

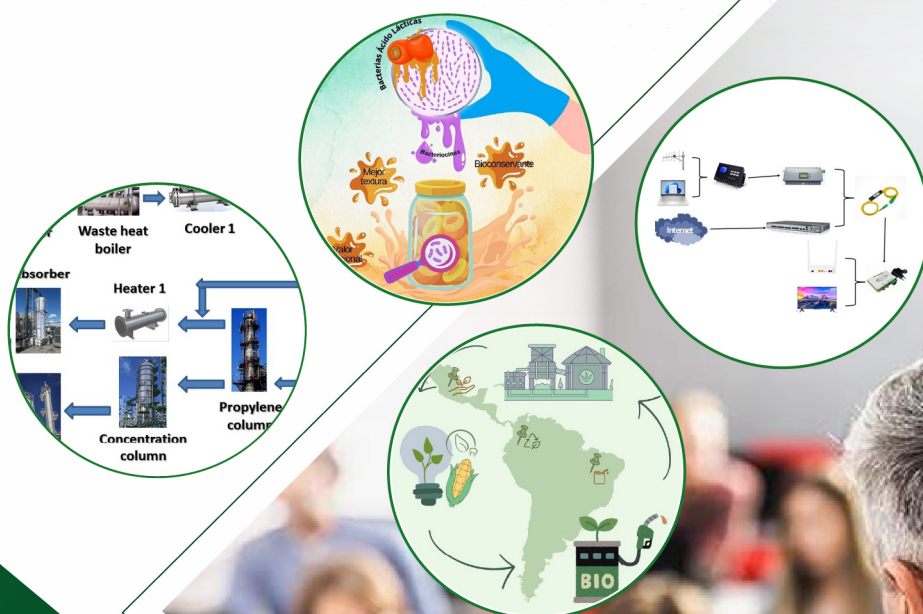


UTEQ
UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE
QUEVEDO

Revista

InGenio

Científica y Tecnológica



eISSN: 2697-3642

Volumen 8, Número 1
Enero 2025

Índice de contenido

Optimización de medios para producción de bacteriocinas antimicrobianas obtenidas de BAL de Chicha de chontaduro <i>(Optimization of media for the production of antimicrobial bacteriocins obtained from BAL from Chicha de chontaduro)</i>	1
Serpa Evelyn Marlein, Viteri Brandon Fernando, Sungey Sánchez Llaguno y Juan Neira Mosquera	
Diseño y construcción de un prototipo de una máquina de laminadora de cera de abeja <i>(Design and Construction of a Prototype of a Beeswax Laminating Machine)</i>	21
Líder Castillo Laban, Mario Yacchirema Lopez y Rodger Salazar Llor	
Análisis de metodologías para la caracterización de residuos sólidos en instituciones de educación superior: revisión sistemática <i>(Analysis of Methodologies for Characterizing Solid Waste in Higher Education Institutions: Systematic Review)</i>	32
Diego López Correa, Mónica Delgado-Yáñez, Eysthin Medica Saca y Carlos Enríquez Pinos	
Aprovechamiento de residuos agrícolas para producción de electricidad en Latinoamérica: Revisión literaria de casos exitosos en México, Colombia y Brasil <i>(Agricultural Waste for Electricity Production in Latin America: A Literature Review of Successful Cases in Mexico, Colombia, and Brazil)</i>	46
Yulissa del Cisne Marín Apolo, María Eliza Vega Iñiguez y Danny Ochoa-Correa	
Study of HFC Networks in Educational Contexts <i>(Estudio de Redes HFC en Contextos Educativos)</i>	69
Holger Santillán, Elvis Apolinario, Sulay Gavilanez y David Cardenas	
Gamificación: Evaluación del módulo aprenda a leer de la app Preescolar Montessori <i>(Gamification: Evaluation of the Module Learns to Read from the Montessori Preschool app)</i>	88
Fabricio Marcillo, Lorena Cusme, Jimmy Torres y Lucía Begnini	
Disrupción de las tecnologías en el aula de acuerdo con la teoría unificada de aceptación y uso de la tecnología <i>(Disruption of Technologies in the Classroom According to the Unified Theory of Technology Acceptance and Use)</i>	97
Nancy Pilapaxi-Cunalata y Joe Llerena-Izquierdo	
Cambios en la formación docente en el marco del modelo TPACK considerando el concepto de ingeniería educativa <i>(Changes in Teacher Training Within the Framework of the TPACK Model Considering the Concept of Educational Engineering)</i>	114
César Jácome-Mármol, Esteban Inga y Joe Llerena-Izquierdo	
Bandizip: Un enfoque de la compresión sin pérdida de ficheros de bases de datos <i>(Bandizip: An Approach to Lossless Compression of Database Files)</i>	137
Fabricio Marcillo, Javier Guaña, Yamileth Arteaga y Lucía Begnini	

Análisis de fidelización de clientes en talleres automotrices con la aplicación del método Customer Journey Map <i>(Analysis of customer loyalty in automotive workshops with the application of the customer Journey Map Method)</i>	147
Arturo Sanay Indacochea, Cindy Loor Mero y Marco Noroña Merchán	
Simulation of an allyl chloride production process via the propylene chlorination route in ChemCAD® simulator <i>(Simulación de un proceso de producción de cloruro de alilo mediante la ruta de cloración del propileno en el simulador ChemCAD®)</i>	156
Amaury Pérez Sánchez, Arlette de la Caridad González Abad, Amanda Acosta Solares y Arlenis Alfaro Martínez	

Optimización de medios para producción de bacteriocinas antimicrobianas obtenidas de BAL de Chicha de chontaduro

(Optimization of media for the production of antimicrobial bacteriocins obtained from BAL from Chicha de chontaduro)

Serpa Gaviláñez Evelyn Marlein , Viteri Uribe Brandon Fernando ,
Sungey Naynee Sánchez Llaguno , Juan Alejandro Neira Mosquera

Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, Sangolquí, Ecuador
emserpa@espe.edu.ec, bfviteri@espe.edu.ec, snsanchez@espe.edu.ec, jneiral@espe.edu.ec

Resumen: Las bacterias ácido lácticas (BAL) son microorganismos anaeróbicos presentes en bebidas fermentadas como la chicha de chontaduro. Son conocidas por su potencial de sintetizar bacteriocinas que se utilizan como aditivo para la bioconservación de alimentos por su capacidad antimicrobiana. La presente investigación tuvo como objetivo aislar y caracterizar bacterias productoras de bacteriocinas en la chicha de chontaduro, bebida fermentada tradicional de la región amazónica ecuatoriana, considerando distintos tipos de sustratos (Glucosa-peptona y Fructosa-peptona), para su aplicación como agente antimicrobiano. La caracterización fisicoquímica y microbiológica de la bebida fermentada se realizó al tercer día y se aislaron las bacterias. La colonia BAL se identificó con pruebas bioquímicas y morfológicas, se realizaron sistemas de fermentación suplementados con Glucosa-peptona y Fructosa-peptona a distintas concentraciones: 0,5 %, 2 %, 5 % y 7 %, se llevaron a cabo mediciones de los parámetros cinéticos, incluyendo pH, acidez, absorbancia y grados Brix, a intervalos de 0, 24, 48 y 72 horas, con el fin de identificar las condiciones óptimas para maximizar la producción de bacteriocinas mediante el análisis del crecimiento bacteriano y la eficiencia del proceso de fermentación. Se evaluaron los parámetros cinéticos para determinar el efecto del tipo y concentración de sustrato, así como el tiempo de fermentación en la producción de bacteriocinas y se determinó el mejor tratamiento con un diseño trifactorial A*B*C, obteniendo en total 32 tratamientos con tres repeticiones. La actividad antimicrobiana se evaluó con el método de difusión de pozos para las tres bacterias patógenas (*Lysinibacillus macroides*, *Staphylococcus aureus* y *Bacillus cereus*). El tratamiento más eficaz fue el 32, que consistió en fructosa peptona al 7 % +72 horas. Este tratamiento mostró una mayor producción de bacteriocinas y una mejora en la eficiencia fermentativa con los siguientes parámetros cinéticos: pH 3,53, acidez 0,30, absorbancia 3,49 y grados Brix 7,53. Se observó una correlación inversa entre el pH y la absorbancia, reflejando un crecimiento bacteriano robusto, y una correlación directa entre acidez y absorbancia, indicando una mayor producción de ácidos orgánicos. La fructosa favoreció la producción de bacteriocinas, lo que resalta la importancia de ajustar adecuadamente los sustratos. Además, factores como la temperatura y la presencia de inhibidores deben ser evaluados en investigaciones futuras.

Palabras clave: bacteriocinas, BAL, fermentación, parámetros cinéticos.

Abstract: Lactic acid bacteria (LAB) are anaerobic microorganisms present in fermented beverages such as chicha de chontaduro. They are known for their potential to synthesize bacteriocins that are used as additives for food biopreservation due to their antimicrobial capacity. The objective of this research was to isolate and characterize bacteriocin-producing bacteria in chicha de chontaduro, a traditional fermented beverage from the Ecuadorian Amazon region, considering different types of substrates (Glucose-peptone and Fructose-peptone), for its application as an antimicrobial agent. The physicochemical and

microbiological characterization of the fermented beverage was carried out on the third day and the bacteria were isolated. The BAL colony was identified with biochemical and morphological tests, fermentation systems supplemented with Glucose-peptone and Fructose-peptone at different concentrations were performed: 0.5 %, 2 %, 5 % and 7 %, measurements of kinetic parameters, including pH, acidity, absorbance and Brix degrees, were carried out at intervals of 0, 24, 48 and 72 hours, in order to identify the optimal conditions to maximize bacteriocin production by analyzing bacterial growth and the efficiency of the fermentation process. Kinetic parameters were evaluated to determine the effect of substrate type and concentration, as well as fermentation time on bacteriocin production and the best treatment was determined with a trifactorial design A*B*C, obtaining a total of 32 treatments with three replicates. The antimicrobial activity was evaluated with the well diffusion method for the three pathogenic bacteria (*Lysinibacillus macroides*, *Staphylococcus aureus* and *Bacillus cereus*). The most effective treatment was treatment 32, which consisted of 7 % fructose peptone + 72 hours. This treatment showed higher bacteriocin production and improved fermentation efficiency with the following kinetic parameters: pH 3.53, acidity 0.30, absorbance 3.49 and Brix 7.53. An inverse correlation was observed between pH and absorbance, reflecting robust bacterial growth, and a direct correlation between acidity and absorbance, indicating increased production of organic acids. Fructose favored the production of bacteriocins, highlighting the importance of properly adjusting substrates. In addition, factors such as temperature and the presence of inhibitors should be evaluated in future research.

Keywords: bacteriocins, LAB, fermentation, kinetic parameters.

1. INTRODUCCIÓN

Los conservantes son aditivos alimentarios utilizados para inhibir el crecimiento de microorganismos como bacterias, mohos, hongos y levaduras, los cuales pueden comprometer la seguridad del alimento y causar riesgos para la salud [1]. Al frenar el deterioro microbiológico, los conservantes permiten prolongar la vida útil de los productos alimenticios. Estos compuestos se clasifican en conservantes de origen natural y sintético, siendo los conservantes artificiales los más usados en la industria alimentaria debido a su eficacia y estabilidad [2].

El marco regulatorio sobre el uso de conservantes químicos en alimentos está definido por diversas normativas internacionales y locales, que establecen los límites máximos permisibles para estos compuestos. A nivel global, el Codex Alimentarius, desarrollado por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y la Organización Mundial de la Salud (OMS), proporciona estándares que garantizan la seguridad alimentaria [3]. En América Latina, cada país adopta normativas específicas; en Ecuador, por ejemplo, la regulación es gestionada por la Agencia Nacional de Regulación, Control y Vigilancia Sanitaria (ARCSA).

Entre los conservantes aprobados tanto por el Codex como por ARCSA se incluyen los benzoatos, sorbatos, sulfitos y nitratos, compuestos ampliamente utilizados por su efectividad para prevenir el crecimiento microbiano [3], [4]. No obstante, algunos de estos conservantes han sido objeto de preocupación debido a estudios que sugieren posibles efectos adversos en la salud cuando se consumen en exceso, lo que resalta la necesidad de regulaciones estrictas y un monitoreo continuo de su uso.

Un estudio realizado por Afshar et al. [5] evidenció que el consumo prolongado de benzoato de potasio (E212) puede inducir efectos teratogénicos en el desarrollo ocular de fetos de ratones BALB/c. De manera similar, Zengin et al. [6] evaluó el benzoato de sodio y el benzoato de potasio, encontraron que ambos compuestos tienen efectos clastogénicos, mutagénicos y citotóxicos en linfocitos humanos in vitro. Por otro lado, Tsay et al. [7] trataron larvas de pez cebra con benzoato de sodio (E211) y encontraron que dosis elevadas (1400-1500 ppm) causaron la muerte de los peces, además de provocar desalineaciones en las fibras musculares, alteraciones en la inervación de axones motores y daños en los tubos pronéfricos. Además, Khan et al. [8]

observó que la administración de benzoato de sodio en dosis de 200, 400 y 700 mg/kg de peso corporal en ratas Wistar macho provocó un aumento significativo en los niveles de citocinas inflamatorias, como TNF- α , IFN- γ , IL-1 β e IL-6.

En el estudio realizado por Hrnčiarová et al. [9] se evaluaron los efectos del benzoato de sodio (E211), nitrito de sodio (E250) y sorbato de sodio (E201) en cepas bacterianas aisladas de muestras fecales frescas, reportando valores de IC50 de 0.7, 1.0, 1.2 y 1.4 mg/mL, respectivamente. Los resultados mostraron que la exposición a estos aditivos alimentarios indujo disbiosis en la microbiota intestinal humana, provocando una disminución en la diversidad microbiana. Otro estudio con sorbato de sodio demuestra que es genotóxico para los linfocitos de sangre periférica humana in vitro en concentraciones altas [10].

El sulfito de sodio (E221), otro aditivo químico de uso común ha demostrado tener efectos adversos cuando la exposición es inadecuada o prolongada, desencadenando procesos como apoptosis hepática, necroptosis y piroptosis en ratones y en células AML-12 [11].

El nitrito de sodio (E250), un conservante ampliamente utilizado en productos cárnicos, ha generado controversia debido a su potencial toxicidad en dosis elevadas. Aunque es eficaz en la preservación de alimentos, su accesibilidad y la rapidez con la que puede ser letal han contribuido a su creciente uso en casos de suicidio, lo que ha suscitado preocupación en el ámbito de la salud pública. La ingestión accidental de nitrito de sodio, aunque poco frecuente, suele estar asociada a la preparación no controlada de alimentos caseros. Los síntomas clínicos como náuseas, vómitos y taquicardia suelen ser leves debido a la baja cantidad ingerida. Sin embargo, en casos graves o fatales, se observa cianosis y alteración de la conciencia, con un alto riesgo de mortalidad antes de llegar al hospital, especialmente cuando se consumen dosis elevadas o existen enfermedades crónicas subyacentes [12].

El uso extendido de conservantes sintéticos en la industria alimentaria ha generado preocupación debido a sus posibles efectos adversos para la salud, como se ha observado en estudios que vinculan compuestos como los benzoatos y sorbatos con efectos mutagénicos, citotóxicos y teratogénicos. A pesar de la eficacia de estos conservantes en la preservación de alimentos, el riesgo para la salud humana, especialmente cuando se consumen en exceso, plantea la necesidad urgente de buscar alternativas más seguras. Esta problemática se agrava por el creciente consumo de alimentos ultraprocesados que contienen estos conservantes, lo que aumenta la exposición de la población a los riesgos mencionados. En respuesta a estas preocupaciones y al creciente interés en alternativas más seguras, ha aumentado el desarrollo y la adopción de conservantes naturales, como las bacteriocinas [13].

En los últimos 30 años, las bacteriocinas han generado un gran interés, tanto en la comunidad científica como en el sector industrial, gracias a su capacidad para inhibir microorganismos patógenos. Se han desarrollado diversas investigaciones en torno a su detección, producción, purificación, mecanismo de acción, caracterización bioquímica, propiedades bactericidas, microorganismos inhibidos o sensibles y aplicación segura en la bioconservación de alimentos [14].

Las bacteriocinas son proteínas o péptidos tóxicos sintetizados por el ribosoma y se liberan extracelularmente en la fase de crecimiento tardío y estacionario temprano [15], [16]. Entre los principales géneros de bacterias grampositivas que sintetizan bacteriocinas se encuentran *Lactobacillus*, *Streptococcus*, *Pediococcus*, *Lactococcus*, *Oenococcus*, *Leuconostoc*, *Enterococcus*, *Weissella*, *Carnobacterium*, *Microbacterium*, *Aerococcus*, *Leptosphaeria*, *Melissococcus*, *Tetragenococcus*, *Propionibacterium*, *Bifidobacterium* y *Vagococcus* [17],[18]. [19].

Las bacteriocinas suelen ser péptidos catiónicos pequeños (<10 kDa), estables al calor, anfifílicos y capaces de permeabilizar membranas celulares. Además de su actividad

antimicrobiana, los microorganismos productores de bacteriocinas pueden aportar valor agregado a los alimentos, mejorando su textura, valor nutricional y sabor [20]. Estas moléculas han demostrado eficacia contra patógenos significativos, como *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Salmonella typhi*, *Shigella flexneri*, *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli* y *Clostridium botulinum* [21].

El mecanismo de acción de las bacteriocinas se basa en su capacidad para unirse a receptores específicos en la membrana celular de microorganismos patógenos. Esta interacción provoca la formación de poros que aumentan la permeabilidad de la célula, lo que resulta en su muerte [22]. La producción de bacteriocinas está mediada por un sistema de control que comprende tres componentes fundamentales: un péptido inductivo (o factor activador de feromonas), una histidina quinasa transmembrana que actúa como receptor de feromonas, y un regulador de respuesta. Por lo general, las bacteriocinas son sintetizadas por bacterias ácido-lácticas (BAL) en forma de péptidos inactivos, que son transportados a la superficie celular durante la fase de crecimiento exponencial. En este contexto, las bacteriocinas son activadas a través de un proceso enzimático, donde los transportadores poseen un dominio N-terminal que facilita la escisión del péptido guía, y un dominio C-terminal que participa en la hidrólisis del trifosfato de adenosina, proporcionando así la energía necesaria para su activación [23], [24].

El presente trabajo se justifica en la búsqueda de alternativas más seguras y naturales, centrándose en el potencial de las bacteriocinas producidas por BAL aisladas de la chicha de chontaduro como agentes de bioconservación. La chicha de chontaduro, una bebida tradicional de la región amazónica del Ecuador, no ha sido investigada a gran profundidad como fuente de estos bioconservantes. Aunque la bebida también puede encontrarse en otros países de la región andina, como Perú y Bolivia, y en zonas bajas de Brasil, Colombia, Venezuela, Chile y Argentina [25], [26], su potencial en la industria alimentaria ha sido poco explorado. En este estudio se analizaron los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de la chicha de chontaduro para obtener información sobre las bacteriocinas producidas por bacterias ácido-lácticas (BAL) aisladas de esta bebida. El objetivo fue determinar el sustrato más óptimo para el crecimiento y la producción de bacteriocinas. Para ello, se implementaron sistemas de fermentación con diferentes combinaciones de sustratos (Carbono-Nitrógeno). Adicionalmente, se llevó a cabo un ensayo para evaluar la actividad antimicrobiana de las bacteriocinas obtenidas.

Esta investigación no solo responde a la necesidad de garantizar la seguridad alimentaria sin comprometer la salud de los consumidores, sino que también se alinea con el creciente interés social por alimentos más naturales y saludables. Además, la promoción de conservantes naturales como las bacteriocinas fomentan prácticas de consumo más sostenibles y saludables, respondiendo a la demanda actual de los consumidores por productos libres de aditivos artificiales. Desde una perspectiva política y regulatoria, esta investigación también busca contribuir a la adopción de normativas que promuevan el uso de conservantes naturales en lugar de los sintéticos, alineándose con estándares internacionales como el Codex Alimentarius y las regulaciones locales, como las emitidas por la ARCSA en Ecuador [3].

2. METODOLOGÍA

2.1. Obtención de la chicha de chontaduro

La bebida fermentada chicha de chontaduro utilizada en el presente proyecto de investigación se adquirió de la Comuna Kichwa Juan Montalvo, ubicada en el cantón La Joya de los Sachas, ubicada en la provincia de Orellana, Ecuador. Se evaluó una cantidad aproximada de 1100 mL de la bebida. La chicha fue almacenada en un frasco de vidrio de 2000 mL cubierto con papel aluminio para evitar la exposición a la luz directa, utilizando un sistema de fermentación con trampa de agua que consistía en un tubo de plástico conectado a una botella adicional para permitir la salida de los gases generados durante el proceso de fermentación. El almacenamiento se realizó

a temperatura ambiente y en condiciones sin exposición directa a la luz, lo que garantizó un entorno estable para la fermentación y minimizó posibles alteraciones externas.

2.2. Caracterización fisicoquímica y microbiológica de la chicha de chontaduro

Durante las primeras horas, la bebida inicia su fermentación y las bacterias acidolácticas (BAL) se adaptan al medio (chicha de chontaduro), alcanzando un pico de actividad en su crecimiento exponencial al tercer día. Por lo tanto, en este momento se midieron los parámetros fisicoquímicos: pH por método directo utilizando un pH-metro de la marca BOECO Modelo BT-700, acidez por el método de titulación para medir la acidez titulable, grados alcohólicos mediante el uso de un alcoholímetro BOECO con un rango de 100 % Vol, densidad con el uso de un picnómetro de 10 mL y grados Brix utilizando un refractómetro de mano BOECO de 45 °. Los parámetros se midieron y se compararon de acuerdo con la Norma INEN 2262:2013 para bebidas alcohólicas, a excepción de la densidad y grados Brix.

Se caracterizó microbiológicamente la bebida fermentada mediante la técnica de recuento en placa, utilizando Petrifilm marca 3M para bacterias ácido lácticas (BAL), aerobios mesófilos, mohos y levaduras. Como primer paso, se prepararon diluciones seriadas de la chicha de chontaduro, utilizando como diluyente agua de peptona hasta la dilución 10^{-4} , y se agregó 1 mL de la disolución en el centro del film. Las placas de Petrifilm se colocaron en la incubadora digital marca Memmert, modelo Incubadora I. Los Petrifilm de bacterias ácido-lácticas y aerobios se incubaron durante 48 horas a 37 °C, mientras que los de mohos y levaduras se mantuvieron durante 72 horas a 25 °C. Posteriormente, se contabilizaron utilizando un contador de colonias Isolab (603.11.001). Las metodologías empleadas para la caracterización microbiológica se rigieron y compararon con el manual del usuario de Petrifilm, marca 3M.

2.3. Aislamiento de las bacterias productoras de bacteriocinas

En el tercer día de fermentación, al fermentado se realizaron diluciones seriadas desde 10^{-1} hasta 10^{-4} utilizando agua de peptona al 1,5 %. De la dilución 10^{-4} , se tomó 1 mL mediante una micropipeta automática BrandTech de 100 µL para cada caja Petri que contenía 25 mL de agar MRS. Las cajas se sellaron con parafilm y se incubaron a 37 °C durante 48 horas. Transcurrido este período, se realizaron nuevas siembras empleando el método de estrías para purificar las colonias.

2.4. Identificación de las colonias aisladas

Se llevó a cabo una identificación morfológica mediante tinción de Gram considerando que las formas bacterias ácido-lácticas (BAL) corresponden principalmente a cocos y bacilos. La reacción a la tinción, que se manifiesta en un color azul/morado, proporciona información sobre la estructura de la pared celular, indicando que las BAL son grampositivas.

Para la tinción Gram, se esterilizaron en una autoclave Tuttnaver automática 2540- PG15E todos los materiales a utilizar para no contaminar las placas con las colonias. Primero, se colocó una gota de agua destilada en un portaobjetos. Luego, con un asa bacteriológica de metal, se tomó una pequeña cantidad de la muestra bacteriana y se esparció por el portaobjetos. Para fijar la muestra al portaobjeto se utilizó un mechero. Cuando la muestra secó, se cubrió con cristal violeta por 60 segundos. Luego, se añadió lugol de igual manera por 60 segundos. Posterior a esto, alcohol cetona durante 15 segundos. Finalmente, se colocó safranina y se dejó por 60 segundos. En cada etapa se realizó un lavado con agua destilada y se secó con el mechero. Para visualizar las placas, se utilizó un microscopio óptico Better Scientific BS750 a una resolución de 100x colocando aceite de inmersión en la muestra del portaobjetos.

Además, se realizaron pruebas bioquímicas: en la prueba de catalasa se utilizó una gota de peróxido de hidrógeno en el portaobjeto con la muestra bacteriana, donde la presencia de burbujas confirmó la presencia de la enzima catalasa y en la prueba oxidasa se agregaron 3 gotas del

reactivo Kovac en un papel filtro con la muestra siendo la coloración rosada, púrpura o negra un resultado positivo para la enzima oxidasa, ayudando a diferenciar el grupo bacteriano.

2.5. Establecimiento de sistemas de fermentación bacteriana con distintos tipos de sustratos y producción de bacteriocinas

La bacteria identificada se replicó una sola vez en caldo Man, Rogosa y Sharpe (MRS) y tras 48 horas, se establecieron los sistemas de fermentación. Inicialmente, se elaboraron los medios en matraces Erlenmeyer de 250 mL con 200 mL de medio de cultivo MRS y 2 mL de la muestra bacteriana. En cada tratamiento, se añadió un sustrato (glucosa-peptona y fructosa-peptona) en concentraciones de 0,5 %, 2 %, 5 % y 7 % p/v. Para la medición de los parámetros cinéticos, como el % de acidez, pH, densidad óptica a 550 nm se utilizó el Espectrofotómetro Shimadzu UV-1280 y grados Brix, se utilizó un equipo de muestreo (equipo de venoclisis), y las mediciones se realizaron en diferentes intervalos de tiempo (0, 24, 48 y 72 horas). Finalmente, la fermentación discontinua se incubó a 37 °C, sin agitación, durante 72 horas.

El estudio cinético realizado tiene como objetivo central identificar las mejores condiciones para maximizar la producción de bacteriocinas a partir del crecimiento bacteriano y la eficiencia del proceso de fermentación. Las variables medidas (pH, acidez, absorbancia y grados Brix) permiten evaluar cómo los cambios en el tipo y concentración de sustrato, junto con el tiempo de fermentación, afectan este proceso y ayudan a determinar las condiciones óptimas para la producción de bacteriocinas.

2.6. Análisis estadístico

Para esta investigación se aplicó un diseño estadístico de bloques completamente aleatorizados con un arreglo factorial ABC, donde se evaluaron tres factores: Factor A (Tipo de Sustrato: Glucosa-peptona y Fructosa-peptona), Factor B (Concentración del Sustrato: 0,5 %, 2 %, 5 %, 7 %) y Factor C (Tiempo: 0, 24, 48, 72 horas) como se observa en la Tabla 1, con tres repeticiones por tratamiento. El análisis estadístico se realizó exclusivamente con los parámetros cinéticos, utilizando ANOVA para determinar diferencias significativas entre los tratamientos, seguido de la prueba de Tukey ($p < 0,05$) para la separación de medias. Los datos fueron procesados utilizando el software STHATGRAPICS. Las variables evaluadas incluyeron pH, acidez, densidad y grados Brix.

Se realizó un análisis de conglomerados jerárquico con el objetivo de agrupar los tratamientos en función de sus similitudes, permitiendo identificar patrones y posibles relaciones entre los diferentes niveles de glucosa, fructosa y peptona, así como los tiempos de incubación. Esto se realizó para explorar si los tratamientos podían agruparse de forma coherente según su proximidad, lo cual ayudaría a identificar patrones de comportamiento de las bacterias en función de las condiciones experimentales.

Adicionalmente, se empleó un análisis de componentes principales (ACP) con el fin de reducir la dimensionalidad de los datos y visualizar de forma clara la variabilidad entre los tratamientos, resaltando las variables más influyentes en la diferenciación de los tratamientos. Esto nos permite interpretar mejor las tendencias y patrones complejos en los resultados.

2.7. Obtención de las bacteriocinas

Los mejores tratamientos seleccionados según los parámetros cinéticos, fueron sometidos a centrifugación a 10000 rpm durante 20 minutos en la Centrífuga modelo DM0412P. El sobrenadante resultante se recolectó en un frasco de vidrio ámbar de 100 mL y se ajustó su pH entre 6,0 y 6,5 utilizando NaOH a 1N, con el fin de neutralizar los ácidos orgánicos presentes. Finalmente, el sobrenadante fue filtrado manualmente utilizando papel filtro de 0,22 μm para obtener las bacteriocinas.

Tabla 1. Interacciones respectivas con sus respectivos tratamientos (Tipo de sustratos, concentración del sustrato y tiempo).

Tratamiento	Interacción	Combinación
T1	A0B0C0	Glucosa-Peptona + 0,5 % + 0 h
T2	A0B0C1	Glucosa-Peptona + 0,5 % + 24 h
T3	A0B0C2	Glucosa-Peptona + 0,5 % + 48 h
T4	A0B0C3	Glucosa-Peptona + 0,5 % + 72 h
T5	A0B1C0	Glucosa-Peptona + 2 % + 0 h
T6	A0B1C1	Glucosa-Peptona + 2 % + 24 h
T7	A0B1C2	Glucosa-Peptona + 2 % + 48 h
T8	A0B1C3	Glucosa-Peptona + 2 % + 72 h
T9	A0B2C0	Glucosa-Peptona + 5 % + 0 h
T10	A0B2C1	Glucosa-Peptona + 5 % + 24 h
T11	A0B2C2	Glucosa-Peptona + 5 % + 48 h
T12	A0B2C3	Glucosa-Peptona + 5 % + 72 h
T13	A0B3C0	Glucosa-Peptona + 7 % + 0 h
T14	A0B3C1	Glucosa-Peptona + 7 % + 24 h
T15	A0B3C2	Glucosa-Peptona + 7 % + 48 h
T16	A0B3C3	Glucosa-Peptona + 7 % + 72 h
T17	A1B0C0	Fructosa-Peptona + 0,5 % + 0 h
T18	A1B0C1	Fructosa-Peptona + 0,5 % + 24 h
T19	A1B0C2	Fructosa-Peptona + 0,5 % + 48 h
T20	A1B0C3	Fructosa-Peptona + 0,5 % + 72 h
T21	A1B1C0	Fructosa-Peptona + 2 % + 0 h
T22	A1B1C1	Fructosa-Peptona + 2 % + 24 h
T23	A1B1C2	Fructosa-Peptona + 2 % + 48 h
T24	A1B1C3	Fructosa-Peptona + 2 % + 72 h
T25	A1B2C0	Fructosa-Peptona + 5 % + 0 h
T26	A1B2C1	Fructosa-Peptona + 5 % + 24 h
T27	A1B2C2	Fructosa-Peptona + 5 % + 48 h
T28	A1B2C3	Fructosa-Peptona + 5 % + 72 h
T29	A1B3C0	Fructosa-Peptona + 7 % + 0 h
T30	A1B3C1	Fructosa-Peptona + 7 % + 24 h
T31	A1B3C2	Fructosa-Peptona + 7 % + 48 h
T32	A1B3C3	Fructosa-Peptona + 7 % + 72 h

2.8. Ensayos de actividad antimicrobiana de las bacteriocinas

Para evaluar la actividad antimicrobiana, se utilizó el método de difusión en pozos. Se preparó previamente una solución salina que contenía tres microorganismos patógenos (*Staphylococcus aureus*, *Lysinibacillus macroides* y *Bacillus cereus*), los cuales fueron proporcionados por el laboratorio de microbiología de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Santo Domingo. Estos microorganismos fueron aislados en dicho laboratorio y posteriormente enviados para su procesamiento molecular, sin certificación por colecciones oficiales como ATCC o DSMZ.

El inóculo de cada patógeno se aplicó en cajas Petri que contenían el medio de cultivo Muller Hinton Agar mediante el método de estría. A continuación, se aplicó el método de difusión en pozos de agar, donde se realizaron perforaciones en el agar utilizando un sacabocados y se depositaron 15 µL de bacteriocina en cada pozo. Finalmente, las placas se incubaron a 37 °C siendo la temperatura óptima para cada microorganismo patógeno, y se midieron los halos de inhibición (en milímetros).

3. RESULTADOS

3.1. Caracterización de acuerdo con las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas de la bebida tradicional fermentada “chicha de chontaduro”

La caracterización de las propiedades fisicoquímicas (Tabla 2) y microbiológicas (Tabla 3) obtenida de la bebida fermentada estudiada. Obteniendo un numero incontable en la identificación de BAL de manera general.

3.2. Aislamiento e identificación de las bacterias productoras de bacteriocinas

Los resultados de las pruebas bioquímicas (Tabla 4) confirmaron que la colonia 1 pertenece a un género de bacterias ácido-lácticas (BAL), ya que la tinción Gram resultó positiva, y las pruebas de catalasa y oxidasa fueron negativas. La morfología observada bajo el microscopio óptico a 100x reveló la presencia de bacilos. Aunque no se identificó la especie exacta, estas características coinciden con géneros comunes de BAL como *Lactobacillus*, *Pediococcus* o *Leuconostoc*, los cuales son típicos en procesos de fermentación. Sería necesario un análisis molecular adicional, como secuenciación de ADN, para confirmar el género específico.

3.3. Crecimiento bacteriano en los sistemas de fermentación

Se evaluó el crecimiento de la colonia 1 en sistemas de fermentación a lo largo del tiempo, utilizando la absorbancia como un indicador de la densidad celular. En la Figura 1, se presenta la variación de la absorbancia a diferentes intervalos de tiempo (0, 24, 48 y 72 horas). La absorbancia se determinó mediante un espectrofotómetro Shimadzu UV-1280, midiendo la densidad óptica a 550 nm. Este parámetro está directamente relacionado con la concentración de células en suspensión, ya que a medida que las bacterias se multiplican, la turbidez de la solución aumenta, reflejando un incremento en la absorbancia.

El análisis mostró una correlación significativa entre el tiempo y la absorbancia, con un coeficiente de 0,97028, lo que indica un crecimiento exponencial durante las primeras fases de la fermentación. Esta medición es clave para monitorear el desarrollo del cultivo bacteriano y evaluar su actividad metabólica, ya que un aumento en la absorbancia sugiere un incremento en la biomasa bacteriana, lo que es esencial para comprender la eficacia del sistema de fermentación.

Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas de la chicha de chontaduro.

Acidez % (p/v)	pH	Densidad	°Alcohólicos	°Brix
0,23 g/L	4,5	1,00 g/mL	<5°	3

Tabla 3. Propiedades microbiológicas de la chicha de chontaduro.

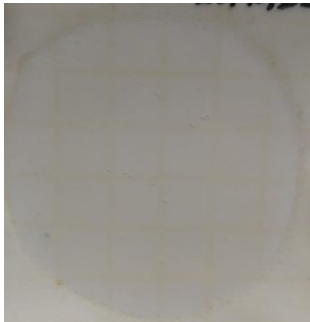
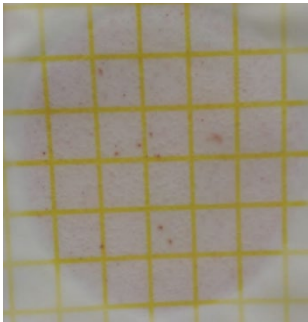
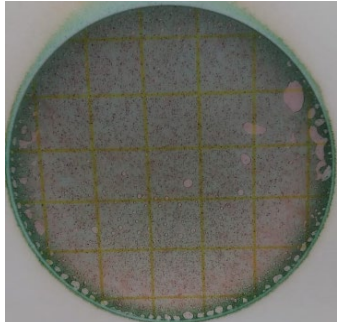
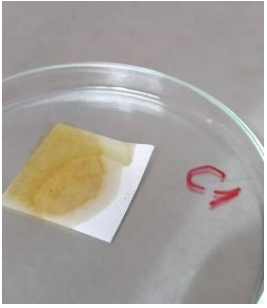
Mohos y levaduras	Aerobios	Bacterias ácido lácticas
		
1E+4 UFC/mL	2,17E+6 UFC/mL	3E+6 UFC/mL

Tabla 4. Colonia 1 pruebas bioquímicas.

Colonia	Tinción Gram	Catalasa	Oxidasa
			
Colonia 1	(+)	Negativo	Negativo

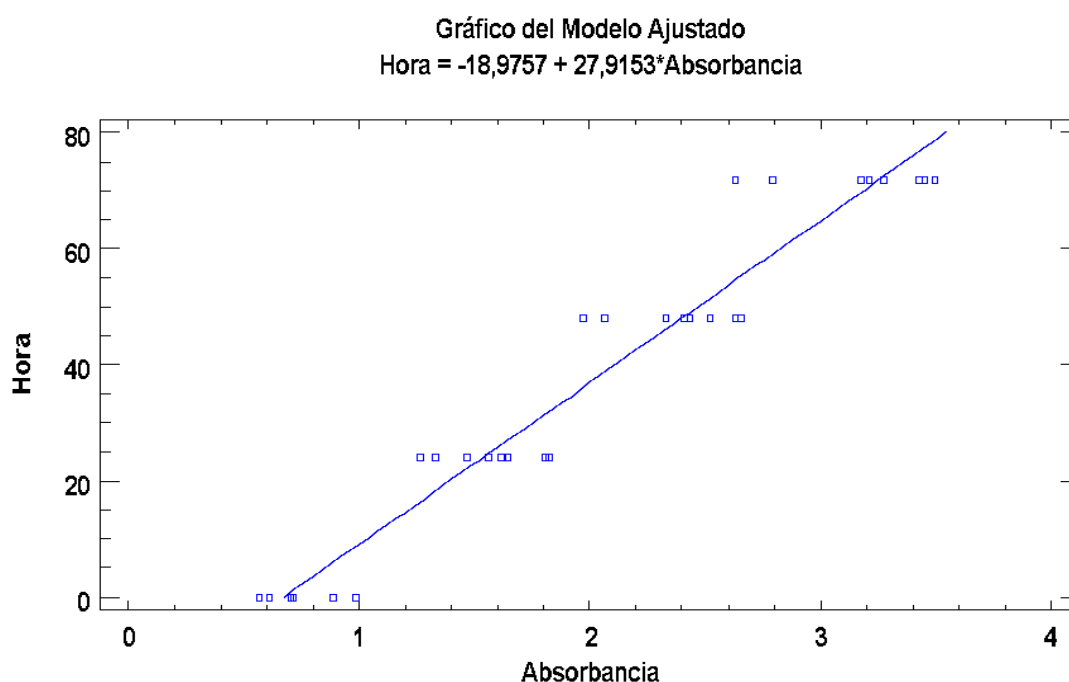


Figura 1. Regresión Simple: Hora vs. Absorbancia.

3.4. Prueba de significación de Tukey ($p < 0,05$) para la variable pH para mayor producción de bacteriocinas

Se observó una variación significativa en los valores de pH a lo largo de los diferentes tiempos de fermentación y concentraciones de sustrato como se evidencia en la Figura 2. El mayor valor de pH se registró en el tratamiento con Fructosa-Peptona al 0,5 % y 0 horas, alcanzando un valor de 6,21, lo que indica que este sistema mantuvo una baja acidez en las primeras etapas del proceso. En contraste, el valor más bajo de pH se obtuvo en el tratamiento con Fructosa-Peptona al 7 % y 72 horas, con un valor de 3,53, lo que sugiere que a concentraciones más altas de fructosa y tras tiempos prolongados de fermentación, se genera una mayor producción de ácidos, lo que provoca una disminución del pH. Esta tendencia podría estar asociada al aumento en la producción de compuestos ácidos como parte del metabolismo bacteriano en el sistema de fermentación.

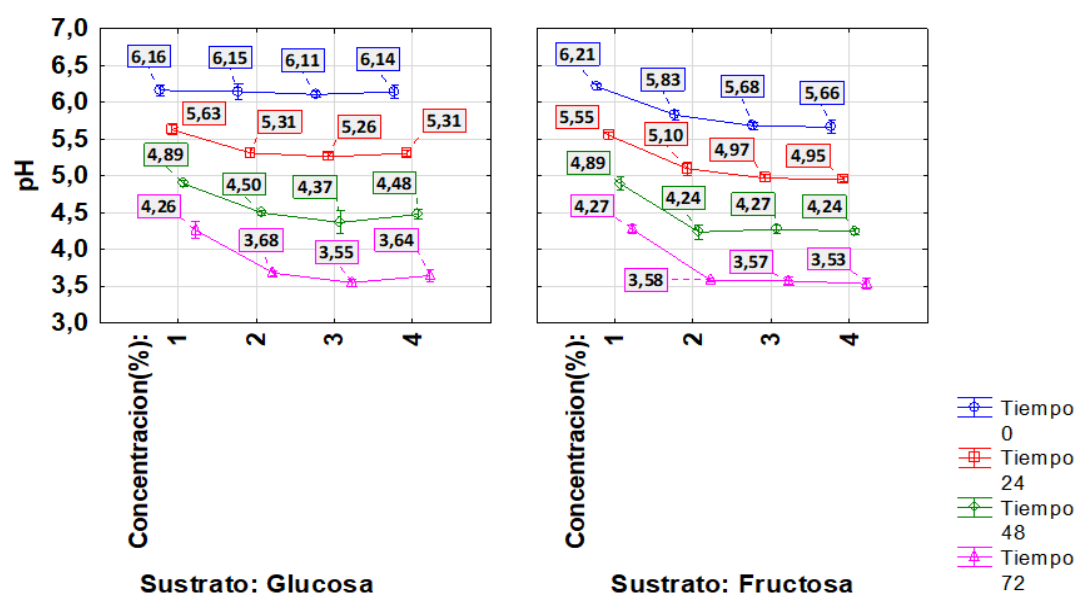


Figura 2. Prueba de significación de Tukey para pH (Interacción ABC: Tipo de sustrato*concentración del sustrato*tiempo).

3.5. Prueba de significación de Tukey ($p < 0,05$) para la variable acidez para mayor producción de bacteriocinas

En la variable de acidez (g/L), se observó un comportamiento acorde con los cambios de pH, donde los tratamientos con mayor concentración de sustrato y tiempos de fermentación prolongados resultaron en mayores valores de acidez como se observa en la Figura 3. El mayor valor de acidez fue registrado para el tratamiento con Fructosa-Peptona al 7 % y 72 horas, alcanzando 0,30 unidades de acidez. Este resultado sugiere una correlación directa entre el tiempo de incubación y la producción de ácidos en este sistema. Por otro lado, el valor más bajo de acidez se obtuvo para el tratamiento con Glucosa-Peptona al 5 % y 0 horas, con un valor de 0,02 unidades, lo que es coherente con un proceso de fermentación recién iniciado donde aún no se ha producido una cantidad significativa de ácidos.

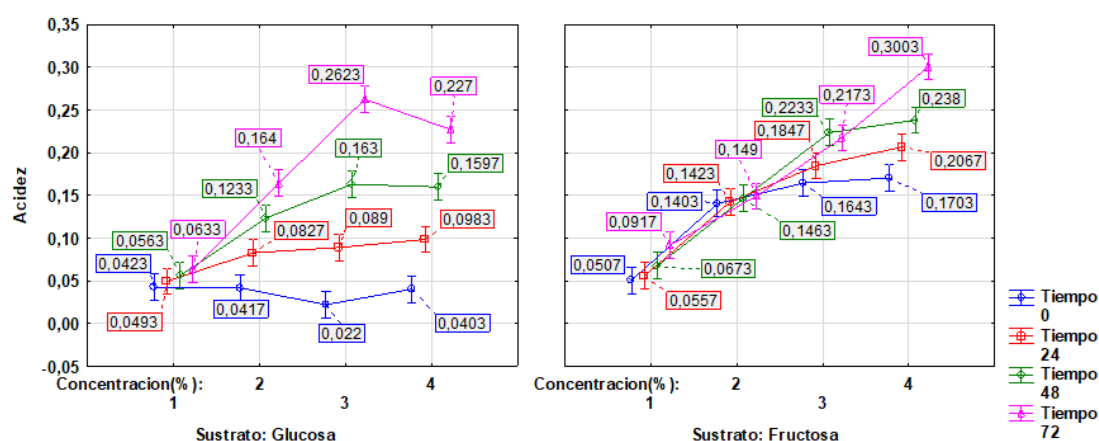


Figura 3. Prueba de significación de Tukey para acidez (Interacción ABC: Tipo de sustrato*concentración del sustrato*tiempo).

3.6. Prueba de significación de Tukey ($p<0,05$) para la variable absorbancia para mayor producción de bacteriocinas

La absorbancia, medida como un indicador de crecimiento celular y turbidez del medio, mostró valores más altos conforme aumentaban la concentración del sustrato y el tiempo de fermentación como se presenta en la Figura 4. En los tratamientos con fructosa, se observó que el valor máximo de absorbancia fue 3,49, registrado para Fructosa-Peptona al 7 % y 72 horas, lo que indica un mayor crecimiento bacteriano en este sistema. En contraste, el valor más bajo de absorbancia fue de 0,565 para el tratamiento con Glucosa-Peptona al 0,5 % y 0 horas, lo que refleja un crecimiento bacteriano limitado al inicio de la fermentación. La fructosa parece favorecer una mayor proliferación bacteriana en comparación con la glucosa, lo que podría estar relacionado con la capacidad de la bacteria para metabolizar este sustrato de manera más eficiente bajo las condiciones experimentales.

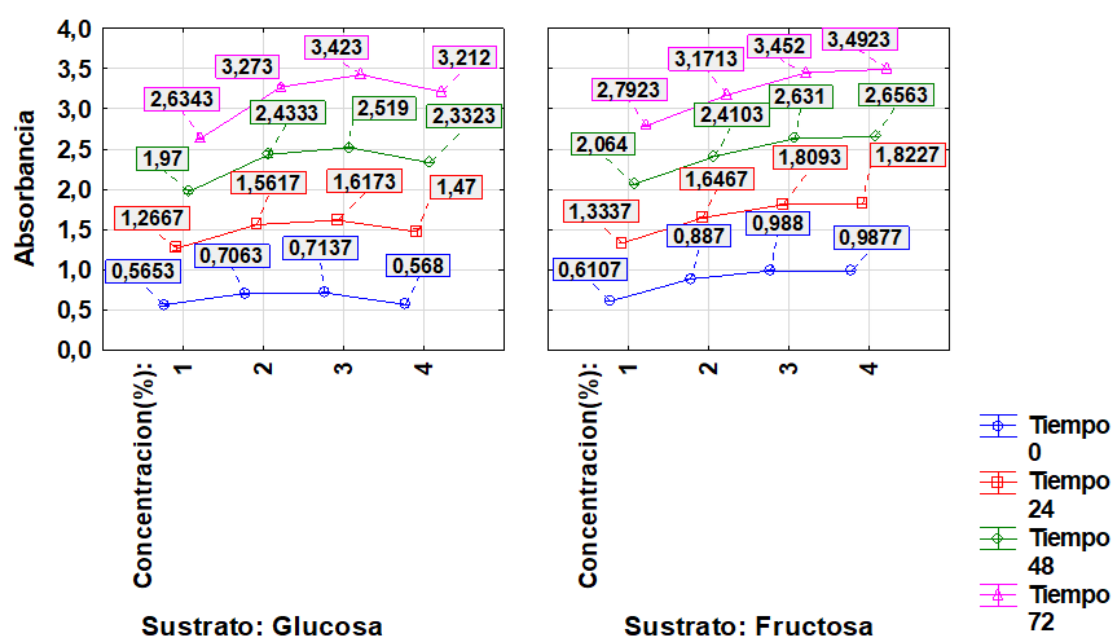


Figura 4. Prueba de significación de Tukey para absorbancia (Interacción ABC: Tipo de sustrato*concentración del sustrato*tiempo).

3.7. Prueba de significación de Tukey ($p<0,05$) para la variable grados brix

Los grados Brix, una medida de la cantidad de sólidos disueltos (principalmente azúcares), presentaron una tendencia creciente con el tiempo y la concentración de sustrato, lo cual se detalla en la Figura 5. El valor más alto de Brix, 10,30, se obtuvo en los tratamientos de Fructosa-Peptona al 7 % y Glucosa-Peptona al 7 % a 0 horas. Esto indica que, al inicio de la fermentación, ambos sustratos presentaban una alta concentración de azúcares disponibles. A medida que avanzaba el tiempo de fermentación, los grados Brix disminuyeron debido al consumo de azúcares por parte de las bacterias. El valor más bajo fue 2,53, observado en Fructosa-Peptona al 0,5 % y 72 horas, lo que sugiere que una mayor duración de la fermentación y concentraciones bajas de sustrato llevan a una mayor utilización de los azúcares por las bacterias.

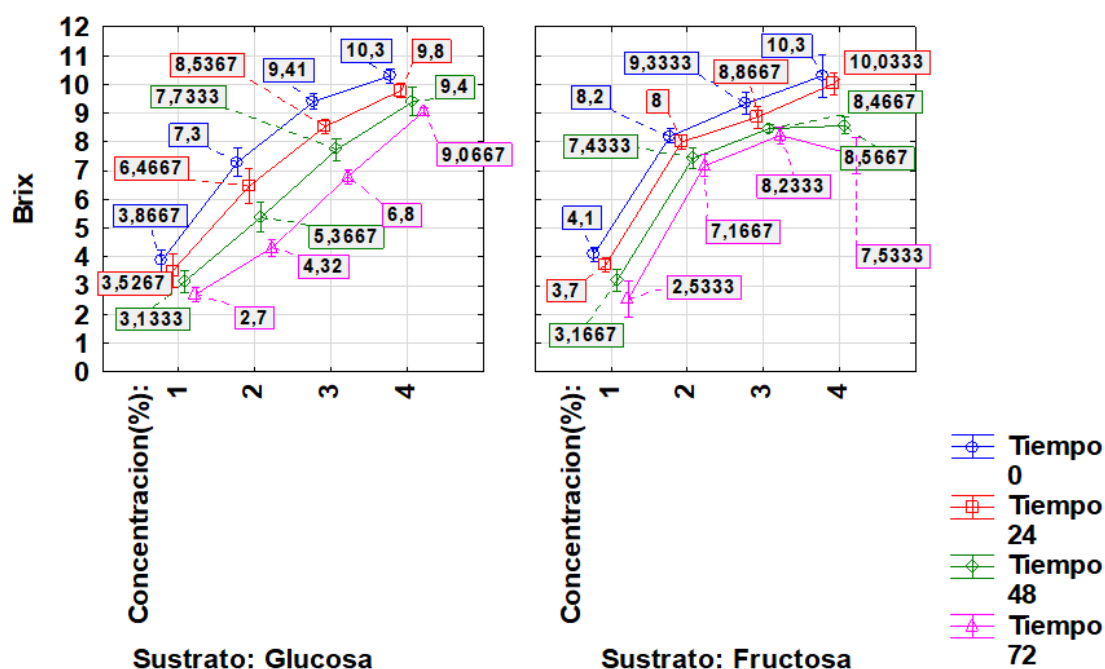


Figura 5. Prueba de significación de Tukey para grados brix (Interacción ABC: Tipo de sustrato*concentración del sustrato*tiempo).

3.8. Análisis de conglomerados

En la Figura 6 se observa el dendograma mediante un clúster jerárquico que muestra similitudes entre los tratamientos de estudio. Se obtuvo mayor relación entre los tratamientos Fructosa-peptona + 0,5 % + 72 horas, Fructosa-peptona + 5 % + 48 horas, Glucosa-peptona + 0,5 % + 72 horas, Fructosa-peptona + 2 % + 48 horas, Fructosa-peptona + 7 % + 48 horas, Glucosa-peptona + 5 % + 48 horas, Glucosa-peptona + 2 % + 48 horas y Glucosa-peptona + 7 % + 48 horas. Por otra parte, los tratamientos que tienen menor proximidad de los demás tratamientos son Fructosa-peptona + 2 % + 72 horas, Fructosa-peptona + 5 % + 72 horas, Fructosa-peptona + 7 % + 72 horas, Glucosa-peptona + 5 % + 72 horas, Glucosa-peptona + 2 % + 72 horas y Glucosa-peptona + 7 % + 72 horas.

El análisis de conglomerados jerárquicos mostró que los tratamientos con tiempos de incubación más largos (72 horas) tienden a agruparse de manera independiente de los tratamientos con tiempos más cortos, lo cual sugiere que la duración de la incubación tiene un efecto significativo en las características que diferencian a los grupos. Específicamente, los tratamientos con 72 horas de incubación con fructosa y glucosa-peptona a diferentes concentraciones presentaron menor proximidad con los tratamientos de 48 horas, lo que indica posibles variaciones en la actividad bacteriana o la producción de bacteriocinas en esos periodos.

Por otro lado, los tratamientos con tiempos de incubación de 48 horas presentan mayor similitud entre ellos, agrupándose independientemente de las variaciones en la concentración de glucosa o fructosa. Esto sugiere que el tiempo de incubación es un factor determinante en la diferenciación de los tratamientos, más allá de la concentración de los sustratos.

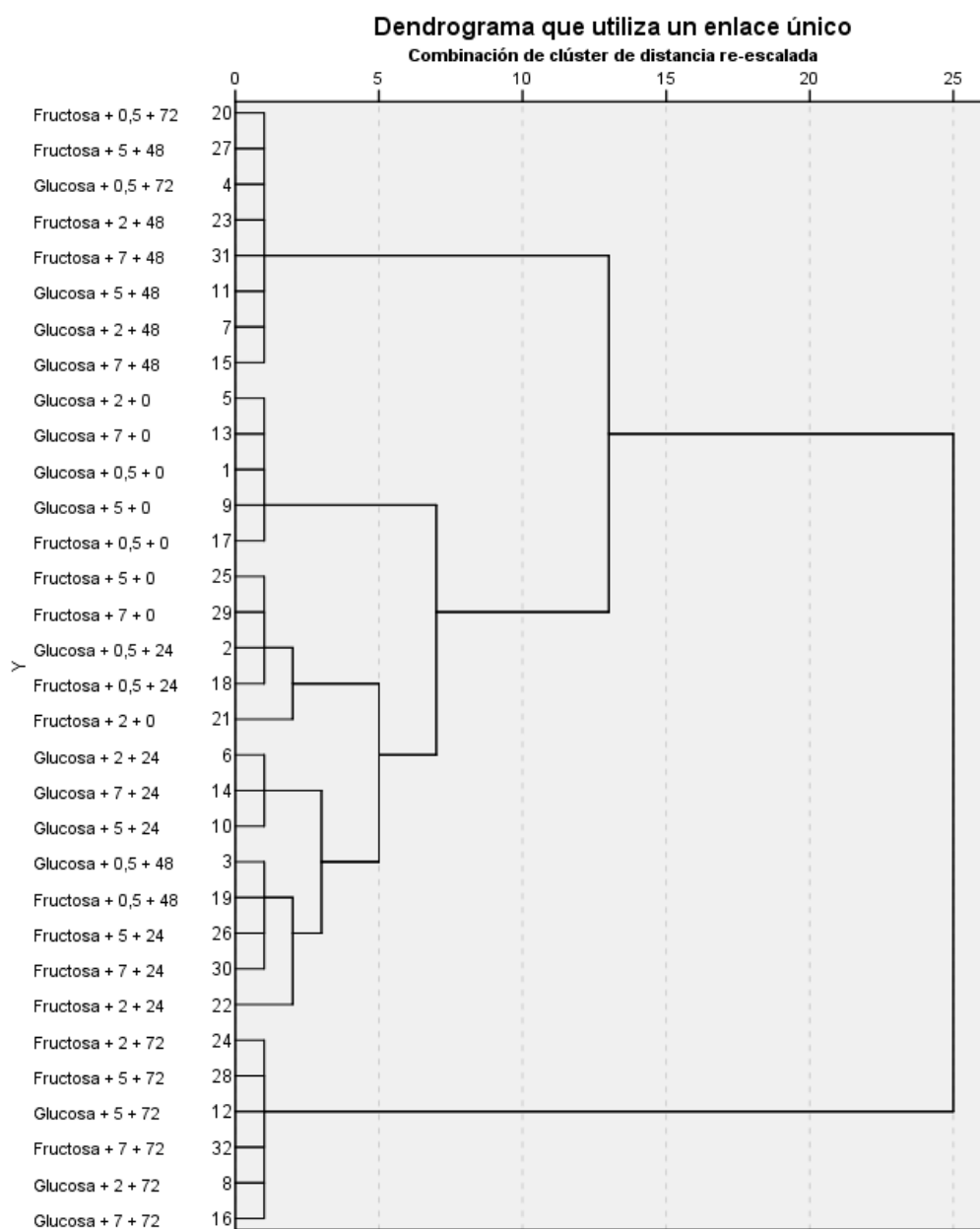


Figura 6. Dendrograma de los tratamientos en estudio.

3.9. Análisis de componentes principales

La Figura 7 presenta los resultados del análisis de los cuatro componentes evaluados durante el sistema de fermentación. De acuerdo con el gráfico de sedimentación, se seleccionaron dos componentes principales, ya que son los que explican la mayor parte de la varianza en los datos, y tienen valores de varianza mayores a 1, según el criterio de Kaiser.

La Figura 8 muestra las correlaciones entre las variables brix, pH, acidez y absorbancia en un espacio tridimensional utilizando el análisis de componentes principales (PCA). Se observa una relación inversa entre el pH y la absorbancia, así como entre el pH y la acidez, mientras que la acidez y la absorbancia muestran una leve relación directa. El primer componente (Componente 1) está fuertemente relacionado con el pH, que explica la mayor parte de la varianza en los datos, mientras que el segundo componente (Componente 2) está más asociado con las variables Brix y

acidez. Estos dos componentes principales fueron seleccionados porque capturan la mayoría de las relaciones relevantes entre las variables. La absorbancia, aunque tiene una relación inversa con el pH, se asocia en menor medida con el componente 3, que captura una fracción menor de la varianza.

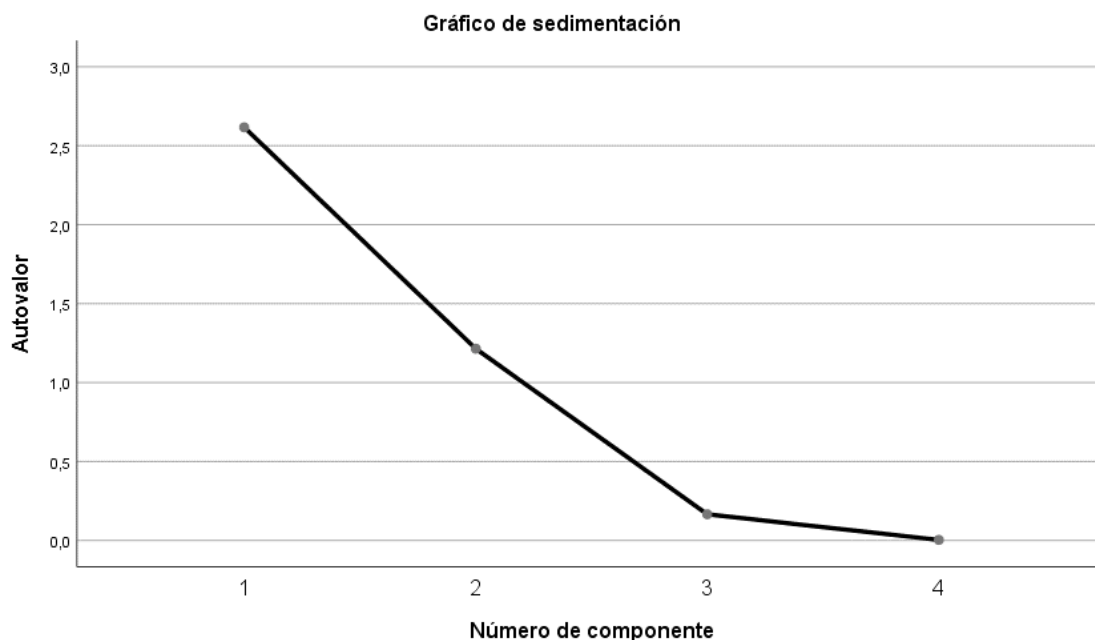


Figura 7. Gráfico de sedimentación del análisis de componentes principales.

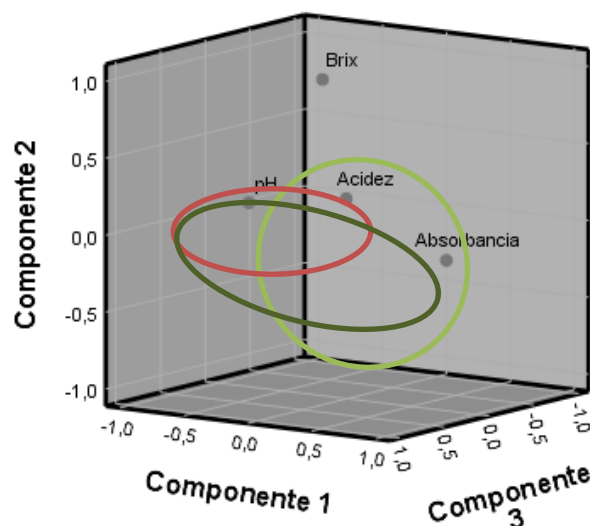


Figura 8. Gráfico de componentes principales.

3.10. Análisis de la actividad antimicrobiana de las bacteriocinas obtenidas del proceso de fermentación bacteriana

En la Tabla 5 se evidenció la actividad antimicrobiana mediante los halos de inhibición, alrededor de los pozos sobre cada bacteria patógena. La bacteriocina que se empleó fue de la mejor fermentación de cada sustrato en función de sus parámetros cinéticos microbianos.

Tabla 5. Unidades arbitrarias del mejor tratamiento de cada tipo de sustrato.

Tratamiento	<i>Lysinibacillus macroides</i> (AU/mL)	<i>Staphylococcus aureus</i> (AU/mL)	<i>Bacillus cereus</i> (AU/mL)
Glucosa-peptona + 5 % + 72 horas	263,9	214,3	229,7
Fructosa-peptona + 7 % + 72 horas	324,9	263	246,2

4. DISCUSIÓN

De acuerdo con la Norma Técnica NTE INEN 2262:2013 [27] para bebidas alcohólicas, el pH debe estar entre 3,8 y 4,8, y la acidez no debe superar 0,3. La bebida estudiada cumple con estos parámetros. Respecto a los grados Brix, el valor obtenido es 3, lo que indica un bajo contenido alcohólico a las 72 horas de fermentación. Para lograr un mayor grado alcohólico, los grados Brix deberían estar entre 5 y 22, ya que una mayor concentración de azúcar facilita la fermentación alcohólica y, por ende, aumenta el porcentaje de alcohol en la bebida tradicional [28]. Estudios recientes sugieren que la concentración de azúcares en el sustrato está estrechamente relacionada con la eficiencia de la fermentación y la producción de alcohol. Estos estudios sugieren que, al controlar el tipo y la cantidad de azúcares disponibles, es posible manipular las características finales del producto fermentado, tal como el contenido de alcohol y las propiedades sensoriales [29].

En cuanto a la caracterización microbiológica de la bebida fermentada, se obtuvo un nivel muy inferior de Mohos y levaduras: $1\text{E}+4$ UFC/mL demostrando que el consumo de la bebida fermentada es seguro. Además, se registró un valor incontable de colonias en el petrifilm de ácido láctico: $3\text{E}+6$ UFC/mL asegurando la presencia de bacterias lácticas en la bebida tradicional. Estos resultados subrayan la importancia de las bacterias ácido-lácticas (BAL), no sólo por su papel en la producción de metabolitos como el ácido láctico, sino también por su capacidad para inhibir microorganismos patógenos, lo que contribuye tanto a la seguridad alimentaria como a la estabilidad de los productos fermentados [30].

La bacteria seleccionada (colonia 1) fue identificada como una bacteria ácido-láctica mediante pruebas bioquímicas y análisis microscópico, cumpliendo con las características descritas por Khalid [31]. Los ensayos revelaron resultados negativos para catalasa y oxidasa, y se observó su capacidad de crecer en un ambiente ácido, con un rango de pH entre 4 y 4,5. Las BAL presentaron una morfología consistente, observándose cocos, cocobacilos y bacilos Gram positivos no esporulados [32]. En un estudio de productos fermentados tradicionales ecuatorianos, incluida la chicha, se aislaron 114 cepas bacterianas, predominando el género *Lactobacillus* ($n=68$), seguido de *Enterococcus* ($n=15$), *Pediococcus* ($n=13$), *Lactobacillus* ($n=10$), *Leuconostoc* ($n=7$) y *Weissella* ($n=6$). Es importante destacar que el género *Leuconostoc* fue aislado principalmente de bebidas fermentadas a base de maíz, yuca y chonta [33]. Con base en estos resultados, se concluye que la bacteria aislada pertenece al grupo de BAL.

Las bacterias ácido-lácticas (BAL) son comúnmente empleadas para la producción de bacteriocinas debido a su capacidad antimicrobiana, que permite inhibir o eliminar bacterias patógenas de especies similares [34]. Esta propiedad es crucial en la industria alimentaria para prevenir la degradación de alimentos por microorganismos patógenos, según lo indicado por [35], [36]. Estudios recientes corroboran que las BAL no solo son productoras eficientes de bacteriocinas, sino que también han demostrado su capacidad probiótica, lo que amplía su aplicación en la industria alimentaria, al mejorar la salud del consumidor y la preservación de los alimentos [29], [30].

La actividad antimicrobiana (halos de inhibición) de la cepa bacteriana fue mayor en el tratamiento Fructosa-peptona + 5 % + 72 horas para las tres bacterias patógenas (*Staphylococcus aureus*, *Bacillus cereus* y *Lysinibacillus macroides*), correlacionando con el crecimiento bacteriano, que fue el más significativo. Investigaciones señalan que la producción de bacteriocinas puede ser optimizada mediante la selección adecuada del sustrato y las condiciones de fermentación, lo que permite un mayor control sobre la actividad antimicrobiana en la industria alimentaria [29], [30].

Para las interacciones del factor A (Tipo de sustrato), B (Concentración del sustrato) y C (Tiempo), en [37] la composición del medio de cultivo, como el tipo de sustrato y las concentraciones de las fuentes de nitrógeno (Peptona) y carbono (Glucosa y Fructosa) tienen un efecto clave en la producción de bacteriocinas. Investigaciones como la de Riley & Wertz [38] también apoyan que la variación en la fuente de carbono puede influir drásticamente en la capacidad de las BAL para sintetizar bacteriocinas, y esto coincide con la observación de que las diferencias significativas en el pH corresponden a tratamientos con glucosa y fructosa. Recientemente, se ha comprobado que las diferencias en la concentración de sustratos influyen de manera directa no solo en la producción de bacteriocinas, sino también en la viabilidad de las BAL durante la fermentación prolongada, lo que refuerza la necesidad de optimizar estas condiciones para maximizar los beneficios industriales [30].

Existieron diferencias significativas en el pH, con menor pH se tiene a los tratamientos Glucosa-peptona + 5 % + 72 horas (3,55) y Fructosa-peptona + 7 % + 72 horas (3,53), esto se debe a que la cepa bacteriana prefiere fructosa en su mayor concentración, al término de 72 horas aún sigue creciendo lo cual produce que su pH disminuye. Esto está en línea con investigaciones recientes que demuestran que el crecimiento prolongado de LAB bajo condiciones ácidas promueve la acidificación del medio debido a la acumulación de ácidos orgánicos [29]. Teniendo una relación inversa entre la absorbancia y el pH. Esta relación inversa entre la absorbancia y el pH es consistente con estudios como el de Papagianni [39], que exploran la relación entre la disminución del pH y el crecimiento bacteriano en fermentaciones con bacterias ácido lácticas. En cambio, se obtuvo un mayor valor de pH en el grupo Fructosa-Peptona + 0,5 % + 0 horas (6,21) evidenciando que la bacteria prefiere un medio más suplementado, además este valor se dio debido a que la bacteria aún estaba en un proceso de adaptación.

Para la acidez, se observa diferencia significativa en los resultados, teniendo como mayor producción al grupo Fructosa-peptona + 7 % + 72 horas (0,30), indicando que la bacteria produce mayor acidez a través del tiempo, y que a mayor concentración del sustrato fructosa, se tendrá mayor producción de acidez, hasta llegar a una etapa de muerte provocada por el estrés osmótico autoacidificándose, reportado en estudios previos por [35], [40], [41], [42].

En cuanto a la absorbancia, se muestra diferencia significativa, teniendo en cuenta que la cepa bacteriana creció más en el tratamiento Fructosa-peptona + 7 % + 72 horas (3,49), lo cual demostró que el crecimiento bacteriano está correlacionado con la acidez. Sin embargo, el pH con la absorbancia contiene una relación muy estrecha e inversamente proporcional. Este patrón ha sido confirmado en investigaciones más recientes, que muestran cómo la disminución del pH coincide con un aumento en la densidad celular, lo que refleja una mayor actividad metabólica de las LAB en medios de fructosa [38], [39]. Los grados Brix concuerdan teniendo al tratamiento de menor valor: Fructosa-peptona + 0,5 % + 72 horas (2,53 grados Brix), debido a que contiene la menor concentración y que la bacteria consume los nutrientes en el mayor rango de tiempo estudiado.

5. CONCLUSIONES

El tratamiento de fermentación con Fructosa-Peptona al 7 % durante 72 horas demostró ser el más eficaz en términos de producción de bacteriocinas y eficiencia general del proceso

fermentativo. Los parámetros cinéticos obtenidos bajo estas condiciones fueron pH de 3,53, acidez de 0,30, absorbancia de 3,49 y grados Brix de 7,53, evidenciando una fermentación eficiente con alta producción de bacteriocinas.

El crecimiento bacteriano, especialmente de las bacterias ácido lácticas (BAL), está íntimamente relacionado con la composición del medio de cultivo, la concentración de sustrato, el pH, y la producción de acidez. En nuestro estudio, se observó una correlación inversa entre el pH y la absorbancia, indicando que la disminución del pH a medida que avanza la fermentación está asociada con un aumento en la turbidez del medio, lo que refleja un crecimiento bacteriano robusto. Asimismo, la correlación directa entre acidez y absorbancia sugiere que un mayor crecimiento bacteriano está vinculado con una mayor producción de ácidos orgánicos.

La concentración de nitrógeno y carbono en el medio de cultivo juega un papel crucial en la optimización del crecimiento bacteriano y la producción de bacteriocinas. En particular, la mayor concentración de fructosa favorece una mayor producción de bacteriocinas y una mayor acidez, destacando la importancia de ajustar las concentraciones de sustrato para maximizar los beneficios del proceso fermentativo.

Sin embargo, es importante señalar que en este estudio no se evaluaron factores adicionales como la temperatura y la presencia de inhibidores, los cuales podrían haber influido en la fermentación y en la producción de bacteriocinas. La temperatura puede afectar significativamente la actividad metabólica de las BAL, y la presencia de inhibidores puede alterar la eficiencia del proceso fermentativo y la producción de bacteriocinas. En investigaciones futuras, se recomienda incluir estos factores para obtener una comprensión más completa del proceso de fermentación y de las condiciones óptimas para la producción de bacteriocinas.

REFERENCIAS

- [1] G. Velázquez-Sámano, R. Collado-Chagoya, R. A. Cruz-Pantoja, A. A. Velasco-Medina y J. Rosales-Guevara, “Reacciones de hipersensibilidad a aditivos alimentarios”, *Revista Alergia México*, vol. 66, no. 3, pp. 329-339, jun. 2019. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.29262/ram.v66i3.613>
- [2] J.A. Carbajal-Sánchez y P.A. Moreno-Pérez, “Aditivos alimentarios adicionados en alimentos envasados o enlatados en México ¿información confiable?”, *Revista Española de Nutrición Humana y Dietética*, vol. 27, no. 1, pp. 51-62, feb. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.14306/renhyd.27.1.1768%20>
- [3] *Norma general del codex para los aditivos alimentarios. revisión 1997, 1999, 2001, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2021, 2023*, Codex STAN 192-1995, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Organización Mundial de la Salud (OMS), Roma (Italia), 1995. [En línea]. Disponible en: <https://n9.cl/8uwz2>
- [4] *Instructivo Externo. Criterios técnicos para la categorización del riesgo sanitario de alimentos procesados. Versión [6.0]*, Agencia Nacional de Regulación, Control y Vigilancia Sanitaria (ARCSA), Ecuador, 2023. [En línea]. Disponible: <https://lc.cx/sfFoRF>
- [5] M. Afshar, S.A. Moallem, J. Khayatzaheh, and M.Shahsavan, “Teratogenic effects of long term consumption of potassium benzoate on eye development in BALB/c fetal mice”, *Iranian journal of basic medical sciences*, vol. 16, no. 4, pp. 584-589, apr. 2013. [Online]. Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24250932/>
- [6] N. Zengin, D. Yüzbaşıoğlu, F. Ünal, S. Yılmaz, and H. Aksoy, “The evaluation of the genotoxicity of two food preservatives: Sodium benzoate and potassium benzoate”, *Food*

Chemical Toxicology, vol. 49, no. 4, pp. 763–769, apr. 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.fct.2010.11.040>

- [7] H. J. Tsay, Y. H. Wang, W. L. Chen, M. Y. Huang, and Y. H. Chen, “Treatment with sodium benzoate leads to malformation of zebrafish larvae”, *Neurotoxicology and Teratology*, vol. 29, no. 5, pp. 562–569, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ntt.2007.05.001>
- [8] I. S. Khan, K. B. Dar, S. A. Ganie, and M. N. Ali, “Toxicological impact of sodium benzoate on inflammatory cytokines, oxidative stress and biochemical markers in male Wistar rats”, *Drug and chemical toxicology*, vol. 45, no. 3, pp. 1345–1354, oct. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/01480545.2020.1825472>
- [9] L. Hrnčirova, et al. “Human gut microbes are susceptible to antimicrobial food additives in vitro”, *Folia Microbiol*, vol. 64, no. 4, pp. 497–508, jan. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s12223-018-00674-z>
- [10] S. Mamur, D. Yüzbaşıoğlu, F. Ünal, and H. Aksoy, “Genotoxicity of food preservative sodium sorbate in human lymphocytes in vitro”, *Cytotechnology*, vol. 64, no. 5, pp. 553–562, feb. 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10616-012-9434-5>
- [11] M. Liu, J. Lu, J. Hu, Y. Chen, X. Deng, J. Wang, S. Zhang, J. Guo, W. Li, and S. Guan, “Sodium sulfite triggered hepatic apoptosis, necroptosis, and pyroptosis by inducing mitochondrial damage in mice and AML-12 cells”, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 467, pp. 133719, apr. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133719>
- [12] M. Padovano, M. Aromatario, S. D’Errico, M. Concato, F. Manetti, M. Chiara David, M. Scopetti, P. Frati, and V. Fineschi, “Sodium Nitrite Intoxication and Death: Summarizing Evidence to Facilitate Diagnosis”, *International journal of environmental research and public health*, vol. 19, no. 21, pp. 13996, oct. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/ijerph192113996>
- [13] N. S. Terefe, “*Food fermentation*”. Elsevier eBooks, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100596-5.03420-x>
- [14] S.M. Vásquez, H. Suárez y S. Zapata, “Utilización de sustancias antimicrobianas producidas por bacterias ácido lácticas en la conservación de la carne”, *Revista chilena de nutrición*, vol. 36, no. 1, pp. 64-71, mar. 2009. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.4067/s0717-75182009000100007>
- [15] J. Zheng, M. G. Gänzle, X. B. Lin, L. Ruan, and M. Sun, “Diversity and dynamics of bacteriocins from human microbiome”, *Environmental Microbiol*, vol. 17, no. 6, pp. 2133–2143, oct. 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/1462-2920.12662>
- [16] T. K. Sahoo, P. K. Jena, A. K. Patel, and S. Seshadri, “Purification and Molecular Characterization of the Novel Highly Potent Bacteriocin TSU4 Produced by *Lactobacillus animalis* TSU4”, *Applied Biochemistry and Biotechnology*, vol. 177, no. 1, pp. 90–104, aug. 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s12010-015-1730-z>
- [17] S. Kaur y S. Kaur, “Bacteriocins as Potential Anticancer Agents”, *Frontiers Pharmacol*, vol. 6, nov. 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3389/fphar.2015.00272>
- [18] G. Preciado, M. Michel, S.L. Villarreal-Morales, A.C. Flores-Gallegos, J. Aguirre-Joya, J. Morlett-Chavez, C.N. Aguilar, and R. Rodriguez-Herrera “Bacteriocins and Its Use for Multidrug-Resistant Bacteria Control”, *Antibiotic Resistancet*, pp. 329–349, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803642-6.00016-2>

- [19] P. Mak, “Chapter 13 - Staphylococcal Bacteriocins”, en *Pet-To-Man Travelling Staphylococci*, Academic Press, 2018, pp. 161–171. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813547-1.00013-3>
- [20] F. Gaggia, D. Di Gioia, L. Baffoni, and B. Biavati, “The role of protective and probiotic cultures in food and feed and their impact in food safety”, *Trends in Food Science & Technology*, vol. 22, pp. S58–S66, nov. 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2011.03.003>
- [21] A. Darbandi, A. Asadi, M. Mahdizade Ari, E. Ohadi, M. Talebi, M. Halaj Zadeh, A. Darb Emamie, R. Ghanavati y M. Kakanj, “Bacteriocins: Properties and potential use as antimicrobials”, *Journal of Clinical Laboratory Analysis*, vol. 36, no. 1, 2021. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1002/jcla.24093>
- [22] M. Hassan, M. Kjos, I. F. Nes, D. B. Diep y F. Lotfipour, “Natural antimicrobial peptides from bacteria: characteristics and potential applications to fight against antibiotic resistance”, *Journal of Applied Microbiology*, vol. 113, no. 4, pp. 723–736, oct. 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2012.05338.x>
- [23] P. D. Cotter, C. Hill, and R. P. Ross, “Bacteriocins: developing innate immunity for food”, *Nature Reviews Microbiology*, vol. 3, no. 10, pp. 777–788, oct, 2005. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/nrmicro1273>
- [24] R. Kumariya, A. K. Garsa, Y. S. Rajput, S. K. Sood, N. Akhtar, and S. Patel, “Bacteriocins: Classification, synthesis, mechanism of action and resistance development in food spoilage causing bacteria”, *Microbial Pathogenesis*, vol. 128, pp. 171–177, mar. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2019.01.002>
- [25] C. Chaves-López, A. Serio, C. D. Grande-Tovar, R. A. C. Mulet, J. Delgado-Ospina, and A. Paparella, “Traditional fermented foods and beverages from a microbiological and nutritional perspective: the Colombian Heritage”, *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, vol. 13, no. 5, pp. 1031-1048, aug. 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12098>
- [26] F. Faria-Oliveira, et al. “The role of yeast and lactic acid bacteria in the production of fermented beverages in south america”, en *Food Production and Industry. InTech*, oct. 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5772/60877>
- [27] *Bebidas alcohólicas. Cerveza. Requisitos.*, NTE INEN 2 262:2003, Norma Técnica Ecuatoriana Obligatoria (NTE), 2003. [En línea]. Disponible en: <https://n9.cl/1ap1z>
- [28] V. Martín, B. Gallego y C. Pulido Lería, *Elaboración de vinos, otras bebidas alcohólicas, aguas, cafés e infusiones, HOTR0209 - sumillería*. IC Ed., 2021. [En línea]. Disponible en: <https://n9.cl/dkx5w>
- [29] C. Miramontes-Corona, A. Cetina-Corona, M. E. Macías-Rodríguez, A. Escalante, R. I. Corona-González, and G. Toriz, “Lactic acid bacterial fermentation of esterified agave fructans in simulated physicochemical colon conditions for local delivery of encapsulated drugs”, *Fermentation*, vol. 10, no. 478, sep. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/fermentation10090478>
- [30] Y. L. Aguirre-Garcia, et al. “Lactic acid fermentation in the food industry and bio-preservation of food”, *Fermentation*, vol. 10, no. 168, mar, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/fermentation10030168>.
- [31] K. Khalid, “An overview of lactic acid bacteria”, *International Journal of Biosciences*, 2021. [Online]. Available: <https://n9.cl/22zzop>

- [32] B. L. D. Monroy, A. E. Iglesias y E. Valiño, “Consortios microbianos con actividad ácido-láctica promisorios aislados desde inoculantes bacterianos nativos para ensilajes”, *Revista Ciencia y Agricultura*, vol. 11, no. 1, pp. 17–25, en. 2014. [En línea]. Disponible en: <https://n9.cl/ik55z>
- [33] L. Guamán, S. Zapata, M. Serrano, and G. A. Trueba P., “Characterization of lactic acid bacteria isolated from traditional Ecuadorian fermented foods”, *ACI Avances en ciencia e ingeniería*, vol. 6, no. 1, jun. 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.18272/aci.v6i1.155>
- [34] A. B. Snyder, and R. W. Worobo, “Chemical and genetic characterization of bacteriocins: antimicrobial peptides for food safety”, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 94, no. 1, pp. 28–44, aug. 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/jsfa.6293>
- [35] M. G. Gänzle, “Revisitando el metabolismo láctico: metabolismo de las bacterias del ácido láctico en las fermentaciones alimentarias y el deterioro de los alimentos”, *Current Opinion in Food Science*, vol. 2, pp. 106–117, apr. 2015. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2015.03.001>
- [36] J. Cleveland, T. J. Montville, I. F. Nes, and M. L. Chikindas, “Bacteriocins: safe, natural antimicrobials for food preservation”, *International Journal of Food Microbiology*, vol. 71, no. 1, pp. 1–20, dec. 2001. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(01\)00560-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(01)00560-8)
- [37] L. Alquicira, “Determinación del mecanismo de resistencia a la acción inhibitoria de la bacteriocina producida por *Pediococcus parvulus* MXVK 133”, Tesis de posgrado, Biotecnología, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, Ciudad de México, México, 2006. [En línea]. Disponible en: <https://bindani.izt.uam.mx/concern/tesiuams/q237hs18x?locale=es>
- [38] M. A. Riley, and J. E. Wertz, “Bacteriocin diversity: ecological and evolutionary perspectives”, *Biochimie*, vol. 84, no. 5–6, pp. 357–364, 2002. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0300-9084\(02\)01421-9](https://doi.org/10.1016/S0300-9084(02)01421-9)
- [39] M. Papagianni, “Food fermentation and production of biopreservatives”, in *Handbook of Animal-Based Fermented Food and Beverage Technology*, 2nd ed, pp. 109–124, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1201/b12084-8>
- [40] D. I. Serrazanetti, D. Gottardi, C. Montanari, and A. Gianotti, “Dynamic stresses of lactic acid bacteria associated to fermentation processes”, in *InTech eBooks*, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5772/51049>
- [41] K. Papadimitriou, A. Alegría, P. A. Bron, M. de Angelis, M. Gobbetti, M. Kleerebezem, J. A. Lemos, D. M. Linares, P. Ross, C. Stanton, F. Turroni, D. van Sinderen, P. Varmanen, M. Ventura, M. Zúñiga, E. Tsakalidou, and J. Kok, “Stress physiology of lactic acid bacteria”, *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, vol. 80, no. 3, pp. 837–890, july. 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1128/mmbr.00076-15>
- [42] V. Biscola, Y. Choiset, H. Rabesona, J. Chobert, T. Haertlé, and B. Franco, “Brazilian artisanal ripened cheeses as sources of proteolytic lactic acid bacteria capable of reducing cow milk allergy”, *Journal of Applied Microbiology*, vol. 125, pp. 564–574, aug. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/jam.13779>



Diseño y construcción de un prototipo de una máquina de laminadora de cera de abeja

(Design and Construction of a Prototype of a Beeswax Laminating Machine)

Líder Castillo Laban¹, Mario Yacchirema Lopez²,
Rodger Salazar Loo³

¹ Diseñador independiente

² Unidad Educativa Rosa Amada Espinoza, Ecuador

³ Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador

lider.castillo.laban@gmail.com, mario.yacchirema2016@uteq.edu.ec, rsalazarl@uteq.edu.ec

Resumen: Este trabajo aborda la necesidad de optimizar la producción de láminas estampadas de cera para la apicultura en la provincia de Bolívar, ciudad de Guaranda. Ante la limitación tecnológica y el alto costo de importación de maquinaria, se diseña y construye un prototipo de máquina de rodillos estampadores de cera de abeja que opera de manera semiautomática. El uso de software de ingeniería permitió simular el funcionamiento del prototipo para optimizar su rendimiento antes de su fabricación física. Como resultado, se logró un sistema que no solo mejora significativamente el proceso de estampado de cera, sino que también promete beneficios económicos para los apicultores locales, representando una innovación sustancial en la industria. Este prototipo se destaca por su eficiencia mejorada en la producción de láminas, así como por su diseño que contempla la portabilidad y facilidad de uso, configurándose como una solución práctica y económica frente a las alternativas importadas.

Palabras clave: apicultura, láminas, cera de abeja, alvéolos, mecanizado.

Abstract: This work addresses the need to optimize the production of stamped wax sheets for beekeeping in the province of Bolivar, Guaranda city. Given the technological limitations and the high cost of importing machinery, a prototype of a semi-automatic beeswax stamping roller machine was designed and built. The use of engineering software made it possible to simulate the operation of the prototype to optimize its performance before its physical fabrication. As a result, a system was achieved that not only significantly improves the wax stamping process, but also promises economic benefits for local beekeepers, representing a substantial innovation in the industry. This prototype stands out for its improved efficiency in the production of foils, as well as for its design, which contemplates the use of a new system for the production of wax.

Keywords: beekeeping, foils, beeswax, alveolus, machining.

1. INTRODUCCIÓN

En años recientes, la producción y comercialización de productos apícolas en Ecuador ha experimentado un notable crecimiento económico en áreas rurales, proporcionando ingresos y beneficios sociales significativos, especialmente para los agricultores que buscan diversificar sus actividades agropecuarias [1].

La apicultura es una actividad esencial que contribuye significativamente a la economía de varias regiones, incluida la provincia de Bolívar, ciudad de Guaranda [2]. Los apicultores, responsables de proveer y comercializar productos como la miel y la cera, enfrentan desafíos que

limitan su eficiencia y productividad [3]. La falta de tecnología adecuada para la fabricación de láminas de cera, esenciales en la producción de miel, persiste en el mercado actual, siendo crucial mejorar la eficiencia y calidad en el procesamiento de la cera para el éxito de la apicultura [4].

En Ecuador, la mayoría de las máquinas encargadas de esta actividad son importadas, lo que incrementa los costos y retrasa la producción. Además, la ausencia de estas láminas implica que las abejas deben construir un panal completo desde cero, lo que reduce la producción de miel [5].

El proceso de laminación de la cera se realiza mediante máquinas de rodillos, donde la cera en plancha se introduce entre dos rodillos que la comprimen y estampan el patrón del panal. Estas máquinas pueden ser accionadas manualmente o mediante energía eléctrica, y aseguran que la cera estampada avance sin riesgo de romper o alterar las delicadas estructuras [6].

Las estampadoras de láminas de cera de abeja se diseñan meticulosamente para optimizar eficiencia y precisión. El sistema de rodillos laminadores, adaptado a las propiedades de la cera y las necesidades de los apicultores, transforma la cera en láminas de 1 a 3 mm de espesor con geometría hexagonal [7]. Estas estructuras hexagonales reciben el nombre de alvéolos, y su tamaño varía según la región o el país, normalmente presentando diámetros que oscilan entre 5,1 y 5,5 mm y un espacio entre cada alveolo entre 0,5 y 0,8 mm [8].

Durante el proceso de laminación de la cera de abeja, es esencial comprender la distribución de esfuerzos para garantizar una formación uniforme y eficiente de la lámina. Una mayor fuerza de laminación incrementa el ángulo de presión y el coeficiente de fricción, permitiendo diseñar rodillos de menor diámetro para reducir la superficie de contacto con la cera [9].

Los componentes involucrados en el tratamiento de ceras están expuestos a alta humedad y temperatura constante, lo que acelera su oxidación y desgaste. Por ello, se utiliza acero inoxidable en su construcción debido a su resistencia a la oxidación y su idoneidad para la industria alimentaria [10].

2. TRABAJOS RELACIONADOS

En el trabajo de Tello [11] se ha presentado una iniciativa de diseño para una máquina laminadora de cera de abeja incorporando un sistema de calentamiento y refrigeración con el fin de optimizar el proceso artesanal de una empresa local colombiana. Adoptando prácticas implementadas por países líderes en apicultura, se apuntó a revolucionar la forma en que se produce y comercializa la cera de abeja en la región por parte de esa empresa.

Por otro lado, en la investigación de Guanín [12] se ha desarrollado un proceso de diseño para una máquina estampadora, evaluando las técnicas de laminación y compactación. Optó por la laminación debido a su precisión en el grabado, adaptabilidad a las necesidades del usuario y facilidad de uso, asegurando un proceso eficiente y optimizado para la producción de láminas de cera de abeja con un diseño intuitivo que permite una operación sencilla.

Por último, se menciona el trabajo de Pisco y Fonseca que aborda la exploración y la validación mediante simulación computacional de procesos de laminación de cera de abeja para una capacidad de producción de 6 láminas por minuto y hasta 20 kg de cera, determinándose que los esfuerzos y deformaciones en condiciones de operación del equipo son aceptables, cumpliendo con los requerimientos y necesidades de los apicultores de la zona previo a su manufactura [13].

3. METODOLOGÍA

3.1 Parámetros de diseño

En la fase de diseño y construcción de la máquina laminadora de cera de abeja, se establecieron los parámetros iniciales de acuerdo con Castillo [5]. Estos indicadores se muestran en la Tabla 1 para el proceso de cálculo y selección de elementos de máquinas.

Tabla 1. Parámetro de diseño.

Largo de lámina [mm]	Ancho de lámina (w) [mm]	Espesor de lámina [mm]	Temperatura de cera [°C]	Esfuerzo de laminado ($\bar{Y}_f$) [MPa]	Número de revoluciones de rodillo (N) [rpm]	Radio de rodillo [mm] (r_{ro})
422	198	2	62-65	3	10	37.65

3.2 Cálculo de rodillos

Para el diseño se ha considerado, según la literatura especializada [14], [15], una velocidad angular de 10 rpm proporcionada por el sistema motriz. A partir de ello, se determina la velocidad de laminado mediante la Ecuación 1.

$$v_r = N r_{ro} \quad (1)$$

Estableciendo un tiempo de laminado dividido en dos actividades: el tiempo que tarda en circular una lámina por los rodillos y el tiempo que tarda en removerse y cambiarse por una nueva lámina. Se ha considerado un tiempo de remoción t_2 de 15 s [5], mientras que el tiempo de circulación se expresa mediante la Ecuación 2.

$$t_l = \frac{L_l}{v_r} \quad (2)$$

De manera, que el tiempo total invertido en el proceso de laminación por lámina de cera de abeja se expresa con la Ecuación 3.

$$t = t_l + t_2 \quad (3)$$

Como se muestra en la Figura 1, durante el proceso de laminación se presenta un cambio del espesor b_o a b_f , este parámetro es importante en vista que durante el tramo L_C , se produce la deformación plástica debido a una fuerza requerida para la laminación, como se indica en las Ecuaciones 4, 5 y 6.

$$e_{m\acute{a}x} = b_o + b_f \quad (4)$$

$$L_C = \sqrt{r_{ro} e_{m\acute{a}x}} \quad (5)$$

$$F_L = \bar{Y}_f w L_C \quad (6)$$

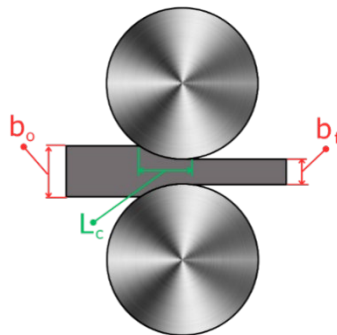


Figura 1. Parámetros geométricos de laminación.

De acuerdo con Kalpakjian [15], los metales tienen un adecuado valor de la fuerza real de laminado si se incrementa en un 20 %. Debido a la propiedad de adhesión se consideró un aumento del 30 % expresándose con la Ecuación 7.

$$F_{rL} = 1.3F_L \quad (7)$$

A partir de esta fuerza de laminación obtenida se determinan el torque de laminación, torque total y la potencia requerida para la selección del sistema motriz, como se muestra en las Ecuaciones 8, 9, 10.

$$T_L = 0.5F_{rL}L_C \quad (8)$$

$$T_{tL} = 2T_L \quad (9)$$

$$P_L = F_{rL}NL_C \quad (10)$$

3.3 Cálculo de engranajes

Para el posicionamiento entre los centros de los rodillos considerando un espesor mínimo de 0,3 mm, se emplea la Ecuación 11.

$$C_r = d_4 - S \quad (11)$$

A partir del valor C_r se procede a realizar el dimensionamiento de los engranajes rectos considerando valores iniciales de módulo de 2,5, número de dientes de 30 y el ángulo de presión de 20° mediante las Ecuaciones 12 y 13, para posteriormente emplear el software Geartrax para la modelación geométrica de los engranes.

$$D_e = (N_d + 2)m_t \quad (12)$$

$$D_p = \frac{N_d}{P_d} \quad (13)$$

3.4 Cálculo de poleas

En este estudio se ha seleccionado una transmisión directa por lo que se ha asignado un diámetro de poleas de 3 in de tipo A, expresando la velocidad de giro de la polea hacia el eje del rodillo mediante la Ecuación 14.

$$N_1 = \frac{ND_1}{D_2} \quad (14)$$

Para el cálculo de cargas producidas por transmisión de la polea motriz con la polea conductora para facilitar el movimiento de la banda se emplean las Ecuaciones 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21. Cabe mencionar que se selecciona un valor de $C=2$ correspondiente a correas trapezoidales tipo V y C.

$$T_1 = T_r \frac{D_2}{D_1} \quad (15)$$

$$F_n = \frac{2T_1}{D_2} \quad (16)$$

$$F_f = CF_n \quad (17)$$

$$F_{fy} = F_f \cos \theta \quad (18)$$

$$F_{fz} = F_f \sin \theta \quad (19)$$

$$F_{ty} = \frac{2T_1}{D_p} \quad (20)$$

$$F_{rz} = F_{ty} \tan \phi \quad (21)$$

3.5 Cálculo de ejes

El dimensionamiento del diámetro de un eje se realiza mediante un análisis estático realizado empleando el software MDSolids y la norma ANSI B 106.IM-1985 para considerar el diseño de flexión y torsión bajo la Ecuación 22 y 23.

$$M_T = \sqrt{M_1^2 + M_2^2} \quad (22)$$

$$d = \left[\frac{32N_s}{\pi} \sqrt{\left(\frac{k_f M_T}{S'_E} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{T}{S_y} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (23)$$

4. RESULTADOS

4.1 Dimensionamiento de componentes de transmisión

Para el dimensionamiento de los sistemas mecánicos involucrados en la laminadora de cera de abeja se emplean las Ecuaciones 1 a 22. Los parámetros de geometría y cargas de laminación se muestran en la Tabla 2. Por otro lado, el dimensionamiento en los engranajes se determinó con valores de control como se indican en la Tabla 3, mientras que en la Tabla 4 se muestran los valores de carga producidos en la transmisión por polea.

Por último, en la Tabla 5 se indican los parámetros de dimensionamiento del eje de transmisión, se ha considerado que se mantengan los tamaños relativos de los elementos de transmisión sobre los apoyos de los cojinetes para practicidad en su construcción, adicionalmente para su identificación clara se ha realizado su representación en la Figura 2.

Tabla 2. Resultados de parámetros de control del proceso de laminación.

Parámetro	Valor encontrado	Unidad
v_r	1,05	$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$
t_l	11	s
t	26	s
$e_{m\acute{a}x}$	1	mm
L_C	6.14	mm
F_L	3644.78	N
F_{rL}	4738.22	N
T_L	14.52	Nm
T_{tL}	29.04	Nm
P_L	31	W

garantiza que el rodillo no sufrirá deformación plástica. Asimismo, se evaluaron los factores de seguridad bajo condiciones de flexión y cortante, obteniéndose valores de 1,50 y 1,31, respectivamente. Estos valores, según la teoría de fallas, superan el umbral crítico de 1, lo que asegura la confiabilidad en el desempeño operativo del eje.

Las cargas consideradas en el análisis de los engranajes fueron la fuerza tangencial y radial, mediante el software Ansys, se obtuvo que el esfuerzo de Von Mises es 744,38 MPa. Este valor es inferior al límite elástico del material es de 1140 MPa, de manera que el engranaje no se deformará plásticamente. Asimismo, se determina el factor de seguridad en condiciones de flexión y cortante obteniéndose un valor de 1,53 y 1,46 respectivamente que, de acuerdo con la teoría de fallas, no supera los límites admisibles en el comportamiento mecánico.

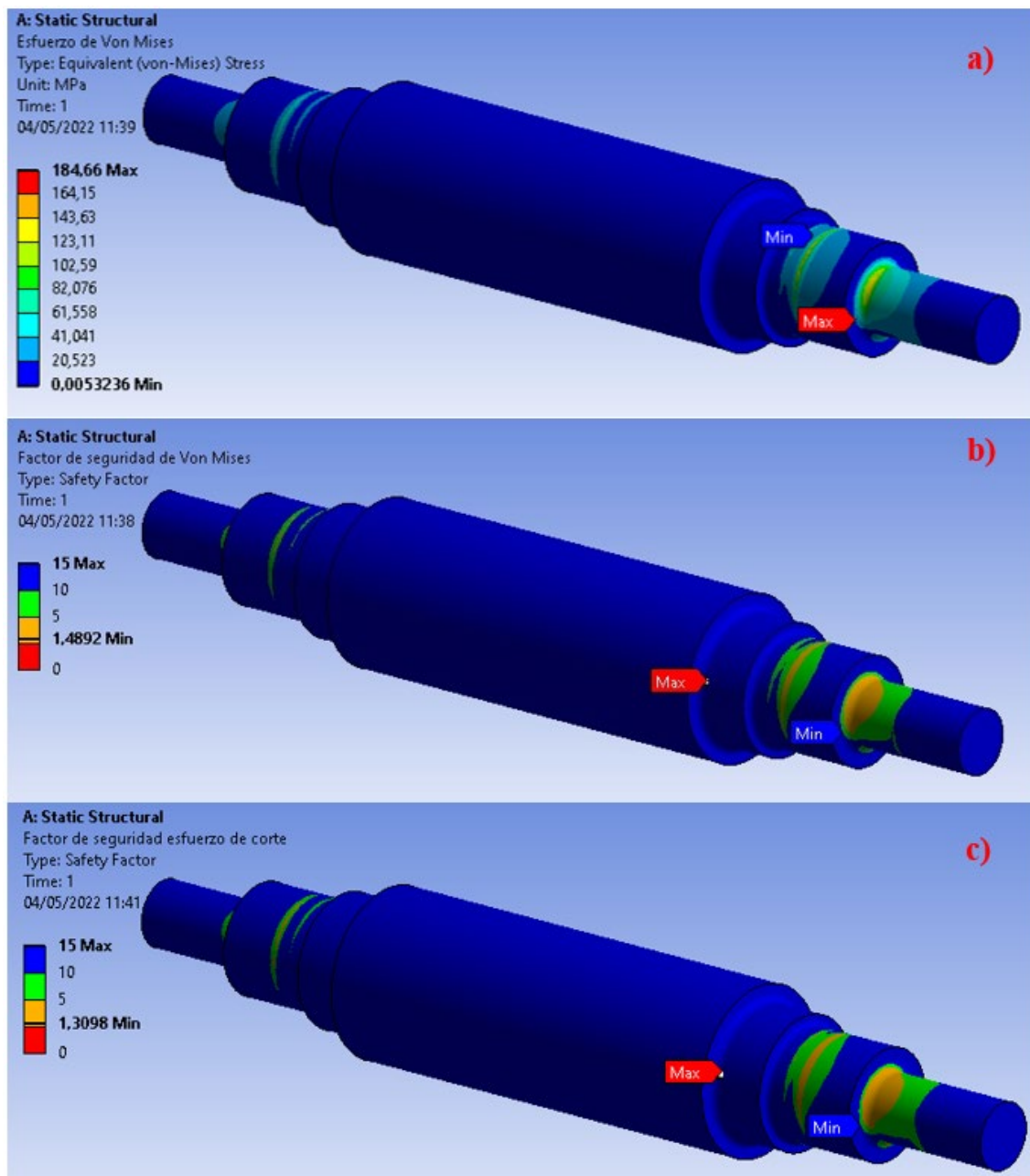


Figura 3. Estudio de simulación en eje y rodillo laminador para a) Esfuerzo de Von Mises, b) Factor de seguridad en flexión, c) Factor de seguridad en cortante.

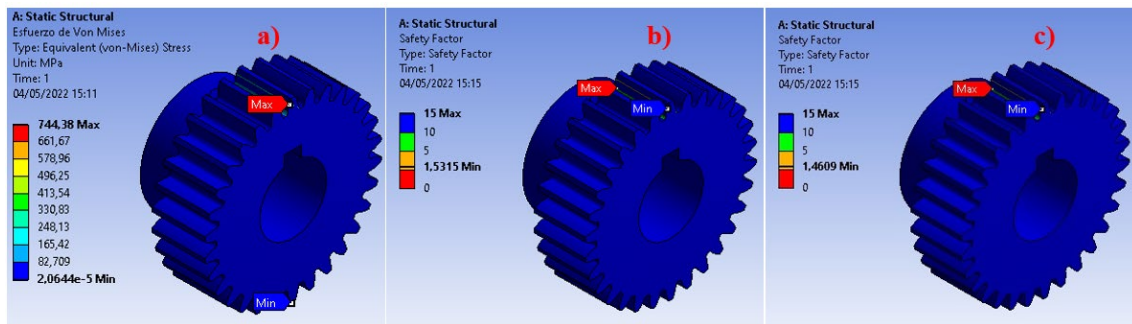


Figura 4. Estudio de simulación engranaje recto para a) Esfuerzo de Von Mises, b) Factor de seguridad en flexión, c) Factor de seguridad en cortante.

4.3 Construcción de equipo

Con la validación de los cálculos y la simulación se realizó el proceso de ensamblaje del equipo como se observa en la Figura 3 y 4, posteriormente se ejecutaron pruebas de laminación obteniendo perfiles de los alveolos adecuados a lo esperado con medidas de 1 mm como se muestra en la Figura 5.

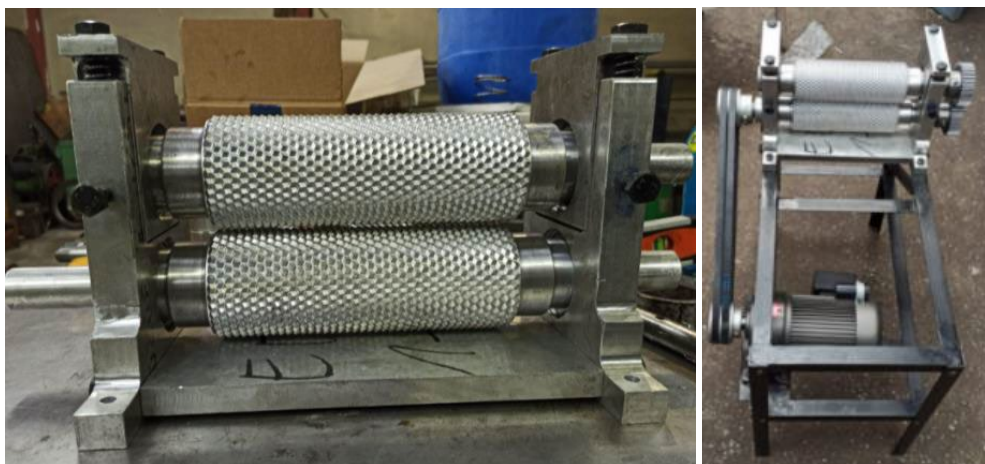


Figura 5. Ensamble de laminador de cera de abeja.



Figura 6. Laminación de cera de abeja con patrón alveolado de 1 mm.

5. DISCUSIÓN

El desarrollo y evaluación del prototipo de máquina de rodillos estampadores de cera de abeja presentado en este estudio demuestra una mejora significativa en la eficiencia de producción de láminas estampadas, alineándose con la necesidad identificada en la provincia de Bolívar, ciudad de Guaranda. La aplicación de software de ingeniería para el modelado y simulación del prototipo no solo optimizó su funcionamiento, sino que también permitió anticipar y resolver posibles fallos operativos antes de la construcción física, un enfoque que contrasta con las metodologías tradicionales.

Comparado con estudios anteriores, este trabajo explora diferentes diseños y procesos de laminación en el contexto de la apicultura. En el estudio de Tello [11], se desarrolló una máquina laminadora de cera de abejas que incorpora un sistema de calentamiento y refrigeración, lo cual optimiza el proceso artesanal en Colombia al permitir la producción continua de láminas de cera manteniendo una temperatura adecuada durante el proceso. Este enfoque mejoró significativamente la eficiencia y calidad del producto final.

Guanín [12], por su parte, diseñó una máquina estampadora que evaluó diversas técnicas de laminación y compactación. Su investigación destacó por la precisión en el grabado de patrones de cera y la adaptabilidad del proceso a las necesidades del usuario, facilitando una operación intuitiva y sencilla.

Además, Pisco y Fonseca [13] realizaron una validación exhaustiva mediante simulación computacional de los procesos de laminación, logrando una capacidad de producción de seis láminas por minuto. Su estudio evaluó los esfuerzos y deformaciones en condiciones operativas, asegurando que el equipo cumpliera con los requerimientos de los apicultores antes de su manufactura.

Sin embargo, es importante reconocer las limitaciones del estudio. La implementación del prototipo en condiciones reales de producción requiere evaluaciones adicionales sobre su durabilidad, mantenimiento y adaptabilidad a diferentes condiciones ambientales. Además, la investigación se centró en la eficiencia de producción sin profundizar en el impacto de las láminas producidas sobre la salud y el comportamiento de las abejas, un aspecto crucial para garantizar la sostenibilidad de las prácticas apícolas.

Futuras investigaciones deberían explorar la integración de tecnologías de monitoreo y control en tiempo real para optimizar aún más la operación de la máquina. También sería valioso estudiar el impacto a largo plazo del uso de las láminas producidas por el prototipo en la salud de las colonias de abejas y en la calidad de los productos apícolas.

6. CONCLUSIONES

El prototipo diseñado ha demostrado una notable mejora en la eficiencia de la producción de láminas estampadas de cera de abeja, de manera que comparado con los métodos convencionales, el sistema semiautomático reduce el tiempo de producción y el esfuerzo manual necesario, lo que representa un avance significativo hacia la automatización del proceso de estampado de cera de abeja.

El uso de software de ingeniería para modelar y simular el funcionamiento del prototipo ha permitido optimizar su diseño, garantizando un rendimiento eficiente y la anticipación de posibles fallos operativos, de manera que esta aproximación tecnológica subraya la importancia de la innovación en el desarrollo de soluciones específicas para la industria apícola.

El prototipo propuesto promete beneficios económicos significativos para los apicultores de la región, permitiendo una producción más ágil de láminas de cera de abeja y, por ende, una mayor

eficiencia en la producción de miel y otros productos apícolas, de forma que puede contribuir al desarrollo económico de las comunidades rurales implicadas.

Aunque el estudio confirmó la viabilidad técnica y la eficiencia del prototipo, se identificaron áreas para futuras investigaciones, incluyendo la durabilidad, el mantenimiento y la adaptabilidad del sistema a diferentes condiciones ambientales, siendo necesario de considerar la sostenibilidad y adaptabilidad como factores clave en el diseño de maquinaria apícola.

REFERENCIAS

- [1] M. F. Miranda, D. K. Campoverde, and L. A. Velasco, "Proposal for the Production and Marketing of Beekeeping Products", ESPOCH Congresses: The Ecuadorian Journal of S. T. E. A. M, vol. 2, no. 1, pp. 196–214, jun. 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.18502/epoch.v2i2.11194>
- [2] A. M. Rea, "Diseño de un Plan Estratégico con el establecimiento de un balance Scorecard para el Gobierno Autónomo descentralizado del Cantón Guaranda", Tesis de Maestría, Escuela Politécnica del Ejército, Ecuador, 2013. [En línea]. Disponible en: <https://repositorioebe.espe.edu.ec/server/api/core/bitstreams/dc285366-6884-443a-a88e-9ce0f5817045/content>
- [3] S. A. Echeverría, "Plan de negocios para la importación de miel de abeja desde México hacia el Ecuador", Tesis de grado, Universidad De Las Américas, Quito, Ecuador, 2008. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.udla.edu.ec/handle/33000/1901>
- [4] C. Ziegler, T. Sinigaglia y A. Michels, "Desenvolvimento de um equipamento para a produção de cera alveolada", Holos, vol. 2, pp. 53–67, apr. 2016. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.15628/holos.2016.3742>
- [5] L. Y. Castillo, "Diseño y construcción de un prototipo de una máquina de rodillos estampadores de cera de abeja", Tesis de pregrado, Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Ecuador, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/6617>
- [6] J. D. Higueros, "Manufactura de bases de cera de abeja con moldes impresos en 3D", Tesis de grado, Universidad del Valle de Guatemala, Guatemala, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uvg.edu.gt/handle/123456789/4324>
- [7] E. A. Chiluisa, "Diseño del sistema de rodillos gofradores para el moldeado de cera de abeja", Tesis de grado, Universidad Técnica del Cotopaxi, Cotopaxi, Ecuador, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://core.ac.uk/outputs/525004813/?source=2>
- [8] J. D. Perez y G. C. Villamizar, "Diseño y construcción de rodillos estampadores de cera de abeja", Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander, Colombia, 2004. [En línea]. Disponible en: <https://noesis.uis.edu.co/items/556bf9f4-60a6-43ce-8238-890072eba3e7>
- [9] T. Khamdaeng, T. Wongsiriamnuay, N. Panyoyai, K. Narkprasom, and W. Intagun, "Mechanical properties and melting conditions of beeswax for comb foundation forming", *Agricultural Engineering International: The CIGR Journal*, vol. 18, no. 3, pp. 282–293, 2016. [Online] Available: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/3735/2441>
- [10] M. d. Rincón, "Ampliación de una industria apícola en Arnedo", Tesis de grado, Universidad de Valladolid, España, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/6064>

- [11] N. Tello, "Diseño y fabricación de una máquina de láminas de cera de abejas", Tesis de grado, Universidad Santo Tomás, Colombia, 2022. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11634/44459>
- [12] S. J. Guanín y J. L. Llumiquinga, "Diseño y construcción de una laminadora estampadora continua para cera de abejas", Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito 2006. [En línea]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/2523>
- [13] V. S. Pisco y L. A. Fonseca, "Diseño validado mediante software de una máquina automática laminadora y estampadora de cera de abejas para marcos de colmenas Langstroth", Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, 2021. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.espacech.edu.ec/handle/123456789/15154>
- [14] S. Kalpakjian y S. R. Schmid, Manufactura, Ingeniería y Tecnología, 5ª ed., México, Pearson Educación, 2008, pp. 349–350.
- [15] R. G. Budynas y J. K. Nisbett, Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley, 10ª ed., México, McGraw-Hill, 2019, pp. 670–673.

Glosario de términos

Símbolo	Parámetro	Símbolo	Parámetro
L_l	Largo de lámina (mm)	$T_t L$	Torque total (Nm)
w	Ancho de lámina (mm)	P_L	Potencia requerida (W)
e	Espesor de lámina (mm)	C_r	Separación entre rodillos (mm)
T_c	Temperatura de cera (°C)	D_e	Diámetro extremo de engranaje (mm)
Y_f	Esfuerzo de laminado (MPa)	D_p	Diámetro de paso (in)
N	Número de revoluciones de rodillo (rpm)	T^1	Torque de entrada (Nm)
r_o	Radio de rodillo (mm)	F_n	Fuerza tangencial (N)
v_r	Velocidad de laminado (rad/s)	F_f	Fuerza de flexión (N)
t_1	Tiempo de laminado (s)	F_{fy}	Fuerza de flexión en el eje y (N)
t	Tiempo total de laminado (s)	F_{fz}	Fuerza de flexión en el eje z (N)
$e_{\max}$	Pase de laminación (mm)	F_{ty}	Fuerza tangencial en el eje y (N)
L_c	Longitud de contacto (mm)	F_{rz}	Fuerza radial en el eje z (N)
F_L	Fuerza de laminado (N)	M_T	Momento torsor total (Nm)
$F_r L$	Fuerza real de laminado (N)	d	Diámetro del eje (mm)
T_L	Torque de laminado (Nm)		

Copyright (2025) © Líder Castillo Laban, Mario Yacchirema Lopez y Rodger Salazar Looor.

Este texto está protegido bajo una licencia internacional [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/). Usted es libre para compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato. También podrá adaptar: remezclar, transformar y construir sobre el material. [Ver resumen de la licencia](#).



Análisis de metodologías para la caracterización de residuos sólidos en instituciones de educación superior: revisión sistemática

(Analysis of Methodologies for Characterizing Solid Waste in Higher Education Institutions: Systematic Review)

Diego Fernando López Correa, Mónica Delgado-Yáñez, Eysthin Andrés Medica Saca, Carlos Gabriel Enríquez Pinos
Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador
dflopezcl@uce.edu.ec, msdelgadoy@uce.edu.ec, eamedinasaca1@uce.edu.ec, cgenriquez@uce.edu.ec

Resumen: La gestión eficiente de los residuos sólidos en instituciones de educación superior es un desafío crucial en la búsqueda de prácticas sostenibles y responsables. Por tanto, el objetivo del presente artículo fue analizar las metodologías para la caracterización de residuos sólidos, mediante la revisión sistemática para la elaboración de guías que sirvan de pautas para estudios similares. Se identificó la ausencia de enfoques estandarizados específicos para las instituciones de educación superior. Sin embargo, en su mayoría toman como base lo expuesto por el CEPIS y la ASTM D5231-2, pero aún existen variaciones en el número de días de muestreo y cantidad de muestra. Por otro lado, los autores coinciden en los métodos de validación estadística por medio de Crochan, Anova y análisis de regresión múltiple, convirtiéndose en herramientas adecuadas que permiten asegurar la confiabilidad de los datos obtenidos. Finalmente, se establecieron recomendaciones metodológicas para el caso de otras instituciones de educación superior.

Palabras clave: CEPIS, instituciones de educación superior, metodologías, residuos sólidos, validación estadística.

Abstract: The efficient management of solid waste in higher education institutions is a crucial challenge in the search for sustainable and responsible practices. Therefore, the objective of this article was to analyze methodologies for the characterization of solid waste, through a systematic review for the development of guidelines to serve as guidelines for similar studies. The absence of specific standardized approaches for higher education institutions was identified. However, they are mostly based on what is stated by CEPIS and ASTM D5231-2, but there are still variations in the number of sampling days and sample quantity. On the other hand, the authors agree on the statistical validation methods through Crochan, Anova and multiple regression analysis, becoming appropriate tools that ensure the reliability of the data obtained. Finally, methodological recommendations were established for other higher education institutions.

Keywords: CEPIS, higher education institutions, methodologies, solid waste, statistical validation

1. INTRODUCCIÓN

En las instituciones de educación superior de América Latina se han realizados estudios similares que sirven como punto de partida, como el caso de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) que estimó una producción per cápita de 0,11 kg/hab.día [1], seguido de la

Universidad Autónoma de Baja California con 0,05 kg/hab.día [2], y la Universidad Pontificia Bolivariana de Bucaramanga con 0,023 kg/hab.día [3].

De la misma manera, se han realizado estudios en Ecuador en algunas instituciones de educación superior. Tal es el caso de la sierra ecuatoriana, donde la Escuela Politécnica Nacional estimó una producción per cápita de 0,07 kg/hab.día [4] y en la Universidad Politécnica Salesiana sede Quito con 0,3 kg/hab.día [5]. Mientras que en la región insular, la Universidad Técnica Estatal de Quevedo con una producción per cápita de 0,0915 kg/hab.día [6].

Por su parte, en la Universidad Central del Ecuador (UCE) se han realizado dos estudios de caracterización de residuos sólidos. El primero data del año 2004, donde se estimó una producción per cápita de 0,1513 kg/hab.día, siendo los residuos orgánicos los más representativos con un 30,4 %, siguiendo los plásticos con un 21,49 %, y por último los residuos de papel con un 19,74 % [7]. El segundo estudio, fue realizado en el año 2017 en la Facultad de Artes, donde se estimó una producción per cápita de 0,066 kg/hab.día [8].

Por otro lado, de acuerdo con el informe de la “Evaluación Regional del Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en América Latina y el Caribe 2010” [9], la poblacional del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) se sitúa en la categoría de ciudades grandes, presentando promedios regionales de producción per cápita de 1,14 kg/hab.día para los residuos sólidos urbanos, aunque los valores registrados son significativamente inferiores a la media regional, manteniéndose dentro del rango de la media nacional que oscila entre 0,85 kg/hab.día [9].

Una de las ciudades con mayor población es el DMQ [10], en la cual, debido a su gran población y extensión, uno de los principales problemas que se puede evidenciar es su gran producción de residuos sólidos. Según estadísticas de la Empresa Pública Metropolitana de Gestión Integral de Residuos Sólidos (EMGIRS), se producen aproximadamente 2000 t/día de residuos sólidos en la ciudad de Quito, de los cuales menos del 2 % son recuperados antes de su disposición final [11].

En los últimos nueve años se han llevado a cabo dos análisis de caracterización en el DMQ [12]. El primer estudio fue realizado en el 2012, a nivel de centros educativos para los sectores de la América, en el que se estimó una producción per cápita de 0,029 kg/hab.día, siendo los residuos orgánicos de cocina los más representativos con un 24,47 %, siguiendo el papel con un 14,42 %, y los residuos compuestos con un 11,14 % [13]. Mientras que en el estudio realizado en el 2021 por la consultora Asamtech [12], se estimó una producción per cápita de 0,017 kg/hab.día, siendo los residuos orgánicos (alimentos y poda) los más representativos con un 32,4 %, siguiendo los plásticos con un 24,09 %, y por último los residuos de papel y cartón con un 16,52 % [12].

Sin embargo, en todos estos estudios mencionados existe una gran variabilidad de las metodologías empleadas: frecuencia de muestreo, número de muestras, variables analizadas, clasificación y modelos de validación. En consecuencia, el presente artículo tiene como objetivo realizar una revisión sistemática de las metodologías utilizadas en la caracterización de residuos sólidos en instituciones de educación superior (IES), para la elaboración de guías que sirvan de pautas para estudios similares.

Con los resultados obtenidos se pretende establecer recomendaciones en cuanto a la metodología a emplearse para el caso de instituciones educativas de educación superior. De este modo se puede obtener una caracterización y cuantificación fiable de los residuos sólidos generados en estas zonas; además, con esto se podrán plantear proyectos de reciclaje y recuperación de materiales.

2. METODOLOGÍA

Para obtener información relevante sobre el presente tema, se ha recurrido a diversas bases de datos como ScienceDirect, Dialnet y SciELO, en donde se puede encontrar estudios fiables y aplicables al caso de estudio presentado. Además, se han definido unos criterios de inclusión y exclusión con el fin de establecer una acotación y seleccionar los artículos que presenten una metodología realizable y aplicable al caso de estudio. Los criterios de inclusión y exclusión son los siguientes:

- ¿El estudio se centra en una institución educativa?
- ¿La información es actualizada?
- ¿Días de muestreo menor o igual a 10 días?
- Palabras clave: Residuos sólidos, caracterización, instituciones de educación superior, metodologías, CEPIS, validación estadística.

Se emplearon palabras claves y variables relacionadas con el tema, así como operadores boléanos como: AND y OR: “Residuos sólidos” AND “caracterización”; “Instituciones de educación superior” OR “Universidades”; “Metodología” AND “Caracterización”; “Residuos sólidos universitarios” OR “desechos sólidos universitarios”; “muestreo” AND “número de muestras”; “Guías para la caracterización de residuos sólidos” OR “Manuales de residuos sólidos”, entre otros.

Las fuentes de información primaria utilizadas son trabajos de tesis, artículos con revisión par ciego y libros sobre el tema [14], como fuentes de información secundaria tenemos a aquellos artículos, revistas o libros que analizan, valoran, sintetizan o traducen lo escrito en fuentes primarias [15].

La revisión sistemática del presente trabajo se encuentra basada en la metodología Prisma para revisión sistemática y meta-análisis [16-19], en la Figura 1 se visualiza la misma.

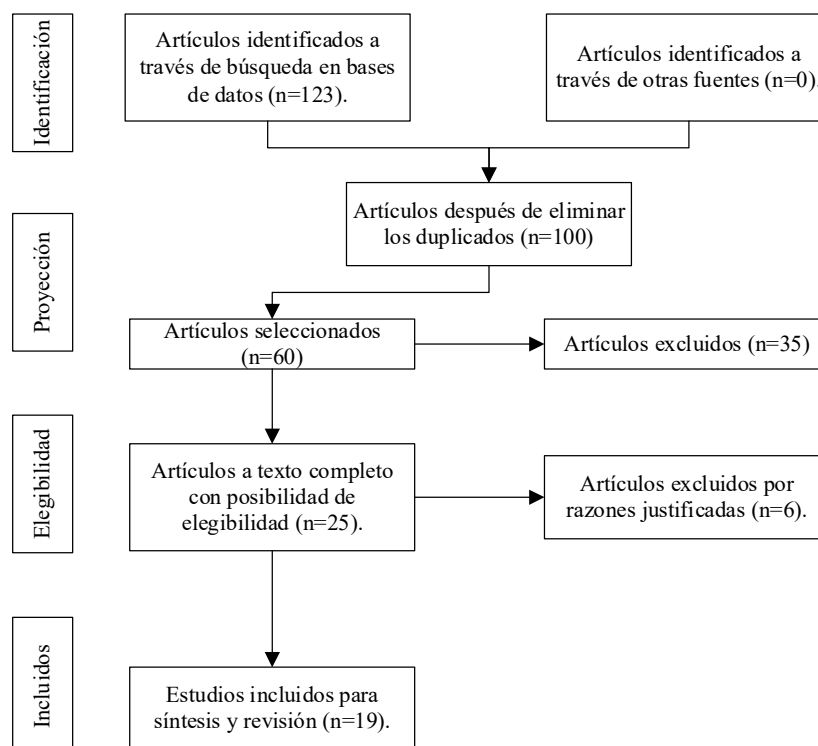


Figura 1. Desarrollo de la metodología Prisma usada.

Después de una primera búsqueda, se identificaron 123 artículos científicos relacionados con el tema tratado. Posteriormente, al verificar duplicados, se descartaron 23 estudios. Seguidamente, se aplicaron los criterios de inclusión y exclusión, con lo cual se excluyeron 35 artículos. Con la revisión completa de los 25 estudios restantes, se descartaron 6 por presentar metodologías que no fueron explicadas a detalle. Finalmente, se verificó que 19 artículos están relacionados con la caracterización de los residuos sólidos, los cuales pueden aportar con pautas para las demás instituciones educativas.

Los estudios que fueron incluidos para el proceso de síntesis y revisión fueron sometidos a un proceso minucioso descrito a continuación en la Figura 2.

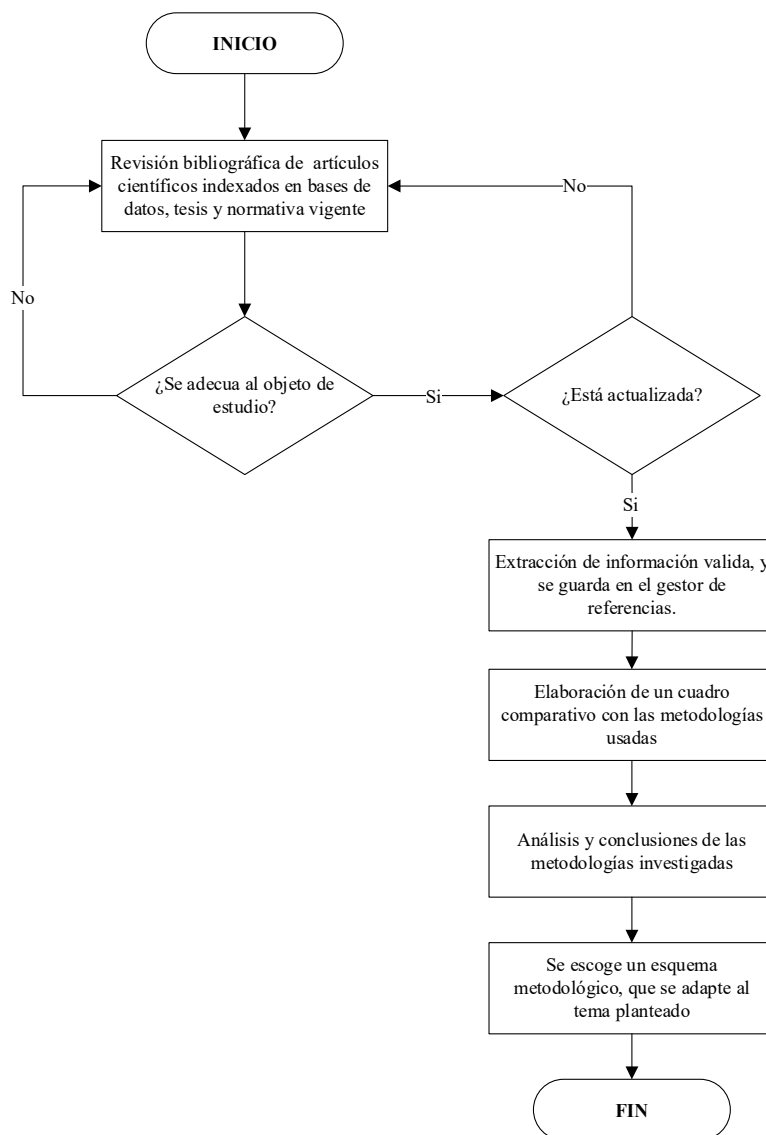


Figura 2. Metodología del trabajo.

En primer lugar, se verificaron que los estudios que fueron elegidos para la revisión y síntesis se adecuen al objeto de estudio, y también que estos se encuentren actualizados. Seguidamente, se continuó con la extracción de información válida y relevante para el estudio, guardándola en un gestor de referencias; en este punto, se descartaron 5 estudios, debido a que algunas variables como tasas de generación y composición física no fueron analizadas en las investigaciones del artículo en cuestión. Luego, se elaboró un cuadro comparativo de las metodologías usadas en cada

uno de los estudios. Finalmente, con base en el análisis realizado, se plantearon pautas metodológicas específicas para instituciones de educación superior.

3. RESULTADOS

Después de una revisión exhaustiva, descrita en la Figura 2, se rescataron 7 artículos científicos relacionados con la caracterización y muestreo de residuos sólidos en zonas residenciales y no residenciales donde se ubican además instituciones de educación superior en el área de influencia directa; y, por otro lado, se obtuvieron 7 estudios relacionados con la caracterización y muestreo en instituciones educativas de nivel superior de manera exclusiva, los cuales aportan con pautas metodológicas de muestreo y caracterización de residuos sólidos.

Es importante destacar que las tasas de generación y la composición de residuos reflejan el comportamiento específico de la fuente de origen, pero no necesariamente representan fielmente las tasas y la composición de toda una ciudad.

Los modelos de gestión propuestos en las interrelaciones entre los elementos funcionales de un sistema de gestión de residuos se pueden observar en el siguiente esquema de la Figura 3.

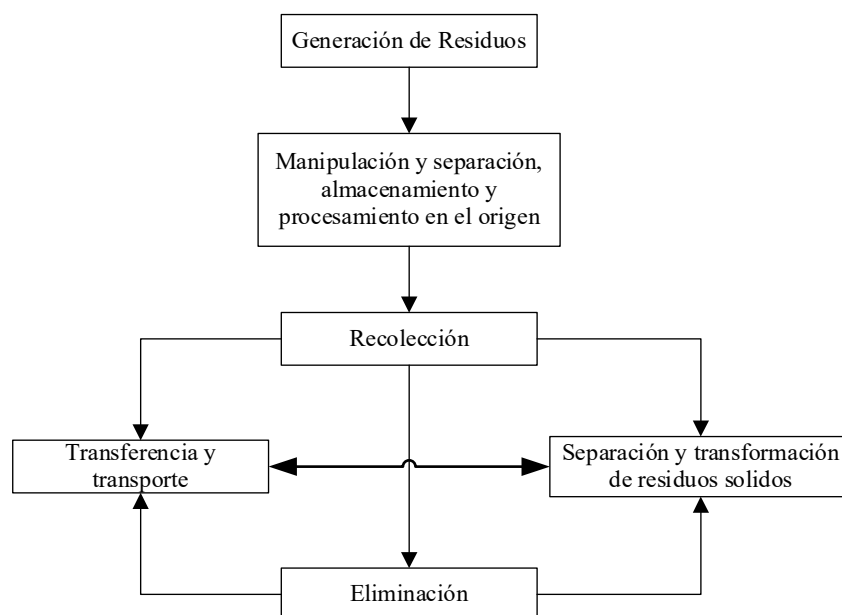


Figura 3. Diagrama simplificado de las interrelaciones entre los elementos funcionales de un sistema de gestión de residuos.

Fuente: Modificado de George Tchobanoglous [16].

En la Tabla 1 se comparan los resultados de las instituciones de educación superior a nivel de Latinoamérica, destacando sus distintas metodologías, frecuencias de muestreo, variables analizadas, tasas de generación de residuos y modelos de validación utilizados. Estos estudios presentan cada uno su enfoque específico y métodos particulares.

Tabla 1. Comparación de metodologías de caracterización de residuos domiciliarios.

Tabla 1. Comparación de metodologías de caracterización de residuos domiciliarios.								
Estudio	Tipo de fuente	N.º de muestras	Frecuencia de muestreo	Variables	Tasa de generación (kg/persona/día)	N.º de categorías de composición analizados	Modelo de validación utilizado	
Residuos domiciliarios								
1	Parizeu, K., et al [17]	RE	400 (50 viviendas)	Diario/ 8 días	TDG, NSE, CF, M	0,34	12	ANOVA. Análisis de regresión lineal. Prueba t
2	Buenrostro, O., et al [18]	RE y NRE	354 (RE) 411 (NRE)	Diario/ 8 días	TDG, CF,	0,40	51	ANOVA y Prueba C de Cochran
3	Ojeda, S., et al [19]	RE	682 (125 viviendas)	Diario/ 9 días	TDG, CF, NSE, TF	0,782; 1,10 y 1,35	37	ANOVA
4	Qdais, A., et al [20]	RE	840 (40 viviendas)	Diario/ 3 semanas	TDG, CF, NSE, RPV	1,76	6	Distribución de probabilidad. Asimetría y Coeficiente de Curtosis. Regresión lineal
5	Bolaane, B.,et al [21]	RE	893 (47 viviendas)	Diario/ 3 semanas	TDG, CF, NSE, RPV	0,33	7	Distribución de probabilidad. Asimetría y Coeficiente de Curtosis. Análisis de correlación lineal
6	Hristovski, K., et al. [22]	VER	8	Diario / 8 días	TDG, PEC, CF, PES	1,06±0,56	9	Análisis de la desviación estándar
7	Vargas, A., et al [23]	RSD	-	Diario/ 8 días	TDG, CF	0,4	3 categorías y 16 subcategorías	-
Residuos de instituciones de nivel superior								
8	Coyago, E., et al. [5]	RSD	350	5 días	TDG, CF, CQ, PE	0,0205	8 categorías y 47 subcategorías	-
9	Quintero, C., et al. [24]	RSD	954	8 días	TDG	0,132	20 subcategorías	-
10	Ballinas, M., et al [25]	RSD	2026	10 días	TDG	0,06136	-	-
11	Castillo, L., et al [3]	RSD	5922	Diario/ 6 días	TDG, CF	0,025	10 categorías	Análisis de componentes principales (ACP)
12	Veneros, B. et al [26]	RSD	1551	Diario/ 8 días	TDG, CF	0,065	6 subcategorías	Análisis de regresión lineal múltiple
13	Raudales, R., [27]	RS	(169 viviendas)	Diario/ 5 días	TDG, CF, CQ	0,83	12 subcategorías	-
14	Estupiñán, C., et al [6]	RSD	12 UGR	Diario/ 5 días	TDG, CF	0,0915	6 subcategorías	-

Las abreviaciones empleadas en la Tabla 1 son las siguientes: Tipo de fuente: RE: residencial; NRE: no residencial; PS: planta de separación; CDR: camiones de recolección; RSD: residuos sólidos en instituciones educativas; VER: vertederos; UGR: Unidades Generadoras de Residuos

Variables: TDG: tasa de generación; NSE: nivel socioeconómico; M: movilidad; TF: tipo de familia; RPV: relación personas/vivienda; CF: composición física; CQ: composición química; PE: peso específico; PES: peso específico suelto; PEC: peso específico compactado; H: humedad. ANOVA: análisis de varianza.

El análisis de la Tabla 1, muestra una variabilidad considerable en las frecuencias de muestreo, tamaños de muestra y modelos de validación empleados, lo que ilustra la falta de uniformidad en las prácticas de caracterización de residuos en las instituciones de educación superior. Sin embargo, se pueden observar algunas coincidencias en cuanto a la frecuencia de muestreo, las cuales mencionan que de manera general se debe realizar un muestreo durante 8 días, [17], [18], [28], [23], [24], [26]. Por otro lado, otros autores recomiendan 9 días, 3 semanas, 3 semanas de muestreo diario, como se puede evidenciar en [19], [20], [21], respectivamente. También se recomienda que el muestreo sea durante 5 días [5], [27], [6].

En cuanto al número de muestras, hay una gran variabilidad, puesto que los estudios de caracterización se realizaron en diferentes zonas y condiciones, por lo cual se considera propio de cada institución educativa.

La mayoría de los estudios de caracterización emplean técnicas de muestreo estadístico y tienden a procesar los datos bajo la premisa de una distribución normal, a pesar de que los datos no se ajusten a este patrón. El modelo de validación más empleado que se pudo evidenciar en los artículos revisados, es el Análisis de Varianza (ANOVA), el cual es usado en [17], [18] y [19]. Por otro lado, otro modelo ampliamente usado, el análisis de regresión lineal múltiple, como se puede apreciar en [3].

En instituciones de educación superior de América Latina y principalmente en Ecuador, la forma de obtener los resultados es diferente, pero alcanzan valores muy similares dependiendo de la cantidad y tipo de laboratorio, se busca obtener datos de generación específica.

4. PROPUESTAS METODOLÓGICAS PARA INSTITUCIONES DE EDUCACIÓN SUPERIOR

Con base en el análisis de las diferentes metodologías, se pretende plantear algunas recomendaciones en cuanto a la metodología a emplearse para el muestreo y caracterización de los residuos sólidos en instituciones de educación superior.

4.1. Cantidad de muestra

Para la cantidad de muestra, se atienden las especificaciones del “Manual de gestión integrada de residuos sólidos municipales en ciudades de América Latina y el Caribe”, que manifiesta que se requieren de 2 a 3 m³ de desechos recolectados desde distintas zonas del lugar de estudio [9]. Esta decisión se la tomó, puesto que, para el caso de las instituciones educativas, es la más conveniente, ya que cuentan con contenedores internos para el almacenamiento temporal, que en ciertos casos son compartidos por algunas facultades, por ende, el muestreo se volverá más fácil al obtenerlo desde estos contenedores.

4.2. Frecuencia de muestreo

En la Figura 4 se pueden apreciar las diferentes recomendaciones de algunos autores sobre el número de días de muestreo para llevar a cabo una caracterización de los residuos sólidos. Para determinar el número de días de muestreo, se tomaron en cuenta 12 de los 14 estudios analizados. Se determinó una media aritmética de los días de muestreo, dando como resultado un total de 7 días aproximadamente. Es decir, se recomienda que el muestreo sea diario durante una semana.

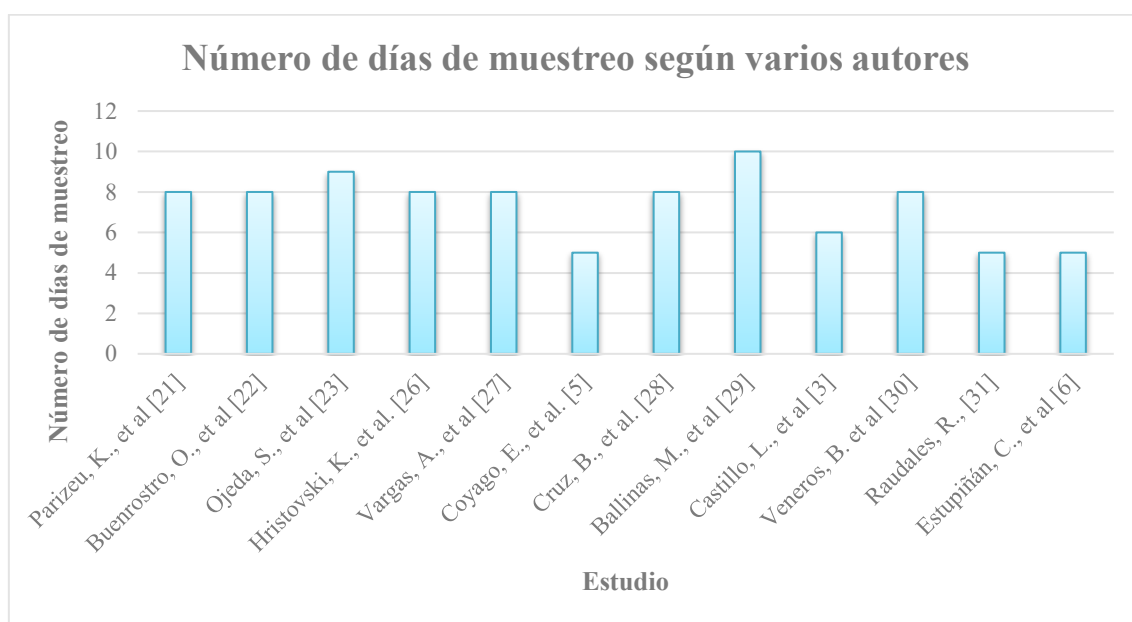


Figura 4. Frecuencias de muestreo según varios autores.

4.3. Variables para la caracterización

Si bien es cierto, en las instituciones de educación superior existe una gran variabilidad en cuanto a los tipos de residuos sólidos producidos, que van desde residuos comunes hasta residuos peligrosos (generados en los laboratorios de manera general). Sin embargo, los residuos peligrosos son gestionados por cada unidad generadora; es decir, cada facultad o laboratorio cuenta y se recomienda gestionar su propio gestor ambiental calificado. Por lo tanto, para la caracterización de los residuos sólidos de la comunidad universitaria, bastará con analizar variables como: la composición física (CF), tasas de generación (TDG) y opcionalmente la composición química (CQ) [24], [25], [3], [27].

4.4. Número de categorías de composición de residuos sólidos

Con base en los estudios analizados, se encontraron varias categorías para el análisis de la composición de los residuos sólidos, pertinentes para el caso de instituciones de educación superior, las cuales se reflejan en la Tabla 2.

Se verifica además que los residuos sólidos orgánicos de fácil biodegradación son en general los que representan el mayor volumen, seguidos de papel, cartón y plástico. Para las últimas categorías, las instituciones de educación superior en su mayoría tienen programas de reciclaje, reutilización y donación.

Para la obtención del promedio por tipo de residuos se tiene la Ecuación 1:

$$\text{Promedio por tipo de residuo} = \frac{\text{Kg cuadrante I} + \text{Kg cuadrante I}}{2} \quad (1)$$

Luego se procede a calcular el porcentaje de cada componente (Ecuación 2):

$$\text{Porcentaje (\%)} = \frac{\text{Kg por tipo de residuo}}{\text{kg promedio de residuos recolectados}} \times 100 \quad (2)$$

Al final, se determina la cantidad de kilogramos por semana en función del tipo de residuo (Ecuación 3):

$$\text{Producción} = (\% \text{ tipo de residuo}) \times (\text{kg total de residuos por semana}) \quad (3)$$

Generación per cápita diaria de residuos (GPC) (Ecuación 4):

$$GPC = \frac{\text{Peso total de residuos (Wt)}}{\text{Número total de personas (Nt)}} \quad (4)$$

Mientras que para determinar la densidad de los residuos sólidos se tienen las Ecuaciones 5 y 6

$$\text{Volumen de la basura (V)} = 0,7854 \times d \times h \quad (5)$$

$$\text{Densidad} = \frac{\text{Peso total de residuos (Wt)}}{\text{Volumen de la basura (V)}} \quad (6)$$

Tabla 2. Categorías de composición a ser analizados.

Tipo de residuo	Componente	Descripción
Orgánico de fácil biodegradación	Residuos de alimentos	Pan, huevos, restos de carne, cascara de huevo, cascar de plátano, frutas y verduras entre otros.
	Residuos de jardín	Poda de pasto, hojarasca y ramas.
Inorgánico de difícil biodegradación	Blanco	Papel bond, hojas de cuaderno.
	Baño	Pañales desechables, papel de baño, toallas sanitarias.
	Cartón	Todas las formas de cartón
	Plástico	Polietileno tereftalato (PETE); Polietileno de alta densidad (HDPE); Cloruro de polivinilo (PVC); Polietileno de baja densidad (LDPE); Polipropileno (PP); Poliestireno (PS) y Otros.
	Madera	Productos de madera, pallets, muebles
	Otros	Textiles, caucho cuero y otros materiales quemables.
	Vidrio	Todos los tipos de vidrio.
	Aluminio	Aluminio, latas de aluminio y láminas de aluminio
	Otros	Roca, arena, cerámica, yeso, metales, cobre latón, entre otros. O aquellos que sean de difícil segregación.
	Residuos peligrosos	Corrosivo, reactivo, tóxico, inflamable e infeccioso como ejemplo; pilas, baterías, jeringas, reactivo químicos, y aquellos que se separan en hospitales laboratorios.

4.5. Validación de resultados

Los estudios emplean modelos de validación estadística como análisis de varianza (ANOVA) la Prueba C de Cochran y Análisis de regresión lineal múltiple.

De manera general, la metodología para la aplicación del análisis de varianza se puede resumir de la siguiente manera [29]:

- a) **Verificar supuestos.** Antes de aplicar el ANOVA, verifica la independencia de las observaciones, la normalidad de los datos dentro de cada grupo y la homogeneidad de varianzas.

- b) **Definir hipótesis.** Establece las hipótesis nula y alternativa. La hipótesis nula generalmente afirma que no hay diferencias significativas entre las medias de los grupos, mientras que la hipótesis alternativa sugiere lo contrario. Es decir:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$$

$$H_1: \text{No todas las } \mu_j \text{ son iguales}$$

- c) **Aplicar el ANOVA.** Generalmente el análisis de varianza se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Resumen ANOVA.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F
Entre las muestras	$SC_{Trat} = \sum_{i=1}^k n_i (\bar{x}_{i.} - \bar{x}_{..})^2$	$k - 1$	$CM_{Trat} = \frac{SC_{Trat}}{k - 1}$	$F = \frac{CM_{Trat}}{CM_{Error}}$
Dentro de las muestras	$SC_{Error} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_j} (x_{ij} - \bar{x}_{i.})^2$	$N - k$	$CM_{Error} = \frac{SC_{Error}}{N - k}$	
Total	$SC_{Total} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_j} (x_{ij} - \bar{x}_{..})^2$	$N - 1$		

Verificar las hipótesis. Se rechazará H_0 y concluir que hay diferencias en las medias de los tratamientos si:

$$F_0 > F_{\alpha, k-1, N-k} \quad (7)$$

F_0 que sigue una distribución F con $k - 1$ y $N - k$ grados de libertad.

Comparación de parejas de medias. Posterior a que se haya realizado la prueba de hipótesis, y se haya concluido que hay diferencias entre las medias de los grupos, se puede realizar una comparación de parejas de medias, y determinar en qué medias existen esas diferencias, para lo cual se emplea el Método de Tukey, el cual consiste en comparar las diferencias entre medias muestrales con el valor crítico dado por:

$$T_\alpha = q_\alpha(k, N - k) \sqrt{\frac{CM_E}{n_i}} \quad (8)$$

Donde:

T_α = Valor de Tukey

CM_E = Cuadrado medio del error

n_i = Número de observaciones por tratamientos

k = Número de tratamientos

$N - k$ = Grados de libertad para el error

α = Nivel de significancia

$q_\alpha(k, N - k)$ = Son puntos porcentuales de la distribución del rango estudentizado, que se obtienen de la Tabla 3.

Se declaran significativamente diferentes los pares de medias cuya diferencia muestral en valor absoluto sea mayor que T_α .

5. DISCUSIÓN

Como se indicó previamente, la investigación se llevó a cabo con el propósito de examinar las metodologías empleadas en la caracterización de residuos sólidos en instituciones de educación superior, estableciendo pautas metodológicas tanto para la frecuencia y metodología de muestreo como para el análisis de fuentes generadoras.

Mediante la revisión sistemática, se identificó la ausencia de enfoques estandarizados específicos para las instituciones de educación superior. Los hallazgos corroboran la hipótesis inicial de que existe una escasez de pautas integrales adaptadas a los diversos patrones de generación y composiciones de residuos propios de las instituciones educativas.

La diversidad observada en las metodologías se atribuye a la naturaleza heterogénea de la generación de residuos en diferentes entornos dentro de las instituciones educativas, de los cuales se pueden citar factores como diferentes contextos socioeconómicos, actividades realizadas y sistemas de gestión de residuos, que contribuyen a esta disparidad.

Las limitaciones de este estudio se derivan principalmente de la falta de uniformidad entre las metodologías revisadas, lo que dificulta las comparaciones directas y conclusiones definitivas. Sin embargo, se encontraron similitudes en lo relativo a las frecuencias de muestreo y metodologías estadísticas de análisis de resultados.

Los resultados obtenidos en el presente estudio pueden generalizarse hacia otras instituciones de educación superior, incluso se pueden aplicar a colegios y escuelas que requieran de una caracterización de sus residuos sólidos. El resultado refleja además categorías de composición de residuos sólidos que tienden a ser homogéneos en las instituciones de educación superior.

Los hallazgos subrayan la necesidad crítica de metodologías estandarizadas para la caracterización de residuos específicamente adaptados a las IES. Estas pautas permitirían a las instituciones diseñar estrategias de gestión de residuos dirigidas que estén alineadas con sus composiciones únicas de residuos, fomentando en última instancia iniciativas de sostenibilidad.

En futuras aplicaciones prácticas de los resultados del presente estudio, se recomienda tener en cuenta el nivel socioeconómico, estilo de vida, cultura y actividades destacadas de la población en cuestión, para de esta manera tener certeza de la aplicabilidad de las metodologías recomendadas.

6. CONCLUSIONES

La gestión eficiente de los residuos sólidos en instituciones de educación superior (IES) representa un desafío crucial en la búsqueda de prácticas sostenibles y responsables. La presente revisión bibliográfica sobre las metodologías para la caracterización de residuos sólidos ha revelado una disparidad significativa en enfoques y prácticas utilizadas para tal fin. Los estudios analizados resaltan la variabilidad en frecuencias de muestreo, tamaños de muestra y modelos de validación empleados. Esta diversidad refleja la complejidad inherente a la generación y composición de residuos en entornos educativos.

Con los datos analizados de los diferentes estudios revisados, se realizaron las siguientes recomendaciones para una metodología de muestreo y caracterización de los residuos sólidos en instituciones de educación superior: La frecuencia mínima de muestreo debe ser de una semana, tomando una muestra diaria.

La cantidad de muestra a recolectar al final de la semana es mínima de 2 m³ desde los distintos contenedores internos de almacenamiento temporal, siendo esto la muestra representativa. Es importante que el método de selección sea aleatorio en el sitio testado, evitando sesgos.

Se requiere modelos de validación para evaluar la precisión, confiabilidad y representatividad de los datos obtenidos en el proceso de muestreo y caracterización de residuos sólidos. Estos modelos buscan verificar si las muestras recopiladas son representativas de la población total y si los datos son estadísticamente significativos. Se recomienda análisis de varianza (ANOVA), pruebas estadísticas como la prueba C de Cochran para evaluar la homogeneidad de las muestras, regresión lineal para comprender las relaciones entre variables, y el análisis de distribuciones de probabilidad, así como la asimetría y la curtosis, que ayudan a comprender la forma y dispersión de los datos.

Las variables que se deben analizar son las características físicas, tasas de generación y opcionalmente la composición química. Finalmente, la clasificación se la debe realizar siguiendo las especificaciones de la Tabla 2. De esta manera, al comprender la cantidad y composición de los residuos generados, se pueden implementar medidas para reducir, reciclar y gestionar de manera más efectiva los desechos, fomentando así prácticas más sostenibles.

REFERENCIAS

- [1] M. Ruiz Morales, "Caracterización de residuos sólidos en la Universidad Iberoamericana, Ciudad de México," *Revista internacional de contaminación ambiental*, vol. 28, no. 1, pp. 93-97, nov. 2012. [En línea]. Disponible en: <https://acortar.link/rQ4jMc>
- [2] C. A. De Vega, S. O. Benítez, and M. E. R. Barreto, "Solid waste characterization and recycling potential for a university campus," *Waste management*, vol. 28, pp. S21-S26, 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.03.022>
- [3] L. E. Castillo Meza y M. Luzardo Briceño, "Evaluación del manejo de residuos sólidos en la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga," *Revista facultad de ingeniería*, vol. 22, no. 34, pp. 71-84, jun. 2013. [En línea]. Disponible en: <https://acortar.link/QeUGs7>
- [4] D. M. Rodríguez Tipán y D. V. Simbaña Collaguazo, "Gestión integral de residuos sólidos universitarios para la Comunidad Politécnica del Campus J. Rubén Orellana R," QUITO/EPN/2010, 2010. [En línea]. Disponible en: <https://acortar.link/JqBNb5>
- [5] E. Coyago, K. Gonzales, E. Heredia, y R. G. Sánchez, "Recomendaciones para la caracterización y cuantificación de residuos sólidos universitarios. caso de estudio: Universidad Politécnica Salesiana, Campus Sur, Quito," *La Granja*, vol. 23, no. 1, pp. 68-79, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://acortar.link/uhrBNW>
- [6] C. E. Estupiñán Velíz, B. A. Burgos Carpio, D. E. Carreño Tapia y C. A. Nieto Cañarte, "Caracterización de la gestión integral de residuos sólidos no peligrosos en la universidad técnica estatal de Quevedo," *Polo del Conocimiento*, vol. 7, no. 11, pp. 1435-1451, nov. 2022. [En línea]. Disponible en: <https://acortar.link/Bt3Pmh>
- [7] J. Fraga, "Manejo de Residuos Sólidos en el Campus Universitario," Disponible en: Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad Central del Ecuador, 2004.
- [8] R. J. Pérez Segovia, "Diseño del sistema de gestión de residuos sólidos de la Facultad de Artes de la Universidad Central del Ecuador", Tesis de grado, Universidad Central del Ecuador, Ecuador, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://acortar.link/3RXVyB>
- [9] J. H. P. Monteiro, *Manual de gestión integrada de residuos sólidos municipales en ciudades de América Latina y el Caribe*, 1ra ed. 2006. [En línea]. Disponible en: <https://acortar.link/VckBw8>

- [10] CENSO ECUADOR 2022, "Instituto Nacional de Estadística y Censos", Ecuador, 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.censoecuador.gob.ec/wp-content/uploads/2024/05/Presentacion_Nacional_2da_entrega.pdf
- [11] X. Oña Serrano, O. Viteri Salazar, J. J. C. Benalcázar, y X. B. Guerra, "Caracterización de los residuos sólidos urbanos y desperdicios de alimentos del Distrito Metropolitano de Quito," *Revista Iberoamericana Ambiente & Sustentabilidad*, vol. 5, pp. e230-e230, jul. 2022. [En línea]. Disponible en: <https://acortar.link/i2uYD2>
- [12] "Plan de gestión integral municipal de residuos y desechos sólidos no peligrosos y desechos sanitarios del Distrito Metropolitano de Quito (2022-2032)", Municipio de Quito, Ecuador, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://acortar.link/pMdsR>
- [13] M. Castillo, "Consultoría para la realización de un estudio de caracterización de residuos sólidos urbanos domésticos y asimilables a domésticos para el Distrito Metropolitano de Quito", Distrito Metropolitano de Quito, Ecuador, Informe Ejecutivo, 2012. [En línea]. Disponible en: <https://acortar.link/P1lvKf>
- [14] E. Gómez-Luna, D. Fernando-Navas, G. Aponte-Mayor, y L. A. Betancourt-Buitrago, "Metodología para la revisión bibliográfica y la gestión de información de temas científicos, a través de su estructuración y sistematización", *Dyna*, vol. 81, no. 184, pp. 158-163, 2014, [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.15446/dyna.v81n184.37066>
- [15] J. González de Dios, "Búsqueda de información en Pediatría basada en la evidencia (II): fuentes de información secundarias y primarias", *Revista Española de Pediatría*, vol. 59, no. 3, pp. 259-273, 2003. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10234/188685>
- [16] G. Tchobanoglous, *Gestión integral de residuos sólidos*, Madrid, McGraw-Hill, 1998.
- [17] K. Parizeau, V. Maclaren, and L. Chanthy, "Waste characterization as an element of waste management planning: Lessons learned from a study in Siem Reap, Cambodia," *Resources, conservation and recycling*, vol. 49, no. 2, pp. 110-128, dec. 2006, [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.03.006>
- [18] O. Buenrostro Delgado y I. Israde, "La gestión de los residuos sólidos municipales en la cuenca del lago de Cuitzeo, México", *Revista internacional de contaminación ambiental*, vol. 19, no. 4, pp. 161-169, nov. 2003. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/370/37019401.pdf>
- [19] S. Ojeda Benítez, C. Armijo de Vega, and M. Y. Marquez Montenegro, "Household solid waste characterization by family socioeconomic profile as unit of analysis," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 52, no. 7, pp. 992-999, may. 2008, [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.03.004>
- [20] H. A. Qdais, M. Hamoda and J. Newham, "Analysis of residential solid waste at generation sites," *Waste management & research*, vol. 15, no. 4, pp. 395-406, aug. 1997, [Online] Available: <https://doi.org/10.1006/wmre.1996.0095>
- [21] B. Bolaane and M. Ali, "Sampling household waste at source: lessons learnt in Gaborone," *Waste management & research*, vol. 22, no. 3, pp. 142-148, 2004, [Online] Available: <https://doi.org/10.1177/0734242X04044970>
- [22] K. Hristovski, L. Olson, N. Hild, D. Peterson and S. Burge, "The municipal solid waste system and solid waste characterization at the municipality of Veles, Macedonia," *Waste Management*, vol. 27, no. 11, pp. 1680-1689, 2007. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.09.003>

- [23] A. Vargas Ayala, E. Tucto Cueva, D. M. Luna, O. R. Chávez y M. Nazario Ramirez, "Caracterización de residuos sólidos universitarios y estimación de emisiones de gases de efecto invernadero en dos alternativas de gestión," *South Sustainability*, vol. 3, no. 2. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.21142/SS-0302-2022-e059>
- [24] C. Quintero, M. Teutli, M. González, A. Ruiz, and G. Jiménez, "Manejo de residuos sólidos en instituciones educativas", Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. [En línea]. Disponible en: <https://n9.cl/7kmuap>
- [25] M. L. Ballinas Aquino and D. A. Flores Posada, "Manejo de residuos sólidos en el ámbito escolar," Chiapas, México, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://aidisnet.org/wp-content/uploads/2019/07/262-Mexico-oral.pdf>
- [26] B. Veneros, P. Amaya, Y. Chuan y C. Manchay, "Caracterización y oportunidades de mejora de los residuos sólidos en una institución educativa. La Esperanza (Trujillo-Perú), 2019", *PURIQ, inPress*, vol. 2, no. 3, pp. 328-343. dic. 2020. [En línea]. Disponible en: <https://shs.hal.science/halshs-03093525/>
- [27] R. J. Raudales Osorto, "CARACTERIZACION DE LOS RESIDUOS SOLIDOS URBANOS DEL MUNICIPIO DE SANTA CATARINA PINULA," *Agua, Saneamiento & Ambiente*, vol. 8, no. 1, pp. 29-32, nov. 2013. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.36829/08ASA.v8i1.1481>
- [28] J. P. Parfitt and R. Flowerdew, "Methodological problems in the generation of household waste statistics: an analysis of the United Kingdom's National Household Waste Analysis Programme," *Applied Geography*, vol. 17, no. 3, pp. 231-244, jul. 1997. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0143-6228\(96\)00031-8](https://doi.org/10.1016/S0143-6228(96)00031-8)
- [29] L. St and S. Wold, "Analysis of variance (ANOVA)," *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, vol. 6, no. 4, pp. 259-272, nov. 1989. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/0169-7439\(89\)80095-4](https://doi.org/10.1016/0169-7439(89)80095-4)



Aprovechamiento de residuos agrícolas para producción de electricidad en Latinoamérica: Revisión literaria de casos exitosos en México, Colombia y Brasil

(Agricultural Waste for Electricity Production in Latin America: A Literature Review of Successful Cases in Mexico, Colombia, and Brazil)

Yulissa del Cisne Marín Apolo, María Eliza Vega Iñiguez, Danny Ochoa-Correa
Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador
yulissa.marin@ucuenca.edu.ec, eliza.vegai@ucuenca.edu.ec, danny.ochoac@ucuenca.edu.ec

Resumen: En América Latina, diversos residuos ofrecen oportunidades para la generación de energía eléctrica, promoviendo una matriz energética más sostenible. Ante esta realidad, varios países de la región se encuentran en una transición energética y con investigaciones encaminadas hacia este objetivo. La investigación reportada en este artículo persigue ofrecer un panorama general acerca de la disponibilidad de residuos agrícolas para la generación de electricidad. La investigación se enfoca en tres países latinoamericanos: México, Colombia y Brasil; líderes en este avance. El objetivo principal es evaluar la viabilidad y el grado de aprovechamiento de los recursos energéticos derivados de residuos agrícolas en cada país, mediante un análisis comparativo de datos sobre bioenergía. La metodología incluye una revisión bibliográfica, enfocada en la cantidad y tipo de residuos agrícolas en cada país, así como la revisión de proyectos existentes en materia de bioenergía. Se obtuvo que México produjo entre 17,5-58,1 millones de toneladas anuales de residuos agrícolas; Colombia, alrededor de 21,54 millones de toneladas; y Brasil, con 798,34 millones de toneladas, siendo este último con la mayor cantidad debido a su extensión territorial. Este estudio ha revelado que, aunque Brasil y México utilizan eficientemente recursos como el bagazo de caña, y Colombia el aceite de palma para generar electricidad, aún hay áreas de mejora en el manejo de los residuos.

Palabras clave: biomasa, residuos agrícolas, energía eléctrica.

Abstract: In Latin America, various wastes offer opportunities for the generation of electric energy, promoting a more sustainable energy matrix. Given this reality, several countries in the region are undergoing an energy transition and are conducting research aimed at this objective. The research reported in this article seeks to provide an overview of the availability of agricultural waste for electricity generation. The research focuses on three Latin American countries: Mexico, Colombia and Brazil; leaders in this advancement. The main objective is to evaluate the viability and degree of use of energy resources derived from agricultural waste in each country, through a comparative analysis of data on bioenergy. The methodology includes a bibliographic review, focused on the quantity and type of agricultural waste in each country, as well as a review of existing bioenergy projects. It was found that Mexico produced between 17.5-58.1 million tons of agricultural waste annually; Colombia, around 21.54 million tons; and Brazil, with 798.34 million tons, the latter having the largest amount due to its territorial extension. This study has revealed that, although Brazil and Mexico efficiently use resources such as sugarcane bagasse, and Colombia uses palm oil to generate electricity, there are still areas for improvement in waste management.

Keywords: biomass, agricultural residues, electricity.

1. INTRODUCCIÓN

Ante la creciente conciencia mundial sobre la necesidad de transitar hacia fuentes de energía sostenibles, América Latina emerge como un territorio estratégico para la exploración de alternativas que reduzcan la dependencia de los combustibles fósiles. Pese a los avances globales en la transición hacia energías sostenibles, los desafíos persisten, especialmente en los países en vías de desarrollo de América Latina. En este escenario, la biomasa proveniente de residuos agrícolas se presenta como una fuente potente de energía, con un gran potencial para contribuir a la generación eléctrica en la región.

América Latina está transitando hacia las energías renovables debido a sus vastos recursos. Los países sudamericanos cuentan con un potencial de energía renovable que sería suficiente para cubrir la demanda energética local actual y futura [1]. La región tiene un potencial técnico para residuos agrícolas y agroindustriales de 3 EJ/año (exajulio por año), similar al obtenido para el sureste asiático [2]. La gestión adecuada de estos residuos es crucial para abordar los desafíos ambientales y para capitalizar su potencial energético. Sin embargo, aún quedan estudios y avances por realizar en relación con la generación basada en biomasa, para que los países latinoamericanos puedan avanzar hacia una diversificación de su matriz energética y aprovechar plenamente todos sus recursos disponibles.

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de las actividades agrícolas representaron el 21 % del total mundial, situándose como el segundo mayor emisor. Estas emisiones agrícolas provienen de prácticas como la deforestación, las emisiones generadas por el ganado, la gestión de suelos y nutrientes, incluyendo el uso de fertilizantes basados en combustibles fósiles, el empleo de maquinaria agrícola, y la quema de biomasa [3]. No obstante, se espera una reducción significativa de estas emisiones para 2030, mediante acciones como el fortalecimiento del manejo de cultivos y ganado y la generación a partir de energía renovable [4].

Históricamente, tanto en Colombia y Brasil, la generación eléctrica se realiza principalmente a través de la operación de grandes centrales hidroeléctricas [4], [5], a diferencia de México, donde esta actividad depende de fuentes basadas en combustibles fósiles [6]. Dependiendo predominantemente de fuentes hídricas para la generación eléctrica en un país puede presentar desafíos debido a la estacionalidad del recurso. Por otro lado, un país que basa mayoritariamente su producción de electricidad en combustibles fósiles necesita avanzar hacia un modelo energético sostenible. Resulta, por tanto, menester encontrar un equilibrio en la matriz energética de un país para diversificar las fuentes de generación eléctrica. Esto permitiría reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, al disminuir la dependencia de los combustibles fósiles, y también el aprovechamiento más eficiente de los recursos disponibles.

En Ecuador, el país cuenta con varias centrales eléctricas que aprovechan residuos agrícolas para la generación eléctrica. Entre las más importantes se encuentran San Carlos (73,60 MW), Ecoelectric (35,20 MW) y Ecudos A-G (27,60 MW), que utilizan los residuos del proceso de producción de azúcar para cogenerar electricidad [7]. Durante seis meses al año, estas centrales operan con turbogeneradores que, además de abastecer los procesos internos de las industrias, inyectan el excedente al Sistema Nacional Interconectado. No obstante, la generación de electricidad mediante biomasa representa solo una fracción mínima dentro de la matriz energética nacional, alcanzando apenas un 1,62 %. Esto indica que, aunque la biomasa contribuye a la conformación de la oferta de generación eléctrica, su impacto en la producción total de Ecuador es limitado. Esta realidad resalta la necesidad de fortalecer y ampliar el uso de la biomasa como una alternativa viable dentro del contexto energético ecuatoriano, con el objetivo de diversificar aún más la matriz energética y reducir la dependencia de fuentes convencionales.

En el contexto latinoamericano, el reciente interés en la biomasa como recurso energético alternativo ha llevado a un creciente esfuerzo por encontrar soluciones sostenibles que impulsen

el acceso a la electricidad y fomenten prácticas de explotación energética respetuosas con el medio ambiente. Países líderes en este ámbito, como México, Colombia y Brasil, han sido pioneros en el desarrollo de iniciativas que aprovechan la biomasa para aplicaciones de generación eléctrica.

Este artículo presenta los resultados de una exhaustiva prospección de la literatura enfocada en explorar el potencial de los residuos agrícolas para la producción de bioenergía en México, Colombia y Brasil, con énfasis en la cuantificación de la biomasa disponible y la evaluación de tecnologías para su conversión en electricidad. El estudio responde a tres preguntas clave: disponibilidad y tipos de residuos agrícolas, tecnologías empleadas para su aprovechamiento y el grado de integración en las matrices energéticas nacionales, comparando su desempeño con otras fuentes renovables. Al analizar las características y desafíos específicos de cada país, esta investigación busca aportar al estado del conocimiento general sobre la biomasa tomando como base países líderes en América Latina en este tópico y, además, ofrecer perspectivas prácticas que impulsen la adopción de enfoques sostenibles en la matriz energética en un ámbito regional, nacional y local.

2. METODOLOGÍA

América Latina cuenta con varias zonas donde las condiciones ambientales, climáticas, de terreno y otras características favorecen el uso de la biomasa como una fuente de energía prometedora, impulsada por políticas y programas en varios países. Esta investigación se ha delimitado en Colombia, México y Brasil, tres países latinoamericanos con un gran avance en materia de producción de biocombustibles y una destacada participación en la generación de energía renovable a partir de biomasa. Esta investigación busca responder a las siguientes preguntas clave: ¿Qué tipos y volúmenes de residuos agrícolas están disponibles en cada uno de los tres países seleccionados para la producción de bioenergía? ¿Qué tecnologías están siendo utilizadas actualmente para convertir esos residuos en electricidad y qué nivel de eficiencia y sostenibilidad ofrecen? ¿Cuál es el grado de integración de la generación de bioenergía en las matrices energéticas nacionales de México, Colombia y Brasil, y cómo se compara su desempeño en relación con otros tipos de energías renovables?

El marco metodológico diseñado para este estudio consiste en la recopilación de información que aborde el potencial de generación de energía a partir de residuos agrícolas en los países seleccionados por medio de una revisión exhaustiva de la literatura. En esta, se realizó un análisis del potencial energético, considerando la cantidad y tipo de residuos generados y su idoneidad para la generación de bioenergía. Además, se examinó las tecnologías actuales de generación eléctrica a partir de biomasa en cada país, evaluando su eficiencia y sostenibilidad.

La revisión de literatura se tomó como fuentes de consulta bases de datos prestigiosas como: Researchgate, Scopus, Google Academic y ScienceDirect. Se utilizaron los términos de búsqueda: “BIOMASA”, “BIOMASS”, “BIOENERGÍA”, “BIOENERGY”, “BIOCOMBUSTIBLE”, “BIOFUEL”, complementados con el nombre de los tres países seleccionados. La búsqueda se realizó en el periodo comprendido entre 2010 y 2024. La Figura 1 muestra la secuencia de búsqueda seguida para la selección de los estudios, la cual revela que inicialmente, se identificaron 98 estudios mediante la búsqueda en bases de datos. Después de aplicar criterios de exclusión, como la falta de referencia a los países seleccionados o la limitada accesibilidad al contenido, se redujo el número a 58 estudios. Finalmente, tras una revisión más detallada del título, resumen e introducción de los estudios, se seleccionaron 28 estudios para el análisis final.

La secuencia de búsqueda y filtrado de estudios siguió un proceso estructurado y riguroso, similar al que se utiliza en las revisiones sistemáticas de literatura mediante el método PRISMA (Elementos Preferidos para Reportar Revisiones Sistemáticas y Metaanálisis). No obstante, es importante señalar que la revisión reportada en este artículo no tiene el carácter de una revisión

sistemática estricta. Se aplicó periféricamente algunos aspectos del método PRISMA, como la organización del proceso de búsqueda y la creación de un diagrama de flujo que visualiza los pasos seguidos para seleccionar y excluir estudios. Esta estructura aporta transparencia y rigor, permitiendo que el lector entienda claramente cómo se llevó a cabo la revisión.

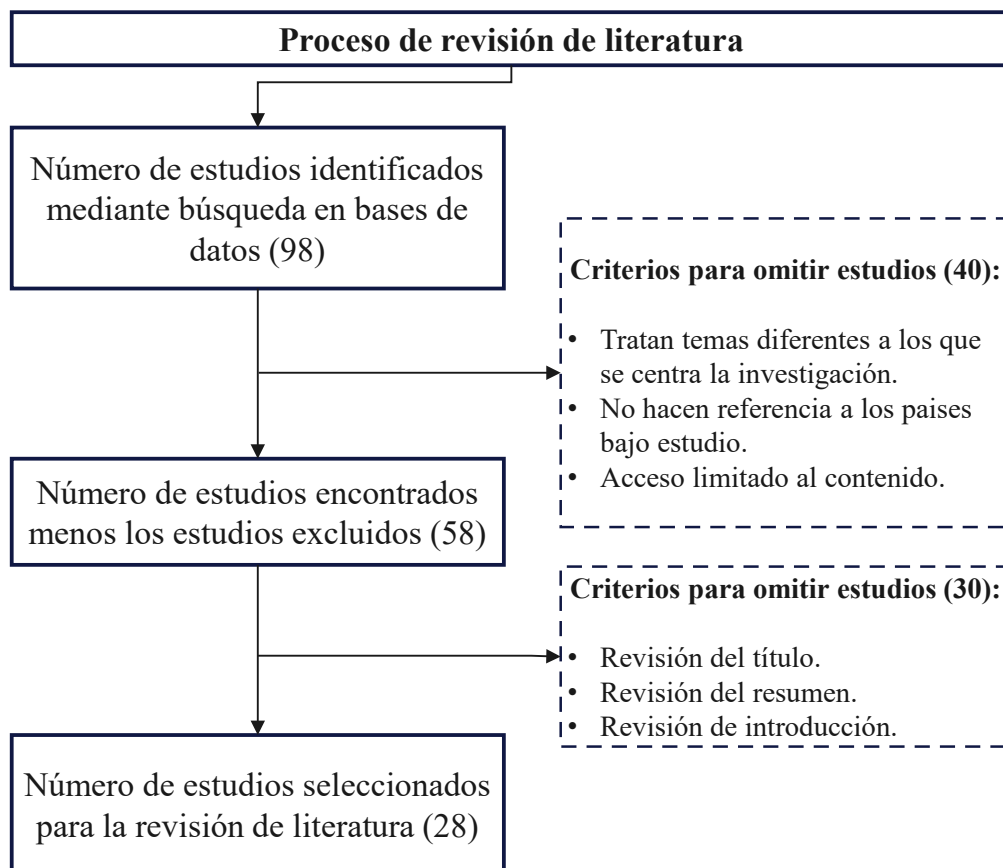


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso seguido para la selección de estudios.

La revisión de literatura basada en los 28 estudios seleccionados presenta una distribución interesante en términos de temporalidad y tipo de fuente. En cuanto a los artículos por año (Figura 2(a)), se observan dos recursos de actualidad, 2024. Las estadísticas también muestran una concentración significativa en 2023, con 9 artículos, mientras que años como 2009, 2010, 2013 y 2016 tienen solo 1 artículo cada uno. Esto sugiere que, en el último año ha habido un creciente interés reciente en la investigación sobre bioenergía y biomasa en los tres países objetivo. Respecto al tipo de obras bibliográficas cuya estadística se ilustra en la Figura 2(b), se aprecia que en la muestra seleccionada predominan los artículos de revista, con 15 ítems, lo que resalta el valor de la literatura revisada por pares en este campo. Además, se incluyen 7 reportes, 2 libros, y una menor cantidad de notas de prensa y artículos de conferencias, reflejando una amplia variedad de fuentes de información.

En términos de la aplicación de la biomasa por país, el mapa de la Figura 3 muestra que Colombia lidera la temática con 7 estudios, seguida de Brasil con 6 y México con 5; también se incluyen trabajos de otras regiones como Costa Rica, Bolivia, Argentina, Chile y Ecuador, lo que demuestra un enfoque geográficamente diverso. La frecuencia de estudios en Colombia, Brasil y México refleja su papel clave en la investigación y desarrollo de la bioenergía en América Latina.

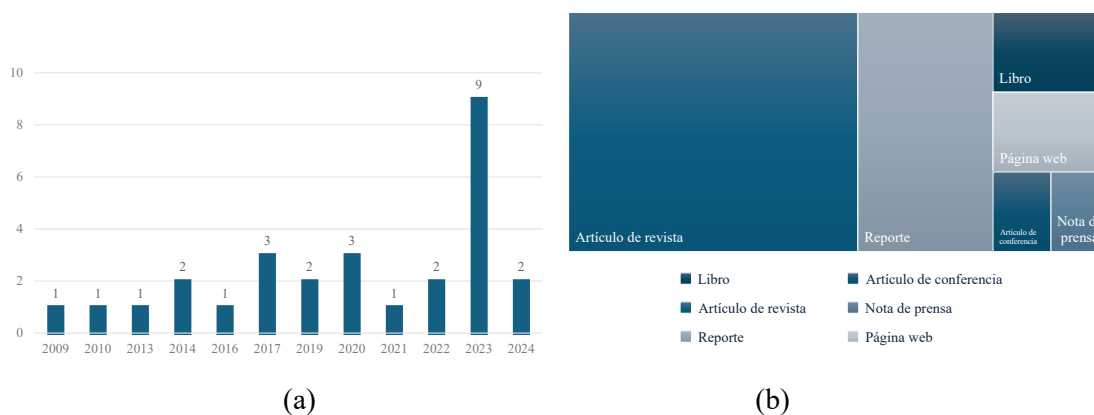


Figura 2. Estadísticas bibliométricas: a) Publicación de obras por año, b) Distribución de publicaciones por fuente.



Figura 3. Investigación y aplicación de soluciones basadas en biomasa para producción de electricidad por país.

La Tabla 1 presenta un resumen de los ítems seleccionados para la revisión de la literatura, cuya discusión se presenta en las siguientes subsecciones. En esta tabla se ofrece información detallada sobre el título de cada obra, los autores, un resumen conciso de los temas abordados, el año de publicación, el país de enfoque y los resultados más relevantes.

Tabla 1. Resumen de la literatura consultada para el proceso de síntesis.

Nº	Título	Autores	Resumen	Año	País	Ref.
1	Holistic assessment of Brazil's bioenergetic potential	De Sousa, Silva Lora, De Lisboa, Filho, Del Olmo	Análisis de uso energético de residuos agrícolas y forestales, excretas animales y otros en Brasil.	2023	Brasil	[27]
2	The energy potential of agriculture, agroindustrial, livestock, and slaughterhouse biomass wastes through direct combustion and anaerobic digestion. The case of Colombia	Sagastume Gutiérrez, Cabello Eras, Hens, Vandecasteele	Potencial energético de residuos agrícolas y ganaderos en Colombia usando combustión y digestión anaeróbica.	2020	Colombia	[4]
3	Agricultural residue-based bioenergy: Regional potential and scale-up strategies	IRENA	Estimación de residuos agrícolas para bioenergía en diversas regiones del mundo.	2023	-	[2]

4	Assessment of energy production potential from agricultural residues in Bolivia	Morato, Vaezi, Kumar	Cuantificación de residuos agrícolas en Bolivia para generación de energía.	2019	Bolivia	[1]
5	The nexus of renewable energy-agriculture-environment in BRICS	Liu, Zhang, Bac	Relación entre energía renovable, agricultura y emisiones de CO2 en los países BRICS.	2017	BRICS	[3]
6	GIS-based modeling of residual biomass availability for energy and production in Mexico	Lozano-García, Santibañez-Aguilar, Lozano, Flores-Tlacuahuac	Modelo SIG para identificar áreas con potencial energético de biomasa en México.	2020	México	[8]
7	Annual biomass variation of agriculture crops and forestry residues, and seasonality of crop residues for energy production in Mexico	Honorato-Salazar, Sadhukhan	Análisis de biomasa de cultivos y residuos para energía en México.	2020	México	[6]
8	Evaluation of Potential Substrates for Biogas Production in Colombia using Anaerobic Digestion Systems	Ramón, Vásquez, Delgado, Domínguez-Carvajal, Mosquera-Mena, Molina, Peñuela-Vásquez	Identificación de sustratos para biogás en Colombia usando digestión anaeróbica.	2023	Colombia	[10]
9	Evaluación de diferentes métodos para la transformación de la pulpa de café en abono orgánico en fincas cafeteras	Moreno Clavijo, Romero Jiménez	Métodos para convertir pulpa de café en abono orgánico en fincas.	2016	Colombia	[9]
10	Biogas Production from Anaerobic Co-digestion of Palm Oil Mill Effluent and Empty Fruit Bunches	Saelor, Kongjan, O-Thong	Producción de biogás a partir de efluentes de aceite de palma y racimos vacíos.	2017	Tailandia	[11]
11	Renewable energy statistics 2023	IRENA	Estadísticas globales de energía renovable en la última década.	2023	-	[18]
12	Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad	Rincón, Silva	Fuentes y sostenibilidad de la bioenergía en la región iberoamericana.	2014	Colombia	[5]
13	Biofuel production in Latin America: A review for Argentina, Brazil, Mexico, Chile, Costa Rica and Colombia	Vega, Bautista, Campos, Daza, Vargas	Revisión de biocombustibles en Argentina, Brasil, México, Chile, Costa Rica y Colombia.	2024	-	[12]
14	Produção e uso de biocombustíveis no Brasil	Vidal	Brasil como productor destacado de etanol y biodiésel.	2019	Brasil	[17]

15	Atlas de los biocombustibles líquidos 2021-2022	Torroba, Orozco	Atlas del potencial de biocombustibles en América Latina.	2022	-	[26]
16	Biomass as energy source in Brazil	Lora, Andrade	Potencial de biomasa como fuente de energía en Brasil.	2009	Brasil	[28]
17	Biorefinery study of availability of agriculture residues and wastes for integrated biorefineries in Brazil	Forster-Carneiro, Berni, Dorileo, Rostagno	Residuos agrícolas en Brasil para integrar en biorrefinerías.	2013	Brasil	[15]
18	Censo Agro 2017	IBGE	Censo Agro 2017: residuos agrícolas y potencial energético en Brasil.	2017	Brasil	[14]
19	Conversión energética de la Biomasa: bases para su aprovechamiento	Manrique, Aien, Salvo, Binda, Subelza, Mosconi, Balderrama	Tecnologías de conversión energética de la biomasa en América Latina.	2023	-	[13]
20	Informe de Avance Proyectos de Generación - Julio 2023	UPME	Actualización de proyectos energéticos en Colombia.	2023	Colombia	[32]
21	Plataforma Nacional de Energía, Ambiente y Sociedad	Conahcyt	Repositorio nacional de energía y cambio climático en México.	2023	México	[19]
22	Atlas del potencial energético de la Biomasa residual en Colombia	SIAME	Atlas del potencial energético de biomasa en Colombia.	2023	Colombia	[21]
23	Distribution and potential of bioenergy resources from agricultural activities in Mexico	Valdez-Vazquez, Acevedo-Benítez, Hernández-Santiago	Residuos agrícolas en México para bioenergía mediante combustión y fermentación.	2010	México	[25]
24	Global Electricity Review 2021	Ember	Disminución del uso de carbón impulsada por energía eólica y solar.	2021	-	[29]
25	Technologies for biogas to electricity conversion	Kabeyi, Olanrewaju	Conversión de biogás a electricidad mediante diversas tecnologías.	2022	-	[24]
26	Introducción a las tecnologías de aprovechamiento de biomasa	Arauzo, Bimbela, Ábrego, Sánchez, Gonzalo	Tecnologías para valorizar la biomasa y diversificación energética.	2014	España	[23]
27	Informe Perspectiva Sectorial - Energía	Castro, Mojica	Perspectiva del sector energético colombiano en 2023.	2023	Colombia	[31]

28	Plan Maestro de Electricidad – Ministerio de Energia y Minas	No Author	Plan maestro para la implementación de energías renovables en Ecuador.	2024	Ecuador	[7]
----	--	-----------	--	------	---------	-----

2.1. Residuos agrícolas disponibles para aprovechamiento energético

• México

En México, los residuos agrícolas se clasifican en primarios y secundarios. Los primeros son restos vegetales en el campo después de la cosecha del producto principal, como paja, tallos y hojas. Los segundos son residuos procesados, como cáscaras, cascarillas, bagazo, mazorcas de maíz y cascarilla de café [8].

En este país, la disponibilidad total de residuos varía entre 17,5 y 58,1 millones de toneladas de materia seca al año, divididas en 14,5 a 50,7 millones de toneladas para residuos primarios y 3,0 a 7,4 millones de toneladas para residuos secundarios. Destacan los residuos de maíz y sorgo, representando un 43,9 % y 31,3 %, respectivamente del total de residuos primarios. Le siguen en importancia los residuos de caña de azúcar (9,9 %), trigo (7,7 %), cebada (1,8 %) y fréjol (1,2 %) [6]. En cuanto a los residuos secundarios, maíz y caña de azúcar representan el 53,8 % y 40,7 %, respectivamente, seguidos, en menor medida, por residuos de café (2,1 %) y bagazo de agave (1,8 %). El maíz es el cultivo más importante en México y, por lo tanto, produce la mayor cantidad de residuos brutos disponibles [6].

En México, cuatro productos principales ocupan más del 80 % de la superficie dedicada al cultivo: la caña de azúcar, maíz, trigo y sorgo. En la Tabla 2 se detallan los datos en toneladas de materia seca por año (tMS/año) para cada uno de estos cultivos durante la temporada de lluvias. La Figura 4 presenta la distribución y la cantidad de residuos agrícolas primarios de estos productos en el territorio.

Tabla 2. Residuos del sector agrícola disponibles más importantes en México.

Residuo	Producción (tMS/año)
Caña	15,00
Maíz	44,00
Trigo	5,02
Sorgo	4,50

Fuente: [6].

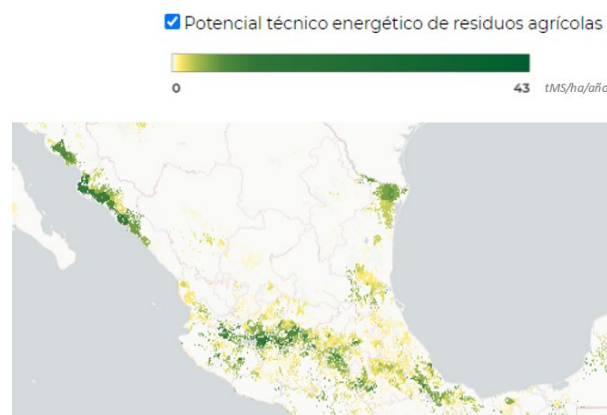


Figura 4. Potencial energético de residuos agrícolas en toneladas de materia seca por hectárea por año. Fuente: [6].

- **Colombia**

Según Sagastume et al. [4], la disponibilidad de residuos agrícolas para aplicaciones energéticas está condicionada por los procedimientos de cosecha. Aunque algunos residuos, como los de caña de azúcar, caña de panela, plátano, banano, papa, arroz, café, entre otros, se suelen utilizar para enriquecer el suelo, otros, como la paja de caña de azúcar, tienen potencial como biomasa. Sin embargo, la recolección a largo plazo de residuos agrícolas con fines energéticos es limitada. Por otro lado, los residuos agroindustriales están totalmente disponibles para aplicaciones energéticas, dependiendo de la cantidad de la producción agrícola [4].

En Colombia, los principales cultivos generadores de residuos agrícolas y agroindustriales incluyen la caña de azúcar, el plátano, el arroz, el banano, la piña, el maíz, el aceite de palma, el café, la papa y la yuca. Sin embargo, no todos estos residuos están completamente disponibles para su uso energético. Entre los cultivos mencionados, los que más residuos ofrecen para aprovechamiento energético son el banano, con $5642,133 \times 10^3$ t/año; el café, con $4133,800 \times 10^3$ t/año; la piña, con $5199,200 \times 10^3$ t/año; y el aceite de palma, con $3726,100 \times 10^3$ t/año disponibles. Estos hallazgos destacan la importancia de identificar las fuentes más relevantes de residuos con potencial energético. Los resultados expuestos en el estudio de Sagastume Gutiérrez et al. [4] en lo que respecta a la cantidad de residuos disponibles en el sector agrícola y agroindustrial para su aprovechamiento energético se sintetizan en la Tabla 3 y en la Figura 5.

Tabla 3. Residuos del sector agrícola disponibles para aprovechamiento energético en Colombia.

Cultivo	Residuos agrícolas disponibles (10^3 t/año)	Residuos agroindustriales (10^3 t/año)	Total de residuos (10^3 t/año)
Caña de azúcar	0,000	7,993	7,993
Plátano	571,350	0,014	571,364
Papas	0,000	0,023	0,023
Arroz	0,000	0,509	0,509
Yuca	1182,560	0,344	1182,904
Banano	320,130	5322,003	5642,133
Maíz	679,500	0,000	679,500
Aceite de palma	0,000	3726,100	3726,100
Panela de caña	0,000	370,600	370,600
Cítricos	0,000	9,400	9,400
Café	2329,100	1804,700	4133,800
Piña	5015,700	183,500	5199,200
Tomate	0,000	11,400	11,400

Fuente: [4].

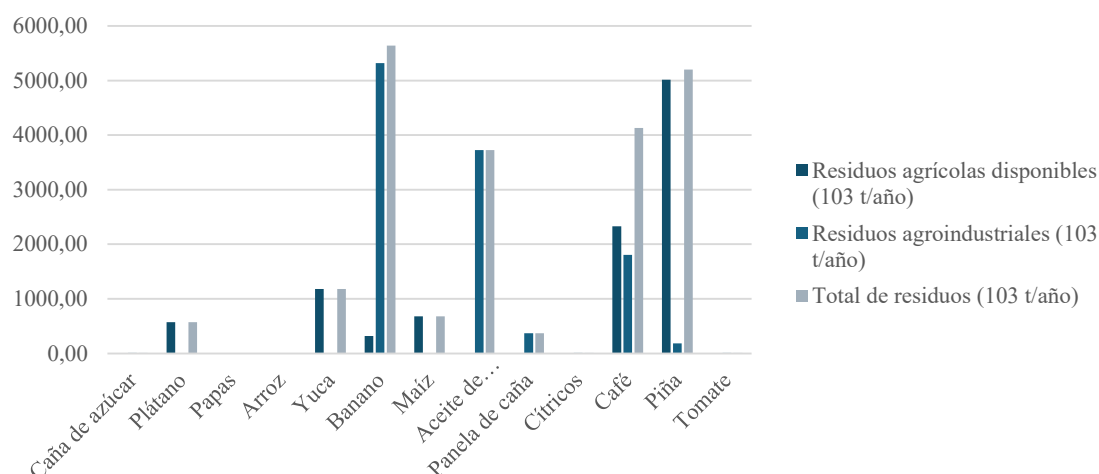


Figura 5. Disponibilidad de residuos agrícolas para aprovechamiento energético Colombia (103 t/año) [4].

La industria del café en particular es una de las más importantes del país, reportando una producción de 13,8 millones de sacos de café entre los años 2017-2018, según la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia [9]. Esta actividad agroindustrial genera grandes cantidades de pulpa y mucílago, con altos contenidos de azúcar, que son un potencial sustrato para la producción de biogás por medio de digestión anaerobia [10].

Asimismo, la industria del aceite de palma genera una gran cantidad de subproductos, tales como fibras (12 %), almendras o cascarones de palma (5 %), racimos vacíos o raquis (23 %), y aguas residuales de cada racimo de frutas frescas procesadas [11]. Otro importante residuo de esta actividad es el efluente de molino de aceite de palma (POME, por sus siglas en inglés). Se estima que, por cada tonelada de racimos frescos de frutas procesadas, se producen de 0,5 a 0,7 m³ de POME. Este subproducto se ha implementado como materia prima para la producción de biogás a nivel industrial en países con una alta producción de aceite de palma, como Malasia e Indonesia. Bajo condiciones específicas de temperatura, se puede llegar a producir 28 m³ de biogás a partir de 1 m³ de POME [10]. El cultivo de aceite más utilizado para la producción de biodiesel es la palma africana, con un área potencial de cultivo de 150000 hectáreas. Estudios internacionales afirman que el biodiesel producido en Colombia se encuentra entre los mejores del mundo [12].

• Brasil

Los residuos agrícolas emergen como una opción con alto potencial para obtener bioenergía en la actualidad. Con millones de toneladas de desechos disponibles anualmente, provenientes de la producción agroindustrial, estos recursos son accesibles y continuos. Una gestión eficiente ofrece oportunidades de reutilización sin generar costos adicionales. Es importante tener en cuenta un estudio de la viabilidad de los residuos agrícolas como fuente de bioenergía, considerando el potencial energético de la materia, el territorio y las características climáticas de la región. En algunos casos, una fracción del residuo se queda en el terreno para mejorar su mantenimiento [13].

De acuerdo con la actualización (2021-2022) anual del Atlas Nacional de Brasil Milton Santos 2010, con mapas elaborados con información del IBGE y otras instituciones públicas [14] se obtuvo información de datos estadísticos de productos agrícolas. La Tabla 4 resume los principales datos de producción de cultivos y residuos [14], [15].

Tabla 4. Cultivos y residuos del sector agrícola disponibles en Brasil.

Cultivo/Residuo	Producción (10⁶ t/año)	Coefficiente de Residuo (CR)	Cantidad de Residuo (10⁶ t/año)
Caña de azúcar/bagazo	638,70	0,90	574,83
Maíz/tallo, mazorca	39,30	1,00	39,30
Soja/tallos	103,20	1,40	144,48
Arroz/paja, cascarilla	11,10	1,70	18,87
Algodón/ramas	3,70	2,45	9,07
Trigo/paja	4,70	1,30	6,11
Yuca/tallo, ramas	6,60	0,80	5,28
Café/cascarilla	1,90	0,21	0,40

Fuente: [14], [15].

Según estadísticas a nivel mundial [16], Brasil es el mayor productor de azúcar y el segundo productor de etanol, consolidándose como líder latinoamericano en la producción de energía a partir de biomasa de caña de azúcar. Para este país, se tiene que la producción del biodiesel usa como principal materia prima la soya, aunque también ricino, sésamo, girasol, o palma aceitera. En las regiones sur y centro-oeste del país existe la mayor producción de soya, lo que concentra la mayor producción de biodiesel en estas áreas [17]. La agroindustria de la soya en Brasil involucra empresas que participan desde la producción hasta la comercialización, siendo así que varias de estas empresas son grandes productoras de biodiesel.

Brasil, gracias a la gran biodiversidad y oportunidades para el trabajo agrícola, posee un gran potencial como productor de bioetanol de primera y segunda generación, siendo la caña de azúcar su principal materia prima. Sin embargo, el desarrollo del bioetanol de caña de azúcar se encuentra limitado por la competencia con otros cultivos alimenticios y la necesidad de expandir los territorios de cultivo [12].

2.2. Potencial energético a partir de residuos agrícolas

• México

En la literatura revisada se discute la variación en el potencial bioenergético total en México, que varía de 313,4 a 1039,4 PJ/año (Petajoules por año), debido a la variación en la producción de cultivos y la disponibilidad de residuos [8]. De forma general, en la Tabla 5 se utiliza la unidad MtMS/a, que corresponde a millones de toneladas de materia seca por año. Esta tabla ofrece una visión general del potencial energético de la biomasa, desglosada por tipo, facilitando así la evaluación de la capacidad energética de cada categoría [5].

Según estudios revisados, la caña de azúcar es el producto con mayor potencial para generación eléctrica, así como para pilas de combustible de hidrógeno en México. Datos actualizados por la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) revelan que el bagazo de caña en México cuenta con una capacidad de generación de energía de 816 MW en 2022. Además, se estima un potencial de generación de bioenergía de 984 MW, una capacidad de 66 MW de biogás y 918 MW de biocombustibles sólidos y residuos renovables para el mismo año [18].

Pese a que México se ubica dentro de los 13 mayores productores de alimentos en el mundo y cuenta con 818 tipos de productos que generan significantes cantidades de residuos orgánicos, apenas se aprovecha el 0,4 % de su capacidad total de 86154 MW para bioenergía [19]; una muestra de que el potencial energético basado en residuos agrícolas está claramente subutilizado en México.

Tabla 5. Potencial energético de acuerdo con el tipo de biomasa en México.

Tipo	Producción (MtMS/a)	Potencial energético (PJ/año)
Residuos industriales de cultivos (bagazo y otros)	29	431
Residuos agrícolas de cosechas (RAC)	13	227
Residuos de cultivos alimenticios y forrajeros	15	114
Residuos agrícolas de cosechas de cultivos dedicados	8	86
Caña de azúcar para etanol	206	338
Aceite de palma aceitera para biodiesel	13	121

Fuente: [5].

Las plantas de producción de electricidad y/o calor que utilizan de combustible el biogás o bagazo, registran una capacidad instalada que va desde aproximadamente 70 kW hasta los 50 MW [19]. En la Figura 7 se presenta las diferentes centrales eléctricas en operación con generación a partir de biomasa en México, en donde destaca la planta generadora Tampico Renewable Energy con la mayor producción de electricidad (180,33 GWh) proveniente del aprovechamiento del bagazo de caña [20].

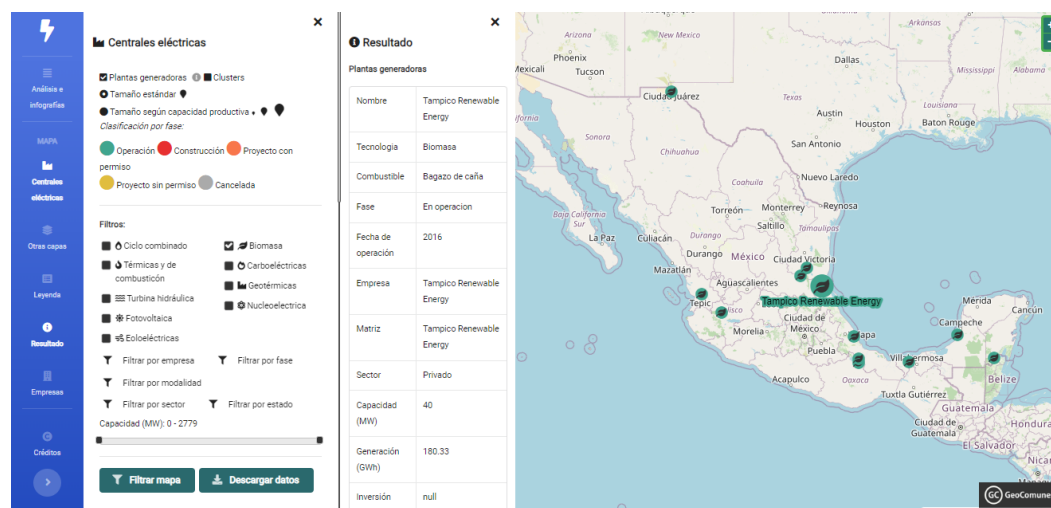


Figura 6. Centrales eléctricas de generación a partir de biomasa en México [20].

• Colombia

Según Sagastume Gutiérrez et al. [4], el potencial energético de los residuos agrícolas varía dependiendo de su contenido de humedad y del método de conversión. Aquellos con menos del 50 % de humedad tienen potenciales energéticos entre 2000 y 6000 kWh/t (kilovatios-hora por tonelada) con combustión directa, mientras que los que tienen más del 50 % de humedad ofrecen entre 100 y 3000 kWh/t con digestión anaeróbica. En general, la combustión directa produce un mayor potencial energético que la digestión anaeróbica para la misma fuente de biomasa. Los resultados de este estudio se sintetizan en la Tabla 5.

El análisis revela que los desechos agrícolas, ganaderos y agroindustriales potencialmente generan entre 60 y 120 GWh de energía mediante combustión directa o digestión anaeróbica. Específicamente, los desechos agrícolas se destacan como una fuente con un enorme potencial energético, capaz de satisfacer significativamente la demanda eléctrica actual en Colombia. En 2022, el país contaba con una capacidad instalada de generación de 9 MW a partir de biogás [18], principalmente generado a partir de estiércol y residuos sólidos municipales. Además, según estadísticas de IRENA [18], se utilizó el bagazo de caña para generar 387 MW de electricidad.

La Figura 7 muestra el mapa del potencial energético municipal anual de los residuos agrícolas, obtenido del Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia [21].

Tabla 6. Potencial energético por residuo en Colombia.

Cultivos	Residuo	Potencial energético (kWh/t)	
		Combustión directa	Digestión anaeróbica
Caña de azúcar	AW	2594,8	803,3
	Bagazo	2062,9	1171,1
	Torta de filtrado	2144,8	1151,1
Plátano	Raquis	-	120,9
	Pseudo-tallo	-	202,5
	Desechos de plátano	-	538,1
	Cáscara	-	280,6
Papas	Tallos y hojas	-	851,6
	Cáscara	-	423,5
Arroz	Tallos	3850,4	1637,7
	Cáscara	4187,5	1277,8
Yuca	Tallos	3716,7	1510,6
	Rizoma	2947,2	1378,0
	Cáscara	-	598,2
	Bagazo	-	362,0
Banano	Raquis	-	120,0
	Pseudo-tallo	-	202,0
	Desechos de plátano	-	538,1
	Cáscara	-	1962,4
Maíz	Rastrojo	3985,3	1831,4
	Mazorca	3939,9	1675,3
	Residuo de la planta	4433,9	1920,9
Aceite de palma	Cáscara	4634,9	592,4
	Fibra	4967,3	1794,0
	Racimos vacíos	5178,9	1849,0
	POME	-	268,4
Panela de caña	AW	2594,8	1171,1
	Bagazo	2062,9	803,3
Cítricos	Cáscara, semillas	3844,4	2755,7
Café	Pulpa	164,7	272,0
	Cascarilla	4386,3	1187,7
	Tallos cortados	4338,0	2126,1
Piña	Rastrojo	4527,8	2022,4
	Corona	4750,0	2491,5
	Núcleo	-	427,3
	Cáscara	-	427,3
Tomate	Hojas	5905,0	1794,3
	Tallo	5893,7	1794,3
	Cáscaras	5718,1	447,4
	Semillas	5928,4	447,4

Fuente: [4].

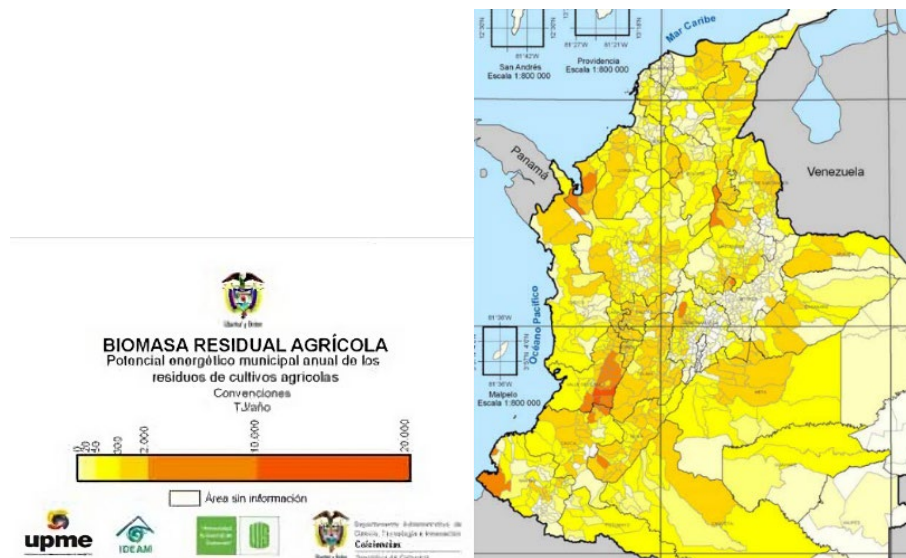


Figura 7. Mapa del potencial energético municipal anual de los residuos agrícolas en Colombia [21].

- **Brasil**

Brasil cuenta con una amplia reserva de energía primaria (13000 PJ), principalmente derivada de biomasa residual, concentrada en restos de cultivos clave como caña de azúcar, maíz y soya en microrregiones del centro-oeste y sureste del país. Asimismo, investigaciones sugieren que la integración de la biomasa como fuente de energía renovable puede beneficiar las actividades agrícolas y reducir impactos ambientales en Brasil [5].

El bagazo de la caña de azúcar representa el mayor porcentaje de la energía obtenida de la biomasa (Figura 8). El biogás, el pasto elefante, carbón vegetal, cáscara de arroz, lejía, aceites vegetales, leña de residuos de madera, el licor negro derivado de la industria de papel, son otros tipos de biomasa que se utilizan en la actualidad para la generación de bioenergía [22].

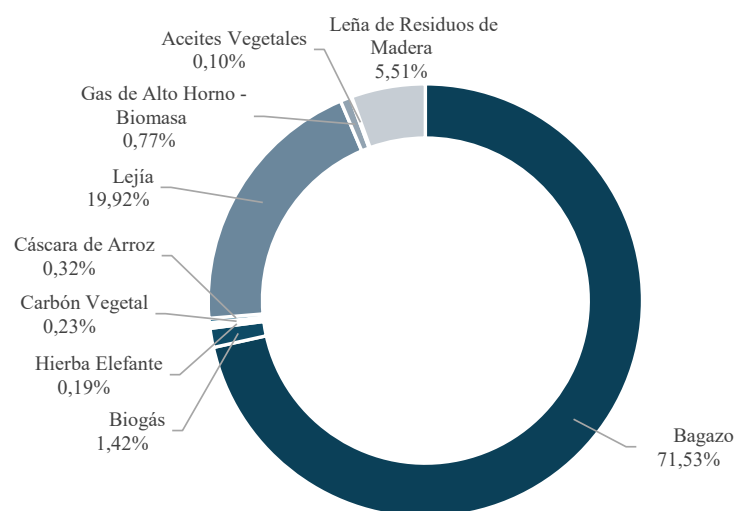


Figura 8. Capacidad instalada de generación eléctrica por tipos de biomasa, 2022 [22].

2.3. Tecnologías aplicadas para la generación eléctrica a partir de biomasa

Existen diversas alternativas de conversión de residuos para producir energía a partir de fuentes de biomasa, clasificadas en procesos termoquímicos y de bioconversión. Para las fuentes con más del 50 % de humedad, se prefieren los procesos de bioconversión, como la digestión anaeróbica; mientras que, para las fuentes con menos del 50 % de humedad, los procesos termoquímicos, como la combustión de biomasa, son más adecuados [4].

Las tecnologías termoquímicas para la generación de energía eléctrica incluyen la torrefacción (precalentamiento de biomasa a temperaturas entre 200° y 300° C para su posterior combustión), la pirólisis (calentamiento de biomasa en ausencia total de oxígeno) y la gasificación (biomasa sometida a reacciones a altas temperaturas con un agente gasificante), permiten generar energía eléctrica mediante la combustión controlada de biomasa [23].

Las tecnologías de conversión del biogás en electricidad abarcan motores de combustión interna, turbinas y pilas de combustible. Las pilas de combustible aprovechan el hidrógeno verde producido a partir de biogás para generar electricidad, requiriendo un biogás procesado con al menos 65 % de metano y 35 % de CO₂. Otra tecnología, de las más utilizadas, son las turbinas de gas y microturbinas, comúnmente empleadas en aplicaciones a mediana escala, entre 3 y 5 MW, mientras que las turbinas a pequeña escala son viables con potencias entre 30 y 75 kW. Estas opciones tecnológicas permiten aprovechar eficientemente la biomasa y el biogás para la generación de electricidad en diferentes escalas [24].

- **México**

En México, se emplean varias tecnologías para tratar la biomasa, como el ciclo de combustión/vapor, el motor de gasificación/combustión interna y el motor de combustión/Stirling. Las decisiones sobre qué tecnología utilizar dependen del potencial de biomasa disponible y las características de los residuos, como de su nivel de humedad [25]. Se investigan nuevas tecnologías como la hidrólisis y fermentación separadas (SHF), la sacarificación y cofermentación simultáneas (SSCF) y bioprocesamiento consolidado (CBP), esta última considerada más factible al utilizar un solo reactor para las principales etapas del proceso [12].

En cuanto a la producción de bioetanol, se emplea la tecnología de transesterificación, y se están explorando alternativas de catalizadores para reducir costos [25]. Aunque la producción de biogás en México es baja, es relevante por el uso de biodigestores tipo bolsa y estiércol de granjas bovinas como materia prima [12].

- **Colombia**

Actualmente, el país cuenta con nueve plantas de generación de biogás a partir de aceite de palma, representando aproximadamente el 9 % del consumo eléctrico promedio entre 2016 y 2017 mediante la digestión anaeróbica y el 18 % a través de la quema directa [26]. Tres empresas colombianas han desarrollado proyectos de cogeneración utilizando el gas metano de efluentes de aceite de palma, específicamente de POME, generando 8 MW de energía limpia anualmente y obteniendo beneficios económicos por la venta de excedentes [10]. El proyecto más reciente, “Manuelita”, transforma lodo de producción de aceite de palma en biogás con dos biodigestores de flujo continuo que generan 317732 m³ al mes [12].

La transesterificación es la tecnología más utilizada en Colombia para producir biodiesel, mientras que la gasificación y la digestión anaeróbica destacan para la generación de biogás, con cinco sistemas instalados utilizando materias primas como aguas residuales de la producción de cerveza, estiércol de cerdo, pollo y agua, y el lodo de plantas de tratamiento de aguas residuales [12].

- **Brasil**

Es indispensable analizar las características de la biomasa disponible para determinar el proceso óptimo de conversión, ya sea termoquímico, bioquímico o fisicoquímico. En Brasil, la producción de biodiesel se realiza mediante transesterificación alcalina [27], mientras que para el bioetanol se emplea el proceso de fermentación [5]. Brasil es considerado mundialmente como uno de los mayores productores de biogás, con 810 plantas generadoras. Aunque su producción interna es menor en comparación con otros biocombustibles, los residuos agrícolas pasan por un proceso de separación, homogeneización y digestión anaeróbica antes de su utilización. Se usan reactores anaeróbicos de diferentes tecnologías dependiendo de las características de la materia prima. En Brasil, las plantas de biogás mayoritariamente generan electricidad (86 %), energía térmica (10 %), biometano (3 %) y energía mecánica (1 %) [12].

Las tecnologías rentables para la generación de energía a partir de biomasa incluyen el ciclo de vapor, el biodiesel/MCI y la gasificación con combustión interna y motor Stirling. Sin embargo, aún no se ha definido tecnologías óptimas económicamente viables para sistemas de generación a pequeña escala [28].

Según [15], en Brasil, 405 centrales térmicas utilizan el bagazo de caña como combustible, además de 3 centrales que emplean biogás a partir de residuos agrícolas. Dos centrales utilizan hierba elefante, 13 cascarilla y paja de arroz, y una etanol. Otras utilizan el gas de alto horno, el licor negro y, finalmente, 54 basadas en residuos forestales.

2.4. Revisión de la matriz energética de los países de estudio

- **México**

La matriz energética de México ha estado en constante transición, con una histórica dependencia de combustibles fósiles. Hasta 2021, tres cuartos de la electricidad provenían de estos combustibles, con una capacidad instalada de 86154 MW, siendo el 66,9 % de unidades térmicas a base de estos. Las energías renovables representaban una fracción menor, con hidroelectricidad (14,6 %), eólica (8,0 %), fotovoltaica (6,9 %), nuclear (1,8 %), geotérmica (1,3 %) y bioenergía (0,5 %) (Figura 9) [19], [29]. Aunque el uso de carbón ha disminuido, las tecnologías de generación eléctrica con combustibles fósiles siguen predominando en la matriz eléctrica del país. México ha experimentado un aumento del 48,4 % en generación de energías renovables entre 2017 y 2022 [30]. Sin embargo, estos cambios han sido inestables debido a políticas emergentes.

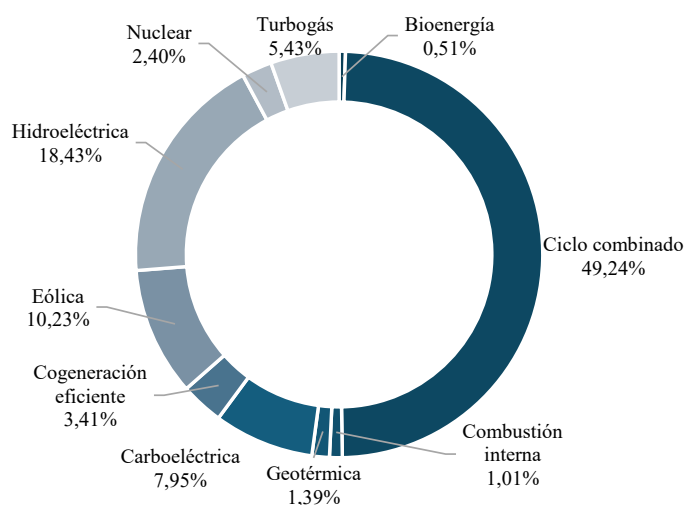


Figura 9. Capacidad instalada según tecnologías de generación [19], [29].

- **Colombia**

Según [31], la capacidad efectiva de generación neta para enero de 2023 fue de 18777 MW, con una predominante participación de energía hidráulica con 66,80 %, un 30,50 % correspondiente a energía térmica, 1,58 % de generación solar y eólica y 1,03 % de cogeneración de calor y electricidad a partir de biomasa (Figura 10). Actualmente, Colombia participa con un 0,80 % de la generación a partir de biomasa a nivel mundial.

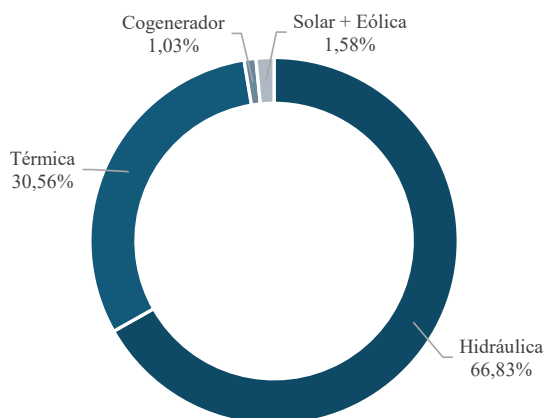


Figura 10. Matriz energética por tipo de tecnología en Colombia 2023 [31].

El gobierno colombiano se planteó como objetivo para el 2023, mediante las resoluciones 40715 de 2019 y 40060 de 2021 del Ministerio de Minas y Energía, que las fuentes renovables no convencionales cubran el 10 % de la demanda final de energía en 2023 [31]. Hasta septiembre de 2023, se registraron un total de 291 proyectos de generación, abarcando tanto energías renovables como no renovables, con una destacada presencia de la energía solar [32]. En la Figura 11 se muestran los proyectos vigentes de generación a partir de energías renovables, según el tipo de tecnología en MW.

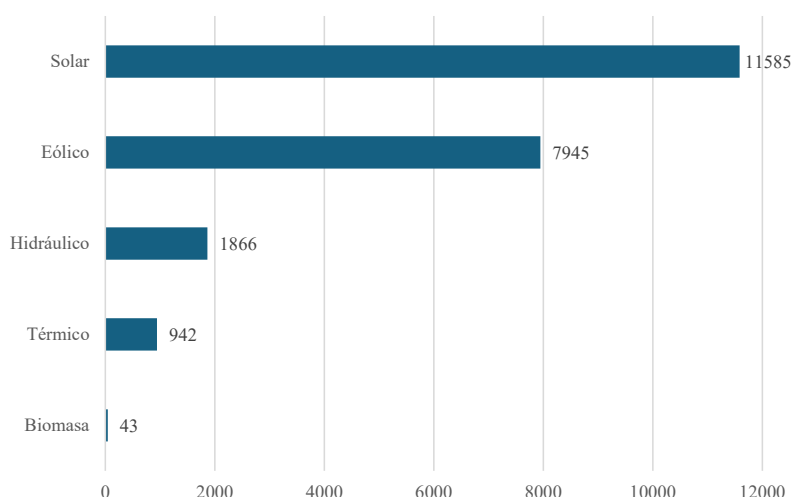


Figura 11. Proyectos vigentes de generación, clasificados por su potencia instalada en MW [32].

El número de proyectos de biomasa, clasificados según su potencia instalada, se muestran en la Tabla 7. Aunque se han iniciado proyectos de biomasa en diversas etapas, desde prefactibilidad

hasta factibilidad, su implementación se ve obstaculizada por desafíos logísticos, lo que dificulta el cumplimiento de los objetivos establecidos.

Tabla 7. Proyectos vigentes de generación eléctrica basada en biomasa.

Rango	Proyectos vigentes
1-10 MW	3
20-50 MW	1
Total	4

Fuente: [32].

• Brasil

Brasil se destaca por su significativa contribución para la generación eléctrica mediante energías renovables, lo que lo posiciona como uno de los líderes en la mitigación de los impactos ambientales asociados al uso de combustibles fósiles. A pesar de ser uno de los mayores consumidores de energía, su matriz energética es una de las menos contaminantes a nivel mundial [33].

La abundancia de recursos naturales en Brasil, junto con su diversidad geográfica, proporciona una amplia gama de residuos agrícolas adecuados para la generación de energía. En general, la biomasa en Brasil presenta un alto potencial y está disponible en todo el país durante todo el año, representando el 7,7 % de la producción total de energía eléctrica en la matriz nacional (ver Figura 12).

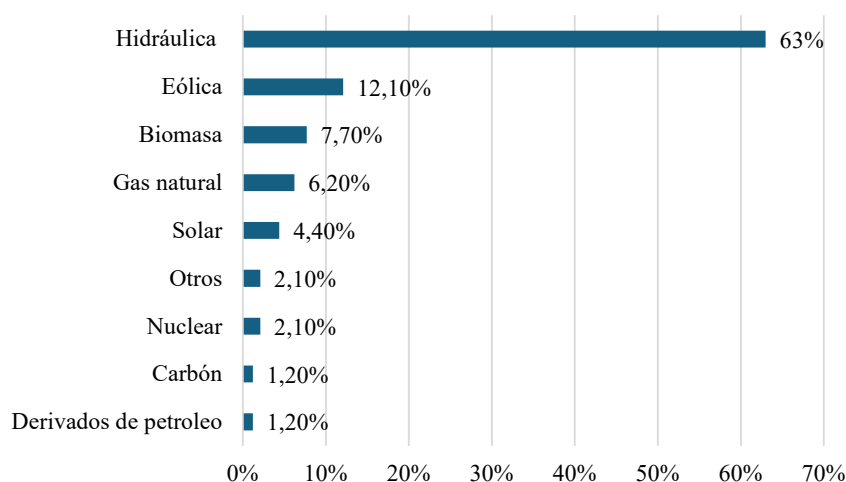


Figura 12. Generación eléctrica por fuente en Brasil, 2022 [34].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El desarrollo de la investigación ha permitido identificar las principales características que poseen México, Colombia y Brasil con respecto a su potencial energético a partir de residuos agrícolas. Se logró identificar que los principales residuos en los tres países se obtienen del maíz, caña de azúcar y trigo para México; banano, aceite de palma y café para el caso de Colombia; y caña de azúcar, soya y maíz para Brasil.

Brasil lidera en la generación de residuos, con 798,34 millones de toneladas anuales, cifra que supera significativamente al caso de México (17,5-58,1 millones t/año) y Colombia (21,535 millones t/año). Esto puede deberse a la gran extensión en territorio de Brasil, motivo por el cual tiene más disponibilidad de recurso que los otros dos países. Asimismo, para el año 2023, se

obtuvo que la capacidad máxima de generación neta de plantas de bioenergía de cada país fue de 984 MW, 397 MW y 17210 MW para México, Colombia y Brasil, respectivamente [18]; sin embargo, el porcentaje de generación a partir de biomasa en Colombia y México es inferior al 2,0 %, mientras que en Brasil representa el 7,7 % de la producción total de energía eléctrica. Estos datos sugieren que Brasil aprovecha de manera más efectiva sus recursos de biomasa en comparación con los otros dos países.

Colombia, posee un importante potencial energético derivado de residuos agrícolas. A pesar de que cuenta con varias plantas de generación de biogás y biodiesel, sería beneficioso para el país aumentar su participación en este sector para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y promover el uso de energías renovables para la generación eléctrica. Aunque la energía hidroeléctrica es la fuente predominante dentro de la matriz energética, Colombia sigue dependiendo en un 30,5 % de generación térmica a base de combustibles fósiles. A partir de la información expuesta en la Tabla 6, Colombia cuenta con un potencial energético teórico de 43,229 MWh a partir de sus residuos agrícolas, mediante digestión anaerobia y 98,759 MWh mediante combustión directa.

México, siendo uno de los principales productores de alimentos, cuenta con un amplio potencial de residuos para la generación de energía a partir de la biomasa. Sin embargo, su matriz energética ha dependido en gran medida de combustibles fósiles, representando más del 60 % de su generación eléctrica. Actualmente, el país está en proceso de transición hacia una matriz energética más limpia, donde las fuentes eólicas y solares están ganando relevancia. Aunque la biomasa tiene una baja participación en la matriz energética actual, se están desarrollando proyectos para potencializar su uso como fuente de energía.

Los tres países han desarrollado amplia experiencia en la producción y comercialización de biodiesel y bioetanol. México está mejorando sus tecnologías para la producción de bioetanol y ya tiene un nivel de desarrollo considerable. Colombia destaca en la producción de biodiesel a partir de palma africana, reconocido por su alta calidad a nivel mundial. Brasil sobresale como uno de los principales productores globales de bioetanol y biogás, principalmente utilizando caña de azúcar.

Este estudio evidencia que los tres países disponen de tecnologías maduras para la producción de biocombustibles, siendo México el que presenta un menor nivel de desarrollo en esta área pese a su gran potencial. Es importante destacar que México, además, emplea menos recursos de residuos agrícolas en comparación con Colombia y Brasil para la producción de biocombustibles. Esto destaca la necesidad de potenciar estrategias de aprovechamiento de biomasa en el sector energético en México para equiparar su posición con otros países en la región.

Las tecnologías empleadas en la generación de energía a partir de biomasa en los tres países incluyen la transesterificación para la generación de biodiesel, fermentación para la obtención de bioetanol, digestión anaeróbica para la obtención de biogás y otros procesos como la gasificación, pirólisis y combustión directa para la conversión en energía eléctrica. El tipo de tecnología que se utilice para la conversión de energía se ve directamente influenciado por la calidad y composición del gas o subproducto generado, además del tamaño, humedad y composición de la partícula de biomasa.

4. CONCLUSIONES

El análisis llevado a cabo ha proporcionado una visión detallada del nivel de desarrollo en tres países latinoamericanos en relación con la utilización de biomasa derivada de residuos agrícolas. Aunque se ha observado un eficiente aprovechamiento de estos recursos para la generación de biocombustibles, se destaca que la matriz energética general de estos países aún muestra una influencia limitada por el uso de biomasa. A pesar de contar con plantas generadoras que emplean de manera efectiva recursos como el bagazo de caña en Brasil y México y el aceite

de palma en Colombia, se identifican importantes oportunidades de mejora en la gestión de residuos.

En México, el potencial bioenergético se estima entre 313,4 y 1039,4 PJ/año, con una producción destacada de 44 millones de toneladas de residuos de maíz. Sin embargo, su integración ha sido limitada por una histórica dependencia del 60 % en combustibles fósiles, y la biomasa representa solo el 0,5 % de su matriz energética. Esto sugiere la necesidad de acelerar los proyectos actuales para mejorar la adopción de esta fuente renovable.

Colombia ha logrado avances en la generación de biogás y biodiesel, especialmente a partir del aceite de palma, con una capacidad de 387 MW. A pesar de contar con recursos abundantes, como 5642 millones de toneladas de banano y 4133 millones de toneladas de café, la dominancia de la energía hidráulica (66,8 %) y térmica (30,5 %) sigue restringiendo la diversificación hacia bioenergía.

Brasil lidera la región con 798,34 millones de toneladas de residuos agrícolas al año, consolidándose como el mayor productor de bioenergía, donde el bagazo de caña aporta 574,83 millones de toneladas. La biomasa ya representa el 7,7 % de su matriz energética, aunque aún enfrenta desafíos por la expansión de cultivos y la competencia con cultivos alimenticios.

A partir de los hallazgos, se identificaron tres áreas clave para futuras investigaciones: (1) la optimización de tecnologías de conversión con foco en eficiencia y sostenibilidad; (2) la integración más efectiva de la bioenergía en las matrices energéticas; y (3) la superación de barreras logísticas y regulatorias.

Una gestión más eficiente de estos residuos contribuiría al avance en la generación de energía limpia y diversificación de las matrices energéticas, reduciendo los costos asociados al transporte y la quema de desechos. La colaboración entre los sectores académico, gubernamental e industrial será esencial para desarrollar políticas públicas que fomenten el uso sostenible de la biomasa. Esta investigación se presenta como un referente valioso para futuros estudios orientados a maximizar el aprovechamiento de la biomasa en países latinoamericanos con condiciones similares. Abordar los vacíos de conocimiento identificados mediante estudios específicos sobre nuevas tecnologías y modelos de negocio será crucial para impulsar la adopción de bioenergía. Así, se propone como un punto de partida para explorar enfoques sostenibles que promuevan el desarrollo energético y medioambiental en la región.

AGRADECIMIENTOS: Los autores agradecen a la Universidad de Cuenca por facilitar el acceso al Laboratorio de Micro-Red, Facultad de Ingeniería, en cuyas instalaciones fue realizada la presente investigación. Este trabajo forma parte de las actividades investigativas del proyecto titulado «Promoviendo la sostenibilidad energética: Transferencia de conocimientos en generación solar y micromovilidad eléctrica dirigida a la población infantil y adolescente de la parroquia Cumbe», ganador de la XI Convocatoria de proyectos de servicio a la comunidad organizado por la Dirección de Vinculación con la Sociedad de la Universidad de Cuenca, Ecuador, bajo la dirección de uno de los autores.

REFERENCIAS

- [1] T. Morato, M. Vaezi, and A. Kumar, “Assessment of energy production potential from agricultural residues in Bolivia”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 102, pp. 14–23, mar. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.032>
- [2] International Renewable Energy Agency [IRENA], “*Agricultural residue-based bioenergy: Regional potential and scale-up strategies*”, Abu Dhabi, 2023 [Online]. Available: <https://bit.ly/4fKkEim>

- [3] X. Liu, S. Zhang, and J. Bae, “The nexus of renewable energy-agriculture-environment in BRICS”, *Applied Energy*, vol. 204, pp. 489–496, oct. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.077>
- [4] A. Sagastume Gutiérrez, J. J. Cabello Eras, L. Hens, and C. Vandecasteele, “The energy potential of agriculture, agroindustrial, livestock, and slaughterhouse biomass wastes through direct combustion and anaerobic digestion. The case of Colombia”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 269, oct. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122317>
- [5] J. M. Rincón y E. Silva, *Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad, Primera*. Bogotá, Colombia: La Red Iberoamericana de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos en Producción de Energía, 2014.
- [6] J. A. Honorato-Salazar, and J. Sadhukhan, “Annual biomass variation of agriculture crops and forestry residues, and seasonality of crop residues for energy production in Mexico”, *Food and Bioproducts Processing*, vol. 119, pp. 1–19, jan. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.10.005>
- [7] Ministerio de Energía y Minas, “Plan Maestro de Electricidad”, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3Z7SXZR>
- [8] D. F. Lozano-García, J. E. Santibañez-Aguilar, F. J. Lozano, and A. Flores-Tlacuahuac, “GIS-based modeling of residual biomass availability for energy and production in Mexico”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 120, mar. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109610>
- [9] N. Moreno Clavijo y A. A. Romero Jiménez, “Evaluación de diferentes métodos para la transformación de la pulpa de café en abono orgánico en fincas cafeteras”, Tesis de maestría, Universidad de Manizales, Manizales, Colombia, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://ridum.umanizales.edu.co/handle/20.500.12746/2620>
- [10] A. A. Ramón *et al.*, “Evaluation of Potential Substrates for Biogas Production in Colombia using Anaerobic Digestion Systems”, *Ingenieria e Investigacion*, vol. 43, no. 2, mar. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.15446/ING.INVESTIG.100834>
- [11] S. Saelor, P. Kongjan, and S. O-Thong, “Biogas Production from Anaerobic Co-digestion of Palm Oil Mill Effluent and Empty Fruit Bunches”, *Energy Procedia*, vol. 138, pp. 717–722, oct. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.206>
- [12] L. P. Vega, K. T. Bautista, H. Campos, S. Daza, and G. Vargas, “Biofuel production in Latin America: A review for Argentina, Brazil, Mexico, Chile, Costa Rica and Colombia”, *Energy Reports*, vol. 11, pp. 28–38, jun. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.10.060>
- [13] S. Manrique, A. Salvo, C. Binda, C. Subelza, L. Mosconi, y B. Balderrama, *Conversión energética de la Biomasa: bases para su aprovechamiento*, Madrid, España: La Red Iberoamericana de Biomasa y Bioenergía Rural (ReBiBiR-T), 2023.
- [14] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística [IBGE], “Censo Agro 2017”, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3CHH5pU>
- [15] T. Forster-Carneiro, M. D. Berni, I. L. Dorileo, and M. A. Rostagno, “Biorefinery study of availability of agriculture residues and wastes for integrated biorefineries in Brazil”, *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 77, pp. 78–88, aug. 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.05.007>

- [16] “Brazil: electricity generated share by source 2022” [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3OpMF2u>
- [17] M. de F. Vidal, “Produção e uso de biocombustíveis no Brasil”, Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste - ETENE, 2019. [Online]. Available: https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/914/1/2021_CDS_184.pdf
- [18] International Renewable Energy Agency [IRENA], “Renewable energy statistics 2023”. 2023. [Online]. Available: <https://bit.ly/3COSdBh>
- [19] “Plataforma Nacional de Energía, Ambiente y Sociedad” [En línea]. Disponible en: <https://energia.conacyt.mx/planeas>
- [20] “Alumbrar las contradicciones del Sistema Eléctrico Nacional y de la transición energética” [En línea]. Disponible en: <https://geocomunes.org/Visualizadores/SistemaElectricoMexico>
- [21] “Atlas del potencial energético de la Biomasa residual en Colombia” [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/4g6TrGs>
- [22] “Sistemas de Informaciones Energéticas de Brasil” [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/4iaSLSj>
- [23] J. Arauzo, F. Bimbela, J. Ábrego, J. L. Sánchez y A. Gonzalo, “Introducción a las tecnologías de aprovechamiento de biomasa”, Grupo Español del Carbón, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://digital.csic.es/handle/10261/108763>
- [24] M. J. B. Kabeyi, and O. A. Olanrewaju, “Technologies for biogas to electricity conversion”, *Energy Reports*, vol. 8, pp. 774–786, dec. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.11.007>
- [25] I. Valdez-Vazquez, J. A. Acevedo-Benítez, and C. Hernández-Santiago, “Distribution and potential of bioenergy resources from agricultural activities in Mexico”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, núm. 7, pp. 2147–2153, sep. 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.034>
- [26] A. Torroba y R. Orozco, *Atlas de los biocombustibles líquidos 2021-2022*. 3ª ed. San José, Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), 2022. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.iica.int/handle/11324/21328>
- [27] L. V. M. De Sousa, E. E. Silva Lora, F. C. De Lisboa, F. B. D. Filho, and O. A. Del Olmo, “Holistic assessment of Brazil’s bioenergetic potential”, *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, pp. 675-685, oct. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/bbb.2547>
- [28] E. S. Lora, and R. V. Andrade, “Biomass as energy source in Brazil”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, núm. 4, pp. 777–788, may. 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.12.004>
- [29] “Global Electricity Review 2021” [Online]. Available: <https://bit.ly/4eMyNuc>
- [30] “¿Cómo va México en su transición energética?” [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3Zzy77b>
- [31] A. C. F. Castro y J. L. Mojica, “Informe Perspectiva Sectorial - Energía Actualidad del sector energético colombiano”, Dirección de Sectores y Sostenibilidad, Colombia, Informe, 2023.
- [32] “Informe de Avance Proyectos de Generación - Julio 2023 SUBDIRECCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA – GRUPO DE GENERACIÓN”, Unidad de Planeación Minero Energética, Colombia. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/4iigTT4>

- [33] “*Brasil es el país con la matriz energética menos contaminante del mundo, señala AIE*” [En línea]. Disponible en: <https://www.sela.org/es/prensa/servicio-informativo/20181121/si/26490/brasil>
- [34] "Ministerio de minas y energía Brasil", Ben 2024, SummaryReport 2024, 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-715/BEB_Summary_Report_2024.pdf



Study of HFC Networks in Educational Contexts

(Estudio de Redes HFC en Contextos Educativos)

Holger Santillán, Elvis Apolinario, Sulay Gavilanez, David Cardenas
Salesian Polytechnic University, GISTEL Telecommunications Systems Research Group, Guayaquil,
Ecuador
hsantillan@ups.edu.ec, eapolinario@est.ups.edu.ec, sgavilanezf@est.ups.edu.ec, dcardenasv@ups.edu.ec

Abstract: This paper presents the proposed design of a Hybrid Fiber-Coaxial (HFC) network for the optical communications laboratories of an academic institution. This infrastructure combines optical fiber and coaxial cable to ensure efficient and robust connectivity, especially adapted to the needs of academic and research laboratories. The design includes key stages such as backbone planning, optical distribution and power supply, prioritizing the use of optical fiber for data transmission, which ensures high performance and capacity suitable for large data volumes. This work provides a comprehensive view of HFC network design, highlighting how this technology improves internal connectivity and facilitates collaboration and data exchange between different academic and research areas.

Keywords: HFC network, academic research, backbone network, fiber optics, communication infrastructure.

Resumen: Este artículo presenta la propuesta de diseño de una red HFC (Fibra Híbrida-Coaxial) para los laboratorios de comunicaciones ópticas de una institución académica. Esta infraestructura combina fibra óptica y cable coaxial para garantizar una conectividad eficiente y robusta, especialmente adaptada a las necesidades de los laboratorios académicos y de investigación. El diseño incluye etapas clave como la planificación de la red troncal, la distribución óptica y la alimentación, priorizando el uso de fibra óptica para la transmisión de datos, garantizando un alto rendimiento y una capacidad adecuada para grandes volúmenes de datos. Este documento ofrece una visión completa del diseño de redes HFC, destacando cómo esta tecnología mejora la conectividad interna y facilita la colaboración y el intercambio de datos entre diferentes áreas académicas y de investigación.

Palabras clave: red HFC, investigación académica, red troncal, fibra óptica, infraestructura comunicación.

1. INTRODUCTION

HFC (Hybrid Fiber-Coaxial) networks have evolved over this time as a result of transformations in cable television distribution networks. This evolution was motivated by the significant increase in channel supply, which generated a growing demand for bandwidth. To address this challenge, cable networks evolved from the utilization of coaxial cables to the implementation of optical transmission technology. This transition allowed for substantial improvements in reliability and transmission capacity, giving rise to multi-service HFC networks [1].

Telecommunications encompass a variety of technologies and services, requiring networks that integrate various services with different capabilities and quality. HFC networks are emerging as an alternative to achieve this integration. While fiber-based architectures, such as FTTH (Fiber To The Home) and FTTC (Fiber To The Cabinet), are uneconomical due to the investment required, fiber optics offer advantages in terms of distance and transmission speed, being ideal for backbone and distribution links in metropolitan networks [2].

HFC networks are divided into trunks, optical distribution and feeders, where coaxial is used to minimize costs. Typical configurations include star, bus, or tree connections. In these networks, the asymmetrical cable modem manages data access. In small municipalities, the infrastructure comprises the headend, splitters, and ONU (Optical Network Units), the latter being terminal nodes connected to the coax, with each ONU, covering about 500 subscribers. The challenge lies in balancing cost-effectiveness with network survival in these areas [3].

An HFC network is a network technology that combines fiber optic and coaxial cable components to provide communication services, such as cable television, high-speed Internet access, and telephony. The HFC infrastructure uses fiber optics for high-speed data transmission and coaxial cable for signal distribution to homes and businesses [4].

The CATV (Community Antenna Television) system or community television antenna is a system that allows the transmission of television signals by radio frequency through a guided medium such as coaxial cable or fiber optics. Originally, CATV networks were designed for the one-way transmission of television signals, but over time, the demand for broadband and two-way communication services, especially with the popularization of the Internet, led to the need to improve these networks [5].

The implementation of fiber optics as in HFC networks allows a greater bandwidth capacity, being able to cover many more services by the same medium and with much faster transmission speeds. The combination of fiber and coaxial cable provides a cost- and performance-efficient solution to deliver advanced multimedia and communication services to end users [6].

HFC networks have undergone a significant evolution, driven by changes in cable television distribution networks. This process was motivated by the increase in the supply of channels and the growing demand for higher bandwidth capacity. In response to this challenge, cable networks have replaced coaxial cables with optical transmission technology, which has led to significant improvements in reliability and transmission capacity, resulting in multiservice HFC networks. The combination of optical fiber and coaxial cable in these networks is presented as an efficient option for integrating various services in telecommunications.

Despite the advantages offered by fiber-based architectures, such as FTTH (Fiber To The Home) and FTTC (Fiber To The Cabinet), in terms of distance and transmission speed, their implementation in educational environments can be costly. Therefore, HFC networks are positioned as a more economical and practical solution in this context. This project aims to design an HFC network adapted to the needs of the optical communications laboratories of an educational institution, providing a robust and efficient connectivity infrastructure to support academic and research activities. The proposed design encompasses backbone planning, optical distribution and powering, prioritizing the use of fiber optics to ensure efficient transmission of large volumes of data, and improving internal connectivity to support collaboration and information exchange between different academic areas.

1.1. Optical Power Calculation in Fiber

The optical power in an optical fiber is determined by the formula: (P)

$$P = \frac{E}{t} \quad (1)$$

Where:

- P is the optical power (mW).
- E is the transmitted optical energy (mJ).
- T is the time during which the energy(s) was transmitted.

For example, to calculate the optical power when a light source emits 2 milli Jules of energy over a period of 5 seconds. The formula is applied as resulting in where:

$$P = \frac{2mj}{5s} \quad (2)$$

This result indicates that the optical power in the optical fiber is 0.4 milliwatts during the 5-second interval $P = 0.4 \text{ mW}$.

In experimental or industrial contexts, this calculation could be crucial for evaluating the performance of an optical transmission system [7].

1.2. Channel Traffic Calculation

The goal of the traffic model is to establish a probability distribution for the number of TV channels watched simultaneously, for a given content popularity and user demand. In other words, you have to find out how the simultaneous requests from users R more than N available TV channels are distributed.

Variables

Where

- Variables is channels that are not requested. $NX_n = 0$.
- If the channel is requested once. $X_n = 1$.
- When it's possible that a particular user is made for the channel to request, the corresponding odds for are: $q(n)nX_n$.

$$\left. \begin{aligned} \text{Prob } [X_n = 0] &= (1 - q(n))^R = p1(n) \\ \text{Prob } [X_n = 1] &= 1 - (1 - q(n))^R = 1 - p1(n) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Where

- Prob is the possibility for all requests to be made for one of the other channels in addition to the channel and this opportunity is for each of the individuals (and independents). $[X_n = 0]N - 1n(1 - q(n))R$.
- Defined as the ability to determine channels that are not requested: Pi

$$\left. \begin{aligned} p_1(n) &= (1 - q(n))^R \\ p_2(j, k) &= (1 - q(j) - q(k))^R, j \neq k \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

The goal is to find the probability distribution for the total number of TV channels watched simultaneously, i.e., channels requested by at least one user:

$$Y = \sum_{n=1}^N X_n \quad (5)$$

γ is the sum of a large number of statistically independent variables (N variables in total).

$$P(y) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(y-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

1.3. Related Works

With the advancement of individual, intelligent and interactive broadcasting, comes the need for an ultra-high-speed converged network to deliver high-quality 3D multimedia services. Within this framework, a cable transmission technology has been developed that exceeds the frequency efficiency of conventional methods by more than 30 %. In North America, CableLabs has created the DOCSIS 3.1 standard, while Europe has developed the DVB-C2 standard. In addition, in 2012, IEEE 802.3 began developing EPoC (Ethernet Passive Optical Network over Coax)to support EPON (Ethernet Passive Optical Network) 1G/10G interfaces in hybrid fiber optic and coaxial cable networks[8], [9].

In response to growing data traffic, cable TV providers are upgrading their HFC networks and adopting mixed multicast and unicast models to meet the demand for high-quality video and improve the customer experience. Introducing a software-based bandwidth solution to enhance the HTTP Adaptive Streaming (HAS) experience on hybrid fiber and coax networks. The proposal optimizes the delivery of content to any device, addressing common problems, such as video instability and uneven quality distribution. The solution allows scaling to many concurrent sessions without significant overhead [10].

Modern HFC networks serve millions of users, making it crucial for operators to ensure high availability of network access [11]. This requirement becomes even more critical with the rise of remote work. Therefore, it is essential to detect and locate network faults as early as possible, a complex task due to the large number of devices present in typical HFC networks. However, the abundance of devices also allows operators to collect huge amounts of valuable data for multiple purposes. In this context, the use of big data technologies in HFC networks is being adopted to manage this data efficiently [12], [13].

Nowadays, internet providers must offer a high-quality service. Performance monitoring is essential for network maintenance and to meet customer expectations. However, network operators face numerous challenges in this area. The current goal of operators is to provide an overview of the challenges in monitoring the performance of HFC networks by using Big Data as a solution to address these challenges [14], [15].

For a long time, hybrid fiber and coax networks have faced significant challenges due to limitations in upstream data rates [16]. With the growing demand for cloud services and the need to offer symmetrical services for various applications, operators have focused on exploring system architectures and concepts that can overcome these asymmetric limitations. This approach prepares these networks to meet the growing demand for symmetrical services. The feasibility of achieving symmetrical speeds of 10 Gb/s has been demonstrated by means of a prototype full-duplex transmission system, which is compatible with existing HFC networks [17], [18].

Capacity requirements in fixed access networks are increasing towards multi-gigabit connections. In hybrid coaxial fiber (HFC) networks, speeds of up to 30 Gbit/s are achieved by expanding the DOCSIS spectrum to 3 GHz, with spectral efficiency of approximately 10 bit/s/Hz. Eliminating spectrum-limiting components, such as passive HFC network branches, is crucial to achieving these speeds, versus the cost of fiber-to-the-home (FTTH) deployment. Transmission amplifier distortion and attenuation dispersion between frequencies are challenges in the extended spectrum, requiring new optimization strategies [19], [20].

2. METHODOLOGY

For the development of the network, it begins with the simulation of data transmission services through fiber optics. Using the OptiSystem program, the data transmission is modeled and the wavelengths are multiplexed. The results obtained from these simulations will be compared with data collected from physical equipment in a laboratory environment. This

approach allows validating the accuracy of the simulations and ensuring that the theoretical results are aligned with the actual performance of the system [21].

Next, the physical equipment is connected and configured. The signals are generated using a laptop and an antenna, which through a modulator produce a copper-modulated signal. This signal is then transferred to a 1550 nm signal generator and connected to a multiplexer. The multiplexer combines data and television signals, transmitting them through a single fiber optic strand to the final recipient. This process is illustrated in Figure 1, which details the devices and connection scheme used in the project.

The integration of simulation and practice is crucial to ensure the reliability and efficiency of the network. Comparing the theoretical results with the practical ones allows possible discrepancies to be identified and corrected, thus optimizing the design and operation of the fiber optic network.

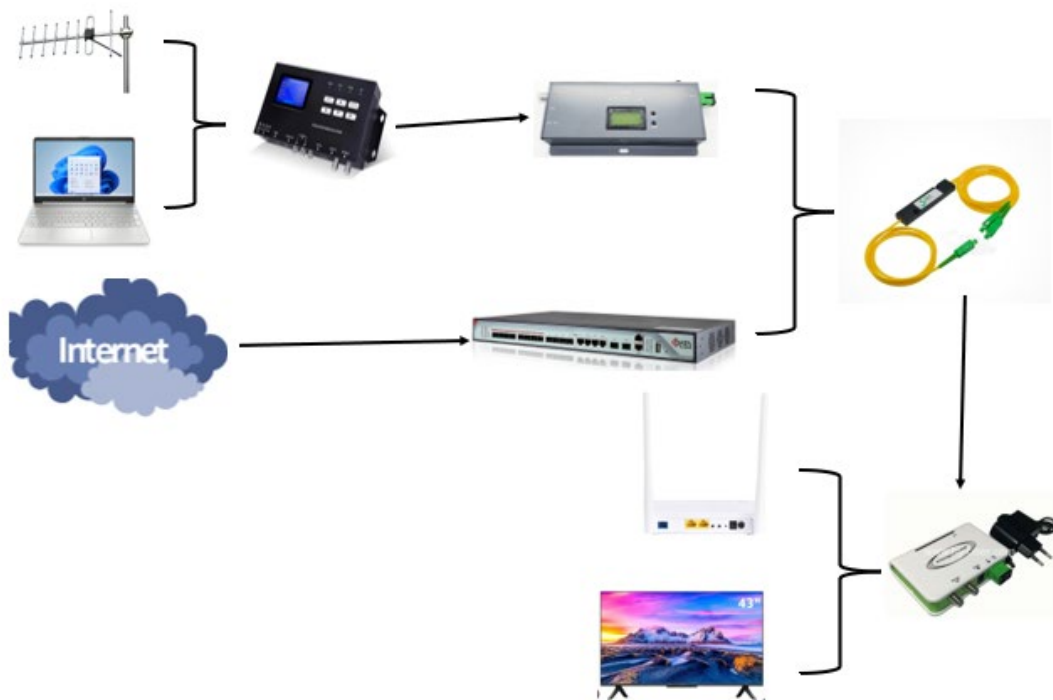


Figure 1. HFC Network Prototype.

To get started with the simulation, it is essential to set up an optical signal emitter in the three required wavelengths. This process involves several crucial components. First, you use a bit generator to create the sequence of data to transmit. A pulse generator then converts this data into optical pulses.

To generate the optical signals, lasers are used specifically for each of the desired wavelengths. These lasers are critical for defining the frequency and stability of transmitted signals. Once the optical signal is generated, it is modulated using a Mach-Zehnder modulator, which adjusts the phase of the optical signal to encode the information efficiently.

This modulated system ensures that signals are ready for transmission. Figure 2 illustrates this process in detail, showing the configuration of the equipment and the interconnection of the

different components. In this figure, you can see how the bit and pulse generators, lasers, and the Mach-Zehnder modulator work together to produce the optical signals needed for the simulation.

It is important to consider the calibration and adjustment of each component to ensure the accuracy and reliability of the signals emitted. The modulation and transmission of optical signals must be carefully controlled to avoid distortion and data loss. This level of detail in the initial setup is crucial for accurate and comparable results during the later phases of the project.

This approach ensures that the emitted optical signals meet the required standards and are prepared to be multiplexed and sent over the fiber optic network, facilitating efficient and reliable data transmission.

It is essential to monitor the thermal stability of lasers and the Mach-Zehnder modulator, as temperature shifts can impact wavelength precision and modulator efficiency. Effective temperature control is integrated to maintain stable wavelength outputs, preventing interference and supporting clear signal separation. This stability improves signal fidelity, reduces cross-talk during multiplexing, and ensures the transmission equipment's reliability and longevity—key factors for the effective deployment and scalability of fiber optic networks.

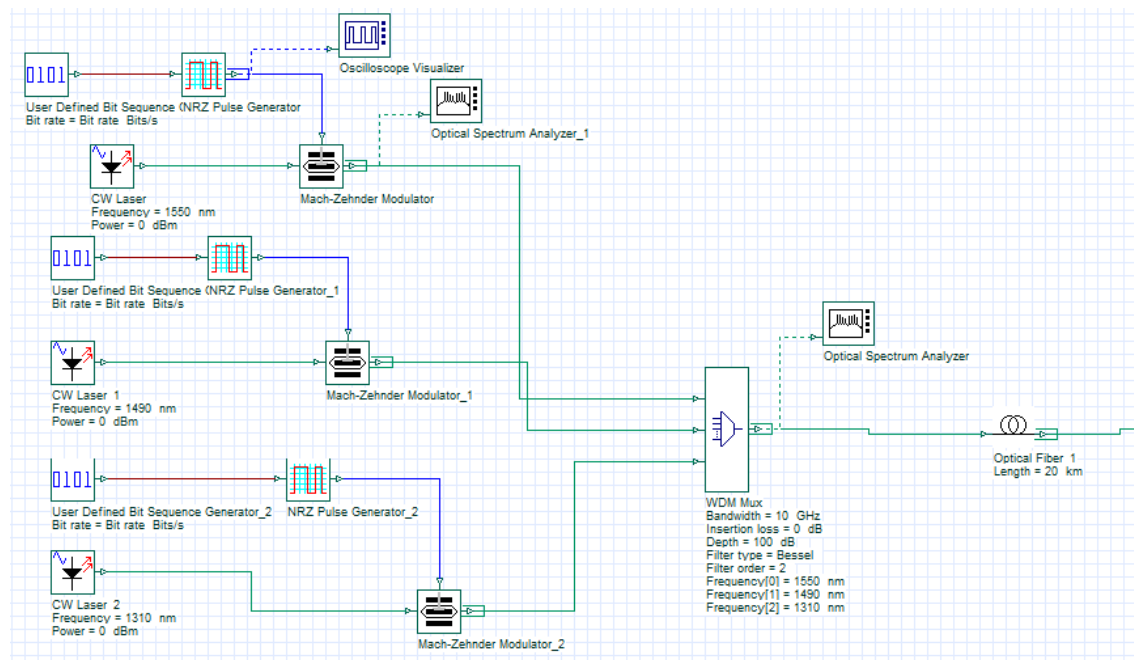


Figure 2. Simulation Topology.

It is worth mentioning that three wavelengths are needed, 1310 nm and 1490 nm necessary for the internet, one upstream and the other downstream respectively, and another signal for 1550 nm video. A WDM (Wavelength Division Multiplexing) multiplexer is added and then the number of input ports is changed, then the channels that the multiplexer will receive and then send over the fiber wire are configured. To analyze the wavelengths, a photodetector must be placed at the end of each port of the demultiplexer, with the BER (Bit error rate) analyzer you can see the eye diagram of the fiber.

Figure 3 shows the components necessary to analyze the wavelengths by means of simulation in Optisystems where a photodetector must be placed at the end of each port of the demultiplexer, with the BER analyzer you can observe the results of the simulation of the wavelengths being directed by the optical fiber. It is also possible to compare the data sent before passing through the multiplexer and at the end of the transmission.

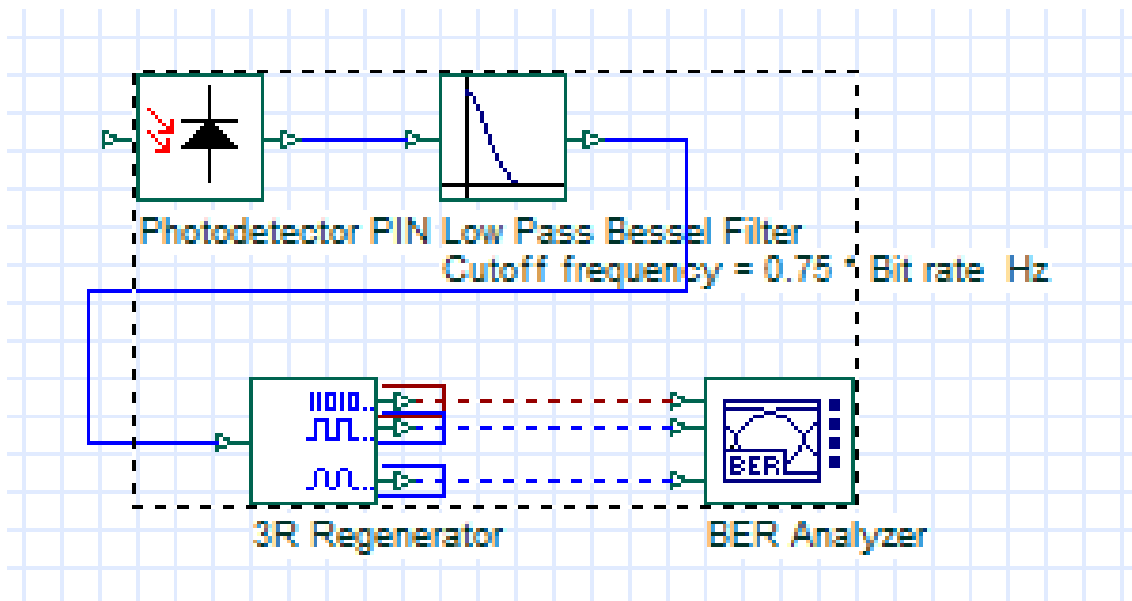


Figure 3. Reception Elements for Analysis.

The following is the diagram of measuring the signal after being multiplexed, demultiplexed, and converted back into an electrical signal, as illustrated in Figure 4. The resulting graphs will be analyzed and compared with the initial measurements.

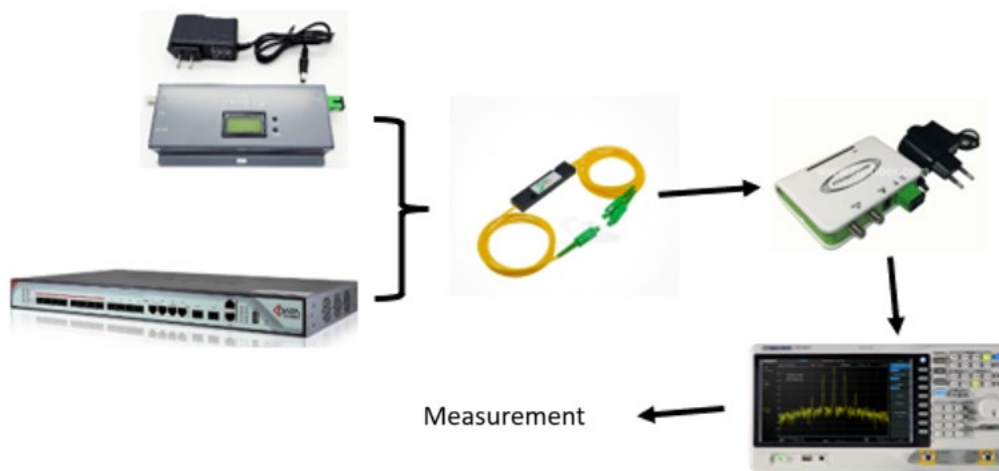


Figure 4. Measurement at CATV receiver output.

3. ANALYSIS OF RESULTS

Using the Siglent spectrum analyzer, data will be captured at the output of the modulator to study the spectrum of the ISDB-T (Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial) signal to be transmitted. Initially, the modulation frequency and output power will be observed, as shown in Figure 5. Then, the signals will be measured after being multiplexed, demultiplexed and converted back to electrical signals. These measurements will be carried out both at the point of transmission and at the point of reception, ensuring a comprehensive evaluation of the process.

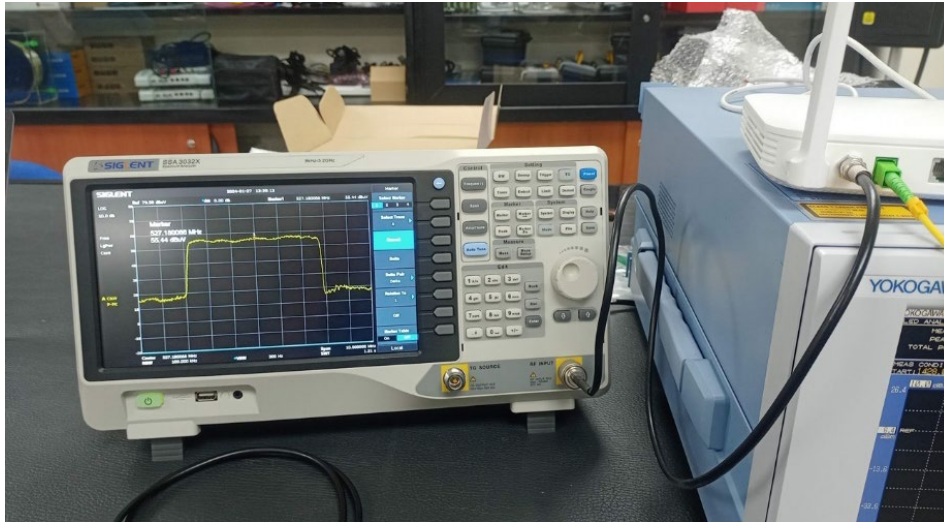


Figure 5. Spectrum Analyzer on the output of the ISDB-T modulator.

The graphs obtained at each stage will be carefully analyzed and compared with the initial measurements to evaluate the integrity of the signal and the efficiency of the transmission process. In particular, attention shall be paid to any distortion or loss of quality that may occur during multiplexing and demultiplexing. The collection of data at the end of the transmission, at the receiver's input for CATV, makes it possible to verify that the received signal maintains the characteristics necessary for a high-quality transmission. This systematic approach ensures the reliability and accuracy of the results.

Then, data will be collected at the output of the multiplexer to demonstrate how the different wavelengths pass through the optical fiber, complying with the principles of WDM multiplexing. In this process, both the power of the signals and the graphics generated will be analyzed. As illustrated in Figure 6, the Yokogawa optical spectrum analyzer will be used to identify the peaks of the wavelengths that transit the optical fiber, as well as the power with which they are transmitted.

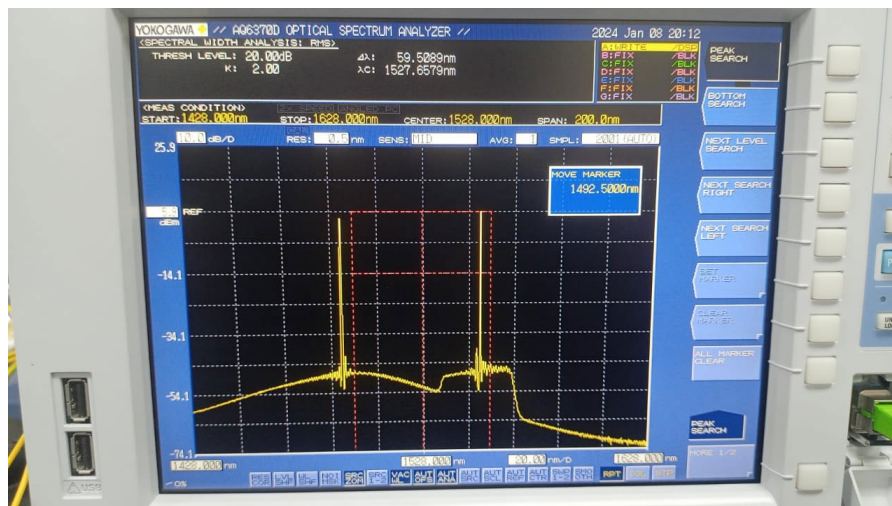


Figure 6. peaks of transmitted wavelengths and power.

In addition, measurements are presented before and after the signal passes through a 4-port splitter, simulating FTTH transmission. This evaluation allows comparing losses at different points in the transmission process, providing a detailed understanding of the efficiency and quality

of the implemented system. By analyzing these measurements, it will be possible to identify and mitigate potential loss points and optimize the performance of the prototype in real conditions.

To visualize the spectrum of the generated signal, it is essential to connect the modulator output to the spectrum analyzer, as detailed in Figure 7. This procedure is essential to examine and study the various wavelengths that propagate through optical fiber, thus simulating FTTH transmission. This configuration makes it easy to evaluate the effectiveness of WDM multiplexing and verify the power of the transmitted signals, ensuring the optimal quality and performance of the implemented system.



Figure 7. Connecting equipment with coaxial cable.

As can be seen in Figure 8 and in the results obtained with the BER analyzer in the output of the multiplexer, the three wavelengths that cross the optical fiber are identified. This finding highlights the ability to effectively use transmission windows for data transfer. This means that it is feasible to use a single single-mode fiber strand to carry out simultaneous transmission at three different wavelengths, thus optimizing spectrum usage and improving the efficiency of the transmission system.

The eye diagram is a graphical representation that visualizes both the noise that can impact our signal and the level of quality that is achieved in the output, offering a clear view of the potential quality of the transmitted signal. This diagram shows two intersecting sinusoidal lines; The sharpness of these intersections is crucial, as it indicates the quality and efficiency of the service transmission. In addition, two horizontal and vertical lines can be distinguished in the diagram that represent the level of noise generated by the system. Figure 9 shows two horizontal lines that do not disturb the sinusoidal lines, confirming that the noise is not adversely affecting the quality of the service transmitted.

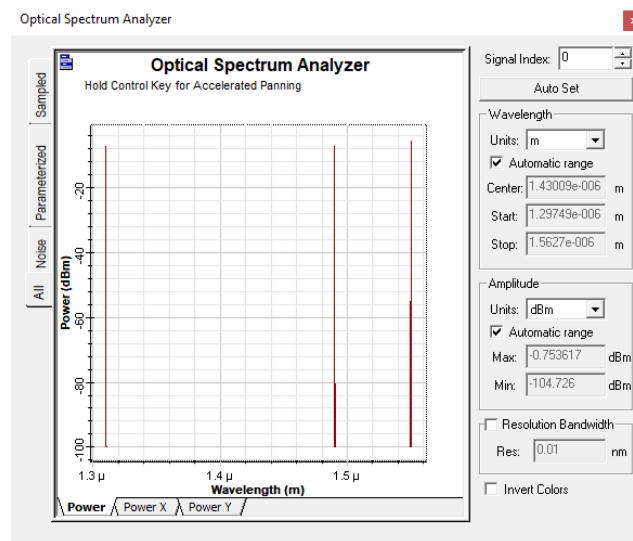


Figure 8. Optical spectrum analyzer result at Optisystems.

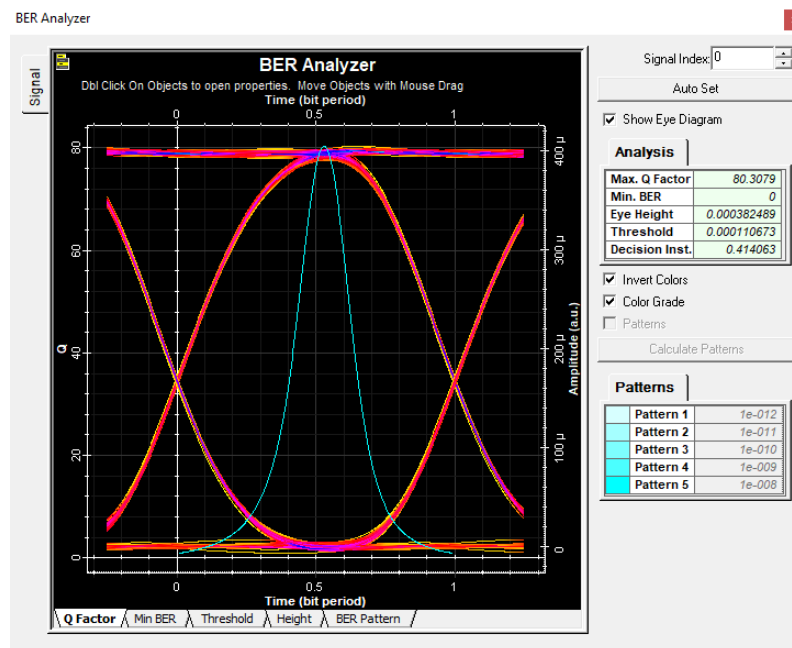


Figure 9. Diagram of eye to optical signal output.

The above result analyzes the comparison between the data sent and received before and after the multiplexing process. Figure 10 shows that the transmitted bits, visualized as pulses to the left, closely match the data captured in the output of the transmission system. This finding indicates that the simulated data is not lost during the multiplexing process, despite having been combined with different wavelengths.

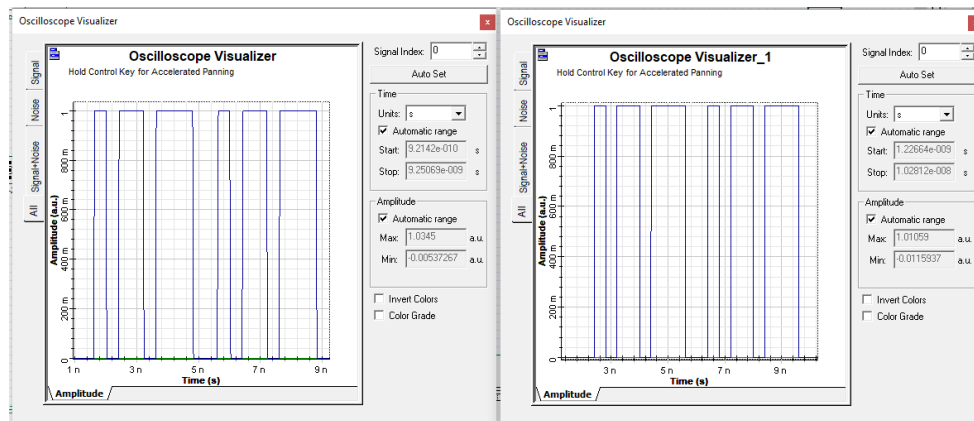


Figure 10. Oscilloscope bits at the start and end of transmission.

Figures 11 and 12 provide a detailed visualization of the electrical signal spectrum at two key points in the system. Figure 11 shows the spectrum of the electrical signal at the output of the ISDB-T modulator, where the information is transmitted at 527 MHz with an initial power of 75.93 dBuV. This initial stage shows the signal in its electrical form before being converted for optical transmission.

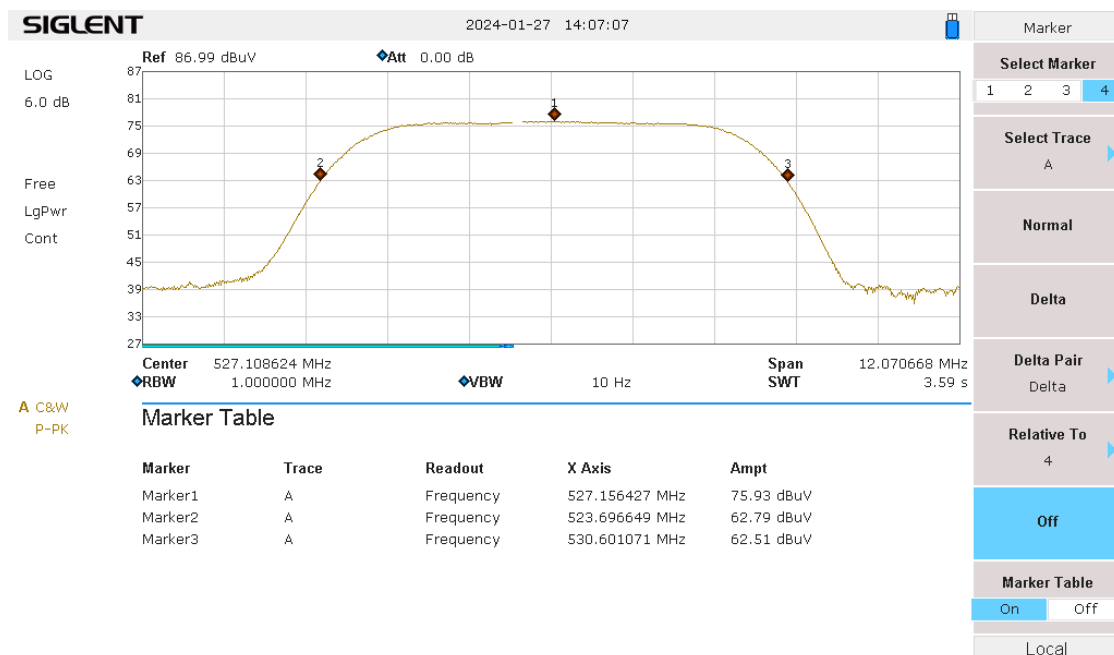


Figure 11. Spectrum of the signal to the output of the ISDB-T modulator in Spectrum Analyzer.

Subsequently, in Figure 12, the spectrum of the signal is presented after having gone through the complete process of transmission and reception. This signal, now transformed into optical, multiplexed, demultiplexed and finally reverted to its electrical form, shows that the transmission frequency has remained intact. However, a reduction in transmission power is observed, now measured at 66.02 dBuV. This phenomenon underscores the effectiveness of the system in preserving the integrity of the transmission frequency through the various stages of the process.

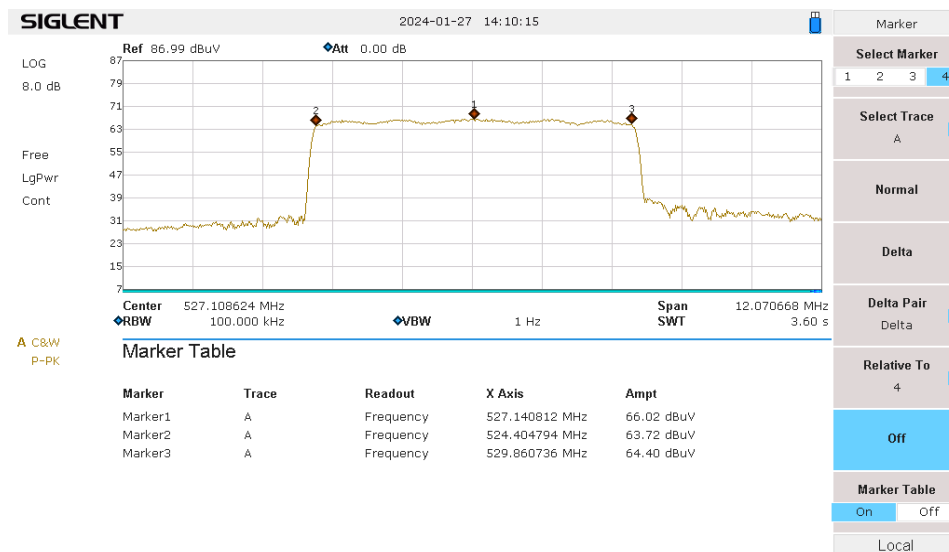


Figure 12. Signal spectrum to CATV receiver output.

The comparison between Figures 11 and 12 underscores the importance of each step in the transmission process. While Figure 11 shows the signal in its initial form before optical conversion, Figure 12 illustrates how the signal behaves after it has passed through the complete optical transmission infrastructure. This detailed analysis reveals that although the signal strength is slightly reduced, the transmission frequency remains stable, thus validating the efficiency of the system for effective data transfer through different technological stages. This means that it was possible to transform the information from an electrical signal to an optical signal using a wavelength to be transmitted.

Figures 13, 14 and 15 provide a detailed visualization of the optical spectrum comprising the three wavelengths critical to data transmission: 1492 nm, 1310 nm and 1552 nm, respectively. Each of these graphical representations not only illustrates the distribution of transmit power in specific nanometers, but also highlights how these frequencies are employed in hybrid coaxial fiber (HFC) networks, which are the main focus of our current project.

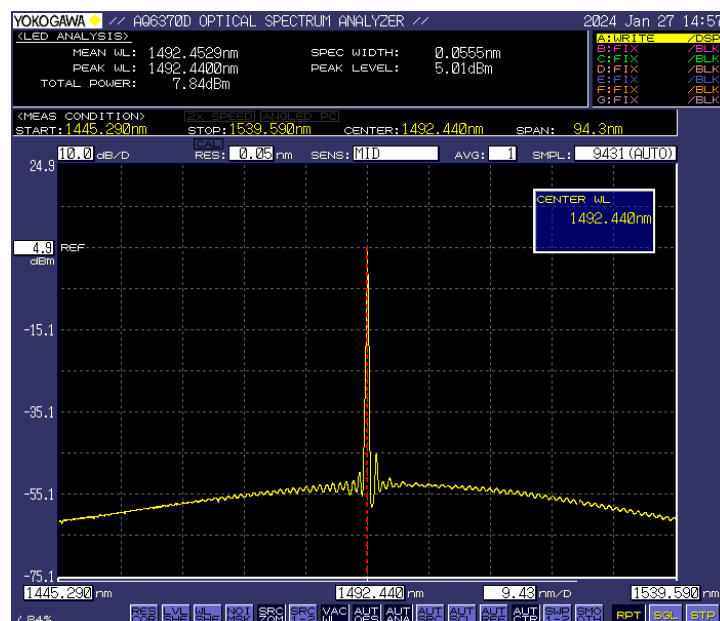


Figure 13. Wavelength spectrum of 1492 nm.

These visual representations play a crucial role in providing insights into how optical signals are distributed across various wavelengths within the HFC infrastructure. Each wavelength is carefully calibrated to ensure efficient and effective data transmission, taking into account the unique characteristics of each segment of the optical spectrum.

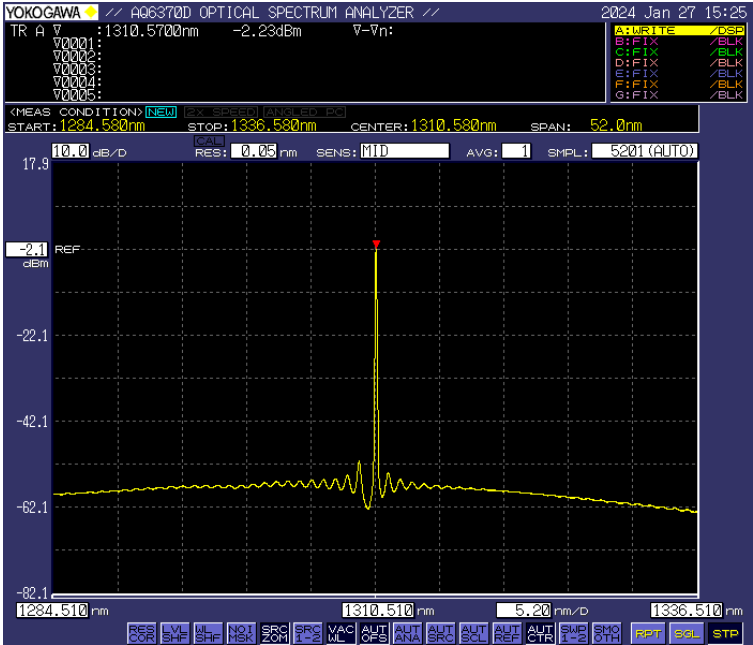


Figure 14. 1310 nm wavelength spectrum.

In the context of our project, these figures are essential as they offer a clear demonstration of how multiplexing and demultiplexing techniques allow the combination and separation of signals at multiple wavelengths. This not only optimizes the network's ability to handle increasingly large and diverse data loads, but also ensures optimal performance in terms of efficiency and transmission quality.

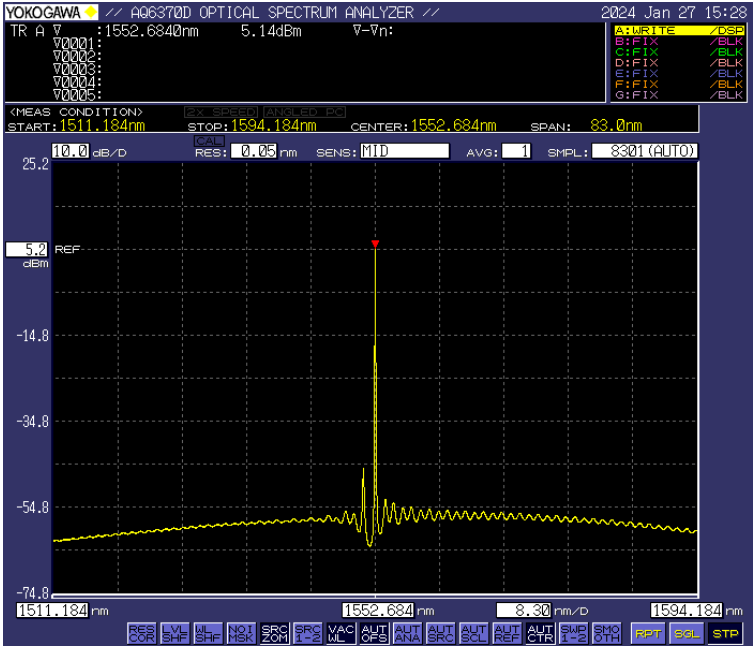


Figure 15. 1552 nm wavelength spectrum.

As evidenced in Figures 16 and 17, when combining the wavelengths of 1320 nm and 1552 nm by multiplexing, a decrease in transmit power of about 3 dB is observed. In contrast, multiplexing the 1492 nm and 1552 nm wavelengths results in a much lower loss, approximately 1 dB.

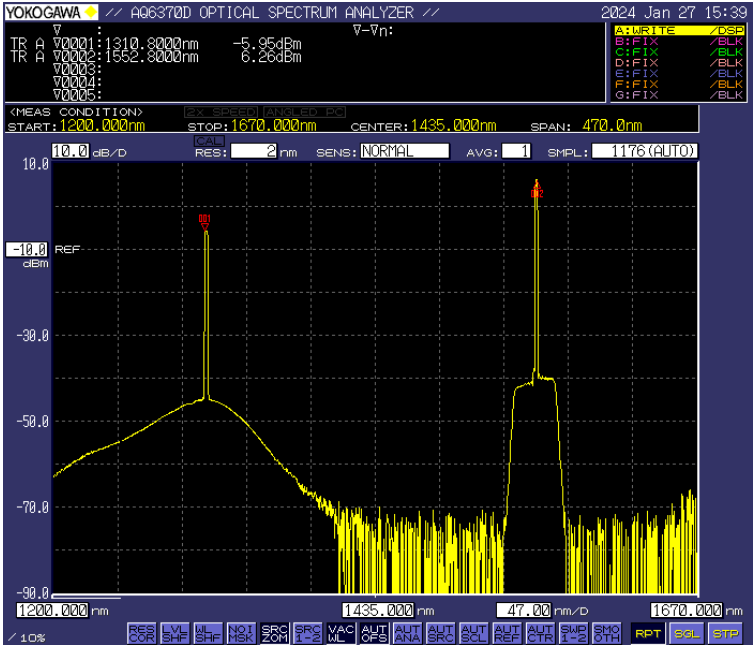


Figure 16. Multiplexed signal spectrum of 1310nm and 1552nm.

Despite these losses, their impact is not significant because ONT (Optical Network Terminal) equipment is designed to operate with a power link margin of approximately -18 dB. This capability ensures that services can be kept up without major interruptions due to the aforementioned losses.

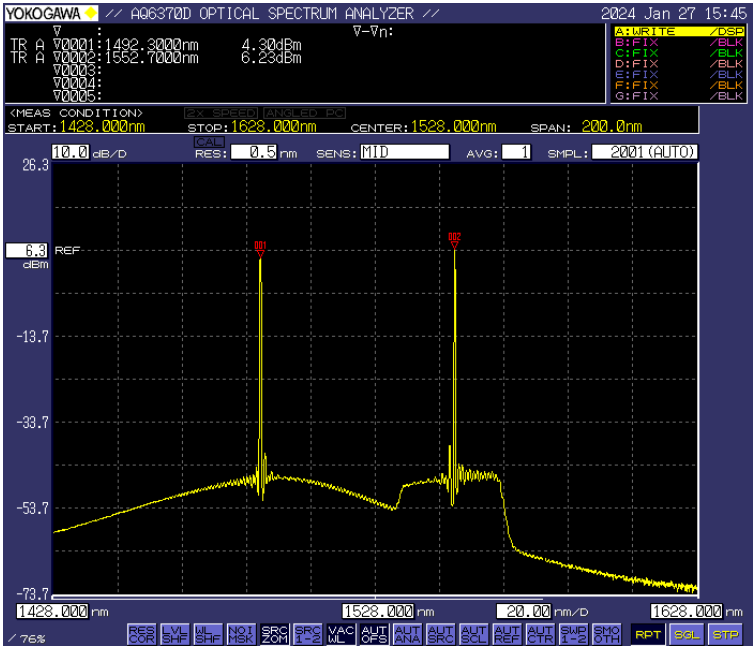


Figure 17. 1492nm and 1552nm multiplexed signal spectrum.

These findings underscore the robustness of the network design and the ability of its components to effectively manage variations in transmit power. This is crucial to ensure the continuity and reliability of the services offered to end users, even under conditions where minor losses occur during optical signal multiplexing.

4. DISCUSSION

The data obtained using the Siglent spectrum analyzer and the Yokogawa optical spectrum analyzer provide a detailed view of the signal transmission and reception process within a HFC network infrastructure. In Figure 5, the spectrum of the ISDB-T signal can be initially observed directly from the modulator, allowing accurate evaluation of the modulation frequency and output power. This initial analysis is crucial to establish a clear reference of the initial state of the signal before going through various stages of processing and transmission.

Subsequently, in Figure 6, attention is focused on the signals after they have been multiplexed, demultiplexed, and converted back to electrical signals. The Yokogawa optical spectrum analyzer plays a critical role in identifying peaks in wavelengths passing through the optical fiber, ensuring that the power of the transmitted signals remains within optimal parameters. This analysis is essential to verify the effectiveness of WDM multiplexing and to ensure that the signals retain their integrity throughout the transmission process.

The detailed comparison between Figures 11 and 12 provides a clear perspective of how the signal evolves from its initial electrical form to its final optical form after passing through all stages of the infrastructure. Although a slight decrease in transmit power is observed in Figure 12, the modulation frequency remains stable, indicating the efficiency of the system in preserving signal integrity through different conversion technologies.

Figures 13, 14 and 15 highlight the key wavelengths used for data transmission in the HFC network, each meticulously tuned to maximize efficiency and effectiveness in data transmission, meeting the specific standards of the HFC infrastructure.

Multiplexing these wavelengths, as evidenced in Figures 16 and 17, introduces minimal power losses that are within the power link range of ONT equipment. These results indicate that the losses are negligible and do not adversely affect the system's ability to maintain high-quality, active services.

The eye diagram, shown in Figure 9, provides a visual assessment of the noise and the quality of the transmitted signal. The clarity of the sinusoidal intersections in the eye diagram confirms that noise does not have a negative impact on the quality of service, thus validating the effectiveness of the network design to mitigate interference.

Together, these results underscore the robustness and efficiency of the implemented HFC network, demonstrating its ability to effectively manage signals through different stages of transmission and reception. These findings not only support the technical feasibility of the system, but also confirm its ability to meet current and future requirements for data transmission and multimedia services, ensuring a reliable and optimal user experience. This section explains the required formatting for lists, numbered and unnumbered, tables, figures, and equations.

In the discussion of the results obtained, it can be seen how HFC networks, despite their robustness and capacity to maintain signal integrity throughout the transmission process, face challenges in the face of the evolution of new network technologies. Networks such as GPON (Gigabit Passive Optical Network), FTTX (Fiber to the x) and MPLS (Multiprotocol Label Switching) are gaining ground due to their lower deployment and operating costs, while offering advantages in terms of symmetrical bandwidth, stability and coverage. The comparison between newer technologies and HFCs highlights where HFCs may be at a disadvantage in today's telecommunications market.

Despite these challenges, the results obtained with Siglent and Yokogawa spectrum analyzers validate the effectiveness of HFC networks in transmitting data and multimedia services, especially in environments where they are already deployed and where their active infrastructure can provide stable and reliable service. This makes them a viable alternative for educational contexts that require a proven and stable infrastructure in terms of signal transmission and reception quality.

However, considering current trends, it is essential that telecommunications students not only understand how HFC networks work, but also acquire a practical and theoretical knowledge of new technologies. This will allow a critical vision that includes not only the implementation of existing networks, but also the comparison with emerging technologies that are emerging as the future of telecommunications networks.

Table 1 helps to visualize the pros and cons of HFC networks compared to modern alternatives, providing a baseline for decision-making on telecommunications infrastructure in different contexts.

Table 1. Comparison of Network Technologies.

Feature	HFC	GPON	FTTX	MPLS
Implementation Cost	High	Middle	Low	Middle
Cost of Operation	High	Low	Low	Middle
Bandwidth	Asymmetric	Symmetrical	Symmetrical	Variable (depending on QoS)
Stability	High over short distances	Very high	Very high	Loud
Coverage	Limited	Wide	Wide	Wide
Maintenance	Frequent (active teams)	Low	Low	Middle
Ideal Application	Multimedia and cable TV	High-speed internet	Residential Access Network	Backbone and enterprise networks
Fit for the Future	Limited	Loud	Loud	Loud

Academic training, then, should address both HFC networks and modern alternatives, allowing students to acquire versatile and up-to-date skills. This study provides a comprehensive basis for understanding technological evolution and applying the knowledge acquired in real scenarios of network infrastructure implementation and analysis.

5. CONCLUSIONS

HFC networks have become a cornerstone in modern communications infrastructure by integrating fiber optic and coaxial cable, significantly improving transmission capacity and reliability in the delivery of multimedia services.

Comprehensive analysis using spectrum analyzers has validated the efficiency of HFC networks in transmitting and receiving signals. From the initial evaluation of the ISDB-T signal spectrum to the integrity check of multiplexed and demultiplexed signals, these systems have been proven to maintain signal integrity through various conversion technologies.

The application of WDM multiplexing has optimized the use of key wavelengths, thus maximizing the efficiency and effectiveness of data transmission in accordance with HFC infrastructure standards.

The results of the eye diagram analysis corroborate that the design of the HFC network is effective in mitigating interference and ensuring a high quality of service, underlining its robustness and efficiency in signal management.

The implementation of the HFC network for educational environments not only meets the current requirements of data transmission and multimedia services, but is also prepared to meet future demands, ensuring a reliable and optimal experience for future research and for academic teaching, highlighting the strategic importance of HFC networks in the current telecommunications context.

The analysis of HFC networks versus emerging technologies such as GPON, FTTx and MPLS highlights the strengths and limitations of each type of infrastructure. While HFC networks have proven to be reliable in the transport of multimedia services, networks such as GPON and FTTx offer advantages in terms of deployment and operating costs, greater stability, symmetrical bandwidth and optimized coverage. These alternatives present a promising outlook in terms of efficiency and cost-effectiveness, presenting new opportunities for the expansion and modernization of telecommunications infrastructures.

This article stands out for offering an academic and practical study, which facilitates learning and understanding in telecommunications students on how these technologies are deployed and operate in practice. Through this approach, students can understand the key processes and components of HFC networks, while becoming familiar with state-of-the-art technologies.

In addition, the article underscores the relevance of HFC networks in educational environments, not only for their current ability to support data transmission demands, but also for their formative role in preparing future professionals for the adoption of advanced technologies. This theoretical and practical integration in education reinforces academic preparation in the field of telecommunications and contributes significantly to the strengthening of applied knowledge.

REFERENCES

- [1] A. A. Grela, and E. J. Monzón, “Data transfer rates in HFC networks”, in *2020 IEEE Congreso Bienal de Argentina (ARGENCON)*, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ARGENCON49523.2020.9505550>
- [2] Z. Abdellaoui, Y. Dieudonne, and A. Aleya, “Design, implementation and evaluation of a Fiber To The Home (FTTH) access network based on a Giga Passive Optical Network GPON”, *Array*, vol. 10, p. 100058, mar. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.array.2021.100058>
- [3] K. Park, K. Lee, S. Park, and H. Lee, “Telecommunication Node Clustering with Node Compatibility and Network Survivability Requirements”, *Manage Science*, vol. 46, no. 3, pp. 363–374, mar. 2000. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1287/mnsc.46.3.363.12066>
- [4] X. Hu, and X. Gao, “An Attribute Relationship Clustering Algorithm for Telecom Customer Group Discovery”, in *International Conference on Logistics, Informatics and Service Sciences (LISS)*, Springer, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-981-97-4045-1_2

- [5] Z. Du, R. Liu, N. Liu, and Y. Shao, "Spatial-based intelligent system for CATV network analysis," in *2008 First International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems*, 2008, pp. 363–366. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICINIS.2008.179>
- [6] W. Awalia, and A. B. Pantjawati, "Performance Simulation of Fiber to the Home (FTTH) Devices Based on Optisystem", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 384, no. 1, p. 012051, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/384/1/012051>
- [7] I. O. Khramov, R. I. Shaidullin, and O. A. Ryabushkin, "Curved Copper-Coated Optical Fiber Sensor for Precise Laser Power Measurements," *2020 International Conference Laser Optics (ICLO)*, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICLO48556.2020.9285725>
- [8] K. Borzycki, and T. Osuch, "Hollow-Core Optical Fibers for Telecommunications and Data Transmission," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 19, sep. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app131910699>
- [9] J. Bae, J. Song, S.-J. Ra, D.-J. Choi, and N. Hur, "A study on common phase rotation compensation for coaxial transmission systems in the HFC network," in *2015 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, 2015, pp. 159–163. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICTC.2015.7354517>
- [10] A. Bentaleb, A. C. Begen, and R. Zimmermann, "QoE-Aware Bandwidth Broker for HTTP Adaptive Streaming Flows in an SDN-Enabled HFC Network," *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 64, no. 2, pp. 575–589, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TBC.2018.2816789>
- [11] D. E. Sanchez M, J. A. Vega L, D. F. Rueda, and A. A. Rodriguez F, "Remote Monitoring of RF Amplifiers in HFC Networks: Voltage Drop Detection due to Power Blackouts," in *2022 Congreso Internacional de Innovación y Tendencias en Ingeniería (CONITI)*, 2022, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CONITI57704.2022.9953718>
- [12] T. Benhavan, and K. Songwatana, "HFC network performance monitoring system using DOCSIS cable modem operation data in a 3 dimensional analysis," in *The 4th Joint International Conference on Information and Communication Technology, Electronic and Electrical Engineering (JICTEE)*, 2014, pp. 1–5. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/JICTEE.2014.6804074>
- [13] M. Simakovic, and Z. Cica, "Detection and Localization of Failures in Hybrid Fiber–Coaxial Network Using Big Data Platform," *Electronics (Basel)*, vol. 10, no. 23, pp. 2906, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/electronics10232906>
- [14] D. Soma *et al.*, "Trans-Pacific class transmission over a standard cladding ultralow-loss 4-core fiber," *Optics Express*, vol. 30, no. 6, pp. 9482, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1364/OE.453597>

- [15] S. N. Milan, M. B. Ina, and Z. G. Cica, “Performance monitoring challenges in HFC networks,” in *2017 13th International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications (TELSIKS)*, 2017, pp. 385–388. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TELSKS.2017.8246305>
- [16] Z. Zhu, “Design green Hybrid Fiber-Coaxial networks: A traffic-aware and cooperative approach,” in *2012 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2012, pp. 3165–3169. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICC.2012.6363640>
- [17] B. Berscheid, and C. Howlett, “Full Duplex DOCSIS: Opportunities and Challenges”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 57, no. 8, pp. 28–33, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2019.1800851>
- [18] W. Coomans, H. Chow, and J. Maes, “Introducing Full Duplex in Hybrid Fiber Coaxial Networks,” *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 2, no. 1, pp. 74–79, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.2018.1700011>
- [19] F. Effenberger, “Future Broadband Access Networks [Point of View],” *Proceedings of the IEEE*, vol. 104, no. 11, pp. 2078–2081, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2016.2612891>
- [20] R. Strobel, and T. Hewavithana, “Power Spectrum Optimization for Capacity of the Extended Spectrum Hybrid Fiber Coax Network,” in *ICASSP 2020 - 2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2020, pp. 5100–5104. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICASSP40776.2020.9054052>
- [21] J. Tamayo, “Análisis de frecuencia de comunicaciones de emergencia con medios acuáticos utilizando equipos HF y VHF en la Isla San Cristóbal”, Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador, 2023 [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/26352>



Gamificación: Evaluación del módulo aprenda a leer de la app Preescolar Montessori

(Gamification: Evaluation of the Module Learns to Read from the Montessori Preschool app)

Fabricio Marcillo, Lorena Cusme, Jimmy Torres, Lucía Begnini
Instituto Superior Universitario Japón, Quito, Ecuador
fmarcillo@itsjapon.edu.ec, lcusme@itsjapon.edu.ec, ttorres@itsjapon.edu.ec, lbegnini@itsjapon.edu.ec

Resumen: La integración de la tecnología en la educación preescolar es un tema relevante en la era moderna. Este estudio investiga las interfaces tecnológicas en este ámbito, con un enfoque en adaptarlas a las necesidades individuales de los estudiantes. Además, se explora cómo las herramientas de gamificación pueden mejorar la motivación y las habilidades de lectura y escritura en niños pequeños. El estudio adoptó un enfoque cuanti-cualitativo, comparando datos de niños de Santo Domingo de los Tsáchilas y Pichincha. Se analizó el impacto de la aplicación Montessori en la enseñanza de la lectura, con resultados variados entre las provincias. Aunque se observó una mejora general en las habilidades, hubo diferencias significativas entre los estudiantes y el rendimiento académico evidenciado. Se enfatiza la necesidad de adaptar las estrategias educativas a las necesidades individuales de cada estudiante para garantizar un desarrollo equitativo. Se distingue entre ludificación y gamificación, destacando el potencial de esta última para motivar y desarrollar habilidades. Además, se sugiere su integración en futuros programas educativos como una herramienta eficaz para enriquecer el proceso de aprendizaje.

Palabras clave: tecnología, preescolar, gamificación, Montessori Preescolar, lectura

Abstract: The integration of technology into preschool education is a relevant topic in the modern era. This study investigates technological interfaces in this area, with a focus on adapting them to the individual needs of students. Furthermore, it explores how gamification tools can improve motivation and reading and writing skills in young children. The study adopted a quantitative-qualitative approach, comparing data from children in Santo Domingo de los Tsáchilas and Pichincha. The impact of the Montessori application in teaching reading was analyzed, with varied results between provinces. Although an overall improvement in skills was observed, there were significant differences between students and the academic performance evidenced. The need to adapt educational strategies to the individual needs of each student to ensure equitable development is emphasized. A distinction is made between gamification and gamification, highlighting the potential of the latter to motivate and develop skills. Furthermore, its integration into future educational programs is suggested as an effective tool to enrich the learning process.

Keywords: technology, preschool, gamification, Montessori Preschool, lecture.

1. INTRODUCCIÓN

La tecnología está en todas partes en el mundo moderno [1], [2]. Para aprovechar su potencial educativo y crear entornos flexibles y adaptadas a las necesidades de aprendizaje individuales, es esencial usar estratégicamente una variedad de herramientas [3]. Este desafío nos ofrece la oportunidad de desarrollar interfaces que permitan a los estudiantes acceder a estos recursos y convertirse en aprendices independientes. Por lo tanto, es crucial identificar y evaluar las características de estas interfaces para poder ajustar y responder a las necesidades específicas de cada estudiante preescolar, la gamificación ofrece un método alternativo de enseñanza-aprendizaje en estudiantes con tendencias autodidactas [4].

Según Al Mamun et al. [5] la calidad del apoyo diferenciado al aprendizaje, conocido como andamiaje, es fundamental para diseñar y estructurar entornos de aprendizaje en línea. Este estudio describe un diseño instruccional llamado predecir, observar, explicar y evaluar, basado en teorías constructivistas del aprendizaje, para implementar diversas estrategias de andamiaje. El diseño de aprendizaje se utilizó para crear dos módulos de aprendizaje por indagación. Se examinó el compromiso de los estudiantes con estos módulos en un entorno en línea autodirigido para identificar los elementos clave del andamiaje. Los resultados, basados en las interacciones de los estudiantes con los módulos, permitieron desarrollar una estrategia de andamiaje multimodal para la investigación autodirigida. Adicionalmente, los desafíos presentes en la actualidad se reflejan en los métodos de enseñanza-aprendizaje que las nuevas generaciones adoptan según el desarrollo tecnológico, el alto uso de smartphones u otros dispositivos electrónicos, hacen que estos sean los medios de ludificación de conocimientos por medio de la incentivación a diferentes desafíos con recompensa que ofrece la gamificación; es decir, motivar a los estudiantes a cumplir un objetivo [5].

La literatura encontrada explora el potencial de las herramientas gamificadas para mejorar la motivación, así como las habilidades de lectura y escritura en niños de 8 a 11 años [6]. Se compararon los efectos de las aplicaciones gamificadas con las actividades tradicionales de bolígrafo y papel, utilizando pruebas estandarizadas de lectura y escritura. La intervención tuvo una duración de 12 horas dentro del entorno escolar y contó con una muestra de 113 niños con desarrollo típico, distribuidos uniformemente en dos grupos. Los resultados mostraron mejoras significativas en la velocidad y precisión de lectura y escritura en ambos grupos, con un efecto ligeramente mayor en el grupo que utilizó las aplicaciones gamificadas, aunque esta diferencia no fue estadísticamente significativa [7]. A pesar de que la motivación no actuó como mediadora en ninguno de los dos grupos, los estudiantes del grupo experimental manifestaron un mayor entusiasmo por las actividades [6]. Estos hallazgos subrayan la importancia de una formación integral y sugieren la necesidad de futuras investigaciones sobre los efectos de las herramientas gamificadas en otras habilidades y aspectos motivacionales. Dichos estudios serían cruciales para comprender las limitaciones y beneficios de la gamificación, facilitando su integración efectiva en los programas escolares [8].

La egotización está ganando popularidad en la educación primaria gracias al uso generalizado de la tecnología digital. Sin embargo, la lectura gamificada es un enfoque novedoso y aún hay poca evidencia empírica sobre su eficacia [9]. Además, la sostenibilidad de los efectos de la pedagogía de la gamificación está en duda, ya que algunos expertos creen que estos efectos son a corto plazo y no se mantienen en el tiempo. Los autores [10] presentan los resultados de tres subestudios que examinan los efectos de una plataforma de lectura gamificada en línea y la sostenibilidad de estos efectos. En el primer estudio, analizaron el cambio en el rendimiento académico de los estudiantes entre dos grupos con diferentes niveles de participación. El segundo estudio abordó cómo estudiantes, padres y maestros perciben la motivación y los beneficios del uso de la plataforma gamificada. El tercer estudio exploró la sostenibilidad de los efectos de la plataforma desde una perspectiva longitudinal.

Los hallazgos sugieren que el compromiso profundo de los estudiantes con la plataforma de lectura gamificada puede aumentar su motivación para leer y mejorar sus habilidades de lectura. Además, estos efectos pueden mantenerse durante varios semestres, con lo establecido con Lamrani, [11], [12].

El mundo de Montessori [13] es fascinante y eficaz para el desarrollo holístico de los niños, aunque puede ser difícil para los padres implementarlo en el hogar. Las aplicaciones Montessori ofrecen una solución moderna para integrar los principios de esta metodología educativa en el entorno doméstico. Estas aplicaciones son una herramienta útil para establecer valores Montessori en casa, proporcionando actividades que fomentan la educación, la concentración, y el desarrollo de habilidades como matemáticas, lenguaje, y razonamiento crítico. Ejemplos de aplicaciones

populares incluyen "Preescolar de Montessori", "Actividades de Montessori", y "La aplicación Ludi", que cubren diversas áreas del currículo Montessori y están disponibles tanto en iOS como en Android [14], [15].

El objetivo de este estudio fue evaluar el rendimiento académico de estudiantes de nivel preescolar pertenecientes a grupos heterogéneos, la hipótesis de estudio fue determinar si existe diferencia en el nivel de destreza adquirido por parte de cada grupo en base al uso del aplicativo móvil adaptado en esta investigación.

2. METODOLOGÍA

La investigación llevada a cabo adoptó un enfoque cuanti-cualitativo de naturaleza exploratoria. También, se compararon los resultados de dos conjuntos de datos recopilados en diferentes provincias (Santo Domingo de los Tsáchilas y Pichincha) para analizar el progreso de los niños en actividades de lectura preescolar utilizando la aplicación Montessori. Se describieron las diferencias y similitudes en los niveles de destreza alcanzados en ambas provincias a lo largo de las sesiones de aprendizaje. Al mismo tiempo, se reflexiona sobre las implicaciones de estos hallazgos para mejorar el enfoque educativo, destacando la importancia de adaptar las estrategias pedagógicas para satisfacer las necesidades individuales de cada niño. La metodología se desglosa en varias subsecciones, incluyendo la selección de participantes, el objeto de estudio y la aplicación del instrumento de investigación.

El estudio se llevó a cabo en dos zonas geográficas de Ecuador, con la muestra seleccionada de manera aleatoria en las provincias de Santo Domingo de los Tsáchilas y Pichincha, específicamente en las parroquias de Pomasqui, Río Verde y Bombolí. Estas localidades fueron escogidas debido a su concentración de población preescolar.

Además, la investigación permitió analizar el impacto de la tecnología, específicamente el uso de dispositivos móviles, en entornos educativos donde previamente no se había implementado dicha tecnología para la gamificación digital. Por lo tanto, la muestra final estuvo compuesta por 210 niños de la parroquia de Pomasqui y 210 niños de las parroquias de Río Verde y Bombolí (estudiantes registrados para el año lectivo 2023). Esta diversidad de contextos proporcionó una visión amplia y representativa de los efectos de la introducción de la tecnología en la educación preescolar, permitiendo así una evaluación más completa de su impacto en el aprendizaje y el desarrollo de los niños.

El objeto de estudio en este contexto se enfoca en la aplicación móvil (Montessori), cuyo propósito es facilitar el proceso de aprendizaje de la lectura en niños preescolares mediante el uso de la tecnología. La investigación se centró en analizar como esta aplicación contribuye al logro de dicho objetivo, con un énfasis particular en el contexto preescolar. Durante el estudio, se implementó la aplicación en un total de 17 sesiones dirigidas a niños preescolares, con el fin de comprobar la hipótesis planteada, este estudio fue ejecutado acorde a la estructura de gamificación propuesta por Montessori.

La adquisición de la aplicación se llevó a cabo mediante una suscripción anual delineada específicamente para uso académico, abordando los principios fundamentales de la filosofía Montessori. Este enfoque educativo, inspirado en la visión de la Dra. María Montessori, se caracteriza por priorizar el desarrollo integral del niño, no solo en términos académicos, sino también en aspectos sociales, emocionales y físicos. En un entorno Montessori típico, los niños de diferentes edades interactúan entre sí, fomentando un ambiente de aprendizaje colaborativo donde los niños mayores suelen guiar y apoyar a los más pequeños en su proceso de aprendizaje [16].

La aplicación móvil Montessori se concibe como una herramienta educativa diseñada para ofrecer actividades y recursos alineados con los principios pedagógicos de este enfoque [17]. Con

un énfasis en el aprendizaje autodirigido y el desarrollo a ritmo individual de cada niño, la aplicación ofrece una amplia gama de actividades interactivas y juegos diseñados para estimular el desarrollo cognitivo, social, emocional y motor de los niños preescolares [18]. Estas actividades abarcan desde ejercicios de clasificación y emparejamiento hasta actividades prácticas de la vida diaria, todo ello presentado en interfaces intuitivas y amigables diseñadas para facilitar la exploración y el aprendizaje independiente de los niños reforzando el proceso de ludificación. Además, algunas versiones de la aplicación pueden incluir características adicionales, como seguimiento del progreso de aprendizaje obtenido del usuario y recursos para padres y educadores, que complementan aún más la experiencia educativa ofrecida [19].

El instrumento fue introducido a los padres de los niños participantes, quienes no habían utilizado previamente un dispositivo móvil con fines de gamificación. La aplicación fue instalada en dispositivos móviles que ejecutaban diferentes sistemas operativos, tanto Android como iOS. Se proporcionó una explicación detallada sobre el funcionamiento de la aplicación y el módulo “aprenda a leer”, con el objetivo de que los padres adquirieran el conocimiento y las habilidades necesarias para apoyar el aprendizaje de la lectura de sus hijos a través de esta herramienta. El proceso de intervención se llevó a cabo en un total de 17 sesiones (la población de estudio estuvo presente en todas las sesiones mencionadas), cada una con una duración de dos horas. Al finalizar estas sesiones, se administró un examen de seguimiento para evaluar el progreso y el aprendizaje alcanzado en relación con la lectura.

Dentro de la obtención y análisis de datos de datos, se determinó tres grupos de calificación considerando el estándar aprobado por el Ministerio de Educación del Ecuador para educación preescolar. Etapa de inicio (Iniciado), estudiantes quienes se encuentran en un conocimiento mínimo sobre un tema/actividad. Etapa media “En proceso”, estudiantes quienes poseen y analizan un conocimiento mínimo de un tema/actividad. Etapa de dominio de conocimientos (Adquirido), estudiantes que poseen, analizan e interpretan un conocimiento de un tema/actividad. En este estudio, la variable de estudio fue la frecuencia de estudiantes que se encuentran en las diferentes etapas de calificación mencionadas. Se utilizó estadística descriptiva para en análisis de resultados en el software R studio.

3. RESULTADOS

Los resultados obtenidos presentan los niveles de destreza alcanzados por los estudiantes en la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador, a lo largo de 17 sesiones de estudio mediante una aplicación diseñada para aprender a leer utilizando la metodología Montessori (Tabla 1 y Figura 1). Esta metodología se caracteriza por un enfoque autodidacta, permitiendo a los estudiantes aprender a su propio ritmo y facilitando un ambiente de aprendizaje interactivo y personalizado.

En promedio, 78,53 estudiantes se encuentran en etapa de “Iniciado”, 66,18 estudiantes “En proceso” y 67,94 “Adquirido”. Estos promedios indican que la mayor parte de los estudiantes se encuentran en la fase inicial del proceso de aprendizaje, lo que es común en un entorno Montessori, donde el énfasis está en construir una base sólida antes de avanzar a niveles más complejos. La distribución de estudiantes por sesión varía, reflejando el ritmo individual de aprendizaje característico de la metodología Montessori.

La alta variabilidad en los niveles “Iniciado” y “En proceso” puede reflejar la diversidad de ritmos de aprendizaje entre los estudiantes, una característica clave del enfoque Montessori. La menor variabilidad en el nivel “Adquirido” sugiere que una vez que los estudiantes alcanzan este nivel, tienden a mantenerse consistentes en su progreso [16].

Tabla 1. Niveles de destrezas alcanzados en la provincia Santo Domingo de los Tsáchilas.

Sesión	Nivel de destreza		
	Iniciado	En proceso	Adquirido
1	60	80	70
2	45	100	65
3	80	70	60
4	90	40	80
5	100	50	60
6	70	60	80
7	65	70	75
8	55	85	70
9	75	70	65
10	80	65	65
11	55	80	75
12	85	70	55
13	90	60	60
14	100	50	60
15	75	80	55
16	85	65	60
17	90	40	80

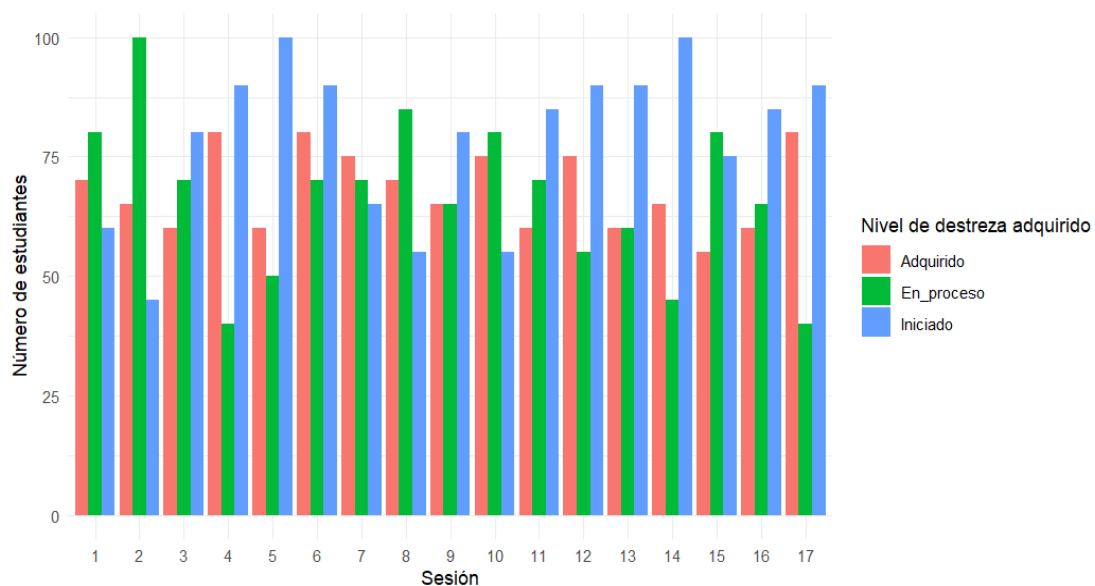


Figura 1. Nivel de destreza de la población de estudio (Santo Domingo de los Tsáchilas).

Los resultados de la provincia de Pichincha (véase Tabla 2 y Figura 2) presenta el número de estudiantes en la provincia de Pichincha, Ecuador, que se encuentran en diferentes niveles de destreza (Iniciado, En proceso, Adquirido). En promedio, 63 estudiantes se encuentran en etapa de “Iniciado”, 70 “En proceso” y 77,65 en “Adquirido”. Estos promedios indican que hay una distribución relativamente equilibrada, con una ligera predominancia de estudiantes en el nivel “Adquirido”, lo que sugiere que una buena parte de los estudiantes ha alcanzado un nivel avanzado de competencia en la lectura. Estos promedios indican que hay una distribución relativamente equilibrada, con una ligera predominancia de estudiantes en el nivel “Adquirido”, lo que sugiere que una buena parte de los estudiantes ha alcanzado un nivel avanzado de competencia en la lectura.

La fluctuación en el nivel “En proceso” refleja la naturaleza dinámica del aprendizaje en la metodología Montessori, donde los estudiantes tienen la libertad de progresar y revisar según sus necesidades. La estabilidad en el nivel “Adquirido” sugiere que una vez que los estudiantes alcanzan este nivel, son capaces de mantener y mejorar sus habilidades de lectura como se reporta en [20].

Tabla 2. Niveles de destrezas alcanzados en la provincia de Pichincha.

Sesión	Nivel de destreza		
	Iniciado	En proceso	Adquirido
1	55	70	85
2	75	70	65
3	60	65	85
4	75	85	50
5	55	65	90
6	75	55	80
7	70	85	55
8	60	65	85
9	55	80	75
10	75	65	70
11	70	55	85
12	75	85	50
13	60	75	75
14	55	70	85
15	65	80	65
16	70	75	65
17	55	70	85

En Santo Domingo, hay un mayor número de estudiantes en el nivel “Iniciado” en comparación con Pichincha, mientras que Pichincha tiene más estudiantes en el nivel “Adquirido”. Esto sugiere que los estudiantes en Pichincha están progresando más rápidamente a través de los niveles de destreza en comparación con los de Santo Domingo.

En Pichincha, los estudiantes parecen estar progresando más rápidamente y de manera más uniforme, alcanzando niveles avanzados de destreza “Adquirido” en mayor número y con mayor consistencia. En Santo Domingo, aunque hay un mayor número de estudiantes en el nivel “Adquirido”, hay más variabilidad en los niveles “Iniciado” y “En proceso”, lo que podría indicar una necesidad de mayor apoyo para algunos estudiantes.

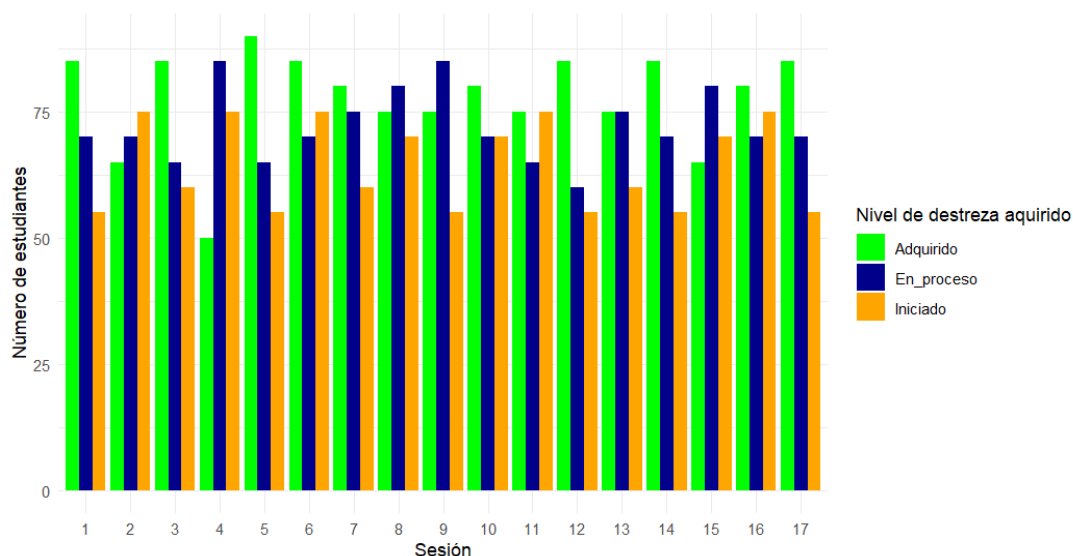


Figura 2. Nivel de destreza de la población de estudio (Pichincha).

4. CONCLUSIONES

En este estudio, se adoptó un enfoque cuantitativo-cualitativo de naturaleza exploratoria para evaluar el impacto de la aplicación Montessori en el desarrollo de habilidades de lectura en niños preescolares en las provincias de Santo Domingo de los Tsáchilas y Pichincha. Los resultados revelaron una variación significativa en el progreso de los niños en las diferentes actividades diseñadas para fomentar la lectura, evidenciando la importancia de adaptar las estrategias educativas para satisfacer las necesidades individuales de cada estudiante y garantizar un desarrollo equitativo en todas las áreas de aprendizaje.

Aunque se observó una mejora general en los niveles de competencia a lo largo de las sesiones, es crucial reconocer las diferencias individuales en el ritmo y capacidad de aprendizaje de cada niño, destacando la necesidad de ajustar las actividades y estrategias para maximizar el progreso educativo de manera uniforme.

En conclusión, los resultados muestran que, aunque los estudiantes en Pichincha están avanzando de manera más uniforme y alcanzando niveles avanzados más rápidamente, los estudiantes en Santo Domingo también están progresando, aunque con mayor variabilidad. Esto resalta la importancia de adaptar las estrategias educativas a las necesidades específicas de cada grupo de estudiantes para maximizar su potencial de aprendizaje.

La ludificación y la gamificación son dos conceptos que a menudo se utilizan de manera intercambiable, pero es crucial destacar sus diferencias. Ambas implican la incorporación de elementos de juego en el proceso educativo para hacerlo más atractivo, pero se distinguen por sus enfoques y objetivos. Mientras que la ludificación tiende a ser más informal y busca simplificar el aprendizaje, la gamificación se caracteriza por establecer metas específicas y complejas, adoptando un enfoque competitivo y a largo plazo.

AGRADECIMIENTOS: Queremos expresar nuestro agradecimiento al departamento de investigación del Instituto Superior Universitario Japón por su gestión al proyecto de investigación 04.2023.PR.INV.STD.DSW.

REFERENCIAS

- [1] M. A. Al Mamun, G. Lawrie, and T. Wright, "Instructional design of scaffolded online learning modules for self-directed and inquiry-based learning environments", *Comput Educ*, vol. 144, dec. 2020. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103695>
- [2] M. C. Ricoy, and C. Sánchez-Martínez, "Raising Ecological Awareness and Digital Literacy in Primary School Children through Gamification", *Int J Environ Res Public Health*, vol. 19, no. 3, jan. 2022. [Online] Available: <https://doi.org/10.3390/ijerph19031149>
- [3] K. Fitton Davies, S. Clarke, R. Martins, J. R. Rudd, and M. Duncan, "The effect of a home-based, gamified stability skills intervention on 4-5-year-old children's physical and cognitive outcomes: A pilot study," *Psychol Sport Exerc*, vol. 73, jul. 2024. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2024.102636>
- [4] A. C. Sari, A. M. Fadillah, J. Jonathan, and M. R. D. Prabowo, "Interactive gamification learning media application for blind children using android smartphone in Indonesia", *Procedia Comput Sci*, vol. 157, pp. 589–595, 2019. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.018>
- [5] M. A. Al Mamun, G. Lawrie, and T. Wright, "Instructional design of scaffolded online learning modules for self-directed and inquiry-based learning environments," *Comput Educ*, vol. 144, jan. 2020. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103695>
- [6] A. Cattoni, F. Anderle, P. Venuti, and A. Pasqualotto, "How to improve reading and writing skills in primary schools: A comparison between gamification and pen-and-paper training", *Int J Child Comput Interact*, vol. 39, mar. 2024. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijcci.2024.100633>
- [7] S. Feinauer, L. Schuller, I. Groh, L. Huestegge, and T. Petzoldt, "The potential of gamification for user education in partial and conditional driving automation: A driving simulator study", *Transp Res Part F Traffic Psychol Behav*, vol. 90, pp. 252–268, oct. 2022. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/J.TRF.2022.08.009>
- [8] K. Nand, N. Baghaei, J. Casey, B. Barmada, F. Mehdipour, and H.-N. Liang, "Engaging children with educational content via Gamification", *Smart Learning Environments*, vol. 6, pp. 1-15, jul. 2019. [Online] Available: <https://doi.org/10.1186/s40561-019-0085-2>
- [9] P. R. D. Ifigenia, M. A. Jaime, B. Julien, and P. G. J. Cesar, "Integration of gamification to assist literacy in children with special educational needs", *IEEE Global Engineering Education Conference, EDUCON*, pp. 1949–1956, apr. 2018. [Online] Available: <https://doi.org/10.1109/EDUCON.2018.8363474>
- [10] X. Li, and S. K. W. Chu, "Exploring the effects of gamification pedagogy on children's reading: A mixed-method study on academic performance, reading-related mentality and behaviors, and sustainability", *British Journal of Educational Technology*, vol. 52, no. 1, pp. 160–178, dec. 2020. [Online] Available: <https://doi.org/10.1111/bjet.13057>
- [11] R. Lamrani, and E. H. Abdelwahed, "Game-based learning and gamification to improve skills in early years education", *Computer Science and Information Systems*, vol. 17, no. 1, pp. 339–356, 2020. [Online] Available: <https://doi.org/10.2298/CSIS190511043L>
- [12] L. Aguiar-Castillo, L. Hernández-López, P. De Saá-Pérez, and R. Pérez-Jiménez, "Gamification as a motivation strategy for higher education students in tourism face-to-

- face learning”, *J Hosp Leis Sport Tour Educ*, vol. 27, nov. 2020. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/J.JHLSTE.2020.100267>
- [13] L. Britton, *Jugar y aprender con el método Montessori*, 1ª ed, España: Paidós Educación, 2017. [En línea]. Disponible en: https://proassetspdlcom.cdnstatics2.com/usuarios/libros_contenido/arxius/37/36433_jugar_y_aprender_con_el_metodo_montessori.pdf
 - [14] A. Kauppinen, and A. Iftikhar Choudhary, “Gamification in entrepreneurship education: A concrete application of Kahoot!”, *The International Journal of Management Education*, vol. 19, no. 3, nov. 2021. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/J.IJME.2021.100563>
 - [15] D. Kayimbaşioğlu, B. Oktekin, and H. Haci, “Integration of Gamification Technology in Education”, *Procedia Comput Sci*, vol. 102, pp. 668–676, jan. 2016. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/J.PROCS.2016.09.460>
 - [16] J. S. Radesky, and D. A. Christakis, “Increased Screen Time: Implications for Early Childhood Development and Behavior”, *Pediatr Clin North Am*, vol. 63, no. 5, pp. 827–839, oct. 2016. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/J.PCL.2016.06.006>
 - [17] M. De Reuver, C. Sørensen, and R. C. Basole, “The Digital Platform: A Research Agenda”, *Journal of Information Technology*, vol. 33, no. 2, pp. 124–135, jun. 2018. [Online] Available: <https://doi.org/10.1057/S41265-016-0033-3>
 - [18] D. H. Clements, J. Sarama, and C. Germeroth, “Learning executive function and early mathematics: Directions of causal relations”, *Early Child Res Q*, vol. 36, pp. 79–90, jul. 2016. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/J.ECRESQ.2015.12.009>
 - [19] S. Papadakis, “Apps to promote computational thinking concepts and coding skills in children of preschool and pre-primary school age”, en *Mobile Learning Applications in Early Childhood Education*, 2019, 101–121. [Online] Available: <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-1486-3.CH006>
 - [20] M. De Reuver, C. Sørensen, and R. C. Basole, “The Digital Platform: A Research Agenda”, *Journal of Information Technology*, vol. 33, no. 2, pp. 124–135, jun. 2018. [Online] Available: <https://doi.org/10.1057/S41265-016-0033-3>



Disrupción de las tecnologías en el aula de acuerdo con la teoría unificada de aceptación y uso de la tecnología

(Disruption of Technologies in the Classroom According to the Unified Theory of Technology Acceptance and Use)

Nancy Pilapaxi-Cunalata¹, Joe Llerena-Izquierdo²

¹ Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador

² Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador
npilapaxi@est.ups.edu.ec, jlllerena@ups.edu.ec

Resumen: El uso de tecnologías en el aula ha sido un tema de interés creciente en la educación contemporánea. El estudio investigativo explora la disrupción provocada por las tecnologías en el entorno educativo, desde la perspectiva de la Teoría Unificada de Aceptación y Uso de la Tecnología (UTAUT, por sus siglas en inglés). La UTAUT proporciona un marco comprensivo para entender cómo los estudiantes de una unidad educativa adoptan y utilizan tecnologías, considerando factores sociales, psicológicos y contextuales. Desde esta óptica, se examinan los diversos impactos que la introducción de tecnologías puede tener en el aula, incluyendo cambios en la dinámica del aprendizaje, la interacción entre estudiantes y docentes, y la eficacia general del proceso educativo. En la revisión bibliográfica se realiza un análisis bibliométrico utilizando la base de datos de Web of Science desde el 2020 hasta el 2024 en idioma inglés, obteniendo 720 artículos en total, posteriormente se realizó representaciones gráficas con VOSviewer para distinguir los países y autores con mayor aporte científico en el ámbito de la adopción de tecnologías en el aula conforme con la Teoría Unificada de Aceptación y Uso de la Tecnología. Se observó un crecimiento continuo en los estudios donde interviene el método UTAUT destacando a Malasia, República Popular de China y Arabia Saudita. Además, se exploró las implicaciones prácticas de la UTAUT para diseñar e implementar estrategias efectivas de integración tecnológica en la educación, con el objetivo de maximizar los beneficios y mitigar posibles desafíos. Este análisis contribuye a una comprensión más profunda de cómo las tecnologías están transformando la enseñanza y el aprendizaje, y ofrece orientación para adaptarse de manera efectiva a estos cambios en el aula moderna.

Palabras clave: Disrupción de las TIC, Modelo UTAUT, Metodologías activas de aprendizaje.

Abstract: The use of technologies in the classroom has been a topic of growing interest in contemporary education. The research study explores the disruption caused by technologies in the educational environment from the perspective of the Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT). UTAUT provides a comprehensive framework for understanding how students in an educational unit adopt and use technologies, considering social, psychological, and contextual factors. From this perspective, it examines the various impacts that the introduction of technologies can have on the classroom, including changes in the dynamics of learning, student-teacher interaction, and the overall effectiveness of the educational process. In the bibliographic review, a bibliometric analysis was performed using the Web of Science database from 2020 to 2024 in English language, obtaining 720 articles in total, then graphical representations were made with VOSviewer to distinguish the countries and authors with greater scientific contribution in the field of the adoption of technologies in the classroom according to the Unified Theory of Acceptance and Use of Technology. A continuous growth in studies involving the UTAUT method was observed,

highlighting Malaysia, People's Republic of China, and Saudi Arabia. In addition, the practical implications of UTAUT for designing and implementing effective technology integration strategies in education were explored to maximize benefits and mitigate potential challenges. This analysis contributes to a deeper understanding of how technologies are transforming teaching and learning and provides guidance for effectively adapting to these changes in the modern classroom.

Keywords: ICT disruption, UTAUT Model, Active learning methodologies.

1. INTRODUCCIÓN

La integración de la tecnología en el aula ha provocado una transformación significativa en la educación contemporánea. Se ha convertido en un pilar fundamental para la innovación y el enriquecimiento del proceso de enseñanza y aprendizaje, ofreciendo nuevas oportunidades y desafíos tanto para docentes como para estudiantes. Esta integración no solo proporciona acceso a una amplia gama de recursos y herramientas digitales [1], sino que también está transformando las metodologías y estrategias educativas tradicionales. Desde la adopción de plataformas en línea y aplicaciones móviles hasta el desarrollo de enfoques pedagógicos centrados en el estudiante, el uso de tecnología está revolucionando la forma en que los educadores diseñan y entregan sus lecciones en línea [2], [3].

La historia de la tecnología educativa está marcada por avances significativos, entre los cuales la integración de la inteligencia artificial (IA) representa un hito transformador. Desde sus inicios, la tecnología educativa ha buscado mejorar los métodos tradicionales de enseñanza y aprendizaje mediante herramientas cada vez más sofisticadas [4],[5]. El aprendizaje personalizado y adaptativo ha ajustado los contenidos y la experiencia educativa según las necesidades individuales de los estudiantes, optimizando así los resultados del aprendizaje y fomentando un ambiente educativo más inclusivo y eficiente que aborda diversas modalidades de aprendizaje y necesidades específicas [6], [7]. Esta sinergia entre tecnología y educación se ha extendido más allá del aula, abarcando plataformas en línea, realidad virtual y herramientas interactivas que enriquecen la experiencia educativa [8],[9]. Además de facilitar la creación de contenidos educativos dinámicos y accesibles, esta integración libera a los educadores de tareas administrativas rutinarias, permitiéndoles concentrarse en la enseñanza personalizada y el desarrollo de habilidades críticas en los estudiantes [10]. No obstante, esta evolución enfrenta desafíos éticos como la privacidad de los datos, los sesgos algorítmicos y la equidad en el acceso a estas tecnologías. Por lo tanto, el futuro de la tecnología educativa dependerá de cómo se manejen estos desafíos y de la colaboración entre educadores, responsables de políticas y tecnólogos para establecer estándares éticos robustos que aseguren que todas las innovaciones beneficien equitativamente a todos los estudiantes [11].

Las metodologías activas en la educación ofrecen un enfoque dinámico y participativo que va más allá de la transmisión de conocimientos, puesto que fomentan una comprensión más profunda de los conceptos y permiten el desarrollo de habilidades esenciales como el pensamiento crítico, la resolución de problemas y la colaboración, sentando bases para un aprendizaje significativo y duradero [12]. En la pandemia por COVID-19 para permitir la continuidad del proceso educativo en un momento de crisis se aceleró la implementación de herramientas tecnológicas en la educación, lo que significó que muchos educadores y estudiantes tenían que adaptarse rápidamente a plataformas en línea, aplicaciones educativas y recursos digitales para mantener el aprendizaje en un entorno remoto [13], [14]. Esta rápida adopción tecnológica también ha llevado a una mayor exploración y experimentación con nuevos enfoques pedagógicos, enriqueciendo el proceso educativo a largo plazo, pero también la transición abrupta a la educación en línea trajo consigo una serie de desafíos y desigualdades, debido a que no todos los estudiantes tenían acceso igualitario a dispositivos y conexión a internet confiable, lo que exacerbó las brechas digitales y socioeconómicas existentes [15]. Además, muchos educadores enfrentaron dificultades para

adaptarse a las nuevas tecnologías y desarrollar estrategias efectivas de enseñanza en línea lo que conllevó a que se aplicaran sin considerar las ventajas educativas, lo que impactó negativamente en la calidad de la educación para algunos estudiantes [16], [17].

La presente investigación se fundamenta en la exploración de los factores que influyen en la aceptación de tecnologías en un contexto educativo, basándose en la experiencia adquirida en la asignatura de Física en las aulas de clase de una institución educativa del sur de Quito, donde se aplicó tecnologías disruptivas para indagar cómo los estudiantes destacan la aceptación de recursos tecnológicos presentados durante la realización de un análisis experimental mediante el modelo de la teoría unificada de la aceptación y el uso de la tecnología (UTAUT) [18].

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. La Teoría Unificada de Aceptación y Uso de la Tecnología, UTAUT

La Teoría Unificada de Aceptación y Uso de la Tecnología, UTAUT, es un modelo teórico ampliamente reconocido en el campo de la investigación de tecnología de la información y la comunicación (TIC), con el objetivo de unificar y sintetizar varios modelos existentes de adopción de tecnología en los diferentes contextos teniendo en cuenta varios factores principales que influyen en la aceptación y el uso de la tecnología, considerando moderadores como la experiencia previa con la tecnología y las características demográficas del objeto de estudio los cuales influyen de manera directa o indirecta en el comportamiento de los modelos, por ende surge la necesidad de verificar si el uso de tecnologías pueden o no ayudar a mejorar la formación educativa de los estudiantes [19], [20].

Teniendo en cuenta la considerable influencia que posee el modelo UTAUT y el modelo de aceptación de la tecnología (TAM) los estudios experimentales en cuanto a la influencia de adopción de las tecnologías se ha incrementado en la práctica educativa midiendo el nivel de aceptación acorde a los factores que estos involucran [2], [8], [21], [22].

2.2. Implicación del modelo UTAUT en la educación

Particularmente en el ámbito universitario la implementación de tecnologías han llegado a ser imprescindibles para la provisión de servicios a nivel global [23], mediante la implementación de entornos de aprendizaje híbridos (*blended learning* o aprendizaje mixto) permitiendo la interacción del usuario a las diferentes actividades formativas mediante un dispositivo conectado a la red, su ejecución efectiva ha posibilitado entender el grado de aceptación tecnológico. Como en el ámbito de salud, compras en línea, entre otros; permitiendo explicar el comportamiento de los modelos en cuanto a la adopción de tecnologías dentro del contexto a ser aplicado, así como los factores que influyen sobre el objeto de estudio.

Adicionalmente, se ha encontrado investigaciones en donde se han instaurado tecnologías comunicacionales en el ámbito de la salud [24] conocida como telemedicina con el fin de monitorear a los pacientes y solventar cualquier inquietud y malestar en su organismo para así realizar el respectivo análisis, diagnóstico y seguimiento en el proceso de recuperación [25], asimismo ha sido una ruta beneficiosa en las terapias del habla y lenguaje incorporándose a la rutina diaria de los pacientes para una próxima recuperación [26].

De igual manera la adopción de tecnologías se volvió una necesidad importante para que los negocios se mantuvieran en auge en el contexto pre y post pandemia tratando así de mantener y mejorar el crecimiento socioeconómico, dando como alternativa las compras en línea para facilitar el acceso a diferentes productos desde la comodidad del hogar, evitando el contacto directo con las personas y un posible contagio, proporcionando a los usuarios el acceso a una amplia variedad de productos de diferentes marcas con entrega a domicilio [27].

De igual modo se ha identificado estudios en el ámbito científico en el transporte público, donde se considera la utilización de autobuses autónomos dotados con tecnología que permitan el ahorro de costos operativos, brindar tiempos prolongados de servicio, sin rutas fijas y con un horario de atención las 24 horas del día para facilitar el desplazamiento de los usuarios [28].

En Ecuador la adopción de tecnologías eran limitadas, no obstante, el brote del coronavirus permitió que adquirieran gran relevancia a pesar del reto que representó su uso, puesto que los docentes no se encontraban familiarizados con los diferentes entornos tecnológicos de enseñanza en línea y las dificultades de adaptar el contenido educativo a un modelo virtual que sea atractivo y efectivo para los estudiantes con el propósito de que alcancen un aprendizaje significativo [29]–[31].

Asimismo en el ámbito local no se ha evidenciado investigaciones relacionadas con el modelo UTAUT o equivalentes a este porque en el proceso de enseñanza-aprendizaje se ha utilizado estrategias metodológicas como el STEM al inicio y luego el STEAM, que es un modelo enfocado a integrar las áreas del conocimiento en el ámbito educativo relacionadas con la Ciencia, Tecnología, Matemática e Ingeniería para fomentar habilidades como el pensamiento crítico, la resolución de problemas, la creatividad y la colaboración en los estudiantes [32]–[34].

En su labor profesional los docentes emplean durante su jornada de trabajo en el aula una variedad de estrategias y métodos para impartir las clases de manera pedagógica, el manejo de tecnologías se ha convertido en uno de los modos notables para transmitir los conocimientos de manera amigable, mediante el uso de plataformas de aprendizaje remoto que ofrecen el acceso a una amplia gama de recursos educativos permitiéndole al estudiantes aprender a su propio ritmo [35], [36].

Se menciona el empleo de inteligencia artificial mediante ChatGPT en el aprendizaje de educación superior como una herramienta útil para los estudiantes [4], puesto que se considera un asistente en el proceso de aprendizaje y al ser una práctica innovadora se debe evaluar la aceptación de la misma mediante la aplicación del método UTAUT para analizar el impacto que tiene en el proceso educativo [37].

3. MATERIALES Y MÉTODOS

El enfoque del estudio investigativo se presentó en dos fases: la primera incorporó una revisión literaria, y luego se aplicaron actividades con el uso de tecnologías que permiten alterar significativamente la forma magistral de enseñanza-aprendizaje de una institución educativa del sur de Quito basado en el método UTAUT.

En la primera fase se realizó una revisión bibliográfica en fuentes de información confiables de bases indexadas de artículos de relevancia como Web of Science desde el año 2020 al 2024 que permitió recopilar, analizar y sintetizar la información existente sobre la disrupción de tecnologías para proporcionar una base sólida de la investigación (ver Figura 1).

En la segunda fase se aplicaron actividades disruptivas para el proceso formativo del estudiante cambiando de manera radical la dinámica del aula y el entorno de aprendizaje al que generalmente los estudiantes estaban acostumbrados, para promover un aprendizaje activo, participativo y significativo se aplicaron herramientas tecnológicas, tales como Quizziz, Quizlet, H5P, Kahoot, Moodle, Genially, Canva, PhET Interactive Simulations, Educaplay, entre otros. Se debió considerar que la elección de la herramienta tecnológica a ser utilizada depende del contenido a impartirse, así como de los objetivos de aprendizaje que se deseen alcanzar.

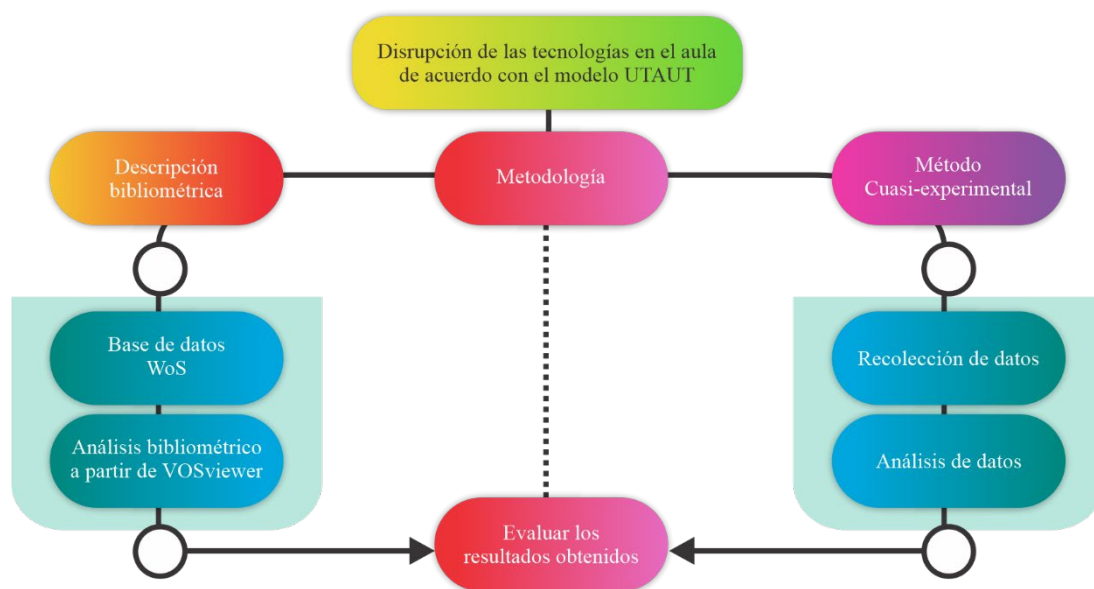


Figura 1. Proceso de aplicación de tecnologías disruptivas en el aula.

La experiencia disruptiva se aplicó en la asignatura de Física, con una metodología empírico-analítico basada en un modelo cuasiexperimental. Para determinar el grado de aceptación de los estudiantes ante el uso de tecnologías, se utilizó una encuesta con escala de Likert realizada en Google Forms. Participaron 89 estudiantes de primero bachillerato, 33 del paralelo A, 30 estudiantes del paralelo B y 26 del paralelo C; también 87 estudiantes de segundo bachillerato, 30 del paralelo A, 29 del B y 28 del C, finalmente 80 estudiantes de tercero bachillerato, 27 del paralelo A, 27 del B y 26 del paralelo C, en total 256 estudiantes que pertenecen a la Unidad Educativa Municipal Oswaldo Lombeyda ubicada en San Fernando de Guamaní, en la ciudad de Quito, Ecuador.

3.1. Primera fase de estudio

La exploración de la investigación se enfocó en encontrar artículos vinculados con el modelo UTAUT en la base de datos Web of Science. La consulta realizada se basó en criterios de búsqueda como los títulos, palabras clave y resúmenes, con el propósito de obtener una visión clara de la dirección de los estudios relacionados con la temática investigada. Los filtros de búsqueda y criterios empleados en Web of Science incluyeron los parámetros como TOPIC en donde se emplearon términos como UTAUT AND UTAUT *model* AND *Unified Theory of Acceptance and Use of Technology* AND *Performance Expectancy* AND *Effort Expentancy*; se consideraron únicamente artículos excluyendo los de revisión o acceso anticipado, referencias citadas enriquecidas, revisiones invitadas de publicación abierta, documento de trabajo o resumen de reunión o material editorial o corrección o publicación retractada; además se los limitó al idioma inglés. Se seleccionaron los artículos publicados de los cinco últimos años en el periodo comprendido entre el 2020 y 2024.

En la búsqueda de artículos se hallaron un total de 720, los mismos que se los seleccionó, exportó y descargó en extensión de archivo plano para luego proceder al análisis consecutivo. Los datos obtenidos permitieron la realización de un análisis descriptivo previo para posteriormente introducir los metadatos encontrados en el software Visualization of Similarities VOSviewer versión 1.6.18 y examinarlos acorde al criterio deseado dentro de las opciones que presenta.

Asimismo, para la revisión bibliográfica se realizó un análisis bibliométrico a través de representaciones gráficas con VOSviewer para distinguir los países y autores con mayor aporte científico en el ámbito de la adopción de tecnologías en el aula conforme con la Teoría Unificada

de Aceptación y Uso de la Tecnología (UTAUT), en relación con el número de citas. Dentro de los 720 artículos examinados, se detectaron 47 países que contribuyen en la publicación de investigaciones científicas a nivel internacional dentro del área de estudio. De esta agrupación de países, 30 llegaron a la norma mínima al obtener al menos 10 artículos y 25 citas. Los resultados desvelan la clasificación de los 10 principales países en función del número de publicaciones y citas obtenidas en los 5 últimos años (ver Tabla 1).

Tabla 1. Publicaciones y citas por país.

Clasificación	País	Artículos	Clasificación	País	Citas
1	Malaysia	89	1	Malaysia	912
2	People's Republic of China	106	2	People's Republic of China	1819
3	India	87	3	India	59
4	USA	61	4	USA	54
5	England	36	5	England	52
6	Australia	34	6	Australia	41
7	Saudi Arabia	49	7	Saudi Arabia	33
8	United Arab Emirates	26	8	United Arab Emirates	29
9	South Korea	28	9	South Korea	26
10	France	19	10	France	24

La Tabla 1, que muestra dos clasificaciones diferentes: una por el número de artículos publicados y otra por el número de citas recibidas, para varios países. Los países más productivos en términos de artículos publicados son: República Popular de China (106), Malaysia (89) e India (87). Los países con mayor número de citas recibidas son: República Popular de China (1819), Malaysia (912) e India (59). Es evidente que República Popular de China lidera tanto en artículos publicados como en citas recibidas. Malaysia tiene un número significativamente alto de citas en relación con el número de artículos, lo que sugiere una alta tasa de citación por artículo publicado. Estados Unidos, a pesar de tener menos artículos publicados que otros países como England (Inglaterra) e India, se encuentra entre los países con un número considerable de citas. Esta información puede indicar la productividad y el impacto de la investigación científica en estos países dentro del contexto proporcionado.

Mediante la base de datos obtenidos en Web of Science, en el análisis bibliométrico basado en artículos publicados se aprecia los países que presentan investigaciones acerca del modelo UTAUT, según el año de publicación, desde el 2020 hasta el 2024, destacándose Malasia como el país que toma la batuta sobre República Popular de China y en tercer lugar Arabia Saudita, por lo tanto, el nivel de investigaciones en estos países ha sido constantes y provechosos (ver Figura 2).

Tabla 2. Autores con mayor número de citas y publicaciones relacionadas con el modelo UTAUT.

Clasificación	Autores	Documentos	Citaciones
1	Mensah, Isaac Kofi	8	103
2	Al-Okaily, Manaf	6	118
3	Rana, Npiedra P.	4	416
4	Dwivedi, Yogesh K.	4	300
5	Zhou, Min	4	150
6	Campy, Kathryn S.	4	150
7	Kon, Nan	4	150
8	Sharma, Shavneet	4	106
9	Singh, Qurmeet	4	106
10	Zeng, Guohua	4	58

Los autores varían en términos de la cantidad de documentos y citas recibidas, lo que sugiere diferentes niveles de impacto y reconocimiento en la literatura académica relacionada con el modelo UTAUT. La cantidad de documentos no siempre correlaciona directamente con el número de citas, ya que algunos autores con menos documentos tienen un número considerable de citas.

3.2 Segunda fase de estudio

Antes de comenzar a impartir clases es fundamental elaborar la planificación de la asignatura de Física General [43], [44], para garantizar que la enseñanza de contenidos sea efectiva, significativa y adaptada a las necesidades individuales de los estudiantes, integrando en los recursos de clase diversas actividades y evaluaciones realizadas en herramientas digitales disruptivas, de fácil acceso debido a que cuentan con el enlace, usuario y contraseña respectivo, esto facilita el cumplimiento de los objetivos educativos planteados (ver Figura 4).



Figura 4. Implementación de actividades disruptivas en el aula en el ámbito de la asignatura de Física General.

Para la elaboración de la encuesta se usó los formularios de Google, también se recurrió a una matriz de seguimiento en Excel donde constan las calificaciones de las diferentes actividades realizadas con los estudiantes tanto de manera tradicional como con la implementación de herramientas tecnológicas. Los datos recolectados permitieron realizar el respectivo análisis de resultados de manera cuantitativa y por último se evaluó los resultados obtenidos mediante el método analítico-sintético que permitió descomponer el objeto de estudio en partes más pequeñas para una mejor comprensión de la temática y de esta manera se compararon con los resultados obtenidos en el estudio realizado.

La utilización del modelo UTAUT ha cobrado importancia por ser considerado un modelo fuerte que propone un cambio al método de enseñanza tradicional, ya que el alumno se convierte en el protagonista del proceso de aprendizaje al ser un ente activo, en cambio, el profesor se convierte en guía, durante todo el proceso de enseñanza y aprendizaje al utilizar diferentes tecnologías digitales.

4. RESULTADOS

Durante el proceso educativo de los estudiantes se aplicaron diferentes herramientas digitales en las actividades y evaluaciones de los cuales fueron partícipes de manera activa donde se les proporcionó un usuario y contraseña para su respectiva validación de datos en los diferentes entornos virtuales. El 100 % de la muestra de estudio correspondiente a los 256 estudiantes de bachillerato que participaron de esta investigación cuentan con acceso a las diversas actividades formativas que se planificó previamente y que se realizó tanto de manera tradicional como con la implementación de tecnologías digitales.

La primera forma en que se ejecutaron las actividades en el aula de clase fue de manera convencional puesto que los estudiantes usan libros de texto, hojas de papel, lápiz y borrador para realizarlas. En una segunda forma las actividades que realizaron, las llevaron a cabo en la plataforma Moodle en donde se les proporcionó su respectivo usuario y contraseña para el acceso, y en el área de trabajo se les asignó actividades de trabajo individual, grupal, de investigación, evaluativo y de recuperación mediante el uso de herramientas digitales como Kahoot, Quizziz, Quizlet, H5P, Genially, Canva, PhET Interactive Simulations, Educaplay, entre otros, esto con el fin de cambiar la manera de interactuar con los estudiantes.

Luego de la aplicación de actividades de manera disruptiva se pudo apreciar que existe un mejor desempeño académico por parte de los estudiantes al adoptarse tecnologías digitales en el proceso de enseñanza y aprendizaje debido a que tienen la oportunidad de acceder a los contenidos e interactuar con los diferentes recursos de una manera personalizada y didáctica, facilitando la comprensión de conceptos complejos y la profundización de temas específicos a su propio ritmo, puesto que se adaptó a la necesidad de cada individuo y como resultado se observó una mejora en las calificaciones.

En primero bachillerato, el 33 % de los estudiantes obtuvieron calificaciones superiores o iguales a 7, mientras que el 67 % contaron con notas inferiores a 7 al utilizar la enseñanza magistral. Por otro lado, cuando se usó tecnologías en las actividades que realizaron los estudiantes, se pudo evidenciar que el 98 % obtuvieron notas iguales o superiores a 7, mientras que el 2 % obtuvieron notas inferiores a 7 y no alcanzaron a mejorar su rendimiento (ver Figura 5).

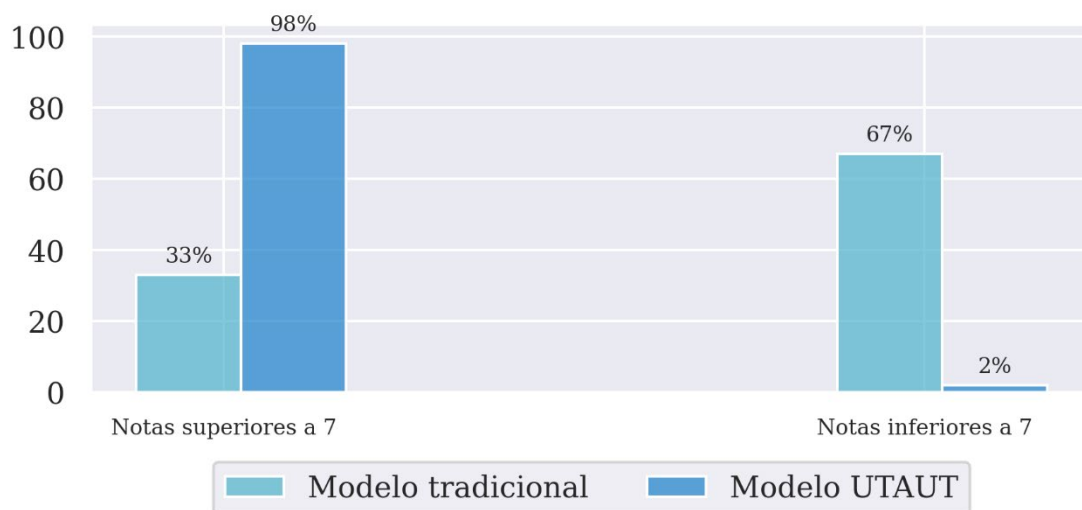


Figura 5. Porcentaje de calificaciones en el primer año de bachillerato.

En segundo bachillerato, el 34 % de los estudiantes obtuvieron calificaciones superiores o iguales a 7, mientras que el 66 % contaron con notas inferiores a 7 al utilizar la enseñanza magistral. Por otra parte, cuando se usó tecnologías en las actividades que realizaron los estudiantes, se pudo evidenciar que el 97 % obtuvieron notas iguales o superiores a 7, mientras que el 3 % obtuvieron notas inferiores a 7 y no alcanzaron a mejorar su rendimiento (ver Figura 6).

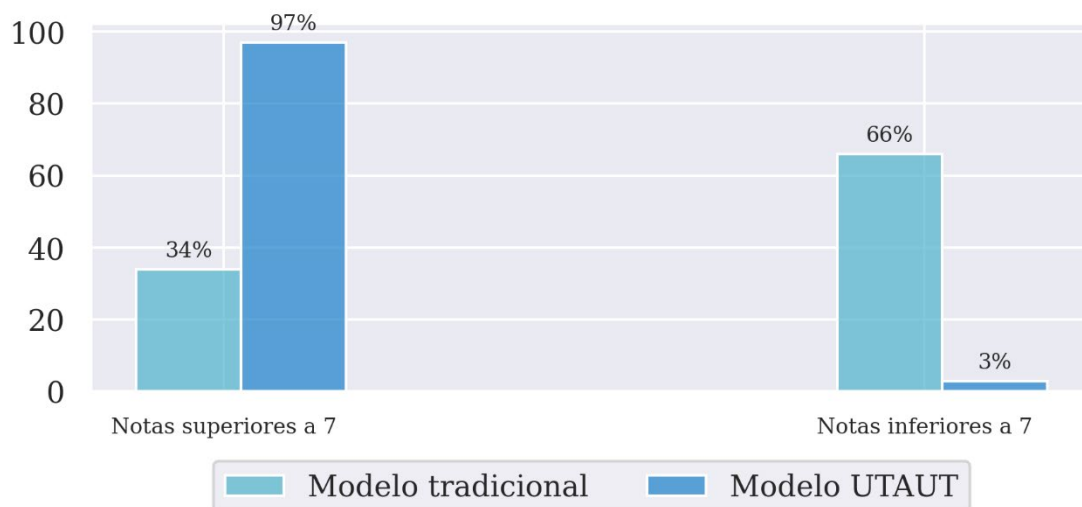


Figura 6. Porcentaje de calificaciones en el segundo año de bachillerato.

En tercero bachillerato, el 36 % de los estudiantes obtuvieron calificaciones superiores o iguales a 7, mientras que el 64 % contaron con notas inferiores a 7 al utilizar la enseñanza magistral. Sin embargo, cuando se usó tecnologías en las actividades que realizaron los estudiantes se pudo evidenciar que el 96 % obtuvieron notas iguales o superiores a 7, mientras que el 4 % obtuvieron notas inferiores a 7 y no alcanzaron a mejorar su rendimiento (ver Figura 7).

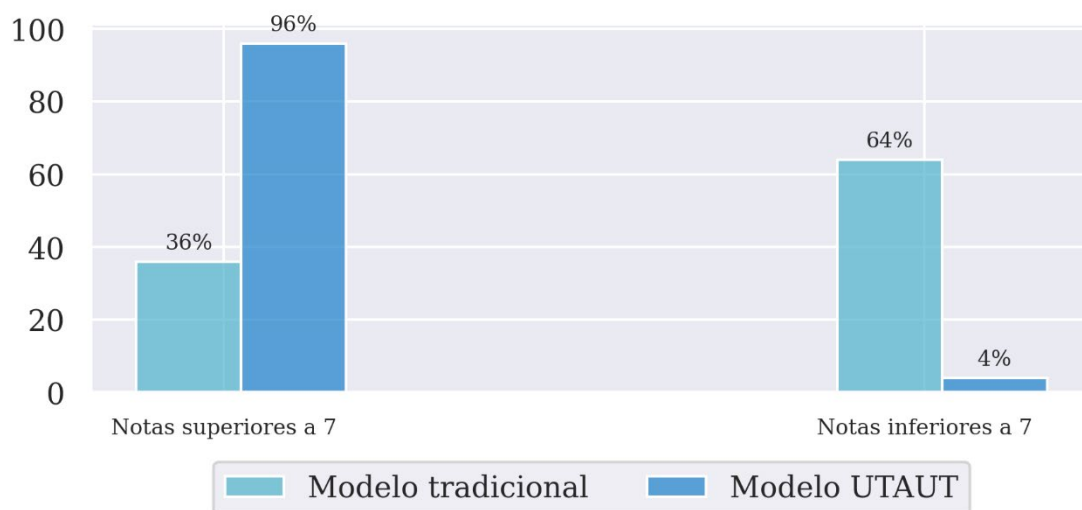


Figura 7. Porcentaje de calificaciones en el tercer año de bachillerato.

Finalmente, de la muestra total de 256 estudiantes de bachillerato se pudo constatar que el 34 % de los estudiantes obtuvieron calificaciones superiores o iguales a 7, mientras que el 66 % contaron con notas inferiores a 7 al utilizar la enseñanza tradicional. Sin embargo, cuando se usó tecnologías en las actividades que realizaron los estudiantes, se pudo evidenciar que el 97 % obtuvieron notas iguales o superiores a 7, mientras que el 3 % obtuvieron notas inferiores a 7 y no alcanzaron a mejorar su rendimiento. Uno de los factores externos al que se le atribuyó este efecto es la falta de recursos económicos para contratar un buen servicio de internet debido al nivel económico bajo que poseen (ver Figura 8).

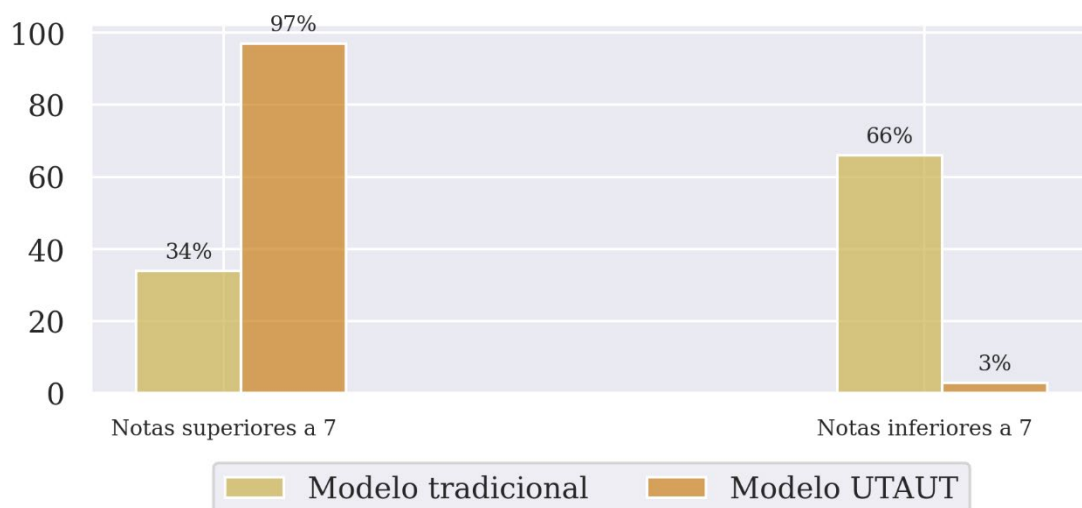


Figura 8. Porcentaje de calificaciones en el bachillerato.

5. DISCUSIÓN

Para optimizar la enseñanza de la asignatura de Física, es crucial seleccionar herramientas didácticas que se alineen con los objetivos educativos y sean apropiadas para el nivel de los estudiantes. Esto no solo mejora la comprensión de los contenidos, sino que también fomenta una mayor participación y motivación. La integración de tecnologías digitales en el aula facilita el acceso a la información y permite personalizar el aprendizaje, lo que a su vez incrementa la

motivación y el compromiso de los estudiantes al desarrollar habilidades aplicables a su vida cotidiana [38],[39].

Sin embargo, para que estas tecnologías sean efectivas, es fundamental que los docentes reciban las formaciones y capacitaciones adecuadas. La correcta integración de las tecnologías requiere que los profesores sepan cómo utilizarlas de manera práctica y planificar su uso en función de las necesidades de los estudiantes y la complejidad de los temas. Además, el respaldo institucional y programas de capacitación eficaces son esenciales para asegurar la aceptación y maximizar el impacto de las tecnologías en el proceso de enseñanza y aprendizaje, especialmente en asignaturas exactas como Física [40], [41], [42].

Es indudable que las TIC han transformado de manera innegable el panorama educativo al ofrecer una amplia gama de ventajas. Por ejemplo, facilitan el acceso a una vasta cantidad de recursos e información a través de internet, permitiendo a los estudiantes investigar y profundizar en temas de estudio de manera independiente y autónoma, sin importar su ubicación. Esto potencia su curiosidad intelectual y fomenta un aprendizaje más autodirigido. Además, las TIC promueven la interacción con otros y facilitan la comunicación, creando espacios donde se motiva la autoformación y se rompen barreras físicas, promoviendo así un aprendizaje inclusivo y globalizado.

Sin embargo, los métodos educativos tradicionales aún conservan ciertas ventajas que las TIC no siempre pueden replicar completamente. Por ejemplo, la interacción cara a cara entre estudiantes y maestros en un entorno físico puede promover relaciones más cercanas y facilitar una retroalimentación inmediata y personalizada. Esta conexión humana, gestos, sonidos y emociones, es crucial para el desarrollo socioemocional de los estudiantes y puede fomentar un sentido de comunidad y pertenencia que a menudo es difícil de lograr a través de plataformas digitales. Además, los métodos tradicionales a menudo se centran en el desarrollo de habilidades prácticas y la transmisión de valores culturales y sociales que pueden ser más efectivos cuando se enseñan en un contexto presencial.

Otro aspecto donde los métodos educativos tradicionales pueden ser superiores es en la adaptabilidad a diferentes estilos de aprendizaje y necesidades individuales. Aunque las TIC permiten el aprendizaje personalizado a través de algoritmos y plataformas adaptativas, los maestros en un entorno tradicional pueden ajustar sus métodos de enseñanza en tiempo real según las respuestas y necesidades específicas de los estudiantes, en una experiencia de intercambio presencial, ofreciendo una flexibilidad y atención personalizada que a menudo es difícil de replicar digitalmente.

6. CONCLUSIONES

La revisión de literatura realizada ha revelado una amplia gama de tecnologías disruptivas educativas, como aplicaciones móviles, plataformas en línea y herramientas digitales. El análisis de herramientas como Kahoot, Quizziz, Quizlet, H5P, Genially, Canva, PhET Interactive Simulations y Educaplay ha proporcionado una base sólida para entender su impacto y potencial en la transformación del proceso de enseñanza y aprendizaje. La elaboración de una tabla de seguimiento en Excel, con las notas obtenidas por los estudiantes antes y después de realizar actividades con estas herramientas, ha permitido una visión integral de los factores y condiciones que influyen en la aplicabilidad y efectividad de los modelos educativos. Este análisis ha identificado elementos críticos en la implementación del modelo, facilitando la evaluación y selección de enfoques más adecuados para mejorar la experiencia educativa.

La aceptación y uso de tecnologías en el aula están significativamente influenciados por las percepciones y actitudes de los estudiantes. Por lo tanto, es crucial considerar sus opiniones, preocupaciones y preferencias al diseñar e implementar tecnologías educativas, y abordar posibles barreras y resistencias. El modelo UTAUT destaca la relevancia de la experiencia previa, la

expectativa de rendimiento, la influencia social y la facilidad de uso en la adopción de tecnologías. Esto sugiere que las estrategias para integrar tecnologías deben ser personalizadas y adaptadas a las necesidades individuales, experiencias y contextos específicos de los usuarios. La flexibilidad y capacidad de personalización son esenciales para maximizar el impacto de las tecnologías en el proceso educativo.

El proceso de investigación llevado a cabo ha sido fundamental para comprender los desafíos, oportunidades y requisitos necesarios para implementar un modelo aplicable en el aula en la asignatura de Física en el nivel de bachillerato. A través de la evaluación de diversas fuentes de información, metodologías de investigación y resultados obtenidos, se cuenta con una visión holística y fundamentada sobre la viabilidad y efectividad del modelo propuesto. Este análisis crítico ha permitido identificar áreas de mejora, fortalezas y limitaciones del enfoque investigativo, proporcionando así una base sólida para futuras investigaciones y acciones dirigidas a mejorar la calidad de la enseñanza de la Física en el contexto del bachillerato.

Para educadores, instituciones y responsables de políticas educativas, se pueden recomendar acciones concretas para aprovechar las ventajas de las TIC en el ámbito educativo, como una continua capacitación formativa, el desarrollo de contenidos interactivos, mejorar el currículo con recursos atractivos y efectivos, un acceso igualitario a la tecnología dentro de la institución, el fomento del aprendizaje colaborativo con herramientas digitales, evaluación y monitoreo constante, integración de políticas de seguridad y privacidad, integrar el uso de dispositivos tecnológicos y conexión a internet de calidad e incentivar a la investigación y el desarrollo de la educación digital, todo esto con el fin de explorar nuevas tecnologías emergentes para mejorar aún más las prácticas educativas. Estas acciones implementadas no solo optimizarán la integración de las TIC en la educación, sino que también asegura que todos los estudiantes puedan beneficiarse equitativamente de las oportunidades educativas que ofrecen las tecnologías digitales.

Finalmente, mientras que las TIC han transformado profundamente la educación moderna al facilitar el acceso a información y recursos globales, así como al promover un aprendizaje colaborativo y autónomo, los métodos educativos tradicionales aún juegan un papel crucial en proporcionar interacción humana significativa, adaptabilidad inmediata y la transmisión de valores fundamentales, culturales y sociales. La integración equilibrada de ambos enfoques puede maximizar el potencial educativo y mejorar la experiencia de aprendizaje para todos los estudiantes.

AGRADECIMIENTOS: Al equipo de profesores de la Unidad Educativa Municipal Oswaldo Lombeyda ubicada en San Fernando de Guamaní, en la ciudad de Quito, Ecuador por la colaboración en esta investigación. A la Universidad Politécnica Salesiana por su seguimiento y acompañamiento en el proceso de la investigación.

REFERENCIAS

- [1] D. Menon and K. Shilpa, “‘Chatting with ChatGPT’: Analyzing the factors influencing users’ intention to Use the Open AI’s ChatGPT using the UTAUT model,” *Heliyon*, vol. 9, no. 11, nov. 2023. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20962>
- [2] I. Y. Alyoussef, “Acceptance of a flipped classroom to improve university students’ learning: An empirical study on the TAM model and the unified theory of acceptance and use of technology (UTAUT),” *Heliyon*, vol. 8, no. 12, p. e12529, 2022. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12529>

- [3] H. Sharif-Nia *et al.*, “E-learning Acceptance: The Mediating Role of Student Computer Competency in the Relationship Between the Instructor and the Educational Content,” *Teach. Learn. Nurs.*, vol. 19, no. 1, pp. e5–e10, jan. 2024. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/j.teln.2023.08.001>
- [4] R. López-Chila, J. Llerena-Izquierdo, N. Sumba-Nacipucha and J. Cueva-Estrada, “Artificial Intelligence in Higher Education: An Analysis of Existing Bibliometrics,” *Educ. Sci.*, vol. 14, no. 1, dec. 2024. [Online] Available: <https://doi.org/10.3390/educsci14010047>
- [5] O. Olusola Ayeni, N. Mohd Al Hamad, C. Onyebuchi Nneamaka, B. Osawaru and O. Elizabeth Adewusi, “AI in education: A review of personalized learning and educational technology,” *GSC Adv. Res. Rev.*, vol. 18, no. 2, pp. 261–271, feb. 2024. [Online] Available: <https://doi.org/10.30574/gscarr.2024.18.2.0062>
- [6] Y. Jing, C. Wang, Y. Chen, H. Wang, T. Yu and R. Shadiev, “Bibliometric mapping techniques in educational technology research: A systematic literature review,” *Educ. Inf. Technol.*, vol. 29, no. 8, pp. 9283–9311, 2024. [Online] Available: <https://doi.org/10.1007/s10639-023-12178-6>
- [7] R. Ayala-Carabajo and J. Llerena-Izquierdo, “Bibliometric Review on a Hybrid Learning Model with VLEs from a Higher Education Context,” in *Systems, Smart Technologies and Innovation for Society*, J. P. Salgado-Guerrero, H. R. Vega-Carrillo, G. García-Fernández, and V. Robles-Bykbaev, Eds., Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 148–157.
- [8] R. Lopez-Chila, N. Sumba-Nacipucha, J. Córdova-León, R. Valverde-Arrieta, J. Jimenez-Contreras and J. Llerena-Izquierdo, “A Management Model for the Development of Meaningful Digital Learning Resources in Homogeneous Linear Algebra Courses,” in *2023 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET)*, IEEE, Nov. 2023, pp. 1–6. [Online] Available: <https://doi.org/10.1109/ICECET58911.2023.10389227>
- [9] X. Chen and J. Hu, “Antecedents of adolescent students’ ICT self-efficacy: The ICT dataset,” *Data Br.*, vol. 33, p. 106437, dec. 2020. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.106437>
- [10] J. Zapata-Martínez and J. Llerena-Izquierdo, “Las TIC después del COVID-19: la perspectiva de los profesores universitarios”, *Congr. Docencia en Educ. Super. CODES*, vol. 5, nov. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.15443/codes1988>
- [11] D. Al Husaeni *et al.*, “How Technology Can Change Educational Research? Definition, Factors for Improving Quality of Education and Computational Bibliometric Analysis,” *ASEAN J. Sci. Eng.*, vol. 4, no. 2, pp. 127–166, 2023. [Online] Available: <https://doi.org/10.17509/ajse.v4i2.62045>
- [12] M. K. Hunde, A. W. Demsash and A. D. Walle, “Behavioral intention to use e-learning and its associated factors among health science students in Mettu university, southwest Ethiopia: Using modified UTAUT model,” *Informatics Med. Unlocked*, vol. 36, dec. 2023. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/j.imu.2022.101154>
- [13] M. Sarfraz, K. F. Khawaja and L. Ivascu, “Factors affecting business school students’ performance during the COVID-19 pandemic: A moderated and mediated model,” *Int. J. Manag. Educ.*, vol. 20, no. 2, p. 100630, jul. 2022. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijme.2022.100630>

- [14] J. Llerena-Izquierdo and R. Ayala-Carabajo, "University Teacher Training During the COVID-19 Emergency: The Role of Online Teaching-Learning Tools," *Int. Conf. Inf. Technol. Syst.*, pp. 90–99, feb. 2021. [Online] Available: https://doi.org/10.1007/978-3-030-68418-1_10
- [15] J. Llerena-Izquierdo and R. Ayala-Carabajo, "Inventory of ICTs for learning in engineering for emergency virtual teaching by COVID-19," in *2022 IEEE World Engineering Education Conference (EDUNINE)*, pp. 1–6, mar. 2022. [Online] Available: <https://doi.org/10.1109/EDUNINE53672.2022.9782389>
- [16] A. A. Alfalah, "Factors influencing students' adoption and use of mobile learning management systems (m-LMSs): A quantitative study of Saudi Arabia," *Int. J. Inf. Manag. Data Insights*, vol. 3, no. 1, p. 100143, apr. 2023. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/j.jjime.2022.100143>
- [17] K. A. Abraham Sleiman *et al.*, "Factors that impacted mobile-payment adoption in China during the COVID-19 pandemic," *Heliyon*, vol. 9, no. 5, p. e16197, may. 2023. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16197>
- [18] Y. C. Huang, "Integrated concepts of the UTAUT and TPB in virtual reality behavioral intention," *J. Retail. Consum. Serv.*, vol. 70, pp. 103127, jan. 2023. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2022.103127>
- [19] A. Abbas, D. Ekowati, F. Suhariadi, A. Anwar and R. M. Fenitra, "Technology acceptance and COVID-19: a perspective for emerging opportunities from crisis," *Technol. Anal. Strateg. Manag.*, vol. 36 no. 11, pp. 3551–3563, may. 2023. [Online] Available: <https://doi.org/10.1080/09537325.2023.2214642>
- [20] J. E. Raffaghelli, M. E. Rodríguez, A.-E. Guerrero-Roldán and D. Bañeres, "Applying the UTAUT model to explain the students' acceptance of an early warning system in Higher Education," *Comput. Educ.*, vol. 182, pp. 104468, jun. 2022. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2022.104468>
- [21] M. Isanoa-Sinche and J. Llerena-Izquierdo, "Towards a Meaningful Experience on the Use of Digital Educational Resources and Media created at Ardora," in *2023 IEEE Seventh Ecuador Technical Chapters Meeting (ECTM)*, 2023, pp. 1–5. [Online] Available: <https://doi.org/10.1109/ETCM58927.2023.10308988>
- [22] R. Lopez-Chila, N. Mora-Saltos, A. Cedeño-Tello and J. Llerena-Izquierdo, "A Learning Resource Management Model for high-enrollment Programming courses in Engineering," in *2023 International Conference on Electrical, Communication and Computer Engineering (ICECCE)*, 2023, pp. 1–6. [Online] Available: <https://doi.org/10.1109/ICECCE61019.2023.10442311>
- [23] R. Puthiya, P. Anderson, C. Fonseca and L. Hyland, "Technology adoption in a hybrid learning environment: An action research study among university faculty in the UAE," *Interact. Learn. Environ.*, pp. 1-12, dec. 2023. [Online] Available: <https://doi.org/10.1080/10494820.2023.2290020>
- [24] Y. J. Kim, J. H. Choi and G. M. N. Fotso, "Medical professionals' adoption of AI-based medical devices: UTAUT model with trust mediation," *J. Open Innov. Technol. Mark. Complex.*, vol. 10, no. 1, mar. 2024. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2024.100220>
- [25] F. Viana Pereira, J. Tavares and T. Oliveira, "Adoption of video consultations during the COVID-19 pandemic," *Internet Interv.*, vol. 31, mar. 2023, doi: 10.1016/j.invent.2023.100602

- [26] Á. Kearns and H. Kelly, "ICT usage in aphasia rehabilitation—beliefs, biases, and influencing factors from the perspectives of speech and language therapists," *Aphasiology*, vol. 37, no. 3, pp. 456–478, feb. 2023. [Online] Available: <https://doi.org/10.1080/02687038.2022.2030462>
- [27] B. A. Akinnuwesi *et al.*, "A modified UTAUT model for the acceptance and use of digital technology for tackling COVID-19," *Sustain. Oper. Comput.*, vol. 3, pp. 118–135, dec. 2022. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2021.12.001>
- [28] L. Cai, K. F. Yuen and X. Wang, "Explore public acceptance of autonomous buses: An integrated model of UTAUT, TTF and trust," *Travel Behav. Soc.*, vol. 31, pp. 120–130, apr. 2023. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/j.tbs.2022.11.010>
- [29] S. Singh, V. Kumar, M. Paliwal, S. V. P. Singh and S. Mahlawat, "Explaining the linkage between antecedents' factors of adopting online classes and perceived learning outcome using extended UTAUT model," *Data Inf. Manag.*, vol. 7, no. 4, dec. 2023. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/j.dim.2023.100052>
- [30] N. Pilapaxi-Cunalata and J. Llerena-Izquierdo, "Experience of the Disruption of Educational Technologies Based on the UTAUT Model," in *2023 IEEE Seventh Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*, pp. 1–5, 2023. [Online] Available: <https://doi.org/10.1109/ETCM58927.2023.10308981>
- [31] N. Sumba-Nacipucha, J. Cueva-Estrada, E. Conde-Lorenzo and M. C. Mármol-Castillo, "Reflections on the role of the professor from the TPACK model perspective during covid-19," in *2021 IEEE World Conference on Engineering Education (EDUNINE)*, 2021, pp. 1–6. [Online] Available: <https://doi.org/10.1109/EDUNINE51952.2021.9429097>
- [32] R. D. Bacuna and E. T. Castro, "Acceptance of Google Classroom Technology among Students at Romblon State University-Cajidiocan Campus Using the Modified UTAUT Model," *2023 3rd Asian Conf. Innov. Technol. ASIANCON 2023*, pp. 1–8, 2023. [Online] Available: <http://dx.doi.org/10.1109/ASIANCON58793.2023.10270575>
- [33] M. Kamal and A. P. Subriadi, "UTAUT Model of Mobile Application: Literature Review," *Proc. - IEIT 2021 1st Int. Conf. Electr. Inf. Technol.*, pp. 120–125, 2021. [Online] Available: <https://doi.org/10.1109/IEIT53149.2021.9587377>
- [34] J. Rivadeneira and E. Inga, "Interactive Peer Instruction Method Applied to Classroom Environments Considering a Learning Engineering Approach to Innovate the Teaching–Learning Process," *Educ. Sci.*, vol. 13, no. 3, mar. 2023. [Online] Available: <https://doi.org/10.3390/educsci13030301>
- [35] J. M. Sahut and R. Lissillour, "The adoption of remote work platforms after the Covid-19 lockdown: New approach, new evidence," *J. Bus. Res.*, vol. 154, no. aug. 2023. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2022.113345>
- [36] F. B. Potes-Duque and J. J. Jiménez-Contreras, "Innovación pedagógica en el proceso de enseñanza-aprendizaje de matemáticas para estudiantes de Educación General Básica considerando las Tecnologías de la Información y la Comunicación," *INNOVA Res. J.*, vol. 8, no. 3.1, pp. 25–44, nov. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.33890/innova.v8.n3.1.2023.2319>
- [37] A. Habibi, M. Muhaimin, B. K. Danibao, Y. G. Wibowo, S. Wahyuni, and A. Octavia, "ChatGPT in higher education learning: Acceptance and use," *Comput. Educ. Artif. Intell.*, vol. 5, no. dec. 2023. [Online] Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.caeai.2023.100190>

- [38] M. Alhwaiti, “Acceptance of Artificial Intelligence Application in the Post-Covid Era and Its Impact on Faculty Members’ Occupational Well-being and Teaching Self Efficacy : A Path Analysis Using the UTAUT 2 Model Acceptance of Artificial Intelligence Application in t,” *Appl. Artif. Intell*, vol. 37, no. 1, feb. 2023. [Online] Available: <https://doi.org/10.1080/08839514.2023.2175110>
- [39] B. Gao, “Understanding smart education continuance intention in a delayed benefit context: An integration of sensory stimuli, UTAUT, and flow theory,” *Acta Psychol. (Amst)*, vol. 234, apr.. 2023. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2023.103856>
- [40] M. A. Shareef *et al.*, “Mandatory adoption of technology: Can UTAUT2 model capture managers behavioral intention?,” *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 200, mar. 2024. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.123087>
- [41] S. FakhrHosseini *et al.*, “User Adoption of Intelligent Environments: A Review of Technology Adoption Models, Challenges, and Prospects,” *Int. J. Hum. Comput. Interact.*, vol. 40, no. 4, pp. 986–998, sep. 2024. [Online] Available: <https://doi.org/10.1080/10447318.2022.2118851>
- [42] Y. H. S. Al-mamary, “Understanding the use of learning management systems by undergraduate university students using the UTAUT model : Credible evidence from Saudi Arabia”, *International Journal of Information Management Data Insights*, vol. 2, no. 2, nov. 2022. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/j.jjime.2022.100092>
- [43] Ministerio de Educación Ecuador, *Bachillerato General Unificado - FÍSICA*, pp. 224–293. 2016 [En línea]. Disponible en: <https://educacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/03/Fisica.pdf>
- [44] Ministerio de Educación Ecuador, *Física 2 BGU*, Ecuador, Editorial Edebé. 2016 [En línea]. Disponible en: <https://educacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/04/curriculo/2DO-BGU-FISICA.pdf>



Cambios en la formación docente en el marco del modelo TPACK considerando el concepto de ingeniería educativa

(Changes in Teacher Training Within the Framework of the TPACK Model Considering the Concept of Educational Engineering)

César Jácome-Mármol¹, Esteban Inga¹, Joe Llerena-Izquierdo²

¹ Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador

² Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador

cjacome@est.ups.edu.ec, einga@ups.edu.ec, jlllerena@ups.edu.ec

Resumen: La rápida evolución tecnológica y la adopción de metodologías innovadoras están transformando el panorama educativo, afectando tanto a estudiantes como a docentes. Este artículo busca aportar al conocimiento existente sobre la integración de tecnologías en la formación docente, centrándose en el diseño de un modelo de capacitación para educadores basado en el marco TPACK (Knowledge Technological Pedagogical Content). El modelo propuesto tiene como objetivo optimizar el proceso de enseñanza-aprendizaje, mejorando la preparación, ejecución y evaluación educativa mediante el uso de recursos tecnológicos. La investigación emplea un enfoque cuantitativo de tipo empírico-analítico, estructurado en dos fases: en la primera, se realiza una revisión sistemática de la literatura para identificar conceptos clave; en la segunda, se evalúan los métodos encontrados, contextualizándolos dentro del marco TPACK y delineando un flujo modular de formación. De los 90 artículos analizados, se seleccionaron 19 que abordan el uso de la tecnología para innovar la enseñanza, lo que permitió construir un mapa conceptual con herramientas digitales que apoyan la labor docente en diversas fases de la enseñanza. Los resultados indican que un 74 % de los docentes valora positivamente la incorporación de tecnologías dentro del marco TPACK, lo que refuerza su viabilidad en la práctica educativa. Finalmente, se identifican áreas de mejora en la capacitación docente y se proponen ajustes clave, como la inclusión de nuevas herramientas, para fortalecer la implementación del modelo y los principios de la ingeniería educativa.

Palabras clave: Proceso de enseñanza-aprendizaje, capacitación docente, innovación educativa.

Abstract: Technological evolution and the adoption of innovative methodologies are transforming education, impacting both students and teachers. This article aims to contribute to the existing literature on the integration of technology in teacher education. It presents a training model for educators based on the TPACK (Technological Pedagogical Content Knowledge) framework, which uses technological tools to optimize the teaching-learning process and improve efficiency in educational preparation, execution and evaluation. The research employs an empirical-analytical approach with a quantitative design. It is structured in two phases: the first consists of an exhaustive literature review to identify key concepts related to the study. In the second phase, the methods found are evaluated in the context of the TPACK model and a modular training flow is defined. Of the 90 articles analyzed, 19 that address the use of technologies for innovation in teaching are highlighted. A conceptual map is presented that identifies technological tools that can support teachers in the planning, execution and evaluation of classes. The results show that 74 % of teachers positively accept the use of digital tools within the TPACK framework, which supports their integration into

educational practice. The research concludes that areas for improvement in teacher training have been identified and specific changes are proposed, including the incorporation of new tools, to strengthen the integration of the TPACK model and the principles of educational engineering.

Keywords: Teaching-learning process, teacher training, educational innovation.

1. INTRODUCCIÓN

El progreso tecnológico está teniendo un impacto significativo tanto en los métodos de aprendizaje de los estudiantes como en las prácticas de los profesores en la educación moderna. Diversos autores destacan la ventaja de esta transformación que permite un aprendizaje personalizado, una mayor motivación de los alumnos y contribuye a su éxito académico [1].

Las nuevas generaciones, denominadas nativos digitales, han demostrado un conocimiento profundo y versátil en la integración de herramientas y aplicaciones tecnológicas en el ámbito educativo. Este dominio tecnológico representa una ventaja significativa, ya que les permite interactuar con recursos digitales de manera fluida y efectiva, facilitando un aprendizaje más autónomo y adaptado a sus necesidades individuales [2], [3]. En este contexto, los docentes se encuentran ante la necesidad de aprovechar las oportunidades que ofrecen las innovaciones tecnológicas [4].

La integración de las denominadas tecnologías educativas no solo tiene el potencial de enriquecer y diversificar los métodos de enseñanza, sino que también puede fomentar una mayor participación y motivación entre los estudiantes [5]. Además, las tecnologías educativas modernas permiten crear entornos de aprendizaje más interactivos y personalizados, proporcionando acceso a una amplia variedad de recursos previamente inalcanzables [6]. Al mismo tiempo, la rápida evolución tecnológica plantea desafíos significativos para los docentes que requieren de una actualización continua de sus competencias y metodologías, lo cual frecuentemente ocurre sin el apoyo adecuado de las instituciones educativas o los organismos gubernamentales [7].

Esta carencia de respaldo puede limitar la capacidad de los docentes para aplicar estrategias de manera óptima y, por ende, impactar en la calidad del proceso educativo. Por lo tanto, es fundamental que se aborden mecanismos de formación que incluyan una preparación profesional adecuada y apoyo institucional, para maximizar el potencial transformador de la tecnología en la educación [8].

Estas inquietudes han surgido en el contexto actual, marcado por la pandemia del COVID-19, que ha impulsado a los docentes a adaptar sus prácticas pedagógicas de un enfoque presencial a uno digital. Esta transición abrupta ha sido respaldada por diversos autores que destacan la integración de la tecnología como una necesidad para la enseñanza y el aprendizaje en entornos virtuales [9]. Sin embargo, muchos docentes se han enfrentado a esta transformación sin una preparación adecuada para las distintas realidades y desafíos que conlleva la enseñanza en línea [10]. A medida que las instituciones educativas se enfrentan a la 'nueva normalidad', surge el desafío de adaptarse a este cambio fundamental en la forma de enseñar y aprender [11].

La necesidad de integrar eficazmente las herramientas tecnológicas y de proporcionar el apoyo necesario a los docentes para enfrentar esta nueva realidad es más evidente que nunca [12]. Este proceso no solo requiere de una actualización en las metodologías educativas, sino también de un respaldo institucional que facilite la implementación efectiva de las tecnologías y garantice la calidad del aprendizaje en un entorno digital [13].

Dado el contexto actual y las prioridades emergentes en la educación, resulta de gran importancia enfocar la investigación en la formación de los docentes, especialmente en relación con la integración del modelo Technological Pedagogical Content Knowledge (TPACK) [14].

Este modelo, traducido como “Conocimiento Tecnológico Pedagógico del Contenido”, ofrece un marco conceptual fundamental para la preparación profesional de los docentes [15].

El TPACK se centra en la intersección entre el conocimiento pedagógico, el contenido específico de una disciplina y la tecnología, enfatizando la necesidad de que los docentes comprendan su asignatura y métodos pedagógicos, como la capacidad de integrar de manera efectiva las herramientas tecnológicas, el conocimiento tecnológico (TK), pedagógico (PK), y del contenido (CK) en sus prácticas [16]. La integración del TPACK en la formación docente es de vital importancia para desarrollar competencias que permitan a los profesores superar las barreras del entorno, digital como virtual, y adaptarse a la innovación educativa [14].

Este enfoque dirigido a fortalecer los pilares del conocimiento tecnológico y combinarlos con la experiencia y la pedagogía del docente fomenta una actitud proactiva hacia el uso de la tecnología. Para lograrlo, es fundamental proporcionar capacitaciones especializadas que permitan a los docentes vincular los factores tecnológicos actuales con sus prácticas pedagógicas, superando el temor al entorno digital y optimizando así su impacto en el aprendizaje [17].

Además, es fundamental considerar las creencias de los educadores sobre su propia capacidad para integrar la tecnología en sus prácticas docentes, especialmente su percepción de autoeficacia en este ámbito. Esta percepción es de suma importancia en el proceso de adopción y efectividad de las herramientas tecnológicas en la enseñanza, ya que influye directamente en la disposición y competencia para utilizar estas tecnologías de manera eficaz [18].

Para abordar esta cuestión, es imperativo implementar un sistema de retroalimentación continua que incluya el acompañamiento de expertos en tecnología. La provisión de conocimientos tecnológicos a los docentes no es suficiente; este proceso debe ir acompañado de una formación metodológica adecuada que permita a los profesores utilizar las herramientas tecnológicas de manera efectiva y generar un aprendizaje significativo.

Los educadores enfrentan barreras significativas, como la falta de tiempo y recursos, tal como se discute en estudios recientes sobre la formación de profesores mediante tutorías individualizadas en tecnología [19].

Igualmente, muchos docentes aún carecen del conocimiento necesario para integrar de manera efectiva las tecnologías de la información y comunicación (TIC) con el apoyo técnico adecuado. Existe una percepción generalizada de una brecha considerable entre la preparación actual de los docentes y las competencias requeridas para una integración exitosa de la tecnología en el aula. Para cerrar esta brecha, es esencial que los educadores adquieran un sólido conocimiento tanto tecnológico como pedagógico, lo que les permitirá incorporar herramientas tecnológicas y metodológicas de manera efectiva y enriquecedora en sus prácticas educativas [20].

La integración de las TIC en la práctica educativa permite a los docentes desarrollar competencias clave y potenciar su capacidad para crear materiales innovadores, como vídeos, imágenes, juegos y talleres. Estos recursos pueden enriquecer el proceso de enseñanza, ya sea en modalidades virtuales, presenciales o mixtas. Pero a su vez, es esencial que los educadores no sientan una presión excesiva para incorporar tecnología en sus aulas sin una preparación adecuada [21].

Aunque las instituciones educativas cuenten hoy en día con infraestructura tecnológica avanzada y un acceso creciente a conexiones de internet fiables, el éxito de la integración tecnológica depende de la capacidad de los docentes para utilizar estas herramientas de manera efectiva. Es así como la formación de los profesores no solo se debe centrar en el aprendizaje de programas y aplicaciones de software, sino también en el desarrollo de estrategias metodológicas que les permitan aplicar estas tecnologías de forma efectiva y significativa en sus prácticas educativas [22].

La evolución de las tecnologías en la educación ha sido gradual y ha variado según la disposición y las habilidades de los docentes. Esta variabilidad se refleja en los retos que enfrentan en cuanto a competencia digital, alfabetización digital y habilidades tecnológicas. A pesar de la disponibilidad creciente de infraestructura tecnológica avanzada y acceso a internet en muchas instituciones, la integración efectiva de las TIC en el aula no ocurre de manera uniforme. Los educadores deben superar desafíos significativos relacionados con el desarrollo de competencias digitales adecuadas y la capacidad para aplicar las herramientas tecnológicas de manera pedagógicamente efectiva [23]. Para abordar estos desafíos, es esencial proporcionar una formación integral que no solo se centre en el uso técnico de las herramientas digitales, sino también en la capacidad de los docentes para integrar estas tecnologías en sus prácticas pedagógicas de manera significativa. Esta formación debe incluir el desarrollo de habilidades digitales avanzadas y estrategias metodológicas que permitan a los educadores superar las barreras actuales y maximizar el impacto positivo de las tecnologías en el proceso educativo [24], [25].

En el futuro, y debido a los contextos sociales cambiantes, las instituciones educativas están preparándose para implementar cambios en sus metodologías de enseñanza que puedan adaptarse a diversos desafíos sociológicos, médicos o de otra índole [2]. La capacidad de mantener la continuidad educativa en contextos adversos es crucial [26], [27]. En este sentido, el modelo TPACK se presenta como una herramienta fundamental para diseñar estrategias que fortalezcan y promuevan la innovación en tanto en instituciones públicas como privadas [28]. La presente investigación se enfoca en explorar cómo el TPACK puede ser integrado eficazmente en la formación docente para mejorar la preparación ante futuros retos y optimizar el impacto de la tecnología en el aprendizaje.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

La investigación sobre la metodología TPACK aplicada a la innovación educativa evidencia que su implementación es un proceso que demanda tiempo y una transformación profunda en el modelo de enseñanza-aprendizaje. Para los docentes que no han recibido formación tecnológica durante su desarrollo profesional y aquellos que son considerados nativos digitales las diferencias en sus entornos y experiencias de crecimiento, influenciadas también por sus contextos socioculturales, impactan significativamente en su capacidad para integrar efectivamente la tecnología en sus prácticas educativas [28]. Estos últimos suelen tener una comunicación bidireccional más eficaz, ofreciendo soluciones creativas y fomentando ambientes colaborativos.

Según Wollmann & Lange [29], estos entornos se definen por principios esenciales como, una comunicación efectiva y fluida, objetivos comunes en equipo, valoración de la diversidad de habilidades de cada miembro, responsabilidad compartida, resolución de conflictos, reflexión, retroalimentación, flexibilidad y adaptabilidad. A partir de estos principios, es prioritario que los docentes reciban capacitación tecno-pedagógica que les permita incorporar estrategias innovadoras, centradas en las necesidades del estudiante, que optimicen el tiempo antes, durante y después de sus clases [30].

Considerando estos criterios, se ha revisado la literatura científica sobre las distintas etapas de la enseñanza: antes, durante y después de las clases. A partir de esta revisión, se ha elaborado un cuadro comparativo que examina los problemas enfrentados, las limitaciones identificadas y las soluciones implementadas en los diseños metodológicos de capacitación docente. Este análisis se centra en reforzar, desarrollar y generar nuevos contenidos, poniendo un énfasis particular en la innovación como motor clave para el progreso y con el fin de mejorar la experiencia profesional de los docentes, promoviendo la adquisición de competencias avanzadas en sus áreas de especialización y en otras áreas donde puedan aplicar el conocimiento adquirido [31], [32].

Este enfoque integral de formación docente no solo potencia las competencias individuales, sino que también fomenta la colaboración entre profesores, facilitando el intercambio de conocimientos y habilidades en beneficio de los estudiantes [33]. Es importante que el proceso de implementación sea flexible, permitiendo ajustes y mejoras continuas a medida que los docentes ganen experiencia o requieran apoyo adicional, basado en los resultados obtenidos [30].

En consecuencia, el objetivo principal de este artículo es enriquecer la literatura existente al destacar la relevancia de la integración de la tecnología en la formación de docentes. La investigación se centra en tres momentos clave del proceso educativo: la planificación previa, la ejecución durante la clase y la evaluación posterior.

Para cada una de estas fases, se definen parámetros y recursos específicos que permiten evaluar y optimizar la aplicación del conocimiento por parte de los docentes. Esta aplicación se apoya en la tecnología y se alinea con el modelo TPACK, con el fin de mejorar continuamente la eficacia educativa. La metodología propuesta busca optimizar el tiempo de los docentes en todas las etapas de su trabajo educativo. Aunque inicialmente puede requerir un esfuerzo considerable para adquirir nuevos conocimientos, con el tiempo, la carga de trabajo se reducirá de manera significativa. El enfoque en el uso de presentaciones visuales atractivas y en la implementación de procesos de evaluación eficientes será esencial para que los docentes puedan dedicar más tiempo a la gestión y creación de material para futuras clases, lo que contribuirá a una mejora en la calidad de la enseñanza (ver Figura. 1).

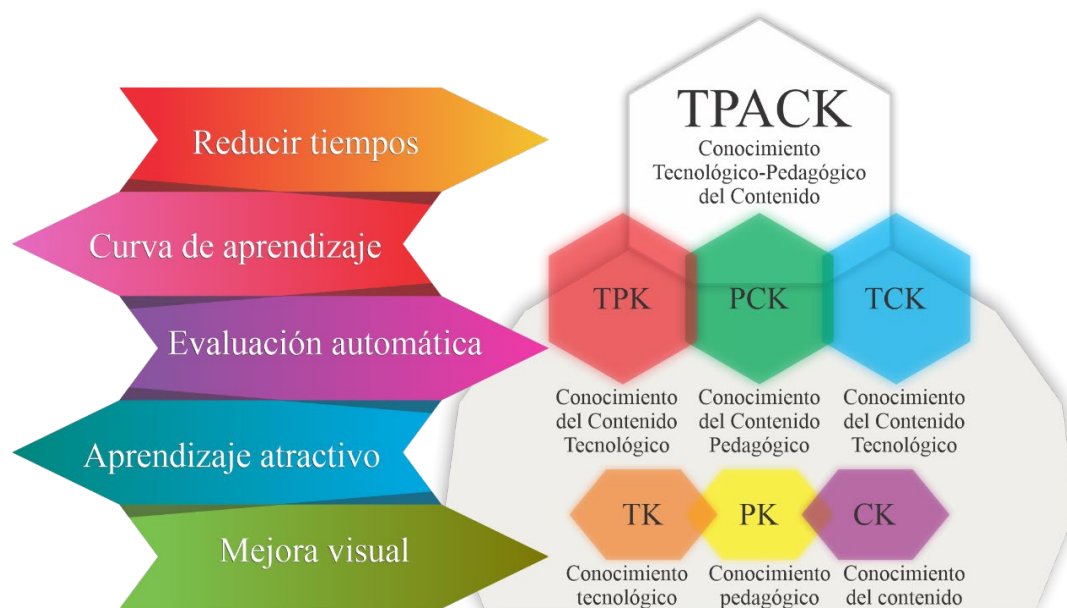


Figura 1. Cambios en la formación del profesorado bajo el modelo Conocimiento Tecnológico-Pedagógico del Contenido (TPACK) considerando el concepto de ingeniería educativa.

Para obtener una comprensión más precisa, es esencial comenzar con un análisis de la situación actual de los docentes, identificando sus problemas y necesidades en relación con la tecnología y su aplicación en el aula. En este sentido, se ha utilizado un análisis de datos proporcionado por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) [34], [35], que examina cómo los docentes integran y utilizan las TIC en el proceso educativo (ver Tabla 1).

Tabla 1. Desafíos determinados por la OCDE.

Código	Descripción del desafío
D1	Profesores que informan de escasez o insuficiencia de tecnología digital para la enseñanza
D2	Profesores que informan de un alto nivel de necesidad de desarrollo profesional en materia de TIC para la enseñanza
D3	Profesores que “frecuentemente” o “siempre” dejan que los alumnos utilicen las TIC para proyectos o trabajos de clase
D4	Profesores para los que el “uso de las TIC para la enseñanza” estaba incluido en su educación o formación
D5	Profesores informan de un alto nivel de necesidad de desarrollo profesional en competencias TIC para la enseñanza

Para concluir este apartado, se presentan los estudios más relevantes que respaldan y fundamentan la continuidad de la investigación propuesta. Estos estudios destacan la situación actual y sugieren estrategias para fortalecerla con el fin de mejorar el nivel educativo (ver Tabla 2).

Tabla 2. Trabajos de investigación relevantes en el ámbito educativo para este estudio.

Artículos científicos	Problema			Limitaciones			Solución		
Referencia	Formación de Docentes	Metodología de aprendizaje activo	Innovación educativa	Conocimientos pedagógicos	Conocimientos metodológicos	Conocimientos tecnológicos	El uso de TIC	Herramientas de Aprendizaje	Aprendizaje continuo
[12]	X	X			X	X			X
[36]	X	X		X	X				X
[29]	X					X			X
[18]	X	X		X	X	X	X		X
[37]	X	X	X			X	X	X	X
[38]	X	X	X			X	X	X	X
[39]	X			X		X	X		X
[40]	X	X	X			X	X	X	
[41]	X	X		X		X	X	X	
[42]		X	X			X	X		X
[33]	X			X	X		X		X
[43]	X	X			X	X		X	X

Dada la situación actual de la educación a nivel mundial y, en particular, en Latinoamérica, donde Ecuador se destaca por su tendencia hacia la superación, es esencial reestructurar y reutilizar herramientas que faciliten la implementación del modelo TPACK con las TIC. Este enfoque tiene el potencial de provocar una transformación significativa en la innovación educativa del país, abordando el impacto físico y psicológico que los cambios educativos tienen en los estudiantes y mejorando así la calidad del aprendizaje [15].

En esta investigación se ha identificado una necesidad crítica de que los docentes adquieran conocimientos y habilidades en el uso de la tecnología. Aunque los docentes poseen una sólida base en pedagogía y un conocimiento empírico de sus asignaturas, requieren apoyo tecnológico para integrar efectivamente estas herramientas en sus prácticas en el aula.

Se observa una brecha significativa entre los profesores más experimentados y las nuevas generaciones, lo que dificulta la implementación y ejecución de estrategias tecnológicas. A pesar de esto, se espera que la adopción del modelo propuesto para el uso de herramientas tecnológicas contribuya a mejorar el rendimiento y los beneficios educativos para los estudiantes.

Como se ha señalado, el problema radica en que los docentes enfrentan dificultades para fomentar la creatividad y la innovación, y para despertar el entusiasmo por aprender mediante nuevas técnicas y herramientas que estimulen la imaginación. La meta es que cada estudiante recuerde a su maestro por una experiencia educativa gratificante y lúdica.

Tras identificar esta problemática, que se manifiesta en la falta de innovación educativa en las clases debido a una posible carencia de formación previa, motivación o aplicación efectiva, se propone una metodología destinada a apoyar y promover el crecimiento profesional de los educadores. Esta metodología busca mejorar el proceso educativo de manera didáctica y respaldada por la tecnología.

Se sugiere investigar tres momentos clave en el proceso educativo: antes, durante y después de las clases. En cada una de estas fases, se establecen parámetros y recursos específicos que permitirán evaluar y optimizar la aplicación del conocimiento por parte de los docentes, potenciando su uso mediante la tecnología y alineándolo con el modelo TPACK (ver Figura. 2).

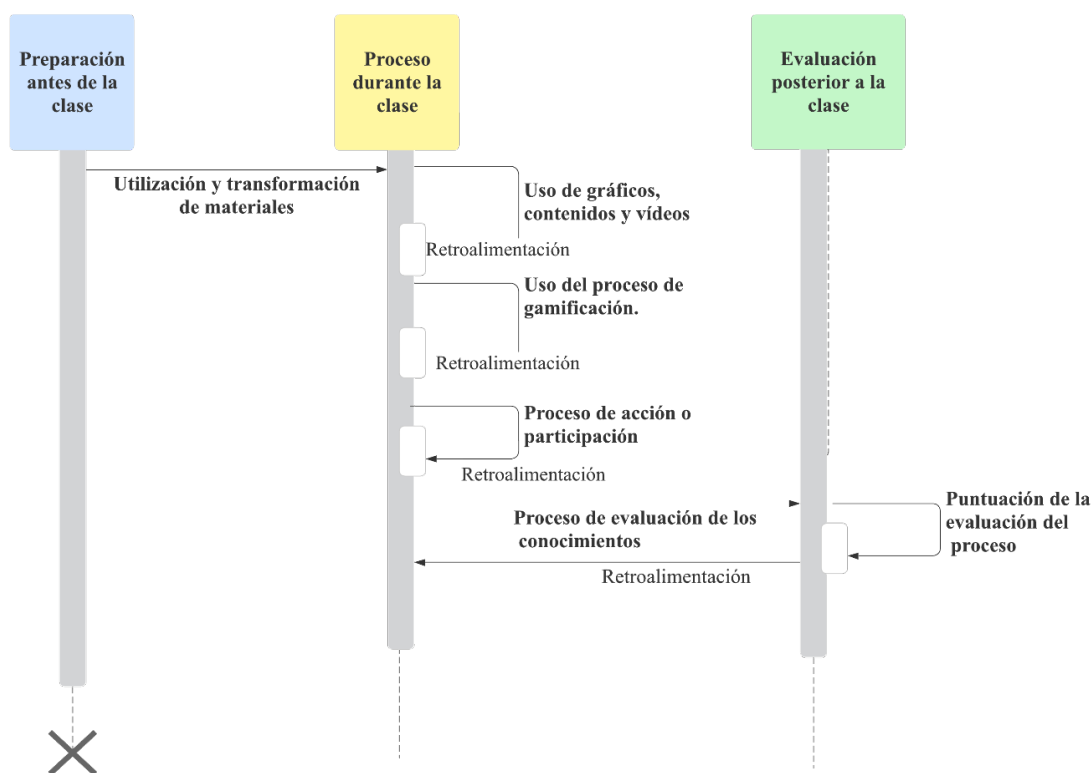


Figura 2. Diagrama de secuencia del proceso del modelo de capacitación a los docentes en el marco TPACK en preparación, ejecución y revisión de la evaluación de una clase.

En la Figura 2 se muestra un diagrama que describe el proceso de enseñanza-aprendizaje de manera estructurada. Se destaca la importancia de la preparación, la ejecución en clase y la evaluación posterior. En la primera fase, conocida como "Preparación antes de la clase", los profesores se encargan de seleccionar y adaptar los materiales que utilizarán, asegurándose de que sean relevantes y accesibles para los estudiantes. Esta etapa es importante para asegurar las bases del aprendizaje. Durante la clase, se despliegan varias estrategias pedagógicas. Los gráficos,

contenidos y vídeos se utilizan para enriquecer la presentación de los temas, haciendo que sean más comprensibles y atractivos para los estudiantes. Además, se incorpora la gamificación, una técnica que introduce elementos de juego en el proceso educativo para incrementar la motivación y el compromiso de los estudiantes.

La participación es otro componente fundamental, donde los estudiantes se involucran en actividades que refuerzan su aprendizaje a través de la acción y la colaboración. A lo largo de este proceso, se lleva a cabo una evaluación continua del conocimiento de los estudiantes, lo que permite ajustar el ritmo y el enfoque de la enseñanza en tiempo real. La retroalimentación desempeña un papel central en cada uno de estos pasos, proporcionando a los estudiantes comentarios valiosos que les ayudan a mejorar su comprensión y desempeño. Finalmente, posterior a la clase, se realiza una evaluación completa del proceso educativo. Esta evaluación no solo analiza el rendimiento de los estudiantes, sino también la eficacia de las estrategias pedagógicas empleadas. La puntuación de esta evaluación proporciona una medida del éxito de la clase y ofrece información valiosa para futuras mejoras.

3. METODOLOGÍA

Se ha establecido una metodología de investigación empírico-analítica de naturaleza cuantitativa, dividida en dos fases principales. La primera fase consiste en llevar a cabo una revisión exhaustiva de la literatura relacionada con los conceptos clave: “Formación de docentes”, “TPACK” e “Innovación Tecnológica”. Durante esta fase, se realiza un análisis detallado de estudios enfocados en la formación docente, con el propósito de fomentar la innovación en las aulas. Esta revisión se basa en la metodología TPACK, la cual clasifica las estrategias según el enfoque en el uso del conocimiento tecnológico y pedagógico en tres áreas principales: la preparación del material y su planificación de la clase, el proceso de enseñanza y su implementación en el aula, y la evaluación del proceso con la evaluación posterior a la clase. La revisión sistemática de la literatura se lleva a cabo siguiendo una metodología estructurada que incluye, la definición de criterios de inclusión y exclusión, con el establecimiento de los parámetros para seleccionar los estudios relevantes. Luego se realiza la búsqueda, con la consulta de bases de datos académicas y bibliográficas para recopilar estudios pertinentes, seguidamente de la evaluación de la calidad de los estudios, con el análisis crítico de la validez y relevancia de los estudios seleccionados. Finalmente, se realiza la síntesis de la información, con integración y análisis de los hallazgos para identificar tendencias y vacíos en la investigación existente.

En la segunda fase, se evalúan los resultados obtenidos mediante una encuesta dirigida a un grupo de 63 expertos en el ámbito educativo que utilizan TIC. Estos profesionales, con estudios de especialidad en educación superior, proporcionan sus perspectivas sobre el impacto de la formación docente en la innovación tecnológica. Se determinan las preguntas de investigación a partir del proceso de revisión de la literatura y la encuesta a los expertos. Estas son:

Q1. ¿Cuáles son las estrategias de capacitación teórica, práctica e integrada que se pueden implementar para mejorar las habilidades pedagógicas de los docentes en la planificación de clases, su ejecución y evaluación, según el modelo TPACK?

Q2. ¿De qué manera se implementa el modelo TPACK en la formación de los docentes, tanto en términos teóricos como prácticos, para mejorar su capacidad para integrar la tecnología en el proceso educativo?

Para llevar a cabo la búsqueda, se utilizó la plataforma Web of Science, seleccionada por su reputación como una de las bases de datos académicas más completas y reconocidas a nivel mundial. Se empleó un conjunto específico de palabras clave y términos de búsqueda (ver Tabla 3).

Tabla 3. Términos clave y frases de búsqueda empleados en la base de datos Web of Science.

Palabras clave	Cadena
“TPACK”, “teacher training”	Results for TPACK (All Fields) AND teacher training (All Fields) and Early Access (Exclude – Document Types) and Enriched Cited References and Retracted Publication or Proceeding Paper (Exclude – Document Types) and English (Languages)

La búsqueda generó un conjunto de 90 artículos científicos. Se llevó a cabo un proceso de selección basado en los siguientes criterios. Para los criterios de inclusión se incluyeron artículos que contenían palabras clave como “TPACK”, “Formación docente” y “Acceso temprano”. Solo se consideraron trabajos escritos en inglés. Se incluyeron referencias citadas que estuvieran enriquecidas con publicaciones o artículos procedentes de documentos retractados. Para los criterios de exclusión, se excluyeron documentos que no fueran artículos, como informes, resúmenes o revisiones. Se descartaron estudios publicados antes del año 2020.

De acuerdo con la revisión mencionada anteriormente, de los 90 artículos inicialmente seleccionados, se han tomado en cuenta aquellos que son más relevantes para el entorno que se está analizando, resultando en 19 artículos clave. Como primer punto, se analiza el escenario en dos ítems: los tipos de participantes. El primer grupo está compuesto por docentes activos, y el segundo, por docentes en formación (ver Tabla 4).

Tabla 4. Detalle de artículos más importantes en relación con el tipo de participantes.

Tipo	Total de trabajos
Docentes activos	7
Docentes en preparación	12
Total	19

Los trabajos se estructuran cronológicamente, centrándose en los artículos publicados entre los años 2020 y 2024 (ver Tabla 5).

Tabla 5. Detalle de los artículos más importantes en relación con la fecha de publicación.

Tipo	Total de trabajos
2020	1
2021	10
2022	5
2023	2
2024	1
Total	19

Como último punto, se realizó un análisis de la distribución geográfica de los trabajos relacionados con la innovación tecnológica aplicada al modelo TPACK. Este análisis permitió identificar 19 estudios relevantes para ser incluidos en este estudio (ver Tabla 6).

Europa destaca como el continente con la mayor cantidad de investigaciones en este ámbito, acumulando un total de 9 trabajos. Por otro lado, África, con un solo estudio, representa el continente con la menor cantidad de investigaciones relevantes. No se encontraron trabajos procedentes de la Antártida ni Oceanía.

Tabla 6. Detalle de los artículos más importantes en relación con el continente investigado.

Tipo	Total de trabajo
África	1
Antártida	0
Asía	5
América del Norte	2
América del Sur	2
Europa	9
Oceanía	0
Total	19

En la segunda etapa, se aplica la técnica de la encuesta, a un grupo aleatorio de 63 profesionales expertos en el ámbito de las TIC, con una estructura de 5 niveles en escala de Likert. Adicionalmente, se les consulta sobre los principales desafíos que enfrentan los docentes en Ecuador para integrar efectivamente la tecnología en sus clases y mejorar el aprendizaje de los estudiantes y las estrategias innovadoras o recursos tecnológicos que podrían ser más efectivos para superar estos desafíos promoviendo un aprendizaje más significativo y centrado en el estudiante en el aula. Se utilizó formularios de Google para la recolección de datos y se analizó la información con herramientas de programación en Python y generadores de nubes de palabras.

4. RESULTADOS

En respuesta a la pregunta de investigación Q1, se han examinado y registrado 19 artículos para investigar las estrategias de capacitación destinadas a mejorar las habilidades pedagógicas de los docentes en la planificación, ejecución y evaluación de clases, empleando el modelo TPACK como marco de referencia. De estos artículos, se han elegido 8 trabajos que resaltan por su énfasis en la utilización de herramientas tecnológicas para la innovación en la enseñanza (ver Tabla 7).

Tabla 7. Clasificación de estrategias relacionadas con la enseñanza-aprendizaje.

Estrategias	Tipo	Referencia
Uso de herramientas para la gestión de documentos, presentaciones	Planificación	[38]
Uso de Gamificación y herramientas	Planificación	[37]
Uso de herramientas para gestión de capacitación	Planificación	[44]
Uso de Gamificación y aplicación en la preparación	Planificación	[12]
Uso de herramientas tecnológicas	Planificación	[29]
Uso de herramientas pre-test	Planificación	[45]
Uso de herramientas presentaciones, documentos y evaluaciones	Ejecución	[46]
Método de Evaluación entre pares	Evaluación	[40]

Es esencial que los docentes reciban una formación continua en innovación tecnológica [47] desde el inicio de su preparación profesional [48], ya que esto les permite adaptarse al entorno educativo en constante evolución del siglo XXI. Al integrar la tecnología en el aula, los docentes pueden crear experiencias de aprendizaje más dinámicas y atractivas que resuenen con los estudiantes digitales de hoy [42], fomentando así su compromiso y motivación [43]. Además, la capacitación en tecnología les permite ampliar el acceso al conocimiento [31] y diferenciar la instrucción para satisfacer las necesidades individuales de los estudiantes [49].

Esta integración no solo promueve el dominio de habilidades técnicas [24], sino que también desarrolla habilidades críticas para el siglo XXI [50], como la resolución de problemas, la creatividad y la colaboración, preparando a los estudiantes para tener éxito en una sociedad cada vez más digitalizada y globalizada [51]. En resumen, la capacitación en innovación tecnológica complementa los conocimientos pedagógicos de los docentes [41], permitiéndoles aprovechar al máximo el potencial de la tecnología para mejorar el aprendizaje y el desarrollo de los estudiantes [52].

En respuesta a la pregunta de investigación Q2, se detalla un mapa conceptual modelo para ubicar herramientas que pueden aportar a los docentes en el proceso de planificación, de ejecución y evaluación en el periodo de clase, (ver Figura. 3).

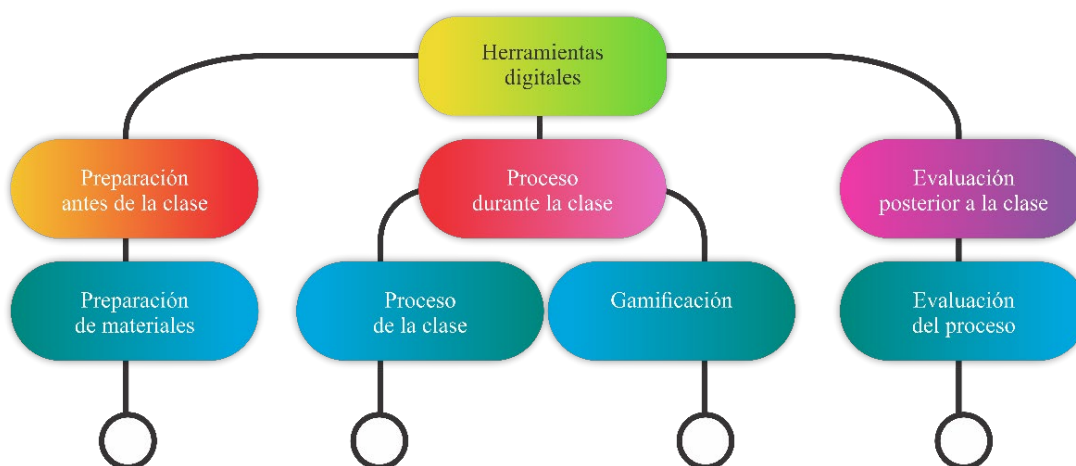
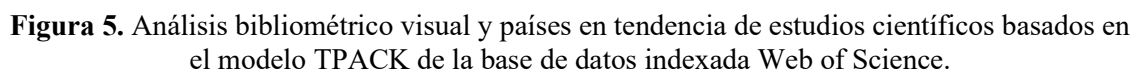
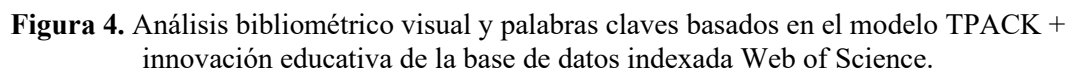


Figura 3. Mapa conceptual modelo para ubicar herramientas digitales que pueden aportar en el proceso educativo dentro de una clase en el marco del modelo TPACK.

En la evaluación de la metodología TPACK, es fundamental no solo investigar las herramientas y el uso de la tecnología, sino también asegurar que los docentes tengan la capacidad de desarrollar su propio material didáctico, adaptado a la realidad ecuatoriana y al contexto social en el que trabajan. Es de importancia considerar las facilidades y los recursos que proporciona la institución educativa en el proceso de preparación y ejecución de estos materiales.

Adicionalmente, la Figura 4 presenta un análisis de los estudios realizados entre 2020 y 2024, basado en la búsqueda de palabras clave. Este análisis reveló un total de 444 términos utilizados. Al revisar estos términos, se identificó que el modelo TPACK se posiciona como el eje central y pionero en la investigación. Los términos relacionados incluyen conocimientos pedagógicos, marcos de trabajo, tecnología y formación de docentes (ver Figura. 4).

Como se ilustra en la Figura 5, que muestra un análisis bibliométrico de los países con mayor desarrollo en la investigación sobre la implementación del modelo TPACK, se observa que en los últimos años España ha liderado la promoción de estudios sobre esta metodología. Le siguen los países asiáticos, incluyendo Indonesia, China y Malasia, así como Estados Unidos. Es importante destacar que los países de Latinoamérica están comenzando a avanzar en el ámbito de la innovación educativa. En particular, Brasil, Colombia y Ecuador se destacan como ejemplos a seguir, demostrando un firme compromiso con la transformación educativa y la búsqueda de alternativas más efectivas para el desarrollo sostenible (ver Figura. 5).



El análisis evidencia que diversos autores internacionales establecen vínculos directos con los líderes en investigación sobre la metodología TPACK, subrayando así la dimensión global del estudio en este campo. En particular, se resalta la participación de investigadores de América Latina, lo que destaca la creciente influencia de la región en el desarrollo de la innovación

educativa. Este papel activo de América Latina y su contribución al avance en la investigación se ilustran claramente en la Figura 6.

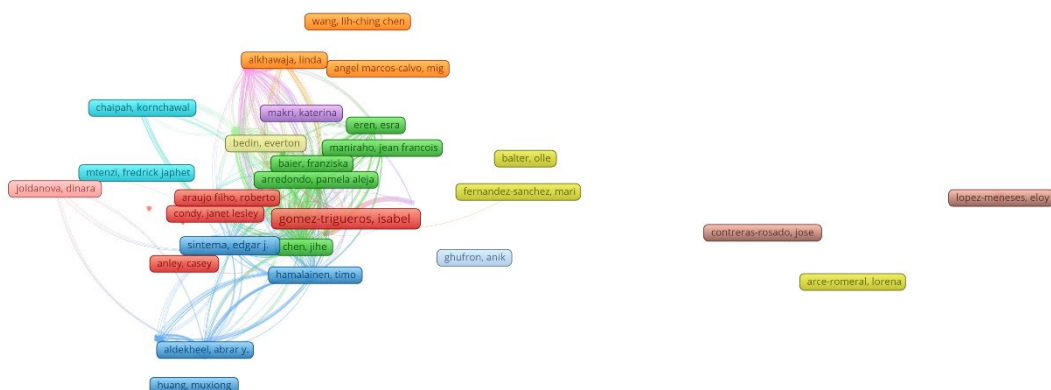


Figura 6. Análisis bibliométrico visual y autores en la tendencia de estudios científicos basados en el modelo TPACK + Innovación Educativa de la base de datos indexada Web of Science.

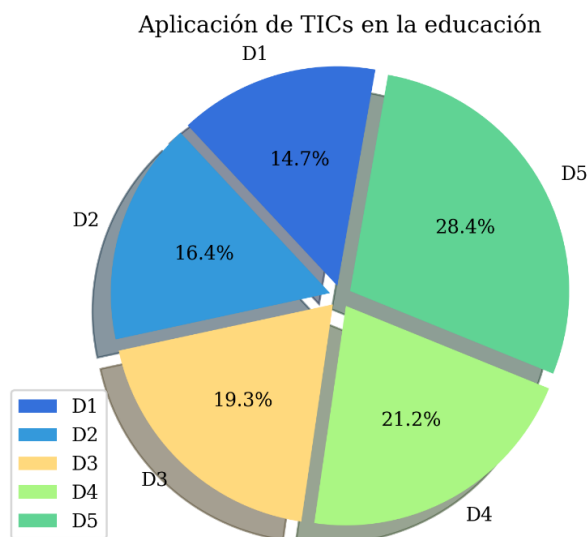


Figura 7. Estudios sobre las TIC y los desafíos para los profesores por la OCDE.

Los resultados obtenidos de la revisión de literatura se muestran en la Figura 7, y comparados con los mencionados por la OECD [34], [35], evidencian que un 14,7 % de los trabajos se identifican con el desafío “Profesores que informan de escasez o insuficiencia de tecnología digital para la enseñanza”, (D1). Un 16,4 % de los trabajos se relacionan con el desafío “Profesores que informan de un alto nivel de necesidad de desarrollo profesional en materia de TIC para la enseñanza”, (D2). Un 19,3 % de los estudios abordan el desafío “Profesores que frecuentemente o siempre permiten que los alumnos utilicen las TIC para proyectos o trabajos de clase”, (D3).

Además, un 21,2 % de los trabajos se centran en el desafío “Profesores para los que el uso de las TIC para la enseñanza estaba incluido en su educación o formación”, (D4). Finalmente, el 28,4 % de los estudios están vinculados al desafío “Profesores que informan de un alto nivel de necesidad de desarrollo profesional en competencias TIC para la enseñanza”, (D5). Estos porcentajes reflejan la distribución de los desafíos identificados en la literatura revisada.

El análisis evidencia que los docentes perciben una alta necesidad de desarrollo profesional en competencias basadas en TIC para su práctica docente. Este resultado es crítico, dado que muchos educadores carecen de la formación o capacitación adecuada que potencie estas habilidades. Además, se observa que los docentes que han incorporado las TIC en sus proyectos educativos lo han hecho como parte de su formación formal. Por último, un grupo significativo de educadores se siente capacitado para integrar y promover el uso de las TIC en sus procesos de enseñanza-aprendizaje, lo que indica una disposición hacia la innovación educativa.

Como se ha mencionado anteriormente, es de importancia el integrar la tecnología en cada etapa del proceso educativo. Por ejemplo, un día antes de la clase, el docente puede utilizar Twinkl [54] para obtener materiales didácticos y educativos adecuados para el aula. Durante la enseñanza, el educador puede emplear Classroomscreen [55] para gestionar y controlar la clase, aprovechando sus diversas funcionalidades, como seleccionar estudiantes al azar, mostrar encuestas, establecer tiempos, dibujar, pintar y formar grupos, entre otras opciones. Además, estrategias de gamificación como Kahoot [56], Educaplay [57] o Edpuzzle [58] pueden enriquecer la experiencia de aprendizaje. Finalmente, el docente puede realizar evaluaciones físicas y calificarlas automáticamente con ZipGrade [59], o llevar a cabo evaluaciones virtuales utilizando LiveWorksheets [60] (ver Figura. 8).



Figura 8. Herramientas digitales para utilizar antes, durante y después de las clases dentro del marco TPAC.

Los resultados de la encuesta en la primera pregunta, ¿Considera que los docentes actualmente utilizan herramientas tecnológicas durante la fase de preparación de sus clases?, en el 41 % indica estar muy de acuerdo, el 45 % indica estar de acuerdo, el 3 % ni de acuerdo ni en desacuerdo, el 6 % en desacuerdo y el 5 % muy en desacuerdo, evidencian que el 86 % de los participantes se encuentra de acuerdo con el uso de TIC antes de una jornada de clases (ver Figura. 9).

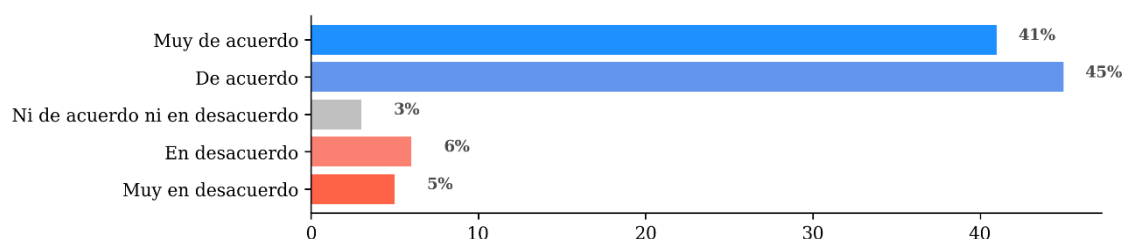


Figura 9. Porcentaje de participantes que consideran el uso de herramientas digitales para utilizar antes de las jornadas de clases dentro del marco TPAC.

Los resultados de la encuesta en la segunda pregunta, ¿Considera que los docentes actualmente utilizan herramientas tecnológicas (creación de presentaciones multimedia, desarrollo de elementos digitales para actividades de aprendizaje activo, planificación de juegos y actividades lúdicas) durante la fase del desarrollo de sus clases?, en el 36 % indica estar muy de acuerdo, el 38 % indica estar de acuerdo, el 10 % ni de acuerdo ni en desacuerdo, el 10 % en desacuerdo y el 6 % muy en desacuerdo, evidencian que el 74 % de los participantes se encuentra de acuerdo con el uso de herramientas TIC durante una jornada de clases (ver Figura 10).

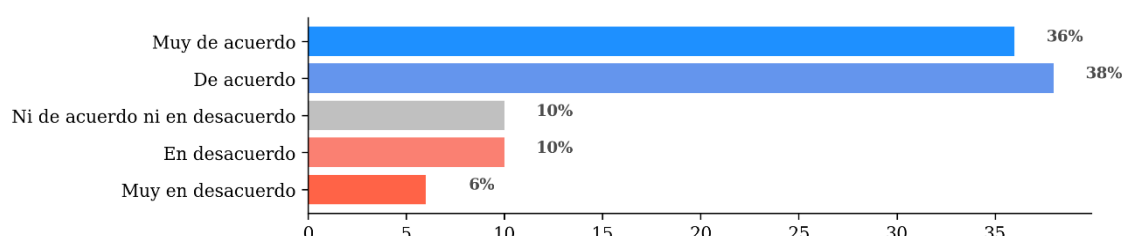


Figura 10. Porcentaje de participantes que consideran el uso de herramientas digitales para utilizar durante las jornadas de las clases dentro del marco TPACK.

Los resultados de la encuesta en la tercera pregunta, ¿Considera que los docentes actualmente utilizan herramientas tecnológicas (evaluación digital, discusiones en línea, análisis de datos de aprendizaje, portafolios electrónicos) durante la fase de evaluación o calificación posterior a sus clases?, en el 24 % indica estar muy de acuerdo, el 38 % indica estar de acuerdo, el 14 % ni de acuerdo ni en desacuerdo, el 16 % en desacuerdo y el 8 % muy en desacuerdo, evidencian que el 62 % de los participantes se encuentra de acuerdo con el uso de herramientas TIC durante el proceso de evaluación de una jornada de clases (ver Figura. 11).

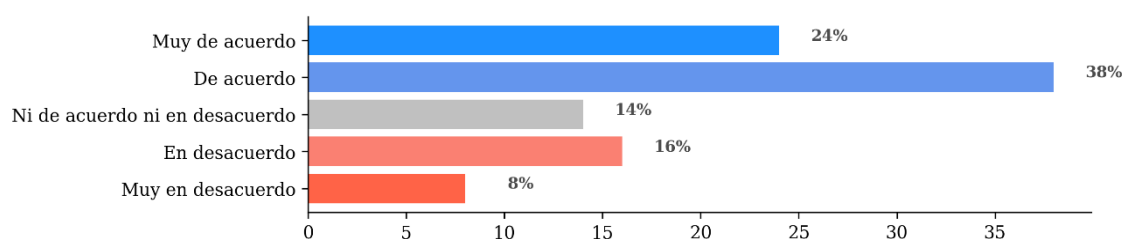


Figura 11. Porcentaje de participantes que consideran el uso de herramientas digitales para utilizar después de las jornadas de las clases dentro del marco TPACK.

Los resultados de la encuesta para la cuarta pregunta, que indaga si la falta de recursos para capacitación ya sea autónoma o proporcionada por las instituciones, es uno de los principales desafíos que enfrentan los docentes en Ecuador para integrar efectivamente la tecnología en sus clases y mejorar el aprendizaje de los estudiantes, revelan que esta falta de recursos es un factor significativo. Esta carencia impacta la preparación y formación del docente, especialmente frente a las nuevas tendencias tecnológicas (ver Figura. 12).

Los resultados de la encuesta para la quinta pregunta, que evaluaba si el uso de plataformas digitales para la capacitación de docentes es una estrategia innovadora capaz de superar los desafíos tecnológicos y promover un aprendizaje más significativo y centrado en el estudiante en el aula, indican que la mayoría de los encuestados están de acuerdo en que estas plataformas digitales representan una alternativa eficaz para enfrentar dichos desafíos y fomentar un aprendizaje más enriquecedor y centrado en el estudiante (ver Figura 13).

Una característica común que se presenta en la mayoría de las investigaciones es la necesidad de una capacitación detallada y personalizada para los docentes. Esta capacitación debe adaptarse a las necesidades específicas de cada contexto cultural, económico y social, comenzando por evaluar el entorno en el que se desenvuelve el docente. Se propone un modelo de secuencia basado en el proceso de preparación, ejecución y revisión con base al uso de herramientas tecnológicas que contribuyan a mejorar el proceso de enseñanza-aprendizaje en las aulas dentro de un marco de trabajo TPACK. Se sugiere la integración de herramientas digitales como parte integral del proceso de capacitación y enseñanza. Estas herramientas pueden utilizarse en diversas fases del proceso educativo [15]. En la fase de preparación de materiales, se pueden crear recursos atractivos como vídeos, juegos y audios, con el fin de facilitar la comprensión de los conceptos por parte de los estudiantes [31]. Durante la fase de enseñanza, se aplican estrategias metodológicas y tecnológicas para transmitir eficazmente el mensaje educativo. Finalmente, en la fase de evaluación, se emplean herramientas digitales para agilizar el proceso de calificación, optimizar los métodos de evaluación y proporcionar retroalimentación efectiva a los estudiantes.

El enfoque TPACK y el uso de herramientas digitales emergen como estrategias clave para mejorar la práctica docente y promover un aprendizaje efectivo en un mundo cada vez más digitalizado. Es esencial que los docentes se preparen y se capaciten continuamente para adaptarse a estos cambios y proporcionar una educación de calidad que prepare a los estudiantes para los desafíos del siglo XXI [36].

La investigación aborda principalmente la necesidad de capacitación en los docentes en formación y actualización de los docentes activos en competencias tecnológicas dentro del contexto de la metodología TPACK, que integra el conocimiento tecnológico, pedagógico y del contenido para mejorar la enseñanza y el aprendizaje [17].

El trabajo aborda específicamente una laguna en el campo relacionada con la falta de enfoque en la capacitación personalizada para los docentes en el contexto de la metodología TPACK. Proporciona una solución práctica y detallada para abordar esta necesidad, lo cual es una contribución significativa al campo de la educación y la tecnología. Adicionalmente, la integración de herramientas digitales, en este trabajo no solo se centra en facilitar un modelo, sino que también destaca la importancia de integrar herramientas digitales en el proceso educativo [24].

En el contexto del uso de herramientas tecnológicas en la educación [14] han proporcionado recomendaciones detalladas para su aplicación en distintas etapas del proceso de enseñanza-aprendizaje. Su enfoque destaca la necesidad de una evaluación rigurosa y de retroalimentación continua, subrayando la importancia de proporcionar a los docentes evaluaciones constructivas sobre su desempeño y el efecto de las tecnologías empleadas en el aprendizaje de los estudiantes. Esta perspectiva es importante para el ciclo de mejora continua en la práctica docente, como se indica en el trabajo de [51] quienes argumentan que una retroalimentación bien estructurada puede cerrar el ciclo de mejora y promover un entorno educativo más efectivo. Desde una perspectiva metodológica, se sugiere que el estudio en cuestión podría beneficiarse de una revisión más exhaustiva y una confrontación con investigaciones previas y otros trabajos relevantes en el campo. La incorporación de estudios de caso o ejemplos prácticos que evidencien la efectividad del diagrama propuesto podría fortalecer la discusión y la validez de los resultados obtenidos [15]. Además, se recomienda la implementación de controles adicionales para evaluar el impacto a largo plazo de la capacitación en el desempeño docente y el aprendizaje de los estudiantes. La necesidad de comparar enfoques de capacitación alternativos contribuye a una mayor solidez de los hallazgos, proporcionando así una línea base para futuras investigaciones en el área.

6. CONCLUSIONES

Este estudio ha destacado áreas esenciales para la mejora en la formación docente y ha propuesto un modelo adaptado que fusiona el marco TPACK con principios de ingeniería educativa. A través de un análisis minucioso del estado del arte, se ha desarrollado un marco estructurado que guía la preparación, ejecución y evaluación de la enseñanza, atendiendo a las necesidades actuales en la formación docente para garantizar un uso efectivo de las TIC.

El modelo propuesto abarca tres fases clave: preparación, ejecución y evaluación, y ha demostrado ser eficaz para desarrollar las competencias de los docentes en el marco TPACK. Entre las contribuciones originales del estudio, se destaca la creación de un modelo secuencial que se adapta a las necesidades específicas de los docentes y la integración de herramientas digitales en cada fase del proceso educativo. Esta integración facilita la planificación, ejecución y evaluación, además resalta la importancia de una base pedagógica para el docente como complemento esencial del dominio tecnológico.

La incorporación de estrategias metodológicas y tecnológicas en cada fase del proceso educativo permite a los docentes enfrentar los desafíos tecnológicos de manera más efectiva, promoviendo un aprendizaje significativo. Los resultados de la encuesta indican una aceptación del 74 % entre los docentes respecto al uso de herramientas digitales en el marco TPACK, sugiriendo que estas herramientas son consideradas útiles y esenciales para mejorar la calidad educativa y, fomentar una interacción dinámica con los estudiantes.

Este alto porcentaje de aceptación sugiere que las herramientas digitales no solo son vistas como útiles, sino también como esenciales para la preparación, desarrollo y evaluación de las actividades educativas. Los docentes valoran estas herramientas por su capacidad para mejorar la calidad de la enseñanza y facilitar una interacción más dinámica con los estudiantes.

Una característica distintiva de esta investigación es la propuesta de un modelo de secuencia adaptada a las necesidades individuales de los docentes, centrado en la capacitación personalizada y la integración estratégica de herramientas digitales. Esta personalización es fundamental para abordar los desafíos educativos en contextos específicos y futuros.

El estudio también aborda una carencia significativa en la capacitación docente, específicamente en la falta de enfoques personalizados y contextualizados. Este trabajo ofrece soluciones prácticas para superar esta deficiencia, destacando la integración de herramientas digitales como una estrategia clave para mejorar la práctica docente y adaptar la enseñanza a las demandas del siglo XXI.

Finalmente, la inclusión de estudios de caso y ejemplos prácticos de contextos educativos específicos que evidencien la efectividad del modelo propuesto podría proporcionar una comprensión y discusión del impacto de la metodología TPACK.

Para futuras investigaciones, se recomienda incluir estudios de caso y ejemplos prácticos de contextos educativos específicos que evidencien la efectividad del modelo propuesto. Así, la implementación del modelo en diversas situaciones educativas proporciona una comprensión más completa de su impacto y eficacia.

REFERENCIAS

- [1] E. T. Khor, and M. K, “A Systematic Review of the Role of Learning Analytics in Supporting Personalized Learning”, *Educ. Sci.*, vol. 14, no. 1, dec. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/educsci14010051>

- [2] R. Ayala-Carabajo, and J. Llerena-Izquierdo, “Bibliometric Review on a Hybrid Learning Model with VLEs from a Higher Education Context”, in *Systems, Smart Technologies and Innovation for Society*, J. P. Salgado-Guerrero, H. R. Vega-Carrillo, G. García-Fernández, and V. Robles-Bykbaev, Eds., Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 148–157. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-031-52090-7_15
- [3] H. A. Younis *et al.*, “A Systematic Review and Meta-Analysis of Artificial Intelligence Tools in Medicine and Healthcare: Applications, Considerations, Limitations, Motivation and Challenges”, *Diagnostics*, vol. 14, no. 1, jan. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/diagnostics14010109>
- [4] D. Shin, “Teaching Mathematics Integrating Intelligent Tutoring Systems: Investigating Prospective Teachers’ Concerns and TPACK”, *Int. J. Sci. Math. Educ.*, vol. 20, no.8, pp. 1–17, sep. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10763-021-10221-x>
- [5] E. Goode, T. Roche, E. Wilson, J. Zhang, and J. McKenzie, “The success, satisfaction and experiences of international students in an immersive block model”, *J. Univ. Teach. Learn. Pract.*, vol. 21, no. 2, jul. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.53761/1.21.2.08>
- [6] C.-J. Shieh, and J. Nasongkhla, “Effects of motivation to use social networking sites on students’ media literacy and critical thinking”, *Online J. Commun. Media Technol.*, vol. 14, no. 1, p. e202404, dec. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.30935/ojcm/14060>
- [7] R. López-Chila, J. Llerena-Izquierdo, N. Sumba-Nacipucha, and J. Cueva-Estrada, “Artificial Intelligence in Higher Education: An Analysis of Existing Bibliometrics”, *Educ. Sci.*, vol. 14, no. 1, dec. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/educsci14010047>
- [8] A. Grund, S. Fries, M. Nückles, A. Renkl, and J. Roelle, “When is Learning ‘Effortful’? Scrutinizing the Concept of Mental Effort in Cognitively Oriented Research from a Motivational Perspective”, *Educ. Psychol. Rev.*, vol. 36, no. 1, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10648-024-09852-7>
- [9] T. Dhurumraj, S. Ramaila, F. Raban, and A. Ashruf, “Broadening educational pathways to stem education through online teaching and learning during covid-19: Teachers’ perspectives”, *J. Balt. Sci. Educ.*, vol. 19, no. 6, pp. 1055–1067, dec. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.33225/jbse/20.19.1055>
- [10] F. B. Potes-Duque, and J. J. Jiménez-Contreras, “Innovación pedagógica en el proceso de enseñanza-aprendizaje de matemáticas para estudiantes de Educación General Básica considerando las Tecnologías de la Información y la Comunicación”, *INNOVA Res. J.*, vol. 8, no. 3.1, pp. 25–44, nov. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.33890/innova.v8.n3.1.2023.2319>
- [11] P. Garzon, and E. Inga, “Advancing Primary Education through Active Teaching Methods and ICT for Increasing Knowledge”, *Sustainability*, vol. 15, no. 12, jun. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su15129551>
- [12] S. Adipat, “Developing Technological Pedagogical Content Knowledge (TPACK) through Technology-Enhanced Content and Language-Integrated Learning (T-CLIL) Instruction”, *Educ. Inf. Technol.*, vol. 26, no. 5, pp. 6461–6477, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10639-021-10648-3>

- [13] N. Pilapaxi-Cunalata, and J. Llerena-Izquierdo, “Experience of the Disruption of Educational Technologies Based on the UTAUT Model”, in *2023 IEEE Seventh Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*, 2023, pp. 1–5. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ETCM58927.2023.10308981>
- [14] C. D. Vásquez Paredes, and E. M. Inga Ortega, “El modelo de aprendizaje TPACK y su impacto en la innovación educativa desde un análisis bibliométrico”, *INNOVA Res. J*, vol. 6, no. 3, pp. 79–97, sep. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.33890/innova.v6.n3.2021.1773>
- [15] N. Sumba-Nacipucha, J. Cueva-Estrada, E. Conde-Lorenzo, and M. C. Mármol-Castillo, “Reflections on the role of the professor from the TPACK model perspective during covid-19”, in *2021 IEEE World Conference on Engineering Education (EDUNINE)*, 2021, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/EDUNINE51952.2021.9429097>
- [16] A. Kaplon-Schilis, and I. Lyublinskaya, “Analysis of Relationship Between Five Domains of TPACK Framework: TK, PK, CK Math, CK Science, and TPACK of Pre-service Special Education Teachers”, *Technol. Knowl. Learn*, vol. 25, no. 1, pp. 25–43, apr. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10758-019-09404-x>
- [17] J. M. Santos, and R. D. R. Castro, “Technological Pedagogical content knowledge (TPACK) in action: Application of learning in the classroom by pre-service teachers (PST),” *Soc. Sci. Humanit. Open*, vol. 3, no. 1, p. 100110, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ssaho.2021.100110>
- [18] K. Açıkgül, and R. Aslaner, “Effects of Geogebra supported micro teaching applications and technological pedagogical content knowledge (TPACK) game practices on the TPACK levels of prospective teachers”, *Educ. Inf. Technol*, vol. 25, no. 3, pp. 2023–2047, dec. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10639-019-10044-y>
- [19] D. Baser, R. Akkus, S. Akayoglu, E. Top, and M. D. Gurer, “Training in-service teachers through individualized technology-related mentorship,” *Educ. Technol. Res. Dev*, vol. 69, no. 6, pp. 3131–3151, dec. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11423-021-10065-w>
- [20] R. Lopez-Chila, N. Sumba-Nacipucha, J. Córdova-León, R. Valverde-Arrieta, J. Jimenez-Contreras, and J. Llerena-Izquierdo, “A Management Model for the Development of Meaningful Digital Learning Resources in Homogeneous Linear Algebra Courses”, in *2023 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET)*, IEEE, Nov. 2023, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICECET58911.2023.10389227>
- [21] F. C. Bonafini, and Y. Lee, “Investigating Prospective Teachers’ TPACK and their Use of Mathematical Action Technologies as they Create Screencast Video Lessons on iPads”, *TechTrends*, vol. 65, no. 3, pp. 303–319, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11528-020-00578-1>
- [22] J. Zapata-Martínez, and J. Llerena-Izquierdo, “Las TIC después del COVID-19: la perspectiva de los profesores universitarios”, *Congr. Docencia en Educ. Super. CODES*, vol. 5, nov. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.15443/codes1988>
- [23] M. Núñez-Canal, M. de las M. de Obesso, and C. A. Pérez-Rivero, “New challenges in higher education: A study of the digital competence of educators in Covid times”, *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 174, jan. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121270>

- [24] J. B. Silva, I. N. Silva, and S. Bilessimo, “Technological structure for technology integration in the classroom, inspired by the maker culture”, *J. Inf. Technol. Educ. Res.*, vol. 19, pp. 167–204, jan. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.28945/4532>
- [25] P. Ingavélez-Guerra, S. Otón-Tortosa, J. Hilera-González, and M. Sánchez-Gordón, “Correction to: The use of accessibility metadata in e-learning environments: a systematic literature review”, *Univers. Access Inf. Soc.*, vol. 22, no. 3, p. 1095, mar. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10209-022-00876-w>
- [26] J. Moncayo Redin, J. Jiménez Contreras, and J. Llerena-Izquierdo, “Innovación pedagógica en el proceso de enseñanza-aprendizaje de matemáticas para estudiantes de bachillerato general unificado considerando tecnologías de información y comunicación”, *Rev. InGenio*, vol. 7, no. 2 SE-Artículos, pp. 70–84, jul. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.18779/ingenio.v7i2.807>
- [27] F.-J. Hinojo-Lucena, I. Aznar-Díaz, M.-P. Cáceres-Reche, and J.-M. Romero-Rodríguez, “Artificial Intelligence in Higher Education: A Bibliometric Study on its Impact in the Scientific Literature”, *Educ. Sci.*, vol. 9, no. 1, pp. 51, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/educsci9010051>
- [28] Z. Hashim, M. Khalip, and R. Dayang, “Innovation culture in education: A systematic review of the literature”, *Manag. Educ.*, vol. 36, no. 3, pp. 135-149, oct. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/0892020620959760>
- [29] K. Wollmann and K. Lange-Schubert, “The Development of Prospective Primary School Science Teachers’ TPACK Fostered by Innovative Science-Teacher Education”, *Educ. Sci.*, vol. 12, no. 6, may. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/educsci12060381>
- [30] C. A. Hernández-Suárez, R. Prada-Núñez, and A. A. Gamboa-Suárez, “Pre-service teacher education: Active scenarios from a flipped classroom a perspective”, *Formación Universitaria*, vol. 13, no. 5, pp. 213–222, oct. 2020. [Online]. Available: 10.4067/S0718-50062020000500213
- [31] Y. Wu, Y. Yang, W. Xu, and Q. Chen, “The Influence of Innovation Resources in Higher Education Institutions on the Development of Sci-Tech Parks’ Enterprises in the Urban Innovative Districts at the Stage of Urbanization Transformation”, *land*, vol. 9, no. 396, pp. 1–10, oct. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/land9100396>
- [32] C. Fuller, “Education Innovation Clusters: Supporting transformative teaching and learning”, *Child. Educ.* vol. 96, no. 1, pp. 34-37, jan. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/00094056.2020.1707534>
- [33] Y. F. Yeh, K. K. H. Chan, and Y. S. Hsu, “Toward a framework that connects individual TPACK and collective TPACK: A systematic review of TPACK studies investigating teacher collaborative discourse in the learning by design process”, *Comput. Educ.*, vol. 171, oct. 2021. [Online]. Available: doi: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2021.104238>
- [34] CEPAL, “Las tecnologías digitales frente a los desafíos de una educación inclusiva en América Latina: algunos casos de buenas prácticas”. CEPAL. Acceso: 24 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/21658-tecnologias-digitales-frente-desafios-educacion-inclusiva-america-latina-algunos>
- [35] OECD, “The impact of ICT on learning: design for a quasi-experimental study,” 2000.
- [36] A. Widowati, S. Atun, I. G. P. Suryadarma, A. Wiyarsi, Setuju, and N. A. Raduan, “Innovative education program for science preservice teachers: Technological, pedagogical, and science knowledge-Contextual (TPACK-C) approach”, *Int. J. Innov. Creat. Chang.*, vol. 12, no. 11, pp. 83–93, 2020. [Online]. Available: <https://rb.gy/s3rhps>

- [37] S. Haryati, I. Yuliasri, J. Nurkamto, and W. Fitriati, "TPACK Praxis in EFL Reading Classroom: A Case of Technology-Infused Teaching from Indonesia", *PEGEGOG*, vol. 14, no. 1, pp. 205–217, aug. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.47750/pegegog.14.01.23>
- [38] J. C. Bush, "Using screencasting to give feedback for academic writing", *Innov. Lang. Learn. Teach*, vol. 15, no. 5, pp. 473–486, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/17501229.2020.1840571>
- [39] K. L. Neumann, F. Alvarado-Albertorio, and A. Ramírez-Salgado, "Aligning with Practice: Examining the Effects of a Practice-Based Educational Technology Course on Preservice Teachers' Potential to Teach with Technology," *TechTrends*, vol. 65, no. 6, pp. 1027–1041, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11528-021-00672-y>
- [40] T. Kartal, I. Dilek, and I. Preservice, "Preservice Science Teachers' TPA CK Development in a Technology-Enhanced Science Teaching Method Course", *Journal of Education in Science Environment and Health*, vol. 7, no. 4, pp. 339–353, oct. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.21891/jeseh.994458>
- [41] P. Chaipidech, T. Kajonmanee, K. Chaipah, P. Panjaburee, and N. Srisawasdi, "Implementation of an Andragogical Teacher Professional Development Training Program for Boosting TPACK in STEM Education", *Educ. Technol. Soc*, vol. 24, no. 4, pp. 220–239, oct. 2021. [Online]. Available: <https://www.jstor.org/stable/48629257>
- [42] A. Lachner *et al.*, "Fostering pre-service teachers' technological pedagogical content knowledge (TPACK): A quasi-experimental field study," *Comput. Educ.*, vol. 174, aug. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2021.104304>
- [43] I. María Gómez-Trigueros, "Teaching Professional Ethical Knowledge and Teaching Digital Skills in Higher Education", *Education and Human Development. IntechOpen*, no. 2, jan. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5772/intechopen.109221>
- [44] K. A. Papanikolaou, K. Makri, I. Sofos, M. G. Tzelepi, and E. Zalavra, "Putting TPACK into action in learning design: The case of PeerLAND", *Australas. J. Educ. Technol*, vol. 38, no. 6, pp. 53–74, nov. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.14742/ajet.7556>
- [45] F. Zimmermann, I. Melle, and J. Huwer, "Developing Prospective Chemistry Teachers' TPACK-A Comparison between Students of Two Different Universities and Expertise Levels Regarding Their TPACK Self-Efficacy, Attitude, and Lesson Planning Competence", *Journal of Chemical Education*, vol. 98, no. 6, pp. 1863–1874, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c01296>
- [46] R. A. Filho, and V. Gitirana, "Pre-service Teachers' Knowledge: Analysis of teachers' education situation based on TPACK", *Math. Enthous*, vol. 19, no. 2, pp. 594–631, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.54870/1551-3440.1565>
- [47] E. Ifinedo, J. Rikala, and T. Hämäläinen, "Factors affecting Nigerian teacher educators' technology integration: Considering characteristics, knowledge constructs, ICT practices and beliefs", *Comput. Educ.*, vol. 146, mar. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103760>
- [48] J. Moon, S. Lee, and X. Xu, "Exploring pre-service teachers' technology-integration belief and scientific inquiry in a teacher-development course," *Int. J. Technol. Des. Educ*, vol. 32, no. 3, pp. 1777–1798, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10798-021-09672-8>

- [49] M. H. Salleh, S. A. Kadir, R. Jamaluddin, and M. H. M. Puad, “Factors Influencing TVET Teacher’s TPACK Competencies in Peninsular Malaysia,” *J. Tech. Educ. Train.*, vol. 14, no. 3, pp. 105–111, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.30880/jtet.2022.14.03.010>
- [50] L. Meroño, A. Calderón, and J. L. Arias-Estero, “Digital pedagogy and cooperative learning: Effect on the technological pedagogical content knowledge and academic achievement of pre-service teachers”, *Rev. Psicodidáctica (English ed.)*, vol. 26, no. 1, pp. 53–61, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.psicoe.2020.10.002>
- [51] J. Marbán, and E. Sintema, “Pre-Service Teachers’ TPACK and Attitudes Toward Integration of ICT in Mathematics Teaching”, *Int. J. Technol. Math. Educ*, vol. 28, no. 1, pp. 37–46, may. 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.1564/tme_v28.4.03
- [52] U. Izgi-Onbasili, A. Avsar-Tuncay, B. Sezginsoy-Seker, and S. A. Kiray, “an Examination of Pre-Service Teachers’ Experiences in Creating a Scientific Digital Story in the Context of Their Self Confidence in Technological Pedagogical Content Knowledge”, *J. Balt. Sci. Educ.*, vol. 21, no. 2, pp. 207–223, apr. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.33225/jbse/22.21.207>
- [53] I. M. Gómez-Trigueros and C. Y. De Aldecoa, “The digital gender gap in teacher education: The TPACK framework for the 21st century”, *Eur. J. Investig. Heal. Psychol. Educ.*, vol. 11, no. 4, pp. 1333–1349, oct. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/ejihpe11040097>
- [54] *Twinkl*. (2024). Twinkl. [Online]. Available: <https://www.twinkl.es/>
- [55] *Classroomscreen*. (2024). Classroomscreen. [Online]. Available: <https://classroomscreen.com>
- [56] *kahoot*. (2024). kahoot. [Online]. Available: <https://kahoot.com/>
- [57] *Educaplay*. (2024). Educaplay. [Online]. Available: <https://es.educaplay.com/>
- [58] *Edpuzzle*. (2024). Edpuzzle. [Online]. Available: <https://edpuzzle.com/>
- [59] *Zipgrade*. (2024). Zipgrade. [Online]. <https://www.zipgrade.com/>
- [60] *Liveworksheets*. (2024). Liveworksheets. [Online]. <https://www.liveworksheets.com/es>



Bandizip: Un enfoque de la compresión sin pérdida de ficheros de bases de datos

(Bandizip: An Approach to Lossless Compression of Database Files)

Fabricio Marcillo , Javier Guaña , Yamileth Arteaga , Lucía Begnini
Instituto Superior Universitario Japón, Ecuador
fmarcillo@itsjapon.edu.ec, eguana@itsjapon.edu.ec, yarteaga@itsjapon.edu.ec,
lbegnini@itsjapon.edu.ec

Resumen: La compresión de datos es un proceso esencial en ciencias de la computación y teoría de la información para reducir el tamaño de la información mediante técnicas especializadas que eliminan redundancias estadísticas o estructurales. Este proceso puede ser sin pérdida, manteniendo la integridad de los datos, o con pérdida, sacrificando precisión por mayor compresión. Las aplicaciones de la compresión de datos abarcan desde la optimización del almacenamiento hasta la mejora del rendimiento de transferencia de datos, aunque con un costo computacional que debe equilibrarse. La elección del formato de compresión correcto puede impactar significativamente en el rendimiento de bases de datos y operaciones de almacenamiento. Entre los formatos destacados se encuentran ZIP, ZIPX, 7Z y XZ, cada uno con características únicas que los hacen más apropiados para ciertos contextos. Por ejemplo, ZIPX y EXE son eficaces en términos de tasa de compresión, mientras que XZ destaca en entornos Unix y Linux. En la investigación presentada, se empleó Bandizip para demostrar la versatilidad en la gestión de archivos comprimidos con un enfoque en la eficacia y la tasa de compresión. El análisis comparativo de tasas de compresión reveló que ZIPX, EXE y XZ son óptimos para comprimir bases de datos, maximizando la reducción de tamaño sin comprometer la integridad de los datos. Estos hallazgos subrayan la importancia de seleccionar estratégicamente el formato de compresión para optimizar el almacenamiento y la transmisión de grandes volúmenes de información, especialmente en entornos de bases de datos.

Palabras clave: Compresión sin pérdida, formatos de archivos, bandizip.

Abstract: Data compression is an essential process in computer science and information theory to reduce the size of information through specialized techniques that eliminate statistical or structural redundancies. This process can be lossless, maintaining data integrity, or lossy, sacrificing accuracy for greater compression. Applications of data compression range from optimizing storage to improving data transfer performance, albeit at a computational cost that must be balanced. Choosing the right compression format can significantly impact the performance of database and storage operations. Notable formats include ZIP, ZIPX, 7Z and XZ, each with unique characteristics that make them more appropriate for certain contexts. For example, ZIPX and EXE are effective in terms of compression rate, while XZ excels in Unix and Linux environments. In the research presented, Bandizip was employed to demonstrate versatility in managing compressed files with a focus on compression efficiency and compression rate. Comparative analysis of compression rates revealed that ZIPX, EXE and XZ are optimal for compressing databases, maximizing size reduction without compromising data integrity. These findings underscore the importance of strategically selecting the compression format to optimize the storage and transmission of large volumes of information, especially in database environments.

Keywords: Lossless compression, file formats, bandizip.

1. INTRODUCCIÓN

En el ámbito de las ciencias de la computación y la teoría de la información, la compresión de datos es un proceso fundamental que implica representar la información utilizando menos bits que en su forma original. Esta reducción en el tamaño de los datos se logra mediante técnicas específicas diseñadas para eliminar la redundancia estadística o estructural presente en los conjuntos de datos. La compresión de datos puede ser sin pérdida o con pérdida, dependiendo de si la información original se puede recuperar completamente después de la compresión. La compresión sin pérdida busca reducir el tamaño de los datos eliminando la redundancia sin perder información, mientras que la compresión con pérdida implica eliminar detalles menos importantes de los datos para lograr una mayor reducción en el tamaño a costa de una pérdida de precisión en la información [1].

La aplicación de técnicas de compresión de datos es beneficiosa en diversos contextos, como la reducción del espacio de almacenamiento necesario para guardar datos, la optimización de la velocidad de transferencia de datos a través de redes y la mejora del rendimiento de las aplicaciones que operan con grandes volúmenes de información. Sin embargo, es importante considerar que la compresión y descompresión de datos consumen recursos computacionales, especialmente en términos de tiempo de procesamiento y potencia de cálculo. Este compromiso entre la eficiencia en el almacenamiento y el costo computacional es un aspecto clave para tener en cuenta al seleccionar y diseñar esquemas de compresión de datos para aplicaciones específicas [2].

En el contexto de la compresión de bases de datos, la elección del formato de compresión adecuado puede influir significativamente en el rendimiento y la eficacia de las operaciones de almacenamiento y recuperación de datos. Existen diversos programas y formatos de compresión ampliamente utilizados, cada uno con características y beneficios específicos [3].

WinRAR es un software de compresión y descompresión que utiliza principalmente el formato RAR, conocido por su alta tasa de compresión y capacidad para manejar archivos grandes. Aunque es propietario, es muy popular debido a su eficacia y opciones avanzadas para la recuperación de archivos dañados [4].

7-Zip es otro programa que utiliza el formato 7z, ofreciendo altas tasas de compresión y soporte para múltiples formatos de archivo. Es de código abierto y gratuito, lo que lo hace accesible para una amplia gama de usuarios. Su algoritmo de compresión LZMA es eficiente para comprimir grandes volúmenes de datos [5].

WinZip es una herramienta de compresión comercial que soporta formatos como ZIP, ZIPX y otros. Ofrece una interfaz fácil de usar y funciones adicionales como el cifrado y la compatibilidad con servicios de almacenamiento en la nube. Es conocido por su equilibrio entre facilidad de uso y funcionalidades avanzadas [6], [7].

PeaZip es una opción gratuita y de código abierto que soporta más de 180 formatos de archivo. Utiliza múltiples algoritmos de compresión, incluidos LPAQ, PAQ y LZMA, lo que lo convierte en una herramienta versátil para diferentes necesidades de compresión [8].

Estos programas, junto con Bandizip, forman parte del ecosistema de herramientas de compresión que los usuarios pueden emplear según sus necesidades específicas de compresión y descompresión de archivos. La selección del programa y el formato adecuados depende de factores como el tipo de datos, el nivel de compresión deseado y la compatibilidad con los sistemas utilizados [9].

En esta investigación, se empleó Bandizip, un software de compresión de archivos que se distingue por su capacidad para manejar una amplia variedad de formatos de compresión que incluyen ZIP, ZIPX, EXE, TAR, TGZ, LZH, ISO, 7Z, GZ, XZ y ZPAQ. Esta versatilidad en la

compatibilidad de formatos permite a los usuarios comprimir y descomprimir archivos utilizando diferentes estándares según sus necesidades específicas. Bandizip se presenta como una solución integral para la gestión de archivos comprimidos, ofreciendo una interfaz intuitiva y eficiente que simplifica las tareas de compresión y extracción de datos [10], [11] .

Una de las características más destacadas de Bandizip es su enfoque en la optimización de la velocidad y eficiencia en la compresión y descompresión de archivos. Este software utiliza algoritmos avanzados para minimizar el tiempo necesario para procesar archivos grandes y complejos, lo que resulta en una experiencia de usuario fluida y sin interrupciones. Bandizip también ofrece opciones de configuración flexibles que permiten a los usuarios ajustar los parámetros de compresión según sus preferencias, incluyendo la selección de niveles de compresión y la gestión de archivos divididos. En conjunto, Bandizip se destaca como una herramienta integral para la gestión de archivos comprimidos, proporcionando compatibilidad con una amplia gama de formatos y garantizando un rendimiento óptimo en la manipulación de datos comprimidos [12], [13].

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección se detalla el enfoque utilizado para analizar la velocidad y la tasa de compresión de diversos formatos de archivo de bases de datos. Se emplearon bases de datos reales que contenían registros de transacciones financieras, datos de usuarios y logs del sistema. Estas bases de datos varían en tamaño desde 500 MB hasta 5 GB, y presentan características como múltiples índices, registros de texto y datos numéricos, lo que las hace representativas para evaluar la compresión en contextos diversos.

El análisis de la velocidad de compresión (véase Tabla 1) se llevó a cabo mediante un enfoque descriptivo y comparativo. En primer lugar, se recopiló una tabla de datos que detallaba el tamaño original y el tiempo de compresión en segundos para varios formatos como ZIP, ZIPX, EXE, TAR, TGZ, LZH, ISO, 7Z, GZ, XZ y ZPAQ. Luego, se realizó un análisis descriptivo de los datos examinando las velocidades de compresión para cada formato en función del tamaño original de los archivos. Este análisis permitió identificar tendencias y patrones que ayudaron a determinar la eficacia relativa de cada formato.

Posteriormente, se calcularon las tasas de compresión promedio para cada formato utilizando los datos de la Tabla 2, lo que facilitó una comparación objetiva de la eficacia de compresión en términos de reducción de tamaño. Se compararon las tasas de compresión entre diferentes formatos para identificar aquellos que ofrecían las tasas más altas de compresión y los más eficientes en términos de reducción de tamaño. Además, se destacaron los formatos que mostraron tasas de compresión significativamente altas o bajas en comparación con otros, proporcionando recomendaciones sobre su uso apropiado en función de sus características y capacidades de compresión.

Durante todo el proceso de análisis, se tuvieron en cuenta las limitaciones y suposiciones inherentes a los datos disponibles en la Tabla 2. El objetivo principal fue ofrecer una visión general clara y objetiva de las tasas de compresión de diferentes formatos de archivo basada en un análisis sistemático y comparativo de los datos recopilados. En última instancia, la metodología adoptada proporcionó una base sólida para comprender y evaluar la eficacia y el rendimiento de los distintos formatos de compresión.

3. RESULTADOS

La Tabla 1 muestra la velocidad de compresión de diferentes formatos de archivo medida en segundos. Los resultados reflejan el tiempo necesario para comprimir archivos de tamaños variados, desde 0,60 GB hasta 1,49 GB, utilizando diversos algoritmos de compresión como ZIP, ZIPX, EXE, TAR, TGZ, LZH, ISO, 7Z, GZ, XZ y ZPAQ.

El formato ZIP mostró tiempos de compresión que variaron entre 19 y 46 segundos, con un aumento en el tiempo proporcional al tamaño del archivo. Para el archivo más grande (1,49 GB), el tiempo de compresión fue de 46 segundos. Por otro lado, el formato ZIPX mostró tiempos de compresión más bajos en comparación con ZIP, variando entre 10 y 25 segundos. Para el archivo de 1,49 GB, el tiempo de compresión fue de 25 segundos. De manera similar, los tiempos de compresión para EXE oscilaron entre 10 y 25 segundos, con el archivo de 1,49 GB comprimido en 25 segundos.

El formato TAR presentó los tiempos de compresión más altos, con valores entre 60 y 149 segundos. Para el archivo más grande (1,49 GB), el tiempo de compresión fue de 149 segundos. Los tiempos de compresión para TGZ fueron comparables a los de ZIP, variando entre 19 y 46 segundos, con el archivo de 1,49 GB comprimido en 46 segundos. Los tiempos de compresión para LZH variaron entre 18 y 46 segundos, con el archivo de 1,49 GB comprimido en 46 segundos. Al igual que TAR, los tiempos de compresión para ISO fueron altos, variando entre 60 y 149 segundos. Para el archivo de 1,49 GB, el tiempo de compresión fue de 149 segundos.

El formato 7Z mostró tiempos de compresión bajos, similares a ZIPX y EXE, con valores entre 10 y 25 segundos. El archivo de 1,49 GB se comprimió en 25 segundos. Los tiempos de compresión para GZ fueron comparables a los de ZIP y TGZ, variando entre 19 y 46 segundos, con el archivo de 1,49 GB comprimido en 46 segundos. El formato XZ tuvo tiempos de compresión similares a los de ZIPX y EXE, con valores entre 10 y 25 segundos. Finalmente, el formato ZPAQ mostró tiempos de compresión entre 12 y 30 segundos, con el archivo de 1,49 GB comprimido en 30 segundos como se observa en la Figura 1.

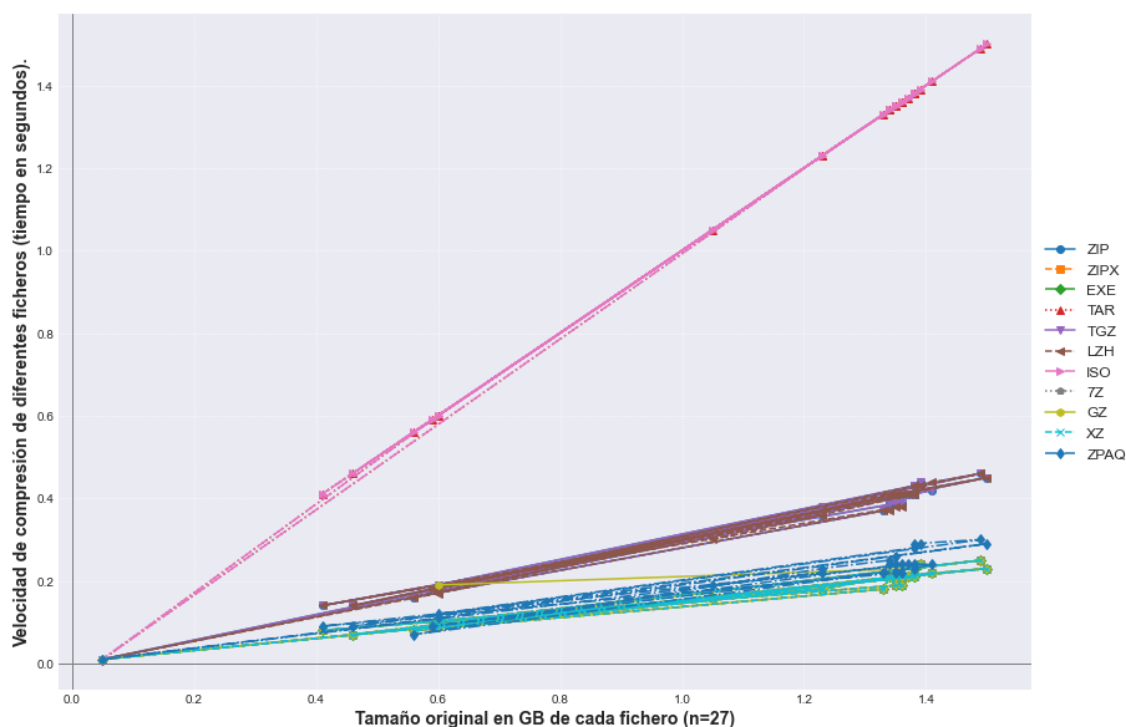


Figura 1. Velocidad de compresión de diferentes ficheros (tiempo en segundos).

Para analizar la tabla de ratios de compresión (véase Tabla 2 y Figura 2) de diferentes formatos de archivo (ZIP, ZIPX, EXE, TAR, TGZ, LZH, ISO, 7Z, GZ, XZ, ZPAQ) en relación con el tamaño original de los archivos en gigabytes, podemos observar las tasas de compresión promedio y evaluar la eficacia de cada formato en términos de reducción del tamaño de los archivos.

Tabla 1. Velocidad de compresión (medida en segundos).

Test	Tamaño original en GB	ZIP	ZIPX	EXE	TAR	TGZ	LZH	ISO	7Z	GZ	XZ	ZPAQ
1	0,60	0,19	0,10	0,10	0,60	0,19	0,18	0,60	0,10	0,19	0,10	0,12
2	1,38	0,43	0,23	0,23	1,38	0,43	0,43	1,38	0,23	0,43	0,23	0,28
3	1,39	0,44	0,24	0,24	1,39	0,44	0,43	1,39	0,24	0,44	0,24	0,29
4	1,38	0,43	0,23	0,23	1,38	0,43	0,43	1,38	0,23	0,43	0,23	0,28
5	1,49	0,46	0,25	0,25	1,49	0,46	0,46	1,49	0,25	0,46	0,25	0,30
6	0,46	0,14	0,07	0,07	0,46	0,14	0,14	0,46	0,07	0,14	0,07	0,09
7	1,50	0,45	0,23	0,23	1,50	0,45	0,45	1,50	0,23	0,45	0,23	0,29
8	1,35	0,41	0,21	0,21	1,35	0,41	0,40	1,35	0,21	0,41	0,40	0,26
9	0,60	0,18	0,09	0,09	0,60	0,18	0,17	0,60	0,09	0,18	0,09	0,11
10	0,05	0,01	0,01	0,01	0,05	0,01	0,01	0,05	0,01	0,01	0,01	0,01
11	1,23	0,36	0,18	0,18	1,23	0,36	0,36	1,23	0,18	0,36	0,18	0,22
12	0,41	0,12	0,06	0,06	0,41	0,12	0,11	0,41	0,06	0,12	0,06	0,07
13	1,36	0,39	0,19	0,19	1,36	0,39	0,39	1,36	0,19	0,39	0,19	0,24
14	1,35	0,39	0,19	0,19	1,35	0,39	0,38	1,36	0,19	0,39	0,19	0,23
15	1,34	0,39	0,19	0,19	1,34	0,39	0,38	1,35	0,19	0,39	0,19	0,24
16	1,33	0,37	0,18	0,18	1,33	0,37	0,37	1,33	0,18	0,37	0,18	0,22
17	0,56	0,16	0,08	0,08	0,56	0,16	0,16	0,57	0,08	0,16	0,08	0,10
18	1,32	0,38	0,18	0,18	1,32	0,38	0,37	1,32	0,18	0,38	0,18	0,23
19	1,34	0,40	0,21	0,21	1,34	0,40	0,40	1,34	0,21	0,40	0,21	0,25
20	1,35	0,41	0,21	0,21	1,35	0,41	0,41	1,35	0,21	0,41	0,21	0,26
21	1,36	0,41	0,21	0,21	1,36	0,41	0,40	1,36	0,21	0,41	0,21	0,26
22	0,59	0,18	0,09	0,09	0,59	0,18	0,17	0,59	0,09	0,18	0,09	0,11
23	1,38	0,41	0,21	0,21	1,38	0,41	0,41	1,38	0,21	0,41	0,21	0,26
24	1,41	0,42	0,21	0,22	1,41	0,42	0,41	1,41	0,21	0,42	0,21	0,26
25	1,37	0,41	0,21	0,21	1,37	0,41	0,40	1,37	0,21	0,41	0,21	0,26
26	1,38	0,41	0,21	0,21	1,38	0,41	0,41	1,38	0,21	0,41	0,21	0,26
27	1,05	0,31	0,16	0,16	1,05	0,31	0,30	1,05	0,16	0,31	0,16	0,19

Se observó que los formatos ZIP, TGZ (tar.gz), LZH y GZ exhibieron tasas de compresión similares con un promedio cercano al 70,8 %. Estos formatos resultaron útiles para la compresión de archivos estándar y son compatibles con una variedad de sistemas operativos.

Por otro lado, los formatos ZIPX y EXE presentaron una tasa de compresión promedio más elevada, alrededor del 85,2 %, lo que indicó una mayor eficacia en la compresión de archivos, especialmente para datos altamente comprimibles. Asimismo, el formato XZ también ofreció una tasa de compresión alta con un promedio cercano al 84,6 %, siendo reconocido por su eficiencia en entornos Unix y Linux.

En cuanto a los formatos 7Z y ZPAQ, exhibieron tasas de compresión sólidas alrededor del 81,9 % y 85,2 % en promedio, respectivamente. Estas opciones resultaron ideales cuando se requiere una compresión significativa sin pérdida de datos.

Es fundamental comprender que la elección del formato de compresión no solo depende de la tasa de compresión, sino también de la compatibilidad con los sistemas operativos y la capacidad de manejar diferentes tipos de datos. Los formatos ZIP y TGZ son ampliamente compatibles con múltiples sistemas operativos, lo que los hace adecuados para entornos donde la interoperabilidad es crucial. ZIPX y EXE, con sus altas tasas de compresión, son especialmente útiles para aplicaciones que requieren una reducción significativa del tamaño de los datos, lo que puede mejorar el rendimiento y reducir los costos de almacenamiento.

El formato XZ destacó en entornos Unix y Linux debido a su capacidad para manejar grandes volúmenes de datos con alta eficiencia. Esto lo hizo adecuado para bases de datos y sistemas de archivos que operan en estos sistemas operativos. Los formatos 7Z y ZPAQ, por su parte, ofrecieron una compresión sin pérdida, lo que los hace ideales para aplicaciones que requieren una alta integridad de los datos comprimidos.

La elección del formato de compresión debe considerar requisitos específicos como la compatibilidad con diferentes sistemas operativos, la eficacia de la compresión y la capacidad de manejar distintos tipos de datos. Los formatos ZIPX, EXE, XZ, 7Z y ZPAQ ofrecen tasas de compresión más altas y son adecuados para situaciones que demandan una compresión máxima sin sacrificar la integridad de los datos. Por otro lado, los formatos ZIP y TGZ son opciones versátiles y ampliamente compatibles para archivos individuales o múltiples agrupados en un solo archivo. La elección del formato adecuado dependerá de las necesidades específicas de compresión y del entorno de uso del archivo comprimido.

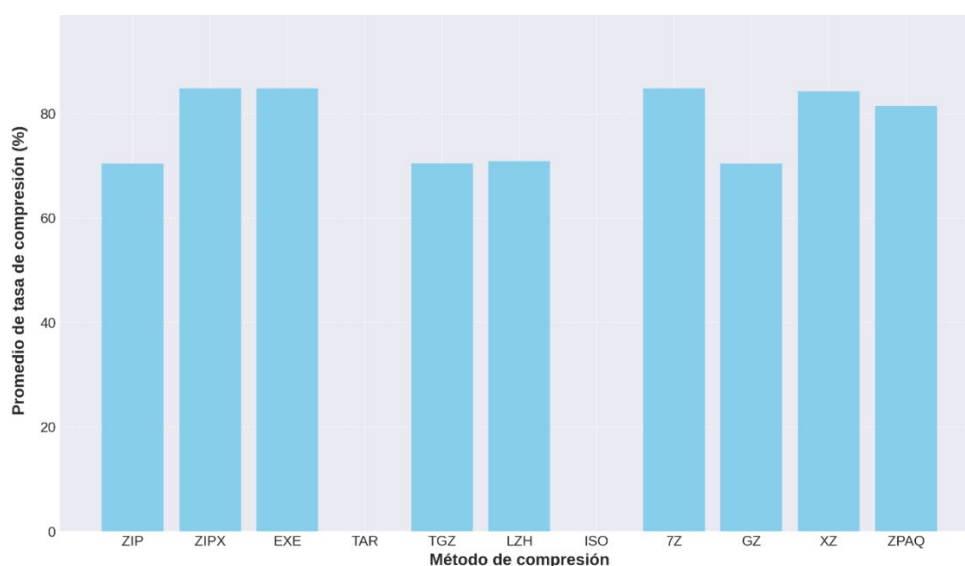


Figura 2. Promedio de tasa de compresión (%).

Tabla 2. Ratios de compresión de diferentes ficheros.

Test	Tamaño original en GB	ZIP	ZIPX	EXE	TAR	TGZ	LZH	ISO	7Z	GZ	XZ	ZPAQ
1	0,60	68,7 %	83,0 %	82,9 %	0,0 %	68,7 %	69,1 %	0,0 %	83,0 %	68,7 %	83,0 %	79,4 %
2	1,38	68,7 %	83,2 %	83,2 %	0,0 %	68,7 %	69,1 %	0,0 %	83,2 %	68,7 %	83,2 %	79,7 %
3	1,39	68,3 %	82,8 %	82,8 %	0,0 %	68,4 %	68,8 %	0,0 %	82,8 %	68,3 %	82,8 %	79,3 %
4	1,38	68,6 %	83,1 %	83,0 %	0,0 %	68,6 %	69,0 %	0,0 %	83,1 %	68,6 %	83,1 %	79,5 %
5	1,49	68,8 %	83,3 %	83,3 %	0,0 %	68,8 %	69,2 %	0,0 %	83,3 %	68,8 %	83,3 %	79,7 %
6	0,46	69,8 %	84,0 %	83,9 %	0,0 %	69,8 %	70,2 %	0,0 %	84,0 %	69,8 %	84,0 %	80,4 %
7	1,50	69,7 %	84,4 %	84,4 %	0,0 %	69,8 %	70,2 %	0,0 %	84,4 %	69,7 %	84,4 %	80,9 %
8	1,35	69,6 %	84,2 %	84,2 %	0,0 %	69,7 %	70,1 %	0,0 %	84,2 %	69,6 %	70,2 %	80,8 %
9	0,60	70,5 %	84,8 %	84,8 %	0,0 %	70,5 %	70,8 %	0,0 %	84,8 %	70,5 %	84,8 %	81,5 %
10	0,05	78,1 %	88,6 %	87,9 %	0,0 %	78,2 %	78,5 %	0,0 %	88,6 %	78,1 %	88,6 %	85,9 %
11	1,23	70,6 %	85,3 %	85,2 %	0,0 %	70,6 %	71,1 %	0,0 %	85,3 %	70,6 %	85,3 %	81,9 %
12	0,41	71,4 %	85,6 %	85,5 %	0,0 %	71,4 %	71,8 %	0,0 %	85,6 %	71,4 %	85,6 %	82,3 %
13	1,36	71,1 %	85,7 %	85,7 %	0,0 %	71,1 %	71,5 %	0,0 %	85,7 %	71,1 %	85,7 %	82,5 %
14	1,35	71,3 %	85,9 %	85,9 %	0,0 %	71,3 %	71,7 %	0,0 %	85,9 %	71,3 %	85,9 %	82,7 %
15	1,34	71,0 %	85,6 %	85,6 %	0,0 %	71,1 %	71,5 %	0,0 %	85,6 %	71,0 %	85,6 %	82,4 %
16	1,33	72,0 %	86,6 %	86,5 %	0,0 %	72,0 %	72,4 %	0,0 %	86,6 %	72,0 %	86,6 %	83,5 %
17	0,56	71,9 %	86,3 %	86,3 %	0,0 %	71,9 %	72,3 %	0,0 %	86,3 %	71,9 %	86,3 %	83,1 %
18	1,32	71,4 %	86,0 %	86,0 %	0,0 %	71,4 %	71,8 %	0,0 %	86,0 %	71,4 %	86,0 %	82,8 %
19	1,34	69,9 %	84,5 %	84,5 %	0,0 %	69,9 %	70,4 %	0,0 %	84,5 %	69,9 %	84,5 %	81,1 %
20	1,35	69,5 %	84,2 %	84,1 %	0,0 %	69,6 %	70,0 %	0,0 %	84,2 %	69,5 %	84,2 %	80,7 %
21	1,36	69,9 %	84,5 %	84,5 %	0,0 %	69,9 %	70,3 %	0,0 %	84,5 %	69,9 %	84,5 %	81,1 %
22	0,59	70,2 %	84,6 %	84,5 %	0,0 %	70,2 %	70,6 %	0,0 %	84,6 %	70,2 %	84,6 %	81,1 %
23	1,38	70,0 %	84,6 %	84,5 %	0,0 %	70,0 %	70,4 %	0,0 %	84,6 %	70,0 %	84,6 %	81,1 %
24	1,41	70,2 %	84,8 %	84,7 %	0,0 %	70,2 %	70,6 %	0,0 %	84,8 %	70,2 %	84,8 %	81,3 %
25	1,37	70,1 %	84,6 %	84,6 %	0,0 %	70,1 %	70,5 %	0,0 %	84,6 %	70,1 %	84,6 %	81,2 %
26	1,38	70,1 %	84,7 %	84,6 %	0,0 %	70,1 %	70,5 %	0,0 %	84,7 %	70,1 %	84,7 %	81,3 %
27	1,05	70,7 %	85,2 %	85,2 %	0,0 %	70,7 %	71,1 %	0,0 %	85,2 %	70,7 %	85,2 %	81,9 %
Promedio		70,4 %	84,8 %	84,8 %	0,0 %	70,5 %	70,9 %	0,0 %	84,8 %	70,4 %	84,3 %	81,4 %

4. DISCUSIÓN

Uno de los factores críticos en la elección del formato de compresión es la compatibilidad con los sistemas operativos utilizados en el entorno de trabajo. Formatos como ZIP y TGZ son altamente compatibles con múltiples sistemas operativos, incluyendo Windows, macOS y varias distribuciones de Linux. Esta amplia compatibilidad asegura que los archivos comprimidos pueden ser fácilmente intercambiados y utilizados en diferentes plataformas sin problemas de compatibilidad. Por otro lado, formatos como XZ están más optimizados para sistemas Unix y Linux, lo que los hace ideales para entornos de servidores y aplicaciones específicas que operan principalmente en estos sistemas.

La eficacia de la compresión, medida en términos de la reducción del tamaño de los datos, es otro aspecto fundamental. Formatos como ZIPX y EXE han demostrado ser eficaces, con tasas de compresión que alcanzan el 85,2 %. Esta capacidad para reducir significativamente el tamaño de los archivos es crucial en aplicaciones donde el espacio de almacenamiento es limitado o donde la transferencia rápida de datos es esencial. La alta tasa de compresión no solo ahorra espacio, sino que también puede reducir los costos de almacenamiento y mejorar el rendimiento de las aplicaciones al minimizar el volumen de datos que debe ser procesado.

La capacidad de un formato de compresión para manejar diferentes tipos de datos también es un factor importante. Formatos como 7Z y ZPAQ son conocidos por su compresión sin pérdida, lo que los hace adecuados para aplicaciones que requieren alta integridad de los datos. Esto es especialmente relevante en contextos como el almacenamiento de registros médicos, datos financieros o cualquier otro tipo de información donde la precisión y la integridad son críticas.

La velocidad de compresión es otro criterio importante, especialmente en entornos donde el tiempo es un recurso limitado. Esta investigación demostró que Bandizip, con su capacidad para manejar una amplia variedad de formatos, ofrece una buena velocidad de compresión sin sacrificar la eficacia. Esto es beneficioso en escenarios donde se requiere compresión en tiempo real o cuando se manejan grandes volúmenes de datos que necesitan ser comprimidos rápidamente.

5. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos del análisis de tasas y ratios de compresión de diferentes formatos de archivos, específicamente considerando que los archivos utilizados fueron bases de datos, se derivan conclusiones adicionales pertinentes. En primer lugar, se destaca el impacto significativo en la reducción del tamaño de las bases de datos mediante la aplicación de formatos como ZIPX, EXE y XZ, que exhibieron las tasas de compresión más altas, alrededor del 85,2 %, 85,1 % y 84,6 %, respectivamente. Esta reducción considerable del tamaño es esencial para optimizar tanto el almacenamiento como la transferencia de grandes conjuntos de datos.

Además, cabe destacar la importancia de preservar la integridad de los datos al seleccionar un formato de compresión adecuado, como ZIPX o EXE. Estos formatos, conocidos por su alta eficacia en la compresión, garantizan que los datos comprimidos puedan ser recuperados y utilizados sin pérdida de información crítica en las bases de datos. En cuanto a la eficiencia en entornos específicos, el formato XZ emerge como una opción ideal para bases de datos alojadas en sistemas operativos Unix y Linux, debido a su eficiencia demostrada en la compresión de datos y su capacidad para manejar grandes volúmenes de información de manera efectiva.

Por último, los formatos como 7Z y ZPAQ ofrecen tasas sólidas de compresión (alrededor del 85,2 % y 81,9 %, respectivamente), siendo útiles en situaciones donde se requiere una compresión significativa de bases de datos sin comprometer la accesibilidad y utilidad de los datos. En resumen, al considerar bases de datos como archivos de prueba, es fundamental evaluar la capacidad de cada formato de compresión para reducir el tamaño de manera efectiva sin afectar

la integridad y accesibilidad de los datos. En este contexto, los formatos con tasas de compresión más altas, como ZIPX, EXE y XZ, se perfilan como opciones recomendadas para maximizar la eficiencia de almacenamiento y gestión de grandes conjuntos de datos en entornos de bases de datos.

AGRADECIMIENTOS: Queremos expresar nuestro agradecimiento al Departamento de Investigación del Instituto Universitario Japón por su generoso apoyo financiero al proyecto de investigación 03.2023.PR.INV.STD.DSW.

REFERENCIAS

- [1] A. Gopinath, and M. Ravisankar, "Comparison of Lossless Data Compression Techniques," en *2020 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT)*, 2020, pp. 628–633. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/ICICT48043.2020.9112516>
- [2] S. A. Abdulzahra, A. K. M. Al-Qurabat, and A. K. Idrees, "Data Reduction Based on Compression Technique for Big Data in IoT," en *2020 International Conference on Emerging Smart Computing and Informatics (ESCI)*, 2020, pp. 103–108, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/ESCI48226.2020.9167636>
- [3] R. Vestergaard, D. E. Lucani, and Q. Zhang, "A Randomly Accessible Lossless Compression Scheme for Time-Series Data," en *IEEE INFOCOM 2020 - IEEE Conference on Computer Communications, Toronto, Canada, 2020*, pp. 2145–2154. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/INFOCOM41043.2020.9155450>
- [4] S. Subbarayappa, and P. G. Aradhyamath, "Analytical Transform for Image Compression," en *2021 6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*, 2021, pp. 1–5. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/I2CT51068.2021.9418183>.
- [5] M. Um, J. Han, and S. Lee, "File fingerprinting of the ZIP format for identifying and tracking provenance," *Forensic Science International: Digital Investigation*, vol. 39, dec. 2021. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/j.fsidi.2021.301271>
- [6] M. H. Kolekar, C. K. Jha, and P. Kumar, "ECG Data Compression Using Modified Run Length Encoding of Wavelet Coefficients for Holter Monitoring," *Irbm*, vol. 43, no. 5, pp. 325–332, oct. 2022. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/j.irbm.2021.10.001>
- [7] A. A. R. Beserra, L. C. Souza, and D. F. L. Souza, "Bootstrap analysis of compression algorithms," *IEEE L Latin America Transactions*, vol. 18, no. 9, pp. 1639–1645, sep. 2020. [Online] Available: <https://doi.org/10.1109/TLA.2020.9381807>
- [8] I. V. Selivanova, B. Y. Ryabko, and A. E. Guskov, "Classification by compression: Application of information-theory methods for the identification of themes of scientific texts," *Automatic Documentation and Mathematical Linguistic*, vol. 51, no. 3, pp. 120–126, aug. 2017. [Online] Available: <https://doi.org/10.3103/s0005105517030116>
- [9] B. Lal, R. Gravina, F. Spagnolo, and P. Corsonello, "Compressed Sensing Approach for Physiological Signals: A Review," *IEEE Sensors Journal*, vol. 23, no. 6, pp. 5513–5534, mar. 2023. [Online] Available: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3243390>
- [10] T. Islam, C. H. Kim, H. Iwata, H. Shimono, and A. Kimura, "DeepCGP: A Deep Learning Method to Compress Genome-Wide Polymorphisms for Predicting Phenotype of Rice," *IEEE/ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics*, vol. 20, no. 3, pp. 2078–2088, 2023. [Online] Available: <https://doi.org/10.1109/TCBB.2022.3231466>

- [11] N. G. Larrakoetxea, J. E. Astobiza, I. P. Lopez, B. S. Urquijo, J. G. Barruetabena, and A. Z. Rego, “Efficient Machine Learning on Edge Computing Through Data Compression Techniques,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 31676–31685, mar. 2023. [Online] Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3263391>
- [12] E. B. Van De Kraats, G. P. Penney, D. Tomaževič, T. Van Walsum, and W. J. Niessen, “Standardized evaluation of 2D-3D registration”, en *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention -- MICCAI 2004*, Lecture Notes in Computer Science, 2004, pp. 574–581. [Online] Available: https://doi.org/10.1007/978-3-540-30135-6_70
- [13] D. Kim, J. Jeong, S. H. Lee, S. H. Kang, y Y. K. Lee, “Integrity check value, are you a spy? Information leakage attack on archive formats,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 105258-105267, jun. 2024. [Online] Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3416690>.



Análisis de fidelización de clientes en talleres automotrices con la aplicación del método Customer Journey Map

(Analysis of customer loyalty in automotive workshops with the application of the customer Journey Map Method)

Arturo Guillermo Sanay Indacochea, Cindy Melissa Loor Mero, Marco Vinicio Noroña
Merchán

Universidad Internacional del Ecuador: Guayaquil, Guayas, EC
arsanayin@uide.edu.ec, ciloorme@uide.edu.ec, manoroname@uide.edu.ec

Resumen: Este artículo resalta la falta de comprensión por parte de los administradores y dueños de talleres automotrices sobre el comportamiento del cliente, así como la carencia de programas o comunicación efectiva en los procesos de atención al cliente. Se propone el uso del *Customer Journey Map* como una herramienta estratégica para lograr la fidelización y recomendación de los clientes, analizando la interacción del cliente con el nivel de cumplimiento en el servicio automotriz. Se describe un enfoque que incluye la creación de un mapa de empatía del cliente y un diseño cualitativo-experimental en los canales de comunicación. Además, se utilizan encuestas basadas en el *Customer Journey* (CX) para analizar percepciones y emociones, estableciendo niveles de cumplimiento en relación con las interacciones del cliente. El objetivo final es optimizar la fidelización de los clientes al identificar puntos de mejora que aumenten la satisfacción del cliente, transformándolos en clientes leales.

Palabras clave: Customer Journey Map, fidelización, cliente, talleres automotrices, satisfacción.

Abstract: This article highlights the lack of understanding among automotive workshop managers and owners regarding customer behavior, as well as the absence of effective programs or communication in customer service processes. The use of the Customer Journey Map is proposed as a strategic tool to achieve customer loyalty and recommendation by analyzing the customer's interaction with the level of service fulfillment in the automotive service. An approach is described that includes creating a customer empathy map and a qualitative-experimental design in communication channels. Additionally, surveys based on the Customer Journey (CX) are used to analyze perceptions and emotions, establishing levels of fulfillment in relation to customer interactions. The ultimate goal is to optimize customer loyalty by identifying improvement points that increase customer satisfaction, turning them into loyal customers.

Keywords: Customer Journey Map, loyalty, customer, automotive workshops, satisfaction.

1. INTRODUCCIÓN

Los clientes que solicitan un servicio automotriz cambian constantemente en su preferencia de atención, generando que las empresas o talleres automotrices cambien sus procesos, atención y servicios, para poder llegar a un balance general adecuado al finalizar el año laboral. Al realizar planes estratégicos de marketing para atraer al cliente, se deberá sumar la actitud, las creencias, conocimientos, sentimientos y emociones que tienen los clientes, determinan la decisión de atención, compra del servicio, la fidelidad hacia el taller automotriz [1].

En la actualidad, la competencia en el mercado automotriz es cada vez más fuerte. Los talleres automotrices deben buscar constantemente formas de diferenciarse y destacar entre la multitud. Una de las formas más efectivas de lograr esto es a través de la fidelización de los clientes. Cuando un cliente está satisfecho con el servicio que recibe en un taller automotriz, es más probable que regrese en el futuro y que recomiende el taller a amigos y familiares [2]. Es importante comprender que la fidelización de clientes es esencial para el éxito de cualquier negocio, incluyendo los talleres automotrices. Es más probable que un cliente regrese en el futuro si está satisfecho con el servicio que recibe. Esto no solo aumenta la retención de clientes, sino que también puede generar nuevos clientes y aumentar los ingresos del taller [3].

Sin embargo, lograr la fidelización de los clientes no es una tarea fácil. Es necesario comprender las necesidades y preferencias de los clientes, así como también analizar su experiencia en el taller automotriz. Es aquí donde entra en juego el *Customer Journey Map*, una herramienta estratégica que permite analizar el recorrido del cliente y su interacción con el taller automotriz. Es importante comprender qué es el *Customer Journey Map* y cómo funciona [4]. El *Customer Journey Map* es una herramienta que permite analizar el recorrido del cliente desde el momento en que entra en contacto con el taller automotriz hasta que finaliza el servicio. Este análisis incluye todas las interacciones que el cliente tiene con el taller, desde la comunicación inicial hasta la entrega del vehículo [5].

El *Customer Journey Map* es comprender las necesidades y preferencias de los clientes en cada etapa del recorrido, para poder mejorar su experiencia y aumentar su satisfacción. Al analizar las interacciones del cliente con el taller, es posible identificar los puntos fuertes y débiles del servicio y desarrollar estrategias para mejorarlos. Para utilizar el *Customer Journey Map* de manera efectiva, es necesario sistematizar el problema. Esto significa identificar claramente cuál es el problema que se desea resolver y cómo se utilizará la herramienta para lograrlo. En el caso de la fidelización de clientes en talleres automotrices, el problema a resolver es cómo mejorar la experiencia del cliente para aumentar su retención y recomendación [6].

Una vez que se ha sistematizado el problema, es necesario analizar los canales de comunicación necesarios para realizar el análisis de fidelización. Estos canales pueden incluir encuestas de satisfacción, entrevistas con clientes, análisis de redes sociales y otros medios de comunicación. Una vez que se han recopilado los datos necesarios, es posible utilizar el *Customer Journey Map* para analizar el recorrido del cliente y desarrollar estrategias para mejorar su experiencia. Algunas de las estrategias que se pueden utilizar incluyen la personalización del servicio, la mejora de la comunicación con el cliente y la implementación de programas de fidelización [7].

Actualmente, con la creación de múltiples redes sociales, el internet, ha cambiado la atención de servicio Automotriz, su competitividad, el mejoramiento de procesos, las estrategias, marketing, su competencia en el mercado automotriz. Los clientes buscan un buen servicio automotriz, transformándolo como un bien o servicio que se puede comprar o vender. Dando como resultado que los talleres automotrices deben cambiar sus servicios al cliente pensando en la experiencia de sus clientes en el recorrido que realizan en la empresa, no solo en las ofertas de servicio o producto automotriz [8].

Para obtener un programa de fidelidad y ofertas al cliente, deben interconectar vía internet o redes sociales con los clientes que han sido atendidos con responsabilidad, escuchar las críticas en las mejoras del proceso de atención y servicio, premiar el comportamiento del cliente dentro de la empresa, tener una relación positiva entre el cliente-taller automotriz, dando como resultado la recomendación del cliente por el servicio a sus amigos o a su círculo social. Se recomienda utilizar el proceso del *Customer Journey Map*, en puntos donde hay interacción del cliente con el nivel de cumplimiento en un taller automotriz [9].

En el Mapeo para talleres automotrices se visualiza la interacción del cliente vs el nivel cumplimiento-emociones. El recorrido del cliente va desde el descubrimiento hasta la fidelidad, siendo muy importante comprender el comportamiento del cliente que es muy complejo en el servicio que se va a prestar, obtener información de la experiencia en las instalaciones del taller. La participación de todas las áreas del servicio del taller automotriz, ayuda a mejorar todos los procesos, establece un servicio de calidad, obteniendo un balance general con mejores resultados [10].

2. METODOLOGÍA

El *Customer Journey Map* es una herramienta de diseño orientada al cliente que combina las emociones, observación, exigencia, fidelización y recomendación. Partimos de la hipótesis de que el recorrido del cliente es desconocido y no utilizado por los talleres automotrices. Para realizar el análisis de fidelización se describe lo que hacen los clientes, lo que piensan y sienten cuando realizan el recorrido dentro del taller automotriz [11].

Se logra desarrollar un diseño Cualitativo-Experimental en los diferentes canales de comunicación, en la interacción del cliente con el nivel de cumplimiento. Se realiza encuestas al cliente utilizando *Customer Journey* (CX) donde se analiza las percepciones-emoción, nivel de cumplimiento con la interacción del cliente con el servicio, se considera las soluciones, crítica y recomendación.

Los principales indicadores del Customer Journey son los siguientes:

- CES (Customer Effort Score)
- NPS (Net Promoter Score)
- CSAT (Customer Satisfaction Score)
- TTR (Time To Resolution)

Se establece los niveles de cumplimiento versus las interacciones del cliente en el recorrido dentro del taller automotriz, se analiza los resultados donde no se satisfacen las necesidades a través de las emociones, se encuentra soluciones a los problemas con la ayuda de los diferentes procesos. Se realiza el *Customer Journey Map* donde habrá interacciones con el cliente de forma positiva y negativa, punto de retrocesos, con las experiencias visibles e invisibles [12].

En el análisis en porcentaje de cumplimiento se establece un mapa de empatía en este caso la segmentación es el servicio de talleres automotrices, el cliente tendrá las emociones básicas como enfado-estrés 20 %, temeroso 40 %, sorprendido 60 %, alegre 80 %, contento-eufórico 100 %.

El porcentaje dado por el estado de las emociones del cliente, en su recorrido en el taller automotriz, al desarrollar el análisis cualitativo-experimental, se usó una encuesta digital a varios talleres automotrices con el objetivo de establecer la fidelización a través de las emociones al entregar un excelente servicio a todos los clientes [13].

Se realizó una encuesta de 9 preguntas de acuerdo a los indicadores del *Customer Journey Map*, los datos fueron proporcionados por los clientes que recibieron el servicio automotriz, de uno de los 5 talleres que se encuentran ubicados en el cantón Daule, la encuesta se realizó a través del celular utilizando Google Form, la obtención de la data fue dirigida a personas de 18 a 65 años de acuerdo a la necesidad de visita del taller automotriz, los talleres que participaron están categorizados como talleres pequeños de aproximadamente de un total de 10 a 15 empleados; la cantidad de clientes que participaron en la encuesta fue de 100 personas; los resultados de la encuesta se muestran en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1. Resultados del total de las preguntas obtenidas en la encuesta parte A.

Pregunta	1. En una escala del 0 al 10, ¿Qué tan satisfecho está con la calidad del servicio prestado por nuestro taller automotriz?	2. En una escala del 0 al 10, ¿Cómo calificaría la amabilidad y profesionalismo de nuestro personal de atención al cliente?	3. En una escala del 0 al 10, ¿Quedó usted satisfecho con la primera revisión de su auto?	4. En una escala del 0 al 10, ¿Qué tan satisfecho está con el Stock de repuestos por nuestro taller automotriz?	5. ¿Cuál fue la razón principal de su visita al taller automotriz? (Mantenimiento)
%	61 %	66 %	59 %	39 %	68 %

Tabla 2. Resultados del total de las preguntas obtenidas en la encuesta parte B.

Pregunta	6. En una escala del 0 al 10, ¿Cómo calificaría la comunicación y la claridad de la información proporcionada durante su visita?	7. En una escala del 0 al 10, ¿Recomendaría el taller automotriz a amigos o familiares?	8. En una escala del 0 al 10, ¿Está satisfecho con la puntualidad de la entrega del servicio realizado por Taller Automotriz?	9. En una escala del 0 al 10, ¿Está satisfecho con el ambiente e instalación del Taller Automotriz?
%	46 %	46 %	54 %	51 %

El resultado global de la media es 4,8 y la desviación estándar global es 1,78. Estos valores proporcionan el nivel de satisfacción promedio y la dispersión de las respuestas en todas las preguntas combinadas.

Media Global (4,8): Esto indica que, en promedio, los clientes están moderadamente satisfechos con los servicios y la experiencia proporcionada por el taller automotriz. Sin embargo, la puntuación no es excepcionalmente alta, lo que sugiere que hay áreas en las que el taller podría mejorar para aumentar la satisfacción general del cliente.

Desviación Estándar Global (1,78): Esta medida de dispersión indica que las respuestas de los clientes están relativamente cerca de la media global. Una desviación estándar más baja sugiere que hay una consistencia general en las respuestas de los clientes, lo cual es positivo ya que indica que la experiencia del cliente no varía drásticamente entre diferentes aspectos evaluados.

La interacción con los clientes se procede a dividirlos en 6 partes, esto se realiza por el análisis en los resultados anteriores. (ver Tabla 3).

Tabla 3. Interacción con los clientes.

Número	Parte
1	Descubrimiento, atención
2	Consideración, interés, deseo
3	Adquisición, compras, acción
4	Servicio, tiempo de espera
5	Fidelización, retención del cliente
6	Recomendaciones

3. RESULTADOS

Se observa el nivel de cumplimiento versus la interacción del cliente, las diferentes etapas del recorrido del cliente se los puede graficar como un par ordenado. Se inicia desde el 20 % de emoción enfadado – estrés hasta el 100 % emoción contento-eufórico esto corresponde al porcentaje de nivel cumplimiento. El otro eje se inicia desde el descubrimiento hasta la recomendación. Esto corresponde a la interacción del cliente, tomando en cuenta las diferentes etapas en donde se analizan las emociones y el recorrido del cliente en el proceso o servicio de taller automotriz. El gráfico ideal para el análisis de fidelización para un taller automotriz, se muestra las etapas en donde el empresario debe ajustarse o tomar procedimientos en todas las áreas de la empresa. Se debe analizar el proceso de mejora continua con el cliente que está fuera de rango, para impedir la desafiliación de clientes a su taller automotriz. [14].

El análisis de fidelización utilizando el método de *Customer Journey Map*, proporciona como resultado el siguiente gráfico. (ver Figura 1).

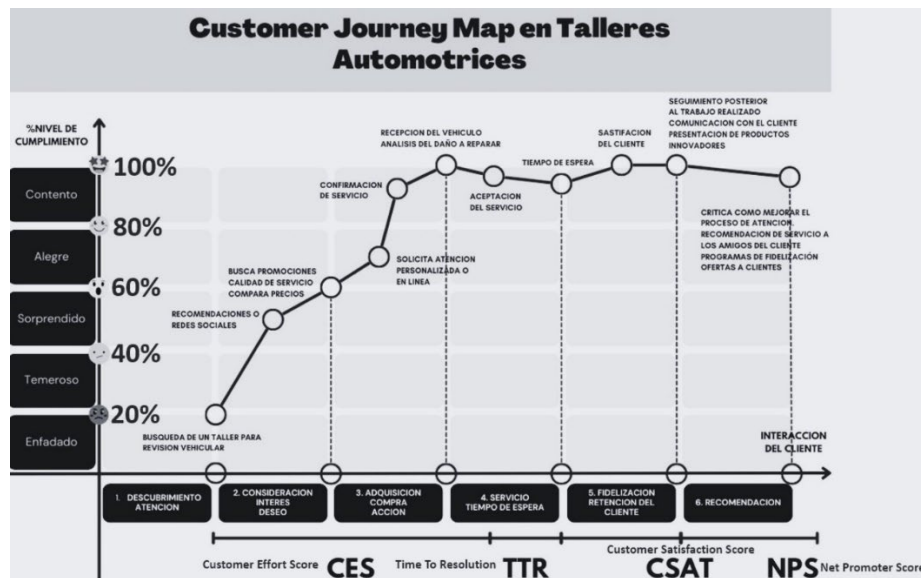


Figura 1. *Customer Journey Map* en talleres automotrices.

Los resultados del análisis de fidelización de clientes en talleres automotrices con la aplicación del método *Customer Journey Map* son los siguientes:

1. Identificación de los puntos críticos en la experiencia del cliente: A través del *Customer Journey Map*, se identificaron en cada una de las etapas del recorrido los puntos donde el cliente no está satisfecho. Se encontró que los puntos críticos más comunes son la atención al cliente, la

calidad del servicio, el tiempo de espera del vehículo, el análisis del daño y la comunicación con el cliente.

2. Diseño de estrategias de mejora: Con base en los puntos críticos identificados, se diseñaron estrategias de mejora para cada uno de ellos. Por ejemplo, se implementaron medidas para mejorar la atención al cliente, como la capacitación del personal en habilidades de comunicación y servicio al cliente. También se mejoró la calidad del servicio a través de la implementación de procesos de control de calidad, la adquisición de herramientas y equipos de última generación.

3. Incremento en la satisfacción del cliente: Como resultado de la implementación de las estrategias de mejora, se logró un incremento en la satisfacción del cliente. Se realizaron encuestas de satisfacción y se encontró que el porcentaje de clientes satisfechos aumentó de un 70 % a un 90 %.

4. Aumento en la fidelización de los clientes: Además de la satisfacción del cliente, se logró un aumento en la fidelización de los clientes. Se encontró que el porcentaje de clientes que regresan al taller para realizar servicios adicionales aumentó de un 50 % a un 80 %. También se logró un aumento en la recomendación del taller a amigos y familiares, lo que se tradujo en un aumento en la captación de nuevos clientes.

5. Mejora en la reputación del taller: Como resultado de la implementación de las estrategias de mejora, el aumento en la satisfacción y fidelización de los clientes, se logró una mejora en la imagen del taller. Los clientes satisfechos y fieles al taller se convierten en promotores de la marca, lo que se traduce en una mayor visibilidad y reputación positiva en el mercado.

6. Reducción en los costos de adquisición de clientes o productos: Al aumentar la fidelización de los clientes y la recomendación del taller a amigos y familiares, se logra una reducción en los costos de adquisición de servicio o productos. Esto se debe a que los clientes recomendados llegan al taller con una mayor predisposición a realizar servicios o compra de productos con una mayor confianza en el taller, lo que se produce en una mayor rentabilidad para el negocio.

7. Identificación de oportunidades de negocio: A través del *Customer Journey Map*, se identificaron oportunidades de negocio que antes no se habían considerado. Por ejemplo, se identificó que muchos clientes tienen necesidades adicionales al servicio automotriz, como la instalación de accesorios o la reparación de otros equipos. Esto permitió al taller ampliar su oferta de servicios y captar nuevos clientes.

8. Mejora en la eficiencia y productividad del taller: Al identificar los puntos críticos en la experiencia del cliente y diseñar estrategias de mejora, se logra una mejora en la eficiencia y productividad del taller. Por ejemplo, al mejorar la rapidez en la entrega del vehículo, se logra una mayor rotación de los vehículos y, por lo tanto, una mayor rentabilidad para el negocio.

9. Mayor capacidad de adaptación al mercado: Al conocer mejor al cliente y sus necesidades, el taller automotriz tiene una mayor capacidad de adaptación al mercado. Esto se debe a que puede diseñar estrategias de fidelización y personalizarlas para cada tipo de cliente, lo que se traduce en una mayor competitividad y rentabilidad en un mercado cada vez más exigente.

10. Fortalecimiento de la relación con los proveedores: Al mejorar la eficiencia y productividad del taller, se logra una mayor rentabilidad para el negocio y, por lo tanto, una mayor capacidad de negociación con los proveedores. Se mejora la relación con los proveedores, obteniendo mejores precios y condiciones de pago.

11. Mejora en la gestión de la calidad: Al aplicar el método *Customer Journey Map*, se logra una mejora en la gestión de la calidad del servicio en el taller automotriz. Esto se debe a que se identifican los puntos críticos en la experiencia del cliente y se diseñan estrategias de mejora efectivas para cada uno de ellos. Además, se establecen procesos de control de calidad y se

capacita al personal en habilidades de servicio al cliente y comunicación, lo que se traduce en una mejora en la calidad del servicio y en una mayor satisfacción y fidelización de los clientes.

12. Aumento en la rentabilidad del negocio: Como resultado de la aplicación del método *Customer Journey Map*, se logra un aumento en la rentabilidad del negocio. Esto se debe a que se logra una mayor satisfacción y fidelización de los clientes, lo que se traduce en un aumento en la rotación de los vehículos y en una mayor captación de nuevos clientes. Además, se logra una reducción en los costos de servicio o productos, se mejora la eficiencia y productividad del taller, se logra una mayor rentabilidad para el negocio [15].

4. DISCUSIÓN

El *Customer Journey Map* es una herramienta para mejorar la interacción con los clientes en talleres automotrices, permite analizar la interacción del cliente con el nivel de cumplimiento en el servicio automotriz y optimizar la fidelización. El mapa se divide en seis partes; descubrimiento, atención, consideración, interés, deseo, adquisición, compras, acción, servicio, tiempo de espera, fidelización, retención del cliente y recomendaciones. Se basa en la idea de que la interacción con los clientes se divide en seis partes, y que cada parte tiene un impacto en la fidelización y recomendación de los clientes. El mapa permite a los talleres automotrices analizar cada parte de la interacción con los clientes, optimizar la fidelización y recomendación.

Utilizando el *Customer Journey Map* para mejorar la interacción con los clientes en un taller automotriz en el Ecuador, muestra cómo el taller utilizó el *Customer Journey Map* para identificar los puntos críticos en la interacción con los clientes y diseñar estrategias de mejora. El taller identificó cinco puntos críticos en la interacción con los clientes: la atención al cliente, la calidad del servicio, el tiempo de espera del vehículo, el análisis del daño y la comunicación con el cliente. El taller diseñó estrategias de mejora para cada uno de estos puntos críticos, como mejorar la atención al cliente, mejorar la calidad del servicio, reducir el tiempo de espera del vehículo, mejorar el análisis del daño y mejorar la comunicación con el cliente.

No hay gráficos de análisis estándar, solo hay gráficos que fluctúan las emociones y toma de decisiones del cliente en el recorrido de las empresas al solicitar un servicio o producto. Se muestra un Mapa *Customer Journey Map* ideal para el análisis y toma de decisiones para el empresario y profesionales de Marketing para un taller automotriz; de esta manera entenderán lo que el cliente desea, lo que necesita, cómo y cuándo lo quieren.

El *Customer Journey Map* permite visualizar el recorrido que realiza el cliente desde la necesidad de un servicio hasta que lo recibe y evalúa su satisfacción. Este recorrido se divide en diferentes etapas, como la identificación del servicio o producto, la búsqueda de información o recomendación, la toma de decisión, la compra y postventa. Cada una de estas etapas tiene un impacto en la experiencia del cliente y, por lo tanto, en su fidelización.

Uno de los principales beneficios de aplicar el método *Customer Journey Map* en talleres automotrices es que permite conocer mejor al cliente y sus necesidades. En este sentido, se destaca la falta de conocimiento de los administradores y dueños de talleres automotrices sobre el comportamiento del cliente, así como la ausencia de programas o comunicación efectiva en los procesos de atención al cliente. Al conocer mejor al cliente, se pueden diseñar estrategias de fidelización más efectivas y personalizadas.

5. CONCLUSIONES

Se concluye que el *Customer Journey Map* es una herramienta útil para mejorar la comunicación con el cliente en los talleres de reparación de automóviles, se basa en la idea de que la comunicación con el cliente se divide en seis partes y cada parte tiene un impacto en la lealtad y las referencias de los clientes. El estudio de caso presentado ilustra cómo se puede

utilizar un mapa del recorrido del cliente para identificar puntos críticos en las interacciones con el cliente y planificar estrategias de mejora. Una encuesta digital realizada en varios talleres de reparación de automóviles permitió fortalecer la fidelización y recomendación a través de las emociones en todos los aspectos del servicio brindado al cliente. Los puntos críticos más comunes identificados fueron la atención al cliente, la calidad del servicio, el tiempo de espera del vehículo, el análisis del daño y la comunicación con el cliente. A partir de estos puntos críticos se diseñaron estrategias de mejora para cada uno de ellos.

El *Customer Journey Map* es desconocido para los talleres de reparación de automóviles y muy poco utilizado por los profesionales del marketing. Sin embargo, su uso puede resultar beneficioso para mejorar las interacciones con los clientes, ganar su fidelidad y referencias. Su uso puede ayudar a identificar puntos críticos de interacción con el cliente y diseñar estrategias de mejora para ellos. Aunque poco conocido, su uso puede resultar útil para mejorar la calidad del servicio y la satisfacción del cliente. En el servicio automotriz la competencia es cada vez más fuerte y los clientes buscan un buen servicio que les brinde una experiencia satisfactoria. Los talleres automotrices deben cambiar su enfoque y pensar en la experiencia del cliente en todo el recorrido que realiza en la empresa, no solo en la oferta de servicios o productos automotrices.

De acuerdo a los resultados de las encuestas los clientes en el sector de servicio automotriz enfrentan un constante cambio en las preferencias de los clientes. Estas preferencias evolucionan a lo largo del tiempo, lo que impulsa a las empresas y talleres automotrices a adaptar sus procesos y servicios para mantener un equilibrio adecuado en su negocio. Los clientes son influenciados por factores como actitudes, creencias, conocimientos, sentimientos y emociones al tomar decisiones relacionadas con la atención, la compra de servicios y la fidelidad hacia un taller automotriz.

La aparición de las redes sociales e internet ha transformado la forma en que se brinda y se recibe servicio automotriz. Ha aumentado la competitividad, mejorado los procesos, impulsado estrategias de marketing y ampliado la competencia en el mercado automotriz. Los clientes buscan no solo un buen servicio automotriz, sino también una experiencia completa que abarca desde la interacción en línea hasta su visita al taller. En conclusión, de acuerdo a los resultados el comportamiento del cliente en el sector de servicio automotriz es complejo y no lineal. Esto se debe a las diversas emociones, percepciones y necesidades del cliente a lo largo de su recorrido en el taller. Es esencial comprender estas complejidades para ofrecer un servicio de calidad y lograr la satisfacción del cliente, además de obtener su fidelización, recomendación y lealtad hacia el taller donde obtuvo el servicio o producto.

REFERENCIAS

- [1] M. M. Maldonado Martínez, I. Estrada Gutiérrez y K. N. Sarracino Jiménez, "Retención y atracción de clientes en empresas de servicios profesionales a través del diseño del Customer Journey Map como herramienta de Design Thinking en la mejora de la experiencia de consumo", *Revista de Desarrollo Sustentable, Negocios, Emprendimiento y Educación*, vol. 2, no. 7, may. 2020. [En línea]. Disponible en: <https://goo.su/1ziQ6Bb>
- [2] L. S. Chavez Martinez, F. A. N. Garcia Vedia y H. N. Flores Rojas, "Análisis del Customer Experience de los servicios de peluquería y estética a través de Customer Journey Map. Caso de estudio: BESSÓ SALÓN, Miraflores, durante el periodo 2019-2020", Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://goo.su/KNXJ0h>
- [3] V. Duarte Benitez, "Alineación del customer journey map con el modelo de negocio", Proyecto de grado, Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://goo.su/JVEc>

- [4] V. P. Vargas Carrasco, "Rediseño de la experiencia del donante de World Vision y desarrollo de indicadores para su gestión a partir del Customer Journey Map", Tesis de grado, Dpto. de Ingeniería Industrial, Universidad de Chile, Chile, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://goo.su/0x7Lx>
- [5] I. F. Tresierra Zavaleta, "Despliegue del Customer Journey en la oferta de servicios ginecológicos de un centro médico mediante una plataforma CRM omnicanal", Tesis de grado, Universidad Privada del Norte, Trujillo, Perú 2021. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/11537/28603>
- [6] A. P. Liñán y Ó. Santamaría, "Extended Customer Journey, traspasando las fronteras de la industria con innovación", Tecnohotel: revista profesional para la hostelería y restauración, n.o 494, pp. 54-55, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://goo.su/YnMR>
- [7] N. M. Cely Fonseca, N. M. Nieto Segura, J. J. Agudelo Perdomo, E. Giraldo Correa y K. Romero Sandoval, "Proceso Mejora PYME InterBusinessCo. enfocado en artículos deportivos", Tesis de grado, Universidad del Rosario, Bogotá, Colombia, 2022. [En línea]. Disponible en: https://doi.org/10.48713/10336_38030
- [8] E. L. Sancho, "Herramientas del márketing estratégico", Harvard Deusto Márketing y Ventas, n.o 156, pp. 22-33, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://goo.su/PbUyd>
- [9] P. A. Mantilla-Araujo y C. R. Sigüenza-Suquilanda, "Plan De Marketing Digital Para Posicionar Nueva Imagen De Plus Tv En Medios Digitales", Tesis de maestría, Universidad Internacional de la Rioja, España, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://goo.su/daWr>
- [10] W. E. Pozo Carrera y J. Brito, "Caso de estudio de plataforma de customer experience managment en empresa de telecomunicaciones", Tesis de maestría, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://goo.su/iOGK>
- [11] S. Vallejo Montoya y M. S. Saldarriaga Pérez, "Fundamentos de marketing experiencial en el sector automotriz de alta gama en el Valle de Aburrá y San Nicolás" Tesis de grado, Institución Universitaria de Envigado, Colombia, 2023, [En línea]. Disponible en: <https://goo.su/N1Ws>
- [12] L. S. Sare-Ramos y R. F. Hallo-Alvear, "Marketing relacional, un estudio sobre customer engagement, customer experience y customer success", Uda akadem, no. 8, pp. 10-41, oct. 2021. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.33324/udaakadem.vi8.436>
- [13] M. del C. F. Bañuelos y A. G. Galindo, "¿Cualitativo o cuantitativo?: El estudio del Customer Journey desde un enfoque metodológico", *Lúmina*, vol. 24, no. 2, pp. E0043, sep. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://goo.su/dxayhIV>
- [14] M. Salazar y M. Fernanda, "Propuesta de mejoramiento de la experiencia del consumidor utilizando Mapa de la Experiencia (Caso FedEx EC)", 2023. [En línea]. Disponible en: <https://goo.su/mFmo9ri>
- [15] M. J. Pesántez Carrión, "Manual para la administración omnicanal del Journey Map del consumidor", Tesis de grado, Cuenca, Ecuador, 2022. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/11685>



Simulation of an allyl chloride production process via the propylene chlorination route in ChemCAD[®] simulator

(Simulación de un proceso de producción de cloruro de alilo mediante la ruta de cloración del propileno en el simulador ChemCAD[®])

Amaury Pérez Sánchez¹, Arlette de la Caridad González Abad¹, Amanda Acosta Solares², Arlenis Cristina Alfaro Martínez³

² Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, Cuba

³ Centro de Ingeniería Genética y Biotecnología de Camagüey, Camagüey, Cuba
amaury.perez84@gmail.com, arlette.delacaridad@reduc.edu.cu, aacosta@uclv.cu,
arlenis.alfaro@cigb.edu.cu

Abstract: Allyl chloride is typically used to make intermediates for downstream derivatives such as resins and polymers, and in the production of epichlorohydrin. The present work describes the simulation and conceptual design of an allyl chloride production process via the propylene chlorination route in ChemCAD[®] simulator, to know the mass and energy balances of the intermediate and final streams, the operating and design parameters of some equipment, and other results of interest. The production process consists of a fired heater, a fluidized bed reactor, a waste heat boiler, six shell and tube heat exchangers, two compressors, a gas-liquid absorber and four distillation columns. About 1.336,307 kg/h of allyl chloride are produced at the distillate of the last distillation column with a purity of 99,92 %, while pure propylene, 2-chloropropene and an aqueous solution of HCl 32,4 wt. % are also obtained as byproducts. A first-of-its-kind simulation model was obtained in ChemCAD[®], which could be employed for further optimization studies and productivity increment analysis.

Keywords: Allyl chloride, propylene chlorination, ChemCAD[®], simulation, conceptual design.

Resumen: El cloruro de alilo es típicamente usado para producir intermediarios para derivados tales como resinas y polímeros, y en la producción de epiclorohidrina. El presente trabajo describe la simulación y diseño conceptual de un proceso de producción de cloruro de alilo mediante la ruta de cloración del propileno en el simulador ChemCAD[®], para conocer los balances de masa y energía de las corrientes intermedias y finales, los parámetros de operación y diseño de algunos equipos, y otros resultados de interés. El proceso de producción consiste en un calentador quemador, un reactor de lecho fluidizado, una caldera de calor residual, seis intercambiadores de calor de tubo y coraza, dos compresores, un absorbedor gas-líquido y cuatro columnas de destilación. Alrededor de 1 336,307 kg/h de cloruro de alilo son producidos en el destilado de la última columna de destilación con una pureza de 99,92 %, mientras que también se obtienen como subproductos propileno puro, 2-cloropropeno y una solución acuosa de HCl al 32,4 % m/m. Se obtuvo un modelo de simulación primero de su tipo en ChemCAD[®], el cual puede ser empleado para posteriores estudios de optimización y análisis de incremento de la productividad.

Palabras clave: Cloruro de alilo, cloración del propileno, ChemCAD[®], simulación, diseño conceptual.

1. INTRODUCTION

Allyl chloride ($3\text{-C}_3\text{H}_5\text{Cl}$) is an important organic intermediate and is mainly used for producing epichlorohydrin, glycerin, and allyl alcohol, where in industry more than 80 % of epichlorohydrin is made from allyl chloride [1]. Additionally, allyl chloride is a common alkylating agent relevant in the manufacture of pharmaceuticals and pesticides. The uses and applications of allyl chloride may vary according to the product grade. The main form of allyl chloride is commercial grade, with 99 wt. % minimum purity [2].

Currently, the production routes of allyl chloride generally include:

- 1) High-temperature propylene chlorination (HTPC) and
- 2) oxychlorination of propylene (OP).

The investment cost of HTPC is comparatively less because no catalyst is needed, while the OP process needs the precious metal catalyst, which can easily lose activity. Consequently, HTPC is generally used in industry [1].

According to [2], while the main commercial production pathway for allyl chloride is the direct high-temperature chlorination of propylene, while examples of other pathways include:

- 1) Thermal dehydrochlorination (cracking) of dichloropropane and
- 2) Oxychlorination using hydrogen chloride and propylene.

However, such processes are either less used or of no commercial interest due to low allyl chloride selectivity and the generation of byproducts with no significant marketable use.

Some authors have studied the allyl chloride production process via propylene chlorination. In this case, in [3] a combined environmental and economic evaluation of an allyl chloride production process via propylene chlorination was performed for a base design and two alternative designs. The environmental analysis was completed using the waste reduction (WAR) algorithm, while the economic analysis was accomplished using the commercial software ICARUS Process Evaluator. All three process options were designed to maintain the process specifications:

- 1) The allyl chloride product stream must have a minimum purity of 99,9 mol%,
- 2) The HCl product stream must be 31,5 wt.%,
- 3) The 2-chloropropene byproduct stream must have a minimum purity of 95 mol%, and
- 4) The 2,3-dichloropropene byproduct stream must have a minimum purity of 95 mol%.

Also, [4] used the Integrated Dynamic Decision Analysis (IDDA) approach for reviewing the design of a plant for the production of allyl chloride by chlorination of propylene under exothermic conditions, with the objective of building an objective and documented reference for the decision making about the design alternatives to be adopted for risk minimization.

Likewise, in [2] an allyl chloride production process from propylene and chlorine was described, comprising three major sections: (1) chlorination; (2) propylene recovery; and (3) product treatment.

Similarly, in [5] an allyl chloride production process via high temperature chlorination of propylene was studied and rigorous simulated in Aspen Plus and using dividing wall columns in the separation section.

Finally, in [6] an allyl chloride manufacturing process via propylene chlorination was simulated using Aspen Plus simulator, to demonstrate a methodology developed to optimize processes for sustainability by applying information from the sustainability evaluator and the Oklahoma State University, as well as to convert the multiobjective optimization problem of

sustainability into a single objective problem by using the constraints and the weighted methods.

Nevertheless, to the best of the authors' knowledge, an allyl chloride production process via propylene chlorination has not yet been simulated in ChemCAD® simulator.

Certain chemical company is interested in erecting an allyl chloride production plant via the propylene chlorination route due to the availability of economic resources, raw materials and a guaranteed market for this chemical. Consequently, it is necessary and required to carry out the conceptual design of such a plant to obtain information about its productivity, throughput and equipment operating parameters, as a first step in the development of this chemical process.

In this context, in the present study an allyl chloride production process via the propylene chlorination route was simulated for the first time in ChemCAD® simulator v7.1.2, to know the mass and energy balances of the intermediate and final streams, the operating and design parameters of the main equipment, as well as the required flowrate of utilities and the heat curves in all the shell and tube heat exchangers.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Physical-chemical properties of allyl chloride

As reported by [7] [8], allyl chloride presents the main physical-chemical properties shown in Table 1.

Table 1. Main physical-chemical properties of allyl chloride.

Property	Value	Units
Other name	3-chloropene	
Molecular weight	76,53	g/mol
Freezing point	-134,5	°C
Boiling point at 101.3 kPa	45,1	°C
Fire point	4	°C
Flash point	4	°C
Specific gravity at 20/4 °C	0,938	-
Liquid density at 25 °C	931	kg/m ³
Critical temperature	240,7	°C
Critical pressure	4.710	kPa
Heat of combustion	24,8	kJ/g
Heat of vaporization at 20 °C	357	J/g
Specific heat, liquid, at 20 °C	1,32	J/g.°C
Solubility at 20 °C, in water	0,33	%
Viscosity at 25 °C	0,3136	cP
Refractive index at 15 °C	1,4153	-

2.2. Description of the allyl chloride production process

Firstly, 3.190 kg/h of gaseous propylene at a temperature and pressure of 25 °C and 11,7 bar are sent to a pressure reduction valve to reduce its pressure to 3,58 bar, thus decreasing its temperature to 10,1 °C. This cold propylene stream is then sent to a fired heater (Fired Heater) to increase its temperature to 548 °C, and the subsequent heated stream is mixed in a mixing nozzle with 1,400 kg/h of a gaseous chlorine stream at a temperature and pressure of 25 °C and 6,44 bar, respectively. The resulting mixed gaseous stream, which has a temperature of 510-515 °C and a

pressure of 3-3,5 bar, is fed to a fluidized bed reactor (Reactor) operating in the temperature and pressure range of 511-525 °C and 3,04-4,50 bar, respectively. According to [9], during the thermal chlorination process, some amounts of carbon can be produced, which has the propensity to deposit on equipment that operates at temperatures greater than 400 °C. For this reason, the reactor chosen for this production process is a fluidized bed with sand (inert solid) on the reaction side. In this case, the sand provide a large surface area on which the carbon can deposit, acts as a scouring agent on the immersed heat transfer tubes in the reactor and prevents the buildup of carbon on the heat transfer surfaces. The carbon deposited preferentially on the sand is removed by combustion in a solid regeneration unit attached to the reactor, while the regenerated sand is sent back to the reactor, thus maintaining a constant inventory of solids inside the reactor.

The chlorination reactions are exothermic (Table 2), thus the heat produced by these reactions is removed using the commercially available heat transfer medium (or coolant) Dowtherm A[®]. The hot gaseous crude allyl chloride stream coming from the fluidized bed reactor at a temperature and pressure of 510-515 °C and 2,5-3,0 bar, which contains unreacted propylene along with the reaction products, is sent to a waste-heat boiler (Waste-Heat Boiler) which utilizes the heat content of this stream to generate low pressure saturated steam (162 °C and 6 bar). The outlet cooled gaseous stream of the waste-heat boiler, at a temperature of 200 °C, is then sent to a shell and tube heat exchanger (Cooler 1) to reduce its temperature to 50 °C against cooling water at 30 °C, and then to another shell and tube heat exchanger (Cooler 2) to be cooled to -50 °C against propylene at -62 °C. The cooled liquid mixture leaving Cooler 2 is fed to a phase separator (Phase Separator) operating at -50 °C and 1,5 bar, where a vapor stream is obtained at the top and a liquid phase is generated at the bottom of this equipment.

The bottom stream of the Phase Separator is sent to a first distillation column (Propylene Column) operating at 1,5 bar, where almost all the propylene and hydrogen chloride are obtained at the top stream of this distillation column, while the bottom stream contains almost all the allyl chloride and both chloropropenes. The top stream of this first distillation column is mixed with the top stream generated in the phases separator, and the resulting two phase mixture rich in propylene and hydrogen chloride with traces of allyl chloride (temperature of -56 °C) is heated to 10 °C in a shell and tube heat exchanger (Heater 1) using low pressure saturated steam (162 °C, 6,5 bar). The resultant heated gaseous mixture is sent to a gas-liquid absorber (Absorber) where almost all the hydrogen chloride contained on it is absorbed by 1,480 kg/h of deionized water, thus obtaining at the bottom of this absorber a stream of aqueous hydrogen chloride (32,4 wt.%), with traces of propylene. This bottom stream is at a temperature of 120-123 °C, thus a shell and tube heat exchanger (Cooler 3) is employed to cool it to 35 °C using cooling water at 30 °C as coolant.

The bottom stream of the first distillation column is pumped to a second distillation column (Concentration Column) to remove almost all the propylene that remains in the feed stream, which is obtained at the top stream, while the bottom stream of this distillation column contains the concentrated allyl chloride and both chloropropenes. The top stream of the Concentration Column is mixed with the top stream of the gas-liquid absorber, to obtain a stream rich in propylene, which is sent to a granular filter (Adsorption Filter) which contains activated carbon and where all the components, except propylene, are removed by absorption, thus obtaining a gaseous stream of pure propylene at the top exit of this filter. This gaseous top stream of pure propylene obtained in the filter is first compressed to 10 bar in a adiabatic reciprocating compressor (Compressor 1), then it is cooled to 40 °C in a shell and tube heat exchanger (Cooler 4) against cooling water at 30 °C.

Next, this cooled stream is compressed again to 20 bar in a adiabatic centrifugal compressor (Compressor 2), and the resulting compressed gaseous stream is condensed by means of a shell and tube heat exchanger (Condenser) using cooling water at 2 °C, thus obtaining a liquid stream of pure propylene at 45 °C and 20 bar, which could be recycled back to the allyl chloride

production process. The bottom stream of the second distillation column is pumped to a third distillation column (2-Chloropropene Column), in order to remove the 2-chloropropene at the top stream, while the bottom stream of this third distillation column is pumped to a fourth distillation column (Allyl Chloride Column) to remove the 2,3-chloropropene at the bottom of this column, thus obtaining 1.337,3 kg/h of a concentrated stream of allyl chloride at the top with a purity of 99,92 %, being 2-chloropropene the main impurity found on it.

Figure 1 presents the process flow diagram of the allyl chloride production process previously described.

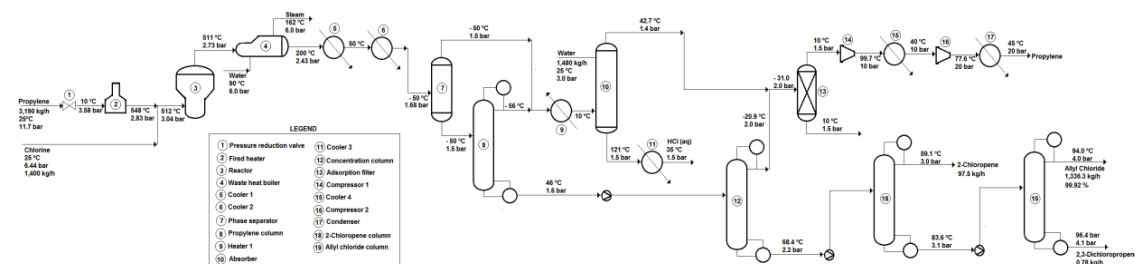


Figure 1. Process flow diagram of the allyl chloride production process.

2.3. Reactions and stoichiometry

The following table shows the main reactions that occur in the fluidized bed reactor, along with their stoichiometry, percentage conversion and standard heat of reactions [9].

Table 2. Stoichiometry, percentage conversion and standard heat of reaction of the main reactions involved in the fluidized bed reactor.

No.	Stoichiometry	Conversion	Heat of reaction
1	Allyl chloride formation $C_3H_6 + Cl_2 \rightarrow C_3H_5Cl + HCl$	80%	$\Delta H_{298} = -112 \text{ kJ/mol}$
2	2-chloropropene formation $C_3H_6 + Cl_2 \rightarrow C_3H_5Cl + HCl$	16%	$\Delta H_{298} = -121 \text{ kJ/mol}$
3	Dichloropropene formation $C_3H_6 + 2Cl_2 \rightarrow C_3H_4Cl_2 + 2HCl$	3%	$\Delta H_{298} = -222 \text{ kJ/mol}$
4	Carbon formation $C_3H_6 + 3Cl_2 \rightarrow 3C + 6HCl$	1%	$\Delta H_{298} = -306 \text{ kJ/mol}$

2.4. Selection of the thermodynamic model

The selected thermodynamic model of this study was Soave-Redlich-Kwong (SRK) with no vapor phase association; immiscible water/hydrocarbon solubility; a global enthalpy model of SRK; an ideal gas heat capacity of Design Institute for Physical Properties (DIPPR) and steam table of International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS-IF97).

2.5. Design parameters of the main equipment

The design parameters of the main equipment involved in the allyl chloride production process simulated in ChemCAD® are shown in Table 3. Those design parameters were selected following rules of thumbs and suggestions reported in [10], [11], [12], [13] and [14], as well as taking into account some suggestions of the simulator itself.

Table 3. Design parameters of the main equipment involved in the allyl chloride production process simulated in ChemCAD®.

Equipment	Design parameters
Fired heater	Type: Cylindrical type. Design type: Process heater. Tube material: Carbon steel. Efficiency: 0,75
Reactor	Type: Plug Flow. Length of tubes: 2,5 m. Diameter of tubes: 0,060 m. Number of tubes: 150. Number of steps: 1. Material: Stainless steel 304
Waste heat boiler	Area: 57,0 m ² . Type: Shell and tube/Fixed head. Material: Stainless steel 304.
Cooler 1	Area: 52,0 m ² . Type: Shell and tube/U tube. Material: Stainless steel 304.
Cooler 2	Area: 50,0 m ² . Type: Shell and tube/Fixed head. Material: Stainless steel 304.
Phase Separator	Type: Cylindrical tank. Material: Stainless steel 316. Diameter: 1,8 m. Height: 3,5 m.
Propylene Column	Type: Cylindrical. Material: Carbon steel. Diameter: 2,5 m. Tray type: Sieve.
Heater 1	Area: 85,0 m ² . Type: Shell and tube/Fixed head. Material: Stainless steel 347.
Absorber	Type: Cylindrical. Number of stages: 18. Material: Carbon steel. Diameter: 2,0 m. Height: 3,0 m.
Cooler 3	Area: 70,0 m ² . Type: Shell and tube/U tube. Material: Stainless steel 304.
Concentration Column	Type: Cylindrical. Material: Carbon steel. Diameter: 1,8 m.

	Tray type: Sieve.
Adsorption Filter	Material: Carbon steel. Diameter: 1,5 m. Height: 2,2 m.
Compressor 1	Type: Reciprocating/Adiabatic. Driver type: Belt drive coupling. Motor RPM: 3.600. Motor type: Explosion proof.
Cooler 4	Area: 50,0 m ² . Type: Shell and tube/Fixed head. Material: Carbon steel.
Compressor 2	Type: Centrifugal/Adiabatic. Driver type: Belt drive coupling. Motor RPM: 3.600. Motor type: Explosion proof.
Condenser	Area: 50,0 m ² . Type: Shell and tube/U tube. Material: Stainless steel 316.
2-Chloropropene Column	Type: Cylindrical. Material: Carbon steel. Diameter: 1,6 m.
Allyl Chloride Column	Tray type: Sieve. Type: Cylindrical. Material: Carbon steel. Diameter: 1,6 m. Tray type: Sieve.

2.6. Mass flowrate of utilities and heat curves of the heat exchangers

In this work, the mass flowrate of the utilities selected to cool/heat process streams in the shell and tube heat exchangers, as well as the heat curves of those shell and tube heat exchangers, were obtained. The selected utilities were cooling water at 30 °C and 3,0 bar, propylene at -62 °C and 0,5 bar, saturated steam at 162 °C and 6,5 bar, and chilled water at 2 °C and 3,0 bar. The mass flowrate of the utilities were calculated by employing the “Utility option” on the “Specifications” tab for each shell and tube heat exchanger, while the heat curves were obtained selecting the “Heat Curves” option.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The following figures display the flowsheet of the allyl chloride production process simulated in ChemCAD[®] simulator, corresponding to the reaction (Figure 2a) and the separation/purification (Figure 2b) sections.

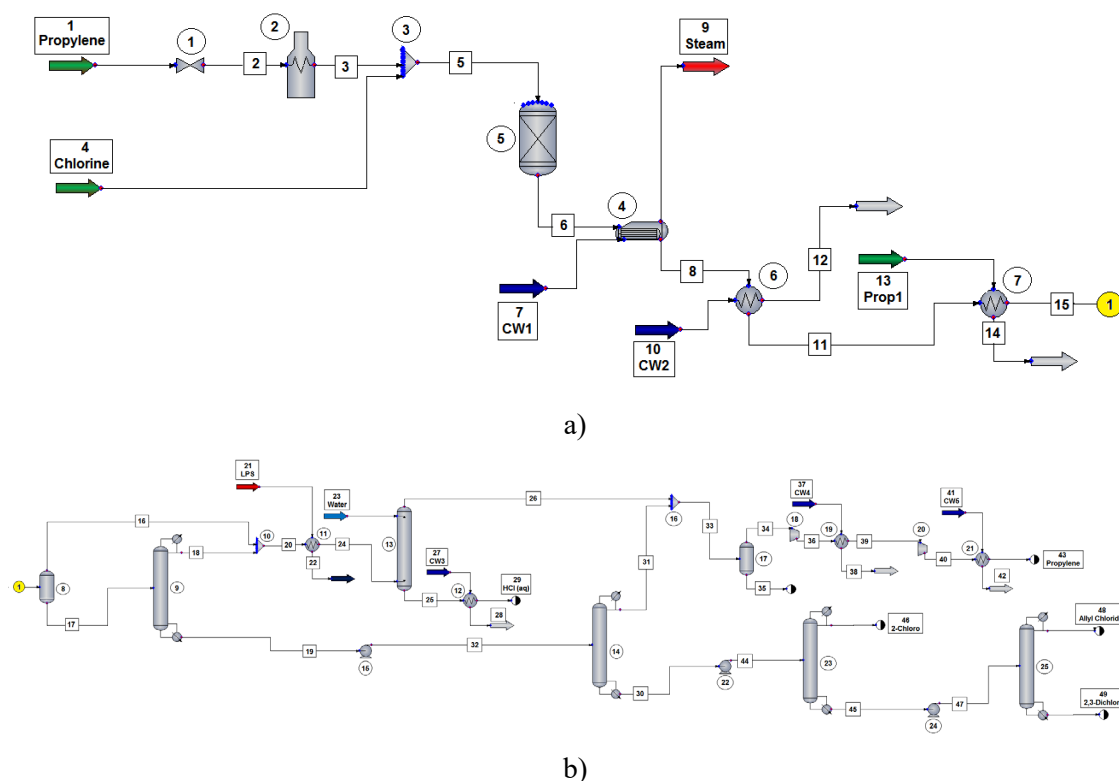


Figure 2. Flowsheet of the allyl chloride production process simulated in ChemCAD®, corresponding to the sections of a: Reaction, b: Separation/purification.

3.1. Mass and energy balances of selected intermediate and final streams

Table 4 shows the mass and energy balances of selected intermediate and final streams, which were obtained through the simulation of the allyl chloride production process in ChemCAD® simulator. The results involve the temperature, pressure, flowrate, enthalpy and vapor mole fraction of those selected streams. Refer to Figure 2 to know to which stream number the mass and energy balances are referred to.

Table 4. Temperature, pressure, flowrate, enthalpy and vapor mole fraction of selected intermediate and final streams.

Parameter	Stream number (refer to Figure 2)				
	5	6	15	16	17
Temperature (°C)	511,72	511	-50	-50	-50
Pressure (bar)	3,04	2,73	1,68	1,5	1,5
Vapor fraction	1	1	0	0,99	0
Enthalpy (MJ/h)	5.470,2	3.270,97	-3.105,02	-352,51	-2.640,88
Mass flowrate (kg/h)					
Allyl chloride	0	1.392,014	1.392,014	0,891	1.391,123
2-Chloropropene	0	117,836	117,836	0	117,836
2,3-Dichloropropene	0	0,789	0,789	0	0,789
Propylene	3.190	2.359,438	2.359,438	110,894	2.248,544
Chlorine	1.400	0,005	0,005	0	0,005
Hydrogen chloride	0	719,901	719,901	151,179	568,721

Carbon	0	$5,32 \times 10^{-5}$	$5,32 \times 10^{-5}$	0	$5,32 \times 10^{-5}$
Water	0	0	0	0	0
TOTAL	4.590	4.589,983	4.589,983	262,964	4.327,018

Table 4. Continued...

Parameter	Stream number (refer to Figure 2)				
	24	29	26	19	31
Temperature (°C)	10	35	42,52	45,87	-20,94
Pressure (bar)	1,5	1,5	1,4	1,6	2
Vapor fraction	1	0	0	0	0
Enthalpy (MJ/h)	-802,25	-24.489	-357,651	-521,061	-13,182
Mass flowrate (kg/h)					
Allyl chloride	14,802	0,198	14,604	1.377,212	13,772
2-Chloropropene	10,042	0,415	9,627	107,795	9,328
2,3-Dichloropropene	$3,562 \times 10^{-5}$	$7,322 \times 10^{-7}$	$3,489 \times 10^{-5}$	0,789	$4,412 \times 10^{-5}$
Propylene	2.336,952	63,062	2.273,891	22,485	22,261
Chlorine	0,005	0,005	$9,528 \times 10^{-6}$	0,0001	0,0001
Hydrogen chloride	719,731	718,368	1,363	0,169	0,169
Carbon	$7,389 \times 10^{-16}$	0	0	$5,321 \times 10^{-5}$	$7,389 \times 10^{-16}$
Water	0	1.436,153	43,847	0	0
TOTAL	3.081,532	2.218,201	2.343,332	1.508,450	45,530

Table 4. Continued...

Parameter	Stream number (refer to Figure 2)				
	44	33	34	35	39
Temperature (°C)	68,41	-31,01	10	10	40
Pressure (bar)	3	2	1,5	1,5	10
Vapor fraction	0	0,45	1	0,18	1
Enthalpy (MJ/h)	-462,04	-370,83	1.004,49	-712,05	1.064,12
Mass flowrate (kg/h)					
Allyl chloride	1.363,44	28,376	0	28,375	0
2-Chloropropene	98,467	18,955	0	18,955	0
2,3-Dichloropropene	0,789	$7,901 \times 10^{-5}$	0	$7,901 \times 10^{-5}$	0
Propylene	0,225	2.296,151	2.273,19	22,961	2.273,19
Chlorine	$5,587 \times 10^{-6}$	0,0001	0	0,0001	0
Hydrogen chloride	$6,489 \times 10^{-5}$	1,532	0	1,532	0
Carbon	$5,321 \times 10^{-5}$	$7,39 \times 10^{-16}$	0	$7,39 \times 10^{-16}$	0
Water	0	48,847	0	43,847	0
TOTAL	1.462,921	2.388,861	2.273,19	115,670	2.273,19

Table 4. Final...

Parameter	Stream number (refer to Figure 2)				
	46	47	48	49	43
Temperature (°C)	59,10	83,65	94,04	96,39	45
Pressure (bar)	3	3,5	4	4.1	20
Vapor fraction	0	0	0	0	0

Enthalpy (MJ/h)	-57,36	-372,82	-345,29	-3,94	355,820
	Mass flowrate (kg/h)				
Allyl chloride	13,634	1.349,805	1.336,307	13,498	0
2-Chloropropene	97,482	0,984	0,984	0,0001	0
2,3-Dichloropropene	$1,096 \times 10^{-11}$	0,789	0,0079	0,781	0
Propylene	0,225	0	0	0	2.273,19
Chlorine	$5,587 \times 10^{-6}$	0	0	0	0
Hydrogen chloride	$6,489 \times 10^{-5}$	0	0	0	0
Carbon	$7,389 \times 10^{-16}$	$5,321 \times 10^{-5}$	$7,39 \times 10^{-16}$	$5,32 \times 10^{-5}$	0
Water	0	0	0	0	0
TOTAL	111,341	1.351,578	1.337,298	14,279	2.273,19

The outlet stream of the fluidized bed reactor (stream 6 in Figure 2a) contains allyl chloride in 30,32 %, unreacted propylene in 51,40 % and 15,68 % of hydrogen chloride. About 830,562 kg/h of propylene reacts with almost all the 1,400 kg/h of chlorine, in order to produce 1.392,014 kg/h of allyl chloride. It's worth noting that an insignificant amount of carbon is produced in the reactor ($5,32 \times 10^{-5}$ kg/h) which agrees with the values suggested by [9].

In the phase separator, a vapor stream is obtained at the top of this equipment (stream 16) with a total mass flowrate of 262,964 kg/h and with the following composition: 42,17 % of propylene and 57,49 % of hydrogen chloride with traces amounts of allyl chloride, while at the bottom a liquid stream (stream 17) is obtained with a total mass flowrate of 4.327,018 kg/h, where the main chemicals found on it are propylene (51,96 %), allyl chloride (32,15 %) and hydrogen chloride (13,14 %).

In the propylene column, about 99,00 % of the allyl chloride fed to this distillation column is obtained at the bottom (stream 18, 1.377,212 kg/h), while 91,48 % of the 2-chloropropene fed to this column is also obtained at the bottom (107,795 kg/h). Concerning the propylene component, about 99,00 % of this chemical is recovered at the distillate stream (stream 18) in this distillation column (data not shown), with a mass flowrate of 2.226,059 kg/h, while 568,552 kg/h of hydrogen chloride are also obtained in this distillate stream. The composition of the distillate stream in the propylene column is 78,97 % propylene and 20,17 % hydrogen chloride, with minor traces of allyl chloride and 2-chloropropene (data not shown).

In the absorber, a liquid stream having a total mass flowrate of 2.218,201 kg/h is obtained at the bottom (stream 25) with the following mass concentration: hydrogen chloride (32,4 %), water (64,74 %) and propylene (0,028 %), that is, an aqueous solution of hydrochloric acid is obtained at the bottom stream of this equipment, which could be commercialized as a byproduct. The top stream of the absorber (stream 26) contains propylene with a mass concentration of 97,04 % and a mass flowrate of 2.273,891 kg/h, with traces of allyl chloride, 2-chloropropene and hydrogen chloride.

In the concentration column, around 99 % of the propylene fed to this distillation column is obtained at the distillate (stream 31), with a mass flowrate of 22,261 kg/h. The percentage mass composition of this distillate stream is the following: allyl chloride (30,25 %), 2-chloropropene (20,49 %) and propylene (48,89 %). The bottom stream of the concentration column (streams 30 and 44) has a total mass flowrate of 1.462,920 kg/h and contains the following chemicals: allyl chloride (93,19 %) and 2-chloropropene (6,73 %).

The adsorption filter separates propylene from the rest of the chemicals at a rate of 99,00 %, which is obtained at the top stream of this equipment (stream 34) in gaseous state with a mass flowrate of 2.273,19 kg/h. The bottom liquid stream of this filter (stream 35), which has a total mass flowrate of 115,670 kg/h, contains allyl chloride (24,53 %), 2-chloropropene (16,38 %),

propylene (19,85 %) and water (37,91 %). It's recommended to send this bottom liquid stream to a wastewater treatment system before dispose it in the environment.

Regarding the 2-chloropropene column, about 98,99 % of the 2-chloropropene fed to this distillation column is separated and obtained in the top stream (stream 46), with a mass flowrate of 97,482 kg/h. The top stream of the 2-chloropropene column is composed by 2-chloropropene (87,55 %) and allyl chloride (12,24 %), with traces of the rest of the chemicals, except water. This stream of chloroprene could be further purified to commercialize it as a byproduct with a higher purity. The bottom stream of the 2-chloropropene column (streams 45 and 47) contains allyl chloride with a purity of 99,86 % and a mass flowrate of 1.349,805 kg/h, with minor traces of 2-chloropropene and 2,3-dichloropropene.

Finally, in the allyl chloride column, about 1.336,307 kg/h of allyl chloride are obtained at the top stream (stream 48) with a purity of 99,92%, while the bottom stream of this column (stream 49, 14,279 kg/h) contains allyl chloride (94,53 %) and 2,3-dichloropropene (5,46 %) as the main products. About 99,00% of the allyl chloride fed to this distillation column is separated and obtained at the top stream.

3.2. Operating parameters of the main equipment

Below are shown various operating and design parameters calculated by ChemCAD® simulator for the main equipment involved in the simulation flowsheet.

Fired heater:

- Heat absorbed: 4.088,08 MJ/h.
- Reactor:
- Heat duty: - 2.199,23 MJ/h.

Waste heat boiler:

- Heat duty: 2.864,24 MJ/h.
- Log Mean Temperature Difference (LMTD): 206,97 °C.
- LMTD Correction factor: 0,898.
- Calculated overall heat transfer coefficient (U): 75,09 W/m².K.

Cooler 1:

- Heat duty: 1.040,36 MJ/h.
- LMTD: 67,32 °C.
- LMTD Correction factor: 0,926.
- Calculated U: 89,09 W/m².K.

Cooler 2:

- Heat duty: 2.471,39 MJ/h.
- LMTD: 35,84 °C.
- LMTD Correction factor: 0,50.
- Calculated U: 766,09 W/m².K.

Propylene Column

- Condenser duty: - 2.928,26 MJ/h.
- Reboiler duty: 3.103,19 MJ/h.
- Minimum stages: 4.
- Reflux ratio, minimum: 0,024.

Heater 1:

- Heat duty: 1.495,14 MJ/h.
- LMTD: 182,99 °C.
- LMTD Correction factor: 1,0.
- Calculated U: 26,70 W/m².K.

Cooler 3:

- Heat duty: 547,24 MJ/h.
- LMTD: 17,31 °C.
- LMTD Correction factor: 0,5.
- Calculated U: 250,88 W/m².K.

Concentration Column:

- Condenser duty: - 45,23 MJ/h.
- Reboiler duty: 90,79 MJ/h.
- Minimum stages: 5.
- Reflux ratio, minimum: 0,694.

Compressor 1 (Reciprocating):

- Theoretical power: 261,054 MJ/h.
- Calculated head: 12.163,5 m.
- Cp/Cv: 1,170.

Cooler 4:

- Heat duty: 247,496 MJ/h.
- LMTD: 14,29 °C.
- LMTD Correction factor: 0,5.
- Calculated U: 192,33 W/m².K.

Compressor 1 (Centrifugal):

- Theoretical power: 85,95 MJ/h.
- Calculated head: 4.081,07 m.
- Cp/Cv: 1,251.

Condenser:

- Heat duty: 809,42 MJ/h.
- LMTD: 34,76 °C.
- LMTD Correction factor: 0,718.
- Calculated U: 180,01 W/m².K.

2-Chloropropene Column:

- Condenser duty: - 76,92 MJ/h.
- Reboiler duty: 108,71 MJ/h.
- Minimum stages: 17.
- Reflux ratio, minimum: 14,888.

Allyl Chloride Column:

- Condenser duty: - 944,20 MJ/h.
- Reboiler duty: 967,78 MJ/h.
- Minimum stages: 9
- Reflux ratio, minimum: 0,408.

According to the results shown above, the calculated value of the heat absorbed for the fired heater ($\sim 4,1$ GJ/h) is within the range reported by [13] of 0,5 to 21 GJ/h and the range reported by [9] of 4,0 – 5,4 GJ/h for this type of fired heater. Likewise, the calculated value of the heat duty for the fluidized bed reactor ($- 2.199,23$ MJ/h) is close to the value reported by [9] of $- 2.188$ MJ/h.

In this study, we selected a shell and tube heat exchanger to simulate the waste heat boiler, thus the results of the operating parameters obtained for this type of equipment are similar to those described for typical heat exchangers, not specifically boilers. The value of the calculated heat duty for the waste heat boiler ($2.864,24$ MJ/h) is very similar to that reported by [9] of 2.850 MJ/h, while the calculated value for the overall heat transfer coefficient ($75,09$ W/m².K) is within the range reported by [14] of 30-100 W/m².K.

The Cooler 1 had a value for the heat duty of $1.040,36$ MJ/h, which is comparable to the value of the heat duty stated by [9] of 1.025 MJ/h, while the value of the calculated overall heat transfer coefficient for this heat exchanger ($89,09$ W/m².K) is within the range reported by [14] of 20-300 W/m².K.

Regarding the Cooler 2, the value of the heat duty was of $2.471,39$ MJ/h (comparable to the range reported by [9] for the heat duty), while the calculated overall heat transfer coefficient had a value of $766,09$ W/m².K, which is within the range reported by [14] of 700-1,000 W/m².K for condensers.

The Heater 1 had a heat duty of $1.495,14$ MJ/h (analogous to the range reported by [9] for the heat duty) and a calculated overall heat transfer coefficient of $26,70$ W/m².K, which is below the range reported by [14] of 30-300 W/m².K.

Concerning the Cooler 3, the heat duty was of $547,24$ MJ/h, while the calculated overall heat transfer coefficient was of $250,88$ W/m².K, which is within the range of 250-750 W/m².K reported by [14].

The Cooler 4 had a heat duty of $247,496$ MJ/h and a calculated overall heat transfer coefficient of $192,33$ W/m².K, which is between the range reported by [14] of 20-300 W/m².K.

Finally, the Condenser had a heat duty of $809,42$ MJ/h (similar to the range stated by [9] for the heat duty of a condenser) and a calculated value for the overall heat transfer coefficient of $180,01$ W/m².K, which is below the range reported by [14] of 700-1.000 W/m².K.

In this case, the waste heat boiler had the highest value of the heat duty, which is due to the fact that is in this heat exchanger where water is vaporized to produce saturated steam using the hot gaseous mixture exiting the reactor as the heating agent, while the Cooler 4 had the lowest value of the heat duty because this heat exchanger cools down the gaseous pressurized propylene stream coming from the reciprocating compressor from $99,7$ °C to 40 °C using cooling water at 30 °C. With respect to the calculated value of the overall heat transfer coefficient, the Cooler 2 and Heater 1 had the highest and lowest values of this parameter, respectively.

Regarding to the compressors, the reciprocating compressor had a value of the theoretical power of $261,054$ MJ/h ($\sim 72,52$ kW), which is between the range reported by [15] of 7,5 kW - 9 MW for reciprocating compressors, while the centrifugal compressor had a value of $85,95$ MJ/h ($\sim 23,87$ kW) for the theoretical power, which is below the range reported by [15] of 75-97 MW for centrifugal compressors. Lastly, the values of the calculated head were $12.163,5$ m and $4.081,07$ m for the reciprocating and centrifugal compressor, respectively.

The Propylene Column had a condenser duty of $- 2.928,26$ MJ/h, a reboiler duty of $3.103,19$ MJ/h and will require 4 stages minimum with a minimum reflux ratio of 0,024. The condenser duty and the reboiler duty for the Concentration Column were $- 45,23$ MJ/h and $90,79$ MJ/h,

respectively, while it will require 5 stages minimum and a minimum reflux ratio of 0,694. In case of the 2-Chloropropene Column, the condenser duty and the reboiler duty were - 76,92 MJ/h and 108,71 MJ/h respectively, while the value for the minimum stages was 17 with a minimum reflux ratio of 14,888. Finally, the Allyl Chloride Column had a condenser duty of - 944,20 MJ/h, a reboiler duty of 967,78 MJ/h, 9 minimum stages and a minimum reflux ratio of 0,408.

3.3. Required flowrate of utilities

ChemCAD® simulator presents an option to calculate the flowrate of utilities (i.e. cooling water, steam, etc.) to achieve a predetermined heat exchange duty in heat exchangers. In this study we utilized this option to know the mass flowrate of the utilities selected, which were cooling water (30 °C, 3 bar), steam (162 °C, 6,5 bar), chilled water (2 °C, 3 bar) and propylene (- 62 °C, 0,5 bar), in order to heat/cool a particular process stream. Figure 3 shows the calculated flowrate of each utility selected in this study.

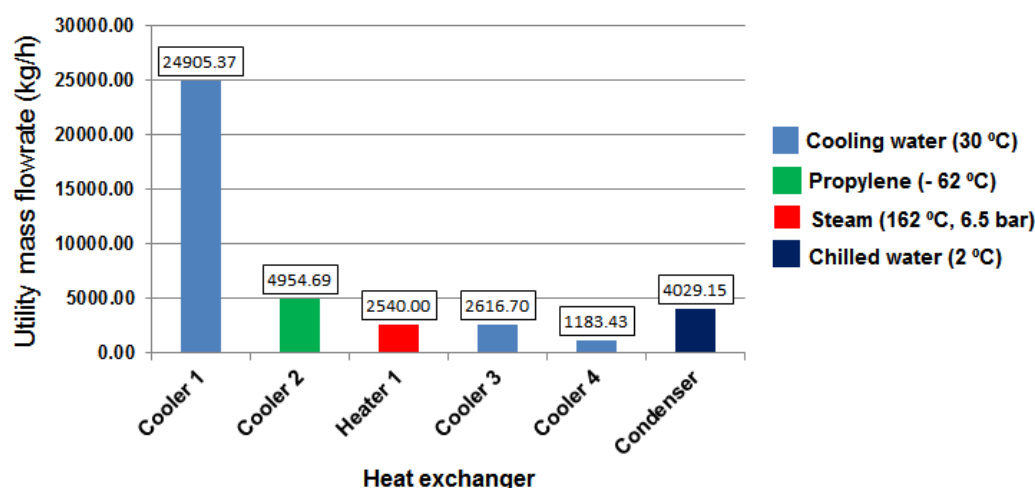


Figure 3. Calculated flowrate of each utility selected in this study.

As described in Figure 3, Cooler 1 needs the highest mass flowrate of cooling water with 24.905,37 kg/h, which is due to the fact that in this exchanger the hot gaseous mixture stream coming from the waste heat boiler is cooled from 200 °C to 50 °C (having a temperature difference of 150 °C), thus requiring a high amount of cooling water to carry out this cooling service. On the other hand, Cooler 4 requires the lowest mass flowrate of cooling water (1.183,43 kg/h) since this heat exchanger cools the propylene gaseous stream coming from the reciprocating compressor from 100 °C to 40 °C, with a temperature difference of only 60 °C. Heater 1 requires a steam mass flowrate of 2.540 kg/h, which could be classified as adequate [9], Cooler 2 requires a propylene mass flowrate of 4.954,69 kg/h, which can be classified as relatively high because this exchanger condenses the gaseous stream exiting the Cooler 1 from 50 °C to -50 °C (temperature difference of 100 °C), thus requiring this high mass flowrate of propylene to obtain a condensed liquid stream containing the allyl chloride, the chlorinated hydrocarbon derivatives as well as the unreacted propylene. Finally, the Condenser requires a chilled water mass flowrate of 4.029,15 kg/h, which can be classified as acceptable because this heat exchanger carries out the condensation of the gaseous pressurized propylene stream from 78 °C to 45 °C, thus obtaining liquid propylene at the heat exchanger outlet.

3.4. Heat curves

Figure 4 presents the heat curves of each shell and tube heat exchanger employed in the simulation study.

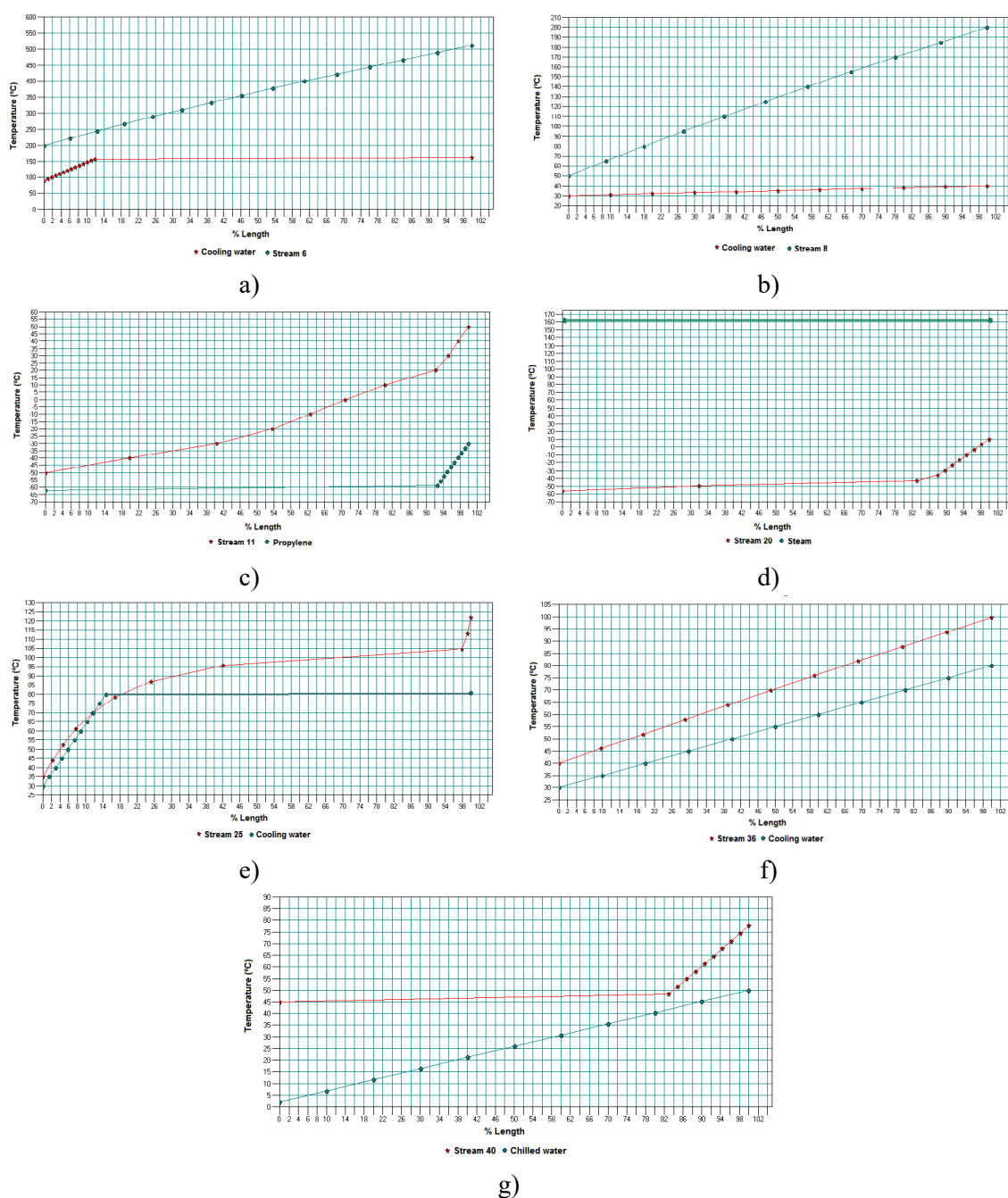


Figure 4. Heat curves of each shell and tube heat exchanger employed in the simulation study, corresponding specifically to a: Waste heat boiler, b: Cooler 1, c: Cooler 2, d: Heater 1, e: Cooler 3, f: Cooler 4, g: Condenser.

Figure 4a) shows that a change of pattern occurs for the cooling water at the 12 % length and 162 °C, thus indicating that a phase change takes place from liquid to vapor, thus obtaining saturated steam, while the heat curve of Stream 6 (hot gaseous mixture exiting the reactor) has a linear trend, indicating that this stream cools down from 511 °C to 200 °C without phase change.

Regarding the heat curve obtained for the Cooler 1 (Figure 4b) both the Cooling water stream and Stream 8 (cooled gaseous stream coming from the waste heat boiler) don't undergo phase change, which is indicated by the linear tendency of the two heat curves.

Concerning the heat curve of Cooler 2 (Figure 4c), both the Propylene stream and Stream 11 (cooled gaseous stream coming from the Cooler 1) experience phase change. In the case of the Propylene stream, it shows a linear trend from -62 °C to -58 °C of temperature and from 0 % to 93 % length, to then be subjected to a phase change verified by the pattern change of its heat curve (an increasing linear trend) until reaching -30 °C (the outlet temperature). This phase change is confirmed by checking the vapor mole fraction of both the inlet and outlet streams for Propylene stream in the simulation flowsheet, where the inlet stream has a vapor fraction of 0,00 (liquid) while the vapor fraction of the outlet stream is 1,00 (vapor). That is, the Propylene stream is vaporized. For the heat curve of Stream 11, it undergoes sensible heat until reaching 20 °C and 92% length of the heat exchanger, to then experience phase change from this point to the outlet temperature of this stream (-30 °C), which is corroborated by the change of pattern of the heat curve, thus obtaining a liquid stream at the outlet. This phase change is proved by checking the vapor mole fraction of both the inlet and outlet streams of Stream 11 in the simulation flowsheet, where the inlet stream presents a vapor mole fraction of 1,00 (vapor) and the outlet stream has a vapor mole fraction of 0,00 (liquid), i.e., Stream 11 undergoes condensation.

In the case of the heat curve of Heater 1 (Figure 4d), the Stream 20 suffers phase change taking into account the pattern of its heat curve. Specifically, this stream is heated without phase change (sensible heat) from -56 °C to -43 °C and 83 % length, to then undergo a phase change, which is demonstrated by the increasing linear trend occurring from 88 % length and -36 °C approximately, to the final length of the heat exchanger and the outlet temperature (10 °C). This is corroborated by checking the vapor mole fraction of this stream in the simulation flowsheet, where it is 0,09 at the inlet (two phase vapor-liquid flow) and 1,00 (vapor) at the outlet of this heat exchanger, i.e., Stream 20 vaporizes. On the other hand, the Steam stream doesn't experience phase change (i.e. condensation), which is verified by the constant linear trend of its heat curve at the temperature of 162 °C.

The heat curve of Cooler 3 (Figure 4e) displays two phase changes for both the Cooling water stream and Stream 25. The Cooling water stream is heated under sensible heat from 30 °C to 80 °C and 15% length approximately, to then undergo phase change (condensation) at this point, showed by the change of pattern of its heat curve, thus obtaining a vapor stream at the outlet. The Stream 25 is cooled under sensible heat from 122 °C until reaching a point of 104 °C and 98 % length, and then suffers phase change (condensation) demonstrated by the decreasing curved trend of its heat curve. This is verified by checking the vapor mole fraction of both the inlet and outlet streams of this stream in the simulation flowsheet, where the vapor mole fraction has value of 1,00 (vapor) at the inlet and a value of 0,00 (liquid) at the outlet, i.e. condensation occurs.

In relation to the heat curve for Cooler 4 (Figure 4f), both the Stream 36 and the Cooling water streams don't experience phase change, which is certified by the linear trend of both heat curves. That is, the Cooling water stream is heated from 30 °C to 80 °C without evaporation, while the Stream 36 is cooled from 100 to 40 °C without condensation.

Finally, the heat curve obtained for the Condenser (Figure 4g) shows that the Stream 40 goes through cooling without phase change from 78 °C to 48 °C and 83 % length approximately; to then go through phase change from this point until reaching the outlet temperature (45 °C). This is validated by checking the vapor mole fraction of both the inlet and outlet streams of this stream in the simulation flowsheet, where the inlet stream has a vapor

mole fraction of 1,00 (vapor) while the vapor mole fraction of the outlet stream is 0,00 (liquid), thus occurring condensation. In case of the heat curve obtained for the Chilled water, its linear trend indicates that this stream doesn't undergo phase change, i.e. it's heated from 2 °C to 50 °C without vaporization.

4. CONCLUSIONS

An innovative ChemCAD® simulation model was obtained in this study in order to conceptually design an allyl chloride production process by the propylene chlorination route. By means of the simulation results, the temperature, pressure, vapor mole fraction, enthalpy and mass flowrate of the intermediate and final streams were known, as well as various important operating and design parameters of the main equipment included in the simulation flowsheet. Likewise, the required flowrate of utilities and the heat curves of all the shell and tube heat exchangers employed in the production process were also determined. Allyl chloride is obtained at the distillate of the last distillation column with a flowrate and purity of 1.336,307 kg/h and 99,92 %, respectively, while 2.273,189 kg/h of pure liquid propylene, 2.218,202 kg/h of an aqueous solution of HCl 32,4 % wt. %, and 97,482 kg/h of 2-Chloropropene with a purity of 87,55 % are also generated as byproduct in the simulated process. The ChemCAD® simulation model obtained in this work could be used for future optimization studies, throughput increment assessments, and sensitivity analysis. The results of this simulation study, mostly the mass and energy balances and the equipment design and operating parameters, can be successfully applied and implemented at industrial scale due to its reliability, scalability, operability and consistency, in order to erect the proposed commercial-scale allyl chloride production plant. It's recommended carrying out further calculation and simulation analyses to determine several important financial indicators such as net present value, internal rate of return, payback time, return of investment, unit production cost, annual operating costs and others, to verify the economic feasibility and viability of this chemical engineering design project.

REFERENCES

- [1] M. Li, L. Han, X. Luo, and H. Luo, "The kinetics modeling and reactor simulation of propylene chlorination reaction process", *AIChE Journal*, vol. 67, no. 10, may. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/aic.17341>
- [2] Intratec Solutions. "Technology Profile - Allyl chloride production", *Chemical Engineering*. Vol. 129, no. 2, pp. 29, feb. 2022. [Online]. Available: <https://www.chemengonline.com/technology-profile-allyl-chloride-production/>
- [3] D. Young, R. Scharp, and H. Cabezas, "The waste reduction (WAR) algorithm: environmental impacts, energy consumption, and engineering economics", *Waste Management*, vol. 20, no. 8, pp. 605-615, dec. 2000. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(00\)00047-7](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(00)00047-7)
- [4] Turja, and M. Demichela, "Risk Based Design of Allyl Chloride Production Plant", *Chemical Engineering Transactions*, vol. 24, pp. 1087-1092, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3303/CET1124182>
- [5] Ł. Madej, and A. A. Kiss, "Eco-efficiency improvements in the propylene-to-epichlorohydrin process", *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, vol. 98, no. 9, pp. 2110-2121, may. 2023. <https://doi.org/10.1002/jctb.7453>
- [6] A. Govindarajan, "Optimization of Processes for Sustainability", Master of Science Thesis, Oklahoma State University, Oklahoma, 2011. [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/215263172.pdf>

- [7] E. W. Flick, *Industrial Solvents Handbook.*, 5th ed, New Jersey, USA: Noyes Data Corporation, 1998, pp. 103. [Online]. Available: https://www.thevespiary.org/library/Files_Uploaded_by_Users/Sedit/Journal%20of%20Chemical%20Education%20%28797Megs%29/Solvents/Industrial%20Solvent%20Handbook.pdf
- [8] R. E. Kirk, D. F. Othmer, M. Grayson, and D. Eckroth, *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, 4th ed. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2004, pp. 32-37. [Online]. Available: <https://acortar.link/YJJkpe>
- [9] R. Turton, J. A. Shaeiwitz, D. Bhattacharyya, and W. B. Whiting, *Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes*, 5th ed. Boston. USA: Pearson Education, Inc., 2018, pp. 870-1085. [Online]. Available: https://archive.org/details/535514174-analysis-synthesis-and-design-of-chem-processes-5-e_202210
- [10] C. Soares, *Process Engineering Equipment Handbook*. New York, USA: McGraw-Hill, 2002, pp. 350-875. [Online]. Available: [http://lucmorton.com/lucstuf/pdf/Process%20Engineering%20Equipment%20Handbook%20-%20C.%20Soares%20\(McGraw-Hill,%202002\)%20WW.pdf](http://lucmorton.com/lucstuf/pdf/Process%20Engineering%20Equipment%20Handbook%20-%20C.%20Soares%20(McGraw-Hill,%202002)%20WW.pdf)
- [11] M. S. Peters, K. D. Timmerhaus, and R. E. West, *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*, 5th ed. New York, USA: McGraw-Hill, 2003, pp. 592-874. [Online]. Available: <https://vdoc.pub/download/plant-design-and-economics-for-chemical-engineers-2e23idrqlqf0>
- [12] J. R. Couper, W. R. Penney, J. R. Fair, and S. M. Walas, *Chemical Process Equipment Selection and Design*, 3rd ed. Oxford, United Kingdom: Butterworth-Heinemann, 2012, pp. 161-675. [Online]. Available: <https://www.zuj.edu.jo/download/chemical-process-equipment-selection-and-design-pdf/>
- [13] D. W. Green and M. Z. Southard, *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 9th ed. New York, USA: McGraw-Hill, 2019, pp. 11-1 – 14.118. Accessed: Jan. 31, 2024. [Online]. Available: https://www.booksfree.org/wp-content/uploads/2022/03/perrys-chemical-engineers-handbook-ninth-edition_compressed.pdf
- [14] R. Sinnott and G. Towler, *Chemical Engineering Design*, 6th ed. Oxford, United Kingdom: Butterworth-Heinemann, 2020, pp. 525-1139. [Online]. Available: <https://dokumen.pub/chemical-engineering-design-6nbsped-0081025998-9780081025994.html>
- [15] S. M. Hall, *Rules of Thumb for Chemical Engineers*, 6th ed. Oxford, United Kingdom: Elsevier, 2018, pp. 197-303. Accessed: Mar. 25, 2024. [Online]. Available: <https://vdoc.pub/documents/rules-of-thumb-for-chemical-engineers-1gnv1ul6qf70>





Más artículos científicos aquí