wetlands differ in their main design characteristics, as well as in the processes responsible for removing pollution. In terms of their hydraulic characteristics, CWs can be classified into surface and subsurface runoff where:

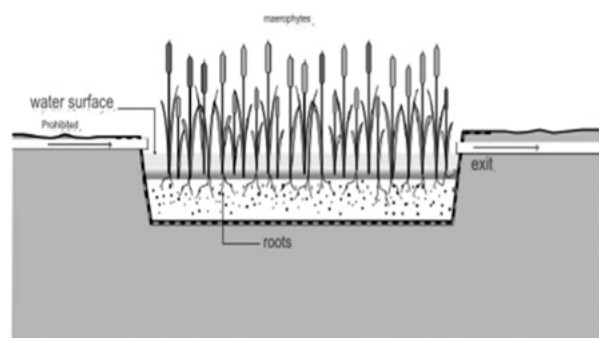
Surface flow constructed wetlands (OFCWs)

Surface flow wetlands are very similar to natural wetlands; however, with sewage volume in the substrate, they are not very deep [14]. The plants and the substrate are the elements that exert the greatest influence on the efficiency of the system. Plant roots extend into the gaps in the substrate, absorb nutrients (e.g. nitrogen and phosphorus) from the pore wastewater in the CWs to support plant growth and purify the water simultaneously.

The Surface Flow Wetland consists of wetlands where water flows over a free surface with the presence of adapted vegetation. There is one type of surface-flow wetland: free-surface wetlands. These systems are the main choice when it comes to wastewater from urban, agricultural and industrial areas, due to their ability to cope with varying flow rates and depths [23]. Constructed wetland systems can be effective in the treatment of a variety of effluents including textile effluents, dairy effluents, piggery effluents, septic tank dewatering, landfill leachate, inorganic industrial effluents, tannery effluents, among others [17], [23].

It should be noted that the selection of plant species is a key factor; the vegetation must survive the possible toxic effects of wastewater and its chemical variability and, of course, it must adapt to local climatic conditions. The substrates used to build wetlands include soil, sand, gravel, rock and organic materials such as compost, which can also adsorb inorganic ions from water, especially phosphorus ions [19], [22], [24], [25].

Figure 4. Schematic representation of a surface wetland

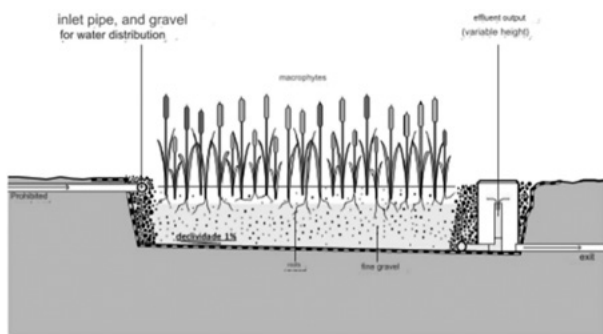


Note. adapted Vymazal [26].

Subsurface flow wetland (SBFW)

Subsurface flow constructed wetlands are divided into two types: horizontal subsurface flow wetland (HSFW) and vertical subsurface flow wetland (VSFW). Where the horizontal subsurface flow constructed wetland consists of gravel or rock beds sealed by an impermeable layer and planted with wetland vegetation. The wastewater is fed at the inlet and flows through the porous medium under the surface of the bed in a more or less horizontal path until it reaches the outlet zone, where it is collected and discharged [26], [27].

Figure 5. Representation of the constructed wetland with horizontal subsurface flow



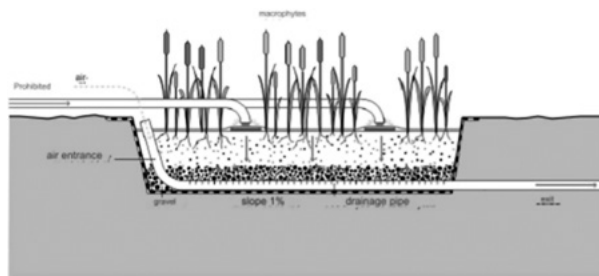
Note. adapted Vymazal [26].

In the wet zone, constructed from vertical subsurface flow, the water is released into the upper/lower layer of the bed, descending/emerging through the soil, passing through a zone of macrophyte roots, until it is finally collected and led to an outlet device. It should be noted that they were originally introduced by Seidel to oxygenate anaerobic septic tank effluents [17], [19], [23].

However, VSFWs have not spread as quickly as HSFWs, probably because of the greater operating and maintenance requirements due to the need to pump wastewater intermittently on the surface of the wetland (Figure 6).

The water is fed in large batches and then the water percolates through the sand medium. The new batch is fed only after all the water has percolated and the bed is free of water [26], [27].

Figure 6. Representation of the Vertical subsurface flow constructed wetland

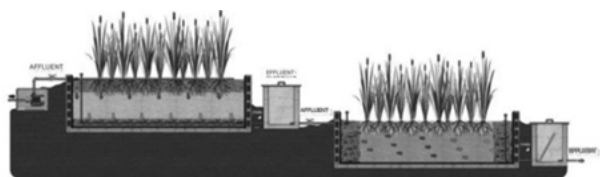


Note. adapted Vymazal [26].

Hybrid Constructed Wetlands (VF-HF CWs)

To improve the efficiency of natural purification systems in constructed wetlands, it is used a hybrid technology for constructed wetlands (VF-HF). For example, France and the UK have been using hybrid vertical flow (VF) and horizontal flow (HF) technology since the 1980s, where the VF-HF system was originally designed by Seidel in the late 1950s and early 1960s, but the use of hybrid systems was then very limited. Today, hybrid constructed wetlands are in operation in many countries around the world and are used especially when the removal of N-ammonia and N-total is required. In addition to sewage, hybrid constructed wetlands have been used to treat a variety of other wastewaters, for example landfill leachate, compost leachate, abattoirs, shrimp and fish aquaculture or wineries [23], [26], [27].

However, proven hybrid systems have shown removal rates of 78% COD, 91% BOD5, 94% NH4-N, 46% NT and 97% TDS. It has been verified that these systems in series can achieve effective wastewater treatment for communities with hot climates [27], [28]. The most common type of configuration, which has been widely used, is composed of a CWs -VF followed by a CWs - HF, achieving good removal of organic matter and solids [26].

Figure 7. Representation of the Hybrid Constructed Wetland

Note. adapted Vymazal [26].

Based on various samples taken at the Mozambican brewery and analysed in the laboratory, the following characteristics of the wastewater were obtained:

Table 1. Characterisation of wastewater from the Mozambican brewery

Parameter	Sample Analyses
PH	5.1 - 6.4
Temperature (°C)	18 - 20
Alkalinity (mg/l)	240 - 265
Conductivity (μS/cm)	2120 - 3480
TDS (mg/l)	2335 - 3246
Turbidity (NTU)	53.42 - 349.92
Phosphate (mg/l)	15.12 - 37.22
Nitrogen (mg/l)	22.03 - 35.09
BOD (mg/l)	1490 - 3241
COD (mg/l)	2670 - 3798

Note. author's source (2023).

Apos was followed by comparative analyses of the various natural wastewater purification systems (Anaerobic Lagoon, Facultative Lagoon, Maturation Lagoon, Vertical Wetland and Horizontal Wetland), highlighting the relevant aspects for choosing an optimum system in the case of: Efficiency of removal of the various parameters, occupational area, environmentally friendly, local climate, maintenance, total costs inherent in the installation, handling of the optimum natural wastewater purification system.

Table 2. Comparison of the efficiency of natural purification systems

Parameters	Reduction (%)				
	Anaerobic lagoon	Lagoon Optional	Lagoon Ripening	Wetlands Vertical	Wetlands Horizontal
Suspended solids	50 – 60	60 – 70	35 – 40	90 – 95	90 – 95
DBOS	40 – 50	60 – 80	25 – 40	90 – 95	90 – 95
DQO	40 – 50	55 – 75	15 – 25	80 – 90	80 – 90
NH*4	–	20 – 60	15 – 50	60 – 70	20 – 25
N total	5 – 10	30 – 60	30 – 60	60 – 75	20 – 30
P total	0 – 5	0 – 30	30 – 45	20 – 30	20 – 30
Coliformes fecais (UFC/100 ml)	0,2 – 0,5 u log	2,2 u log	0,7 – 1,3 u log	1 – 2 u log	1 – 2 u log

Note. adapted Mendieta [10].

Figure 8. Characterisation of the project site for the implementation of a natural wastewater purification system at Cervejeira Moçambicana

Note. author's source.

The images above illustrate the brewery under study with an extensive open area with the capacity and requirements needed to set up a hybrid constructed wetland. The site is in the city of Beira, in the Manga neighbourhood, which has a tropical climate with an average temperature of 24.6 °C and an average annual rainfall of 1312 mm. The average temperature in February, the hottest month of the year, is 27.7 °C. The average temperature in July is 20.6 °C. This is the lowest average temperature during the year. The driest month - September - has a difference in rainfall of 228 mm compared to the wettest month - February.

Table 3. Average monthly temperatures from 2014 to 2022

	Months					
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	June
Td	31°C	31°C	31°C	29°C	26°C	25°C
Tn	24°C	24°C	24°C	23°C	20°C	18°C
Pr	240	281.9	205.3	134	37.3	20.8
	Jul	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec
Td	25°C	26°C	28°C	29°C	30°C	31°C
Tn	18°C	18°C	20°C	22°C	22°C	24°C
Td	74.3	49.5	16.9	61.5	93.7	153

Td: Day temperature. Tn: Night temperature. Pr: Precipitation.

Note. adapted from C. A. Mendieta-Pino, (2022) [10].

Comparative analyses of the use of the built-up wetlands in countries with different climates. temperate and tropical and subtropical countries [29], [17], [18], [19] reported that countries with warmer climates have great potential for implementing this technology, since such temperatures and the flow of sunlight tend to favour the metabolic processes of plants/microorganisms and therefore positively influence the biodegradation of polluting compounds. In addition, studies show that at lower temperatures there is a lower productivity of the microorganisms, i.e. they reduce the rates of biochemical reactions, reducing the treatment results, so it is important to take these variations into account.

This section outlines the criteria for comparatively assessing natural wastewater treatment alternatives. The assessment considers both their environmental impacts and implications, as well as the resources required for their implementation.

Anaerobic ponds

Advantages: simplicity in construction. High BOD and coliform removal efficiency; reduced total operating, energy and maintenance costs.

Disadvantages: the need to occupy large areas; biological activity affected by temperature; generation of bad odours and environmentally unhealthy.

Aerobic lagoon

Advantages: simple construction, minimal maintenance, minimised total costs and efficient removal of pathogenic organisms. The system consumes little energy and has few problems with sludge handling and disposal. In terms of results, it offers treatment equal to or better than some conventional processes.

Disadvantages: requires larger areas than for any other type of treatment, needs an additional source of oxygen to supplement the minimum amount that can be diffused into the surface water, high concentration of total suspended solids in the effluent, dependence on climatological factors such as sunlight and temperature for greater efficiency.

Facultative lagoons

Advantages: low implementation and operating costs. No need for electricity. Ability to absorb sudden increases in hydraulic and organic loads.

Disadvantages: insect proliferation. Evaporation losses. Extensive area required. Environmental and social impact, making it environmentally unhealthy.

Surface flow wetlands

Advantages: ease of construction, low operating and maintenance costs. Minimal sludge production and excellent landscape integration. High removal efficiencies.

Disadvantages: it requires a large area, implying high capital costs. Rodent proliferation and unpleasant odours. Risk of disease transmission due to human and animal exposure, making it unhealthy for the environment.

Vertical subsurface flow wetland

Advantages: easy to build, moderate construction, handling, energy and maintenance costs, low sludge production, low mosquito proliferation and odour generation, high removal capacity and environmentally friendly.

Disadvantages: removal dependent on climate and water characteristics. Wastewater needs to be pre-treated before entering the constructed wetland.

Horizontal subsurface flow wetland

Advantages: easy to build, not too technologically demanding, moderate in terms of construction, handling, energy and maintenance costs, low proliferation of disease-causing insects, high rate of parameter removal and environmentally friendly.

Disadvantages: need to occupy a relatively large area, efficiency dependent on climate in terms of temperature and rainfall, need for pre-treatment of wastewater before it flows into the wetland, deficiency in the oxygenation process implying a reduction in nitrification.

After observing all the comparisons of the systems mentioned above, with emphasis on efficiency rates, the existence of an area behind the industry with the potential for good plant growth and the hot climate of the city where the system was to be implemented, the natural purification system was chosen, namely the Hybrid Constructed Wetland (CWs VF-HF).

Sizing model for the Hybrid Constructed Wetland

As this is a hybrid system, the two constructed wetland systems will be dimensioned: Where we will have the dimensioning of the horizontal flow constructive wetland as well as the vertical flow one.

The following modelling was used to design the Vertical flow constructed wetland: kinetic - hydrodynamic modelling of complete mixing (MC-1st Order +HMC).

Horizontal flow sub-surface wetlands [10] are sized using the first order kinetic equation applicable to piston type reactors. The following modelling was used to design the horizontal flow constructed wetland: kinetic-hydrodynamic modelling of piston flow (MC-1st Order + HFP).

$$A = \frac{Q * (\ln C_e - \ln C_s)}{Kt * h * n}$$

Equation 1

Where: (A) is the required surface area (m²); (Q) is the affluent flow (m³/d); (C_e) is the affluent concentration in terms of BOD₅ (mg/l or g/m³); (C_s) is the effluent concentration in terms of BOD₅ (mg/l or g/m³); h is the average depth of the filter (m); (n) is the porosity of the filter material (dimensionless) and Kt a constant which is the product of h and n.

Table 4. Bulletin of the Republic of Mozambique – standards for the emission of liquid effluents by industries

Parameters	Value	MS
PH	6-9	*
DBO	30	*
DQO	80	
SST	15	*
	10	
NH4	10	
Temperature increase	<= 3°C	

Note. adapted from [10]

III. Results and Discussions

Dimensioning the subsurface constructed wetland:

General aspects regarding the sizing of wetlands. To determine the depth, it is followed the ideology of the authors [23], [26], [27], [28] The depth (h) of the wetland should be < =0.40 m for horizontal flow systems and < =0.80 m for vertical systems. The slope inclination should be between 45 and 60° for both.

The length to width ratio (L/W) should be between 2 and 5 for horizontal flow and 1 for vertical flow.

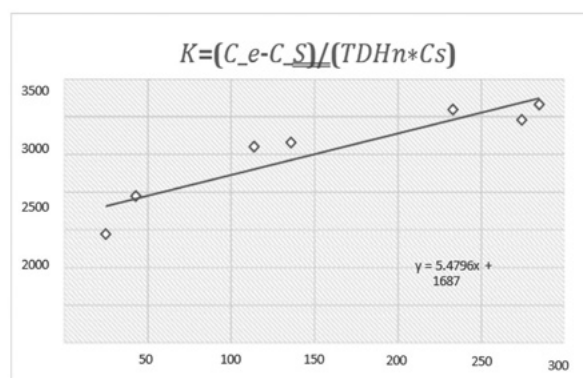
Dimensioning the vertical subsurface constructed wetland:

Firstly, the value of K = the pollutant's degradation constant was obtained using data obtained from the Mozambican brewery's wastewater treatment plant.

Table 5. Data collected at the Mozambican brewery's wastewater treatment plant

CODE	2730,8	2670	1490	3040	3241	3170	1998
CODs	64,9	63,5	35,46	72,35	77,13	75,4	47,5
HRTn	2,1	1,8	0,7	3,8	3,7	3,1	0,9

Note. adapted from [10]

Figure 9. Obtaining the K value - the pollutant's degradation constant

Note. author's source.

For a better performance, a good activity of the microorganisms influenced by high local temperatures, the value of K can be altered using as a starting point the lowest average temperature of the year, which is 20.6°C. It's important to note that the rate at which microorganisms degrade organic matter is directly proportional to temperature. During warmer periods, the K value (representing the degradation rate constant) will increase, which in turn boosts the microorganisms' activity and their speed of degradation.

$$K_T = K_{20^\circ\text{C}} * 1,06^{T-20} = 5,4796 * 1,06^{20,6-20} = 5,7d^{-1}$$

Equation 2

Using equation 3 and the BOD value obtained from the results of the samples taken at the Mozambican brewery and analysed in the laboratory, in this case the highest, with the BOD value recommended by the Mozambican standard for industrial liquid effluent emission standards and the K value, it was possible to find the system's hydraulic detention time:

After obtaining the hydraulic detention time (18.8 d) and knowing the peak flow ($Q=78.3$), the system volume was calculated.

$$\text{onde } V = TDHn * Q = 18,8 * 78,3 = 1472 \text{ m}^3$$

$$V = A * H$$

$$A = \frac{V}{H} = \frac{1472}{0,8} = 1840 \text{ m}^2$$

$$A = C * L$$

$$A = L * l$$

$$1840 = L^2, L = 43 \text{ m e } C = 43 \text{ m}$$

Equation 3

It is known that the length/width ratio (L/W) must be 1. $L=W$ Dimensioning the horizontal subsurface constructed wetland.

The filter material to be used is gravel with a filter medium porosity of 45%. Where n will be 0.45. The value of h will be 0.40 m.

$$A = \frac{Q * (\ln C_e - \ln C_s)}{Kt * h * n} = \frac{78,3 * (\ln 3241 - \ln 30)}{5,7 * 0,40 * 0,45} = \frac{366,6}{1,026} = 357,3 \text{ m}^2$$

Equation 4

Knowing that the length/width ratio (L/W) must be between 2 and 5 for horizontal flow and adopted for piston flow [27, 28], $C = 3 * l$.

$$A = C * L = 3 * L * L$$

$$357,3 = 3L^2$$

$$L = \frac{357,3}{3} = 119,1 = 11 \text{ m}$$

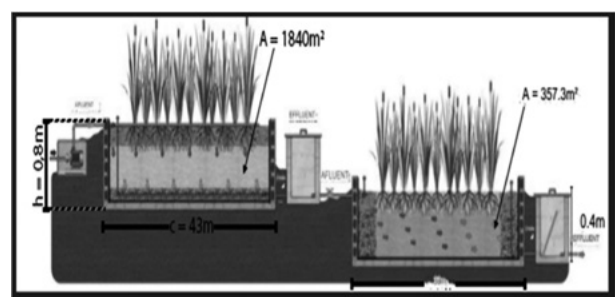
$$C = 3 * L = 3 * 11 = 33 \text{ m}$$

$$V = C * L * H = 33 * 11 * 0,4 = 145,2 \text{ m}^3$$

Equation 5

Schematic representation of the Hybrid Constructive Wetlands system proposed for a brewery in Mozambique.

Figure 10. Representation with dimensional details



Note. author's source (2024).

Given the characteristics of the wastewater produced at the Mozambican brewery under study, the proposed system, following the dimensions, could be an optimum system for natural wastewater purification. Hybrid constructed wetlands have evolved considerably as technology has developed. There is a growing need to provide more efficient types of treatment, with lower operating and construction costs, and less environmental impact. Where the Hybrid Constructed Wetlands system requires a better option, several countries have adopted the system in reference to the removal of various parameters in industrial wastewater, with more emphasis on water that has a more complex characteristic in its composition. [30], [31].

The study area has the spatial capacity to build a hybrid wetland.

IV. Conclusions

When exploring natural wastewater purification systems discussed in this article, constructed wetlands emerged as the preferred solution. Among the various types, hybrid constructed wetlands (combining vertical and horizontal subsurface flows) were particularly highlighted, alongside surface flow constructed wetlands. This preference stems from analyses and studies conducted at the study site, which revealed an extensive vacant and green area nearby. However, the presence of many houses in the vicinity creates conditions unsuitable for implementing surface wetlands. This is primarily due to their tendency to their ability to release odours originating from the process of degradation of organic matter. It is also considered that the surface system has led to the proliferation of malaria-causing mosquitoes. It is well known that the African continent, and Mozambique in particular, is vulnerable to this disease [27].

When sizing wetlands, it is important to check the local climate, with emphasis on the parameter's temperature and rainfall. Where temperature has a direct influence on the activities of microorganisms in the process of degrading organic matter, rainfall

can increase the volume of water in the system and hinder the expected efficiency.

The Mozambican standard for effluent emission standards recommends that the system should be more efficient in removing the 4 main parameters due to the level of danger and indication of the water. The parameters are PH, BOD, TSS and E-Coliforms. Due to the characteristics of the wastewater from the Mozambican brewery, it does not present a hazardous level of E-coliforms due to its production origin. With regard to the other parameters, studies carried out by various authors, articles and projects have shown that the hybrid constructive wetlands system has a high capacity for reducing the parameters.

V. Acknowledgements

This project was made possible with the unconditional contribution of the students of Industrial Process Engineering 2023 edition, third year who were involved in the search for the materials used. This research was co-funded by the INTERREG V-A Cooperation, Spain-Portugal MAC (Madeira-Azores-Canaries) 2014-2020 programme, MITIMAC project (MAC2/1.1a/263).

VI. References

- [1] A. E. Alprol, A. T. Mansour, M. E. E. D. Ibrahim, and M. Ashour, "Artificial Intelligence Technologies Revolutionising Wastewater Treatment: Current Trends and Future Prospective," Jan. 01, 2024, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). Doi: 10.3390/w16020314.
- [2] M. Marzec, A. Listosz, A. Malik, M. Kulik, and K. Józwiakowski, "Organic Pollutants Removal in a Hybrid Constructed Wetland Wastewater Treatment Plant with an Aeration System," *Water (Basel)*, vol. 16, no. 7, p. 947, Mar. 2024, Doi: 10.3390/w16070947.
- [3] I. Naz, I. Ahmad, R. W. Aslam, A. Quddoos, and A. Yaseen, "Integrated Assessment and Geostatistical Evaluation of Groundwater Quality through Water Quality Indices," *Water (Basel)*, vol. 16, no. 1, p. 63, Dec. 2023, Doi: 10.3390/w16010063.
- [4] S. X. de Campos and M. Soto, "The Use of Constructed Wetlands to Treat Effluents for Water Reuse," *Environments*, vol. 11, no. 2, p. 35, Feb. 2024, Doi: 10.3390/environments11020035.
- [5] F. Younas et al, "Current and emerging adsorbent technologies for wastewater treatment: Trends, limitations, and environmental implications," Jan. 02, 2021, MDPI AG. doi: 10.3390/w13020215.
- [6] C. Zaharia, C.-P. Musteret, and M.-A. Afrasinei, "The Use of Coagulation-Flocculation for Industrial Coloured Wastewater Treatment-(I) The Application of Hybrid Materials", *Applied Sciences*, vol. 14, no. 5, p. 2184, Mar. 2024, Doi: 10.3390/app14052184.
- [7] A. A. Galindo Montero, Y. M. Berrio Arrieta, and E. V. Pimienta Serrano, "Treatment of Slaughterhouse Wastewater through a Series System: Upflow Anaerobic Reactor and Artificial Wetland," *Water (Basel)*, vol. 16, no. 5, p. 700, Feb. 2024, Doi: 10.3390/w16050700.
- [8] M. P. María et al, "Current advances in the brewery wastewater treatment from anaerobic digestion for biogas production: A systematic review," Oct. 01, 2023, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.envadv.2023.100394.
- [9] Y. Bao, R. Koutavarapu, and T. G. Lee, "Derivation of Optimal Operation Factors of Anaerobic Digesters through Artificial Neural Network Technology," *Systems*, vol. 11, no. 7, Jul. 2023, Doi: 10.3390/systems11070375.
- [10] C. A. Mendieta-Pino, T. Garcia-Ramirez, A. Ramos-Martin, and S. O. Perez-Baez, "Experience of Application of Natural Treatment Systems for Wastewater (NTSW) in Livestock Farms in Canary Islands," *Water (Switzerland)*, vol. 14, no. 14, Jul. 2022, doi: 10.3390/w14142279.
- [11] T. P. Mendoza-Tinoco, V. Sánchez-Vázquez, M. del Carmen Fajardo-Ortiz, I. González, and R. Beristain-Cardoso, "How does a low-magnitude electric field influence anaerobic digestion in wastewater treatment? A review," Jun. 01, 2023, Elsevier Ltd. Doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.138402.
- [12] S. M. Khumalo, B. F. Bakare, S. Rathilal, and E. K. Tetteh, "Characterisation of South African Brewery Wastewater: Oxidation-Reduction Potential Variation," *Water (Switzerland)*, vol. 14, no. 10, May 2022, Doi: 10.3390/w14101604.

- [13] T. Ribeiro et al, "Magnetic Natural Coagulants for Plastic Recycling Industry Wastewater Treatability," *Water (Switzerland)*, vol. 15, no. 7, Apr. 2023, Doi: 10.3390/w15071276.
- [14] L. E. Fernández Ramírez, S. A. Zamora-Castro, L. C. Sandoval-Herazo, A. L. Herrera-May, R. Salgado-Estrada, and D. A. De La Cruz-Desavre, "Technological Innovations in the Application of Constructed Wetlands: A Review," Dec. 01, 2023, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/pr11123334.
- [15] A. García-Valero et al, "Swine Wastewater Treatment System Using Constructed Wetlands Connected in Series," *Agronomy*, vol. 14, no. 1, Jan. 2024, Doi: 10.3390/agronomy14010143.
- [16] S. X. de Campos and M. Soto, "The Use of Constructed Wetlands to Treat Effluents for Water Reuse," *Environments*, Feb. 01, 2024, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/environments11020035.
- [17] T. Kornilowicz-Kowalska, J. Bohacz, K. Rybczyńska-Tkaczyk, and K. Józwiakowski, "Evaluation of the Richness, Species Diversity, and Biosafety of Saprotrophic Fungal Communities in Constructed Wetlands and Biological Wastewater Ponds," *Water (Switzerland)*, vol. 15, no. 1, Jan. 2023, Doi: 10.3390/w15010031.
- [18] S. R. Wilkinson, M. A. Naeth, and A. Dhar, "Potential of Macrophytes for Wastewater Remediation with Constructed Floating Wetlands in Cold Climates," *Water (Switzerland)*, vol. 15, no. 13, Jul. 2023, Doi: 10.3390/w15132479.
- [19] O. E. Bachi et al, "Wastewater Treatment Performance of Aerated Lagoons, Activated Sludge and Constructed Wetlands under an Arid Algerian Climate," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 24, Dec. 2022, Doi: 10.3390/su142416503.
- [20] P. R. C. de Almeida et al, "Use of otolith microchemistry signatures to assess the habitat use of *Centropomus undecimalis* in lagoon systems of the southwest Atlantic," *Reg Stud Mar Sci*, p. 103470, Jul. 2024, Doi: 10.1016/j.rsma.2024.103470.
- [21] W. H. Jeon, S. H. Lee, H. S. Moon, Y. Kim, S. W. Chang, and S. Hwang, "Impacts of pumping on the spatiotemporal dynamics of a fresh-saline water mixing zone in a coastal lagoon-aquifer system," *J Hydrol Reg Stud*, vol. 51, Feb. 2024, Doi: 10.1016/j.ejrh.2024.101657.
- [22] S. B. Gebru and A. A. Werkneh, "Applications of constructed wetlands in removing emerging micropollutants from wastewater: Occurrence, public health concerns, and removal performances - a review," *S Afr J Chem Eng*, Apr. 2024, Doi: 10.1016/j.sajce.2024.03.004.
- [23] F. J. C. Magalhães Filho, J. C. M. de Souza Filho, and P. L. Paulo, "Multistage constructed wetland in the treatment of greywater under tropical conditions: Performance, operation, and maintenance," *Recycling*, vol. 6, no. 4, Dec. 2021, Doi: 10.3390/recycling6040063.
- [24] H. Su et al, "Advanced treatment and resource recovery of brewery wastewater by Co-cultivation of filamentous microalga *Tribonema aequale* and autochthonous Bacteria," *J Environ Manage*, vol. 348, Dec. 2023, Doi: 10.1016/j.jenvman.2023.119285.
- [25] A. Menció, E. Madaula, W. Meredith, X. Casamitjana, and X. D. Quintana, "Dataset for analysing and modelling the eutrophication processes in groundwater-coastal lagoon systems: The La Pletera lagoons case study (NE Spain)," *Data Brief*, vol. 48, Jun. 2023, Doi: 10.1016/j.dib.2023.109197.

- [26]** J. Vymazal, "Constructed wetlands for wastewater treatment," Sep. 01, 2010, MDPI AG. Doi: 10.3390/w2030530.
- [27]** L. Y. Kochi, P. L. Freitas, L. T. Maranhão, P. Juneau, and M. P. Gomes, "Aquatic macrophytes in constructed wetlands: A fight against water pollution," Nov. 01, 2020, MDPI. Doi: 10.3390/su12219202.
- [28]** M. Macário, A. Saraiva, E. Ferreira, L. Filipe Ferreira, and M. Oliveira, "Constructed wetlands as an alternative to conventional wastewater treatment systems-A Review," 2018. Online. Available: <http://ojs.ipsantarem.pt/index.php/REVUIIPS>
- [29]** Y. Zheng et al, "A feasible method for the composition analysis and chemical remediation of clogging matter in subsurface flow constructed wetland," Water Cycle, Mar. 2024, Doi: 10.1016/j.watcyc.2024.03.003.
- [30]** X. Zhu, R. Qie, C. Luo, and W. Zhang, "Assessment and Driving Factors of Wetland Ecosystem Service Function in Northeast China Based on InVEST-PLUS Model," Water (Basel), vol. 16, no. 15, p. 2153, Jul. 2024, Doi: 10.3390/w16152153.
- [31]** P. Lemenkova, "Artificial Intelligence for Computational Remote Sensing: Quantifying Patterns of Land Cover Types Around Cheetham Wetlands, Port Phillip Bay, Australia," J Mar Sci Eng, vol. 12, no. 8, p. 1279, Jul. 2024, Doi: 10.3390/jmse12081279.



Tipografía: Avenir
Materiales: propalcote 300 g y bond 90 g.

Impreso por: Papeles Pa' Ya
Carrera 69k # 71-23 (oficina 302), Bogotá, Colombia
Teléfono: +57 317 435 8309
E-mail: papeles.paya.sas@gmail.com
Bogotá, Colombia

Sello Editorial TdeA
Tecnológico de Antioquia - Institución Universitaria
Dirección de Investigación - Facultad de Ingeniería
Calle 78B No. 72-220. Medellín - Colombia, Suramérica.
www.tdea.edu.co
2025



1. Análisis de la declaratoria del Distrito de Manejo Integrado Farallones: un estudio de caso en los municipios de Ubalá, Gachalá y Medina, Cundinamarca
2. Prototipo funcional de software de reconocimiento biométrico de huellas dactilares para aerolíneas
3. Potencial antimicrobiano de extractos liquénicos de Parmotrema sp. y Usnea sp.: una evaluación para uso sostenible en el Campus sede Tunja de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
4. ¿Qué saben los estudiantes y docentes de pregrado de carreras orientadas al estudio de las TIC sobre la interactividad y cómo afecta su formación académica? Estudio de caso en la Universidad Católica Luis Amigó
5. Más Allá del RAS: nuevos modelos de proyección de residuos sólidos para estimar la producción per cápita a nivel municipal
6. Valoración sociocultural de servicios ecosistémicos urbanos en el Parque Juan Pablo II del municipio de Chiquinquirá, Boyacá
7. Modelo de formación docente intergeneracional para la educación digital: reactivando saberes, integrando tecnologías
8. Estudio de un sistema de depuración natural para el tratamiento de aguas residuales industriales de la cervecera mozambiqueña

Cuaderno

Activa

• REVISTA CIENTÍFICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA •

