



TECNOLOGÍA
en marcha

Revista trimestral
Julio – Setiembre 2025
Volumen 38 N° 3
ISSN-E 2215-3241



Publicación y directorio en catálogos

latindex

redalyc.org UAEM

Dialnet

melica

SciELO

REDIB
Red Iberoamericana
de Investigación y Docencia Científica

DOAJ

ET
Editorial Tecnológica
de Costa Rica

TEC | Tecnológico
de Costa Rica

Comisión Editorial

Felipe Abarca Fedullo. Director.
Editorial Tecnológica de Costa Rica

Juan Antonio Aguilar Garib
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Universidad Autónoma de Nuevo León.
México

Carlos Andrés Arredondo Orozco
Facultad de Ingenierías
Universidad de Medellín. Colombia

Lars Köhler
Experimenteller Botanischer Garten
Georg-August-Universität Göttingen.
Alemania

Jorge Solano Jiménez
Instituto Costarricense del Cemento
y del Concreto

Edición técnica

Alexa Ramírez Vega

Revisión filológica

Esperanza Buitrago Poveda

Diseño gráfico

Felipe Abarca Fedullo

Diagramación

Alexa Ramírez Vega

Diseño de cubierta

Ariana Sanabria García

Imagen de cubierta

<https://www.pexels.com>

Datos de catalogación en publicación

Tecnología en Marcha / Editorial Tecnológica
de Costa Rica. - Vol. 38-3. Julio-Setiembre,
2025 - Trimestral
ISSN-E 2215-3241

1. Ciencia y Tecnología -
Publicaciones periódicas CDD:600



TEC | Tecnológico
de Costa Rica

Apdo 159-7050 Cartago, Costa Rica
Tel.: (506) 2550-2297, 2550-2618
Correo electrónico: editorial@itcr.ac.cr
Web: <https://www.tec.ac.cr/editorial>
http://revistas.tec.ac.cr/tec_marcha



TEC | Tecnológico
de Costa Rica

La Editorial Tecnológica de Costa Rica es una dependencia especializada del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Desde su creación, en 1978, se ha dedicado a la edición y publicación de obras en ciencia y tecnología. Las obras que se han editado abarcan distintos ámbitos respondiendo a la orientación general de la Institución.

Hasta el momento se han editado obras que abarcan distintos campos del conocimiento científico-tecnológico y han constituido aportes para los diferentes sectores de la comunidad nacional e internacional.

La principal motivación de la Editorial es recoger y difundir los conocimientos relevantes en ciencia y tecnología, llevándolos a los sectores de la comunidad que los requieren.

La revista *Tecnología en Marcha* es publicada por la Editorial Tecnológica de Costa Rica, con periodicidad trimestral. Su principal temática es la difusión de resultados de investigación en áreas de Ingeniería. El contenido de la revista está dirigido a investigadores, especialistas, docentes y estudiantes universitarios de todo el mundo.

Publicación y directorio en catálogos



TECNOLOGÍA *en marcha*

Contenidos

Elaboración de un bioplástico con almidón de maíz/glicerol/anhídrido maleico/prolicaprolactona: estudio preliminar

Elaboration of a bioplastic with corn starch/glycerol/maleic anhydride/polycaprolactone: preliminary study

María Maldonado-Santoyo, Luz Adriana Arias-Hernández, Eladio Delgadillo-Ruiz 3

Aplicación de pigmentos de *Hibiscus sabdariffa* L. en estampación textil

Application of *Hibiscus sabdariffa* L. pigments in textile printing

Carmen Elena Menjívar-Benítez, Milton Alejandro Ramírez-Aguirre, Freddy González-Zamora 14

Proyecto ferroviario David-Panamá: una revisión

David-Panama Railway Project: a review

Aranzazu Berbey-Alvarez, Humberto R. Alvarez-Alvarado, Juan De Dios Sanz-Bobi..... 26

Evaluación de dos fuentes orgánicas (humus de lombriz y excretas de *Zophobas morio*) en la germinación de semillas de lechuga (*Lactuca sativa* L.)

Phytotoxicity assessment in lettuce (*Lactuca sativa* L.) using germination indexes in two organic fertilizers: worm humus and *Zophobas morio* excreta

Daniel Alejandro García-López..... 45

Efecto antimicrobiano de tres aceites esenciales de la familia Lamiaceae para el control *Ralstonia solanacearum*

Antimicrobial effect of three essential oils from the Lamiaceae family for control *Ralstonia solanacearum*

Jovanna Acero-Godoy, Tomás de Jesús Guzmán-Hernández, Wilman Antonio Delgado-Ávila, Johan Steven Alcántara-Cortés, Mauricio Soto-Suárez, Elizabeth Gil-Archila 54

Moneda complementaria basada en tecnología blockchain en Territorio Indígena de Costa Rica

Complementary currency based on blockchain technology in Indigenous Territory, Costa Rica

Paula Arzadun, Alan Henderson-García 69

Emisiones en exceso provenientes de vehículos en ralentí en Comalcalco, Tabasco

Excess emissions from idling vehicles in Comalcalco, Tabasco

Fernando Pérez-Márquez, Rudy Solís-Silván, Milni de los Ángeles Hernández-Nolasco 77

Uso de anticuerpos monoclonales como opción terapéutica para el tratamiento del cáncer de mama: reseña

Use of monoclonal antibodies as a therapeutic option for breast cancer treatment: A review

Aldeir Alvarado-Arce, Nazareth Rueda-Carrillo, Sebastián Ramírez-Chaves, Mónica Vargas-Salas,

Steven Vargas-Cascante 88

Cuantificación del parasitismo natural de Braconidae e Ichneumonidae (Hymenoptera) en larvas de gusano cogollero del maíz (*Spodoptera frugiperda* Smith), en Santa Cruz, Guanacaste

Quantification of natural parasitism by Braconidae and Ichneumonidae (Hymenoptera) in larvae of the corn earworm (*Spodoptera frugiperda* Smith) in Santa Cruz, Guanacaste

Jairo Mora-Prendas 97

Enfermedad de Crohn, colitis ulcerosa y artritis reumatoide: La relación entre la microbiota intestinal y el desarrollo de enfermedades autoinmunes

Crohn's Disease, Ulcerative Colitis, and Rheumatoid Arthritis: The Relationship Between Gut Microbiota and the Development of Autoimmune Diseases

Juan Carlos González-Vásquez, Nicole Brigitte Granados-Rojas, Jimena Juárez-González,

Juan Pablo Rodríguez-Quesada 106

Tacaco (*Sechium tacaco*): relaciones entre características morfológicas del fruto

Tacaco (*Sechium tacaco*): relations among morphological characteristics of the fruit

José Eladio Monge-Pérez, Michelle Loría-Coto 120

Gestión de residuos de coco verde (pipa, *Cocos nucifera* L.) para una industria alimenticia

Green coconut (*Cocos nucifera* L.) waste management for a food processing company

Verónica Fiorella Juárez-Piedra, Lilliana Abarca-Guerrero 137

Antenas de ranura con tecnología GGW para aplicaciones 6G en 94GHz

Slot Antennas with GGW technology for 6G applications at 94GHz

Jorge Luis Blanco-Orta, María del Carmen Guerra-Martínez, Kenneth Marichal-Leyva, Ariel Calzadilla-Ayuso,

Alexander Sánchez-Pompa 151

Modificación de un potenciómetro de bajo costo para su uso en la síntesis y verificación de la pseudocapacitancia del MnO_2

Modification of a low-cost potentiostat for its use in the synthesis and verification of the pseudocapacitance of the MnO_2

Omar Rojas-Bolaños, Alejandro Delgado-Castro 162

Elaboración de un bioplástico con almidón de maíz/glicerol/ anhídrido maleico/prolicaprolactona: estudio preliminar

Elaboration of a bioplastic with corn starch/glycerol/ maleic anhydride/polycaprolactone: preliminary study

María Maldonado-Santoyo¹, Luz Adriana Arías-
Hernández², Eladio Delgadillo-Ruiz³


Fecha de recepción: 18 de setiembre, 2024

Fecha de aprobación: 3 de diciembre, 2024

Maldonado-Santoyo, M; Arías-Hernández, L.A; Delgadillo-
Ruiz, E. Elaboración de un bioplástico con almidón de maíz/
glicerol/anhídrido maleico/prolicaprolactona: estudio prelimi-
nar . *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 3. Julio-Setiembre,
2025. Pág. 3-13.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i3.7240>

1 Dirección de Investigación y Soluciones Tecnológicas. Centro de Innovación Aplicadas en Tecnologías Competitivas. México.

 msantoyo@ciatec.mx

 <https://orcid.org/0000-0001-7205-0240>

2 Departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica. División de Ingenierías. Universidad de Guanajuato. México.

 arhadriana@ugto.mx

 <https://orcid.org/0000-0001-5456-8046>

3 Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. División de Ingenierías. Universidad de Guanajuato. México.

 e.delgadillo@ugto.mx

 <https://orcid.org/0000-0002-2004-5340>

Palabras clave

Ecoplástico; extrusión; biodegradabilidad acuosa; acolchado plástico; plástico ecológico.

Resumen

Este trabajo presenta los resultados obtenidos en la elaboración de un bioplástico empleando almidón de maíz, glicerol, anhídrido maleico y policaprolactona (Alm/G/Am/PCL). Para ello, se prepararon tres mezclas: M1(Alm/G), M2(Alm/G/Am) y M3(Alm/G/Am/PCL) usando una mezcladora de cocina. Después fueron procesados en una extrusora de doble husillo (80 rpm) y con un perfil de temperaturas entre 75-112°C. Los filamentos obtenidos fueron enfriados y cortados y por moldeo con una prensa hidráulica (130°C/20000lbf/3min) se obtuvieron las láminas. Los bioplásticos se caracterizaron en algunas propiedades mecánicas, análisis de infrarrojo, absorción de agua, color y biodegradabilidad primaria aerobia en medio acuoso. Los resultados muestran valores de tensión a la rotura 1.40 ± 0.10 , 1.12 ± 0.07 y 0.38 ± 0.06 MPa; deformación a la rotura 23.36 ± 2.3 , 20.46 ± 2.6 y 22.33 ± 1.6 % y módulo de elasticidad de 1.31 ± 0.39 , 1.43 ± 0.16 y 2.74 ± 0.18 MPa para M1, M2 y M3, respectivamente. La interacción molecular más destacada, fue el cambio en el grupo carbonilo. La absorción de agua para todas la mezclas, superó el 60% (26h) y la biodegradabilidad primaria alcanzada fue entre 30-34%. Los bioplásticos M2 y M3 mejoraron algunas propiedades mecánicas con la adición de anhídrido maleico y policaprolactona. Todos los bioplásticos presentaron buena procesabilidad por extrusión a las condiciones propuestas.

Keywords

Ecoplastic; extrusión; aqueous biodegradability; plastic padding; ecological plastic.

Abstract

This work presents the results obtained in the preparation of a bioplastic using corn starch, glycerol, maleic anhydride and polycaprolactone (Alm/G/Am/PCL). For this, three mixtures were prepared: M1(Alm/G), M2(Alm/G/Am) and M3(Alm/G/Am/PCL) using a kitchen mixer. They were then processed in a twin-screw extruder (80 rpm) and a temperature profile between 75-112°C. The filaments obtained were cooled and cut and, by molding with a hydraulic press (130°C/20,000lbf/3min) the sheets, were obtained. The bioplastics were characterized in some mechanical properties, infrared analysis, water absorption, color and aerobic primary biodegradability in aqueous medium. The results show stress values at break 1.40 ± 0.10 , 1.12 ± 0.07 and 0.38 ± 0.06 MPa; strain of break 23.36 ± 2.3 , 20.46 ± 2.6 and 22.33 ± 1.6 % and, modulus of elasticity of 1.31 ± 0.39 , 1.43 ± 0.16 and 2.74 ± 0.18 MPa for M1, M2 and M3, respectively. The most prominent molecular interaction was the change in carbonyl group. The water absorption for all mixtures exceeded 60% (26h) and the primary biodegradability achieved was between 30-34%. Bioplastics M2 and M3 improved some mechanical properties with the addition of maleic anhydride and polycaprolactone. All bioplastics presented good processability by extrusion at the proposed conditions.

Introducción

Los plásticos de origen petroquímico son ampliamente utilizados en diversos mercados industriales en todo el mundo, para el desarrollo de una extensa gama de productos que mejoran el confort social cotidiano y de la industria, principalmente por sus buenas propiedades físico-mecánicas, bajo costo, fácil procesabilidad y alta estabilidad y durabilidad [1-5]. Sin

embargo, su extensa versatilidad ha provocado su producción acelerada y en gran escala a nivel mundial, destacando la producción de plásticos de polietileno, polipropileno y el policloruro de vinilo, entre otros [3][6-8]. Esto ha atraído la atención tanto de sectores gubernamentales como de la sociedad, debido a su impacto en la economía global, así como al hecho, de que son materiales que provienen de fuentes fósiles no renovables; además del impacto causado por su uso indiscriminado, las bajas tasas de recuperación, alta permanencia en diferentes ecosistemas y su inadecuado manejo al fin de su ciclo de vida, ha ocasionado diversas perturbaciones adversas a los ecosistemas, tanto acuáticos como terrestres [3][9]-[11].

Aunado a ello, el uso de estos plásticos también se ha extendido a la agricultura, principalmente como acolchados agrícolas, siendo el polietileno el más ampliamente utilizado a nivel mundial. Su incursión en este sector se debe principalmente a las ventajas que prestan los plásticos en sus diferentes propiedades y colores, pues coadyuvan a recuperar tierras que carecían de potencial agrícola para transformarlas en tierras productivas, defender los cultivos y al suelo de agentes perjudiciales e incrementar la producción [11][12]. Lo anterior es de gran relevancia, pues la agricultura tradicional está dando un giro importante, transformándose de un sector industrial marginal, a situarse como una de las principales fuentes económicas y de abastecimiento para numerosas poblaciones y “comarcas tradicionalmente desfavorecidas”. Derivado de ello, es que el uso de plásticos en la agricultura se ha ido incrementando paulatinamente durante los últimos años alrededor del mundo [11][13], ya que provee de varias ventajas para la agricultura, sin embargo, también está creando grandes desafíos para el medio ambiente. Según algunos estudios, alrededor del 80 % de los desechos plásticos, provienen de acolchados utilizados en la agricultura, siendo su recolección, al final de su ciclo de vida, un poco complicado y, además, algunos se descomponen en microplásticos, ocasionando que algunas partes significativas se queden en los suelos de cultivo y terminen en ríos y océanos derivados de la filtración y escorrentía [11]-[14].

Ante esta problemática, tanto en la agricultura como en el sector industrial y social, se han planteado el desarrollo de nuevas propuestas de materiales plásticos que estén más comprometidos con la salud del planeta. Una de estas propuestas de plásticos ecológicos son los denominados “bioplásticos”, que tienen como ventaja primordial que pueden obtenerse de diversas fuentes renovables y disponibles tanto de origen animal (proteínas: colágeno, queratina, seda, gelatin, quitosán); vegetal (polisacáridos como el almidón de maíz, papa o de yuca, productos lignocelulósicos, resinas o proteínas vegetales como soya, gluten o algas) o bien, obtenerse sintéticamente vía fermentativa como el ácido poliláctico y los polihidroxialcanoatos, entre otros [3][5][11][15]-[18]. También existen algunos plásticos de origen petroquímico, que son biodegradables como la policaprolactona y algunos derivados del polibutileno [3][5][9][19]. Sin embargo, es de suma importancia considerar que, una adecuada selección de los materiales/sustancias, el mezclado y su procesamiento, son factores de importancia que permiten o no, obtener bioplásticos con propiedades físico-mecánicas y químicas adecuadas para su uso en la fabricación de los diferentes artículos que la sociedad demanda, y de esta manera, coadyuvar a sustituir de a poco, a los plásticos tradicionales de origen petroquímico. Además, otra ventaja de los bioplásticos es que no suelen producir residuos tóxicos al descomponerse y presentan una desaparición rápida bajo condiciones determinadas de humedad, luz solar y oxígeno, permitiendo que los componentes se reintegren a la naturaleza en menor tiempo, mediante la acción de los microorganismos, lo cual contribuye a que el ciclo vital siga su curso sin menoscabo del medio ambiente [3][20].

En este contexto, el almidón es un importante polisacárido producido en las plantas. Es de bajo costo, un recurso renovable, biodegradable y presenta degradación inocua en los productos que lo contienen; esto ha hecho que sea ampliamente estudiado como materia prima para diferentes aplicaciones tanto ambientales, biomédicas, materiales o alimentos [18][21][22]. Es

un biopolímero de glucosa, formado por dos unidades estructurales: amilosa (aprox. 25 %) y amilopectina (aprox. 75 %) con pesos moleculares altos que típicamente superan los 48000 g/mol [21][23]. Se puede encontrar en vegetales, semillas de plantas, raíces o frutas [20] [24]. Sin embargo, por sí solo no se puede procesar, para ello requiere de un plastificante u otros aditivos que permitan su adecuado procesamiento y mejoren sus propiedades. Diversos trabajos han sido reportados en la literatura, en los cuales se emplea el almidón como fuente biológica principal para la elaboración de plásticos ecológicos, combinado con algún otro polímero, sustancias orgánicas e inorgánicas y/o aditivos y utilizando plastificantes ya sean líquidos o sólidos, como agua, glicerol, urea, etilenglicol, ácido acético, azúcar, polialcoholes, lípidos, sorbatos, entre otros [18][22][25]. Jalalvandi et al. [26], desarrollaron un bioplástico para su uso como material de empaque para comida, utilizando una mezcla de almidón de tapioca, ácido poliláctico, glicerol, anhídrido maleico y montmorillonita el cual es un mineral del grupo de los silicatos. Mientras que, Álvarez y Vázquez [27], elaboraron un plástico biodegradable a partir de mezclas de celulosa/almidón reforzadas con fibras de sisal. Otros autores han incluido el uso del almidón ya sea de papa, maíz, yuca o quinoa, plastificando con glicerol, ácido acético u otros aditivos [22][24][25][28] y empleando diversos tipos de fibras vegetales, como material de refuerzo [20][25].

Con base en lo expuesto, este trabajo presenta los resultados preliminares obtenidos en la elaboración de un bioplástico de base biológica, a partir de la mezcla de almidón de maíz con glicerol, anhídrido maleico y/o policaprolactona que pueda usarse como acolchado agrícola.

Materiales y métodos

Reactivos

Los reactivos utilizados fueron almidón de maíz nativo (Meelunie), glicerol (Meyer, pureza 99.5 %), anhídrido maleico (Meyer, pureza >95 %), policaprolactona (PCL) (SUM China), agua desionizada 18.2 MΩ-cm (Sartorius). Fosfato monopotásico (Karal, pureza 99 %), fosfato dipotásico (Karal, pureza >98 %), fosfato disódico heptahidratado (Karal, pureza >98 %), cloruro de amonio (Karal, pureza 99 %), cloruro de calcio dihidratado (Karal, pureza 99 %), sulfato de magnesio (Baker, pureza 98 %), cloruro férrico hexahidratado (Karal, pureza 97 %), hidróxido de sodio (Karal, pureza 97 %), hidróxido de potasio (Merk, >85 %), ácido clorhídrico solución 1.0 N (Karal).

Procesamiento

Los bioplásticos se prepararon de acuerdo a las formulaciones presentadas en el cuadro 1. Las mezclas se realizaron utilizando una batidora marca KitchenAid Artisan durante 5 minutos hasta obtener una mezcla homogénea. Después, cada mezcla se alimentó a una extrusora de doble tornillo (Micro27, Leistritz, Nuremberg, Alemania) con una relación longitud/diámetro (L/D) de 32:1. La velocidad del tornillo fue de 80 rpm y el perfil de temperatura fue de 75, 95, 105, 112, 112, 100, 90 y 80 °C en cada sección. Los filamentos obtenidos se enfriaron con aire y se cortaron en pedazos pequeños (<1 cm) de forma manual. Luego, utilizando una prensa hidráulica (marca Carver, Autoserie NE, Indiana, USA), fueron prensados en caliente (130 °C, 20000 lbf, 3 min) hasta obtener una lámina delgada. Una vez frías las láminas, fueron cortadas utilizando una prensa manual para obtener los especímenes de prueba. Para cada bioplástico se analizaron 5 especímenes de prueba.

Cuadro 1. Formulación de los bioplásticos.

Bioplástico	Almidón de maíz (Alm), g	Glicerol (G), g	Anhídrido maleico (Am), g	Policaprolactona (PCL), g
M1	700	300	-	-
M2	700	300	10	-
M3	700	300	10	100

Caracterización

El espesor de las láminas obtenidas fue medido utilizando un medidor vernier digital con resolución de 0.01 mm (marca Keatronic) [25]. La humedad en los bioplásticos fue determinada por gravimetría, calentando una muestra de cada bioplástico a 105 °C hasta su peso constante. El análisis se realizó por triplicado.

El contenido de carbono total en los bioplásticos fue estimado de forma teórica a partir de la composición de los materiales reportada en el cuadro 1.

Para evaluar la absorción de agua, se tomó una pequeña cantidad de cada material y fue secado a 50 °C durante 20 h y se registró su peso inicial. Después, se sumergieron en agua destilada (24±2 °C) y se registró su peso a las 26 h de contacto [26]. El color en los bioplásticos fue obtenido, utilizando un colorímetro CM-700d/600g, calibrando a blanco con 5 disparos, para cada espécimen de prueba. Los análisis se realizaron por triplicado.

El peso molecular en el almidón de maíz fue estimado por viscosimetría empleando la ecuación de Mark-Houwink $[\eta] = K \cdot M^a$, donde $[\eta]$ es la viscosidad intrínseca; K y a son constantes específicas del soluto-solvente y M es el peso molecular. Para ello, se utilizó un viscosímetro de Ostwald para evaluar el tiempo de fluidez del almidón de maíz a diferentes concentraciones (0.2, 0.5, 1.0, 1.5 g/dL) utilizando una solución de KOH 1N como solvente y a una temperatura de 35 °C en baño maría. Las constantes empleadas fueron $K = 1.4 \times 10^{-4}$ dL/g y $a = 0.73774$ [29]. Todos los análisis fueron realizados por triplicado.

Algunas interacciones moleculares se evaluaron empleando un espectrofotómetro de infrarrojo de transformada de Fourier (Thermo Fisher Nicolet), en un intervalo de número de onda de 4000-400 cm^{-1} con 16 escaneos y una resolución de 4 cm^{-1} . El análisis se realizó para el almidón de maíz, anhídrido maleico y PCL puros y en los bioplásticos (M1, M2 y M3) para su comparación.

Las pruebas mecánicas de tensión a la rotura, deformación a la rotura y módulo de elasticidad fueron evaluadas utilizando una máquina de ensayos mecánicos (marca Galdabini).

De forma preliminar, la biodegradabilidad primaria aeróbica en medio acuoso se realizó para el almidón de maíz, la policaprolactona y los tres bioplásticos (M1, M2 y M3) de acuerdo al método OECD 301B [10] con ligeras modificaciones. Para ello, una cantidad conocida de cada bioplástico, equivalente a 10-20 mg de carbono orgánico/L, fue colocada en un reactor de vidrio de 1L con solución mineral (fósforo, nitrógeno, potasio, calcio, magnesio y hierro) e inoculada con licor de lodos activados recolectado en la planta de tratamiento de aguas residuales Villas de San Juan, León, Gto., acondicionado previamente durante 7 días en el medio mineral, para permitir el desarrollo microbiano. Después, los reactores se colocaron en una placa con agitación magnética suave y flujo de aire a 22±2°C e iluminación difusa durante 28 días. La cantidad de CO₂ formado fue capturado en una trampa de hidróxido de sodio 0.1 N y medido por titración con una solución de ácido clorhídrico 0.1 N. Los análisis se realizaron por duplicado para cada bioplástico.

Resultados

En la figura 1 se muestran las estructuras moleculares de las sustancias utilizadas para la elaboración de los materiales plásticos M1, M2 y M3: almidón de maíz, glicerol, anhídrido maleico y policaprolactona, utilizando ChemSketch. Se puede apreciar, que los grupos funcionales que destacan en todas ellas son enlaces de tipo O-H, C-H, C=O y C-O-C. El peso molecular de cada uno de ellos es de 92.0, 98.06 y 50,000 g/mol para el glicerol, el anhídrido maleico y la policaprolactona, respectivamente y fueron obtenidos directamente de la hoja técnica del proveedor. Mientras que, el peso molecular para el almidón de maíz utilizado, estimado por viscosimetría, fue de 363,095 g/dL.

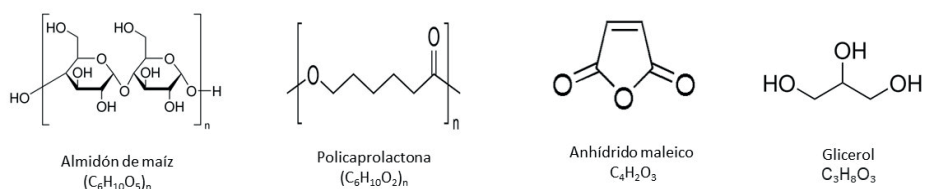


Figura 1. Estructuras moleculares de los materiales puros.

El espesor logrado en las placas obtenidas por compresión fue de 3 mm de espesor. En la figura 2 se presentan imágenes de los especímenes de prueba obtenidos con el procedimiento propuesto para M1, M2 y M3.



Figura 2. Imágenes de los especímenes de prueba de M1, M2 y M3.

La humedad estuvo entre 5.3-5.9 % y la absorción de agua a las 26 h de contacto entre 57-73 % para los tres bioplásticos. Siendo M3 el que mayor absorción de agua presentó (70.89±1.6 %). Lo anterior, se debe principalmente al alto contenido de almidón en los bioplásticos (60-70 %), pues como ya se mencionó, por su naturaleza higroscópica, tiende a absorber agua y se hincha. Estos valores son similares a lo obtenido por otros autores, por ejemplo, Oluwasina et al. [25] reportan para su bioplástico usando almidón de ñame (55 %) con glicerol (12 %) y variando la cantidad de dialdehído, un contenido de humedad entre 6.62-11.85 % y cuando se adiciona sílica fue 11.24-14.26 %; mientras que, la absorción de agua a los 24 h de contacto fue entre 60-80%. Por otro lado, en el material elaborado por Jalalvaldi et al. [26], mezclando una cantidad baja de almidón de tapioca (28 %) con glicerol (12 %), anhídrido maleico (2 %) y un alto contenido de ácido poliláctico (58 %), a las 24 h de contacto con agua, reportó valores de absorción de agua entre 38 y 40 %. Por su parte, Barrios et al. [20] para su bioplástico a base de almidón y glicerol (65/35 %) reporta valores cercanos al 29 % con solo 5 h de contacto. Con base a esta información, se puede deducir que el contenido de almidón presente en un material bioplástico tiene efecto sobre la absorción de agua del material, lo cual puede afectar sus propiedades físico-mecánicas.

Cuadro 2. Valores obtenidos en la caracterización química y de color de los bioplásticos.

Material plástico	Humedad, %	Carbono teórico total, %	Absorción de agua, %	Color*		
				L	a	b
M1	5.3±0.2	42.8	60.39±3.0	39.8	-0.5	+8.7
M2	5.5±0.1	42.9	64.5±2.8	26.7	+2.3	+4.3
M3	5.9±0.1	44.7	70.89±1.6	39.8	+0.5	+4.7

*Espacio Cie Lab donde L: Luminosidad; a: coordenadas rojo/verde (+a: indica rojo, -a indica verde) y b: coordenadas amarillo/azul (+b indica amarillo, -b indica azul). Fuente [Elaboración propia]

Ahora bien, teniendo en consideración que los bioplásticos elaborados en este trabajo, puedan utilizarse como acolchados plásticos en agricultura, también se midió el color en cada bioplástico. Este parámetro es de suma importancia en los acolchados plásticos, ya que contribuye, ya sea en el rebote o absorción de luz, la cual posteriormente se convierte en calor y puede afectar benéfica o adversamente en el desarrollo de los cultivos. Para los bioplásticos aquí propuestos, los valores obtenidos en coordenadas espacio CIE Lab están reportados en el cuadro 2. La luminosidad obtenida fue entre 26 al 40 %, esto es bueno, pues nos indica que pueden absorber luz hasta en un 60 %. Mientras que, las coordenadas obtenidas en los bioplásticos, a y b están dentro de la circunferencia de +10 a -10 cuyo color predominante en esta zona es el color grisáceo; esto es benéfico, ya que el color gris, en un acolchado plástico, puede coadyuvar en el control de malezas.

Por otro lado, los espectros obtenidos en el análisis de FTIR (cuadro 3), mostraron que el cambio y el desplazamiento en la absorción del grupo carbonilo ($1830-1650\text{ cm}^{-1}$) fue el más evidente. Sin embargo, también se observaron cambios en la banda ($3800-3000\text{ cm}^{-1}$), la cual se debe a enlaces de tipo O-H y C-H. Esta banda al ser amplia y alta (3500 y 3200 cm^{-1}) puede deberse al enlace O-H del agua, observándose principalmente en los materiales que contienen el almidón (M1, M2 y M3) pues este tiene un comportamiento higroscópico, es decir, que absorbe agua [20]. Mientras que, las interacciones debidas a estiramientos C-H ($3000-2800\text{ cm}^{-1}$) se observaron en todos los materiales (puros y en mezcla).

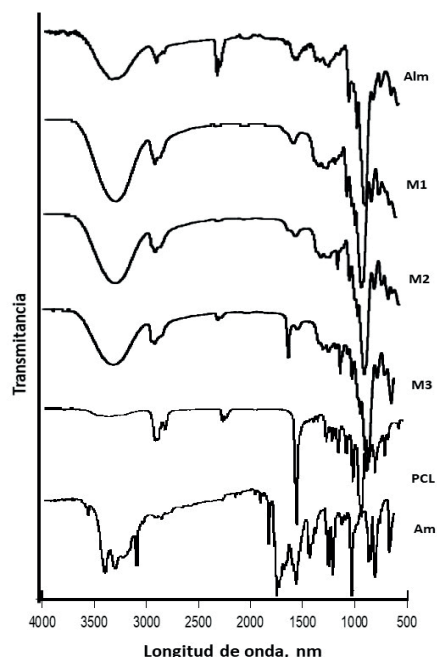


Figura 3. Espectros obtenidos por FTIR.

Respecto a la evaluación de las propiedades mecánicas de tensión a la rotura, deformación a la rotura y módulo de elasticidad se utilizaron cinco especímenes de prueba (figura 1) para cada material bioplástico. Los valores obtenidos (cuadro 3) muestran que, de forma general, las propiedades mecánicas evaluadas fueron mejoradas al adicionar, además del glicerol que tuvo la función como plastificante, el anhídrido maleico sin o con adición de la PCL (M2 y M3), con respecto a M1 que solo tiene el plastificante. Otros estudios como el reportado por Ledesma-Ugisiña et al., [24] en el cual elaboraron una película a base almidón de maíz/glicerol/ácido acético/agua presentaron valores de 0.64 MPa, 33.78 % y 2.44 MPa para la tensión a la rotura, deformación a la rotura y módulo de elasticidad, respectivamente. Mientras que, Meza et al. [28] reporta valores de tensión a la rotura (0.6 y 2.5 MPa) y deformación a la rotura (15 y 30 %) para diferentes bioplásticos a base de almidón y Barrios et al. [20] reporta 0.85 MPa y 13 %, respectivamente, para almidón termoplastificado con glicerol (65/35 %)[20]. Estos valores son cercanos a lo obtenido en el bioplástico M3 (0.38 ± 0.06 MPa y 22.33 ± 1.6 %), desarrollado en este trabajo, sin embargo, es importante destacar que tanto el procesamiento como la composición de los materiales es diferente, razón por la cual los valores en algunas propiedades pueden diferir.

Cuadro 3. Valores obtenidos en las propiedades mecánicas de los bioplásticos

Bioplástico	Tensión a la rotura MPa	Deformación a la rotura %	Módulo elástico MPa
M1	1.40 ± 0.10	23.36 ± 2.3	1.31 ± 0.39
M2	1.12 ± 0.07	20.46 ± 2.6	1.43 ± 0.16
M3	0.38 ± 0.06	22.33 ± 1.6	2.74 ± 0.18

Por otro lado, la biodegradabilidad aeróbica alcanzada en medio acuoso a los 28 días, a las condiciones propuestas, fueron de 31.8 ± 2.3 y 22.78 ± 2.5 %, para el almidón de maíz y la PLC en forma pura, respectivamente. Mientras que, para los tres bioplásticos (M1, M2 y M3) la biodegradabilidad fue muy similar obteniendo valores que oscilaron entre el 30-34 %. Estos valores son cercanos a los reportados por otros autores. Por ejemplo, el estudio realizado por Ledesma-Ugshiña et al. (2021) para una película plástica mezclando almidón de maíz (2.5g)/ glicerol (2 mL)/ácido acético (4 mL)/agua (35 mL), reporta una biodegradabilidad en medio acuoso, cercana al 55 % a los 20 días de contacto[24]. Meza et al., (2019) obtuvo valores que oscilan entre 50-65 % en medio acuoso a los 60 días de contacto[28]). Es importante comentar, que estas diferencias están estrechamente relacionadas con la composición y procesamiento del bioplástico analizado, ya que cualquier cambio en las sustancias y cantidad empleadas en la elaboración y las condiciones de procesamiento influyen directamente en sus propiedades.

Conclusiones y/o recomendaciones

Se obtuvieron tres bioplásticos de base biológica utilizando almidón de maíz y el glicerol como plastificante, que mejoró sus propiedades mecánicas con la adición de anhídrido maleico (M2) y policaprolactona (M3). Los tres bioplásticos mostraron buena procesabilidad por extrusión de doble husillo a las condiciones propuestas. La biodegradabilidad primaria alcanzada en los bioplásticos, en medio acuoso, a los 28 días de contacto, fue mayor al 30 %. Sin embargo, la permeación al agua sobrepasó al 60 % para los tres bioplásticos, por lo cual se plantea continuar con los estudios para mejorar esta propiedad y, además, evaluar la biodegradabilidad bajo condiciones de composteo y realizar pruebas de ecotoxicidad en el crecimiento de plantas.

Agradecimientos

Los autores agradecen al CIATEC A.C. y a la Universidad de Guanajuato por el apoyo brindado para el desarrollo de este trabajo.

Referencias

- [1] J. Ru, Y. Huo and Y. Yang. "Microbial degradation and valorization of plastic wastes", *Front. Microbiol*, vol. 11, no. 442, pp. 1-20, 2020. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00442>
- [2] A.K. Khan and T. Majeed. "Biodegradation of synthetic and natural plastics by microorganisms: a mini review", *Journal of Natural and Applied Sciences Pakistan*, Vol. 1, No. 2, pp. 180-184, 2019.
- [3] T. Ahmed, M. Shahid, F. Azeem, I. Rasul, A. Shah, M. Noman, A. Hameed, N. Manzoor, I. Manzoor and S. Muhammad. "Biodegradation of plastic: current scenario and future prospects for environmental safety", *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 25, no. 1, pp. 7287-7298, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1234-9>
- [4] F. Portillo, O. Yashchuk and É. Hermida. "Evaluation of the rate of abiotic and biotic degradation of oxo-degradable polyethylene". *Polymer Testing*, vol. 53, pp. 58-69, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.04.022>
- [5] T.F. Garrison, A. Murawski and R.L. Quirino. "Bio-based polymers with potential for biodegradability", *Polymers*, vol. 8, no. 7, pp. 262, 2016. <https://doi.org/10.3390/polym8070262>
- [6] F.M. Lamberti, L.A. Román-Ramírez and J. Wood. "Recycling of bioplastic: routes and benefits", *Journal of polymers and the Environmental*, vol. 28, no. 10, pp. 2551-2571, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01795-8>
- [7] I.S. Sidek, S.F.S. Draman, S.R.S. Abdullah and N. Anuar. "Current development on bioplastic and its future prospects: an introductory review", *INWASCON Tech Mag*, vol. 1, pp. 03-08, 2019. <http://doi.org/10.26480/itechmag.01.2019.03.08>

- [8] S. Kubowicz and A.M. Booth. "Biodegradability of plastics: challenges and misconceptions", *Environmental Science and Technology*, vol. 51, no. 21, pp. 12058-12060, 2017. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b04051>
- [9] A.K. Delgado-Villaseñor y M. Maldonado-Santoyo. "Circularidad para los plásticos: Reciclado post-uso vs fabricación de plásticos biodegradables", *Revista Electrónica de Divulgación de la Investigación*, no. 21, pp. 60-70, 2021.
- [10] OCDE Environment Policy. "Improving plastics management: trends, policy responses and the role of international co-operation and trade". Background report. 2018. Disponible en: https://read.oecd-ilibrary.org/environment/improving-plasticsmanagement_c5f7c448-en#page1
- [11] J.A. Schrader, K.G. McCabe, D. Grewell and W.R. Graves. "Bioplastics and biocomposites for sustainable horticulture containers: performance and biodegradation in home compost", *Acta Horti*, vol. 1170, pp. 1101-1108, 2017. Doi: 10.17660/ActaHort.2017.1170.142
- [12] S. Bahadur, S. Pradhan, S. Verma, R. Maurya, and S.K. Verma. "Role of plastic mulch in soil health and crop productivity" in *Climate change and its implications on crop production and food security*. Mahima publications, Varanasi, India: Editores: Rao, R.K., Sharma, P.K., Jirli, B. and Raghuraman, M., 2018, pp. 338-344. ISBN: 978-81-926935-4-5
- [13] S. Kasirajan and N. Ngouajio. "Polyethylene and biodegradable mulches for agricultural applications: a review", *Agronomy for sustainable development*, vol. 32, pp. 501-529, 2012. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0068-3>
- [14] G.C. Silva, F.M. Galleguillos, D. Hernández, G. Pincheira, A.K. Peralta, M. Urrestarazu, V. Vergara-Carmona and F. Fuentes-Peñailillo. "Microplastics and Their Effect in Horticultural Crops: Food Safety and Plant Stress", *Agronomy*, vol. 11, no. 8, pp. 1528-1545, 2021. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081528>
- [15] S. Kumar and K. Thakur. "Bioplastic-classification, production and their potential food applications", *Journal of Hill Agriculture*, vol. 8, no. 2, pp. 1128-129, 2017. Doi: HYPERLINK "<http://dx.doi.org/10.5958/2230-7338.2017.00024.6>"10.5958/2230-7338.2017.00024.6
- [16] M. Rubio-Anaya y J.A. Guerrero-Beltrán. "Polímeros utilizados para la elaboración de películas biodegradables", *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, vol. 6, no. 2, pp. 173-181, 2012.
- [17] L.J. Rodríguez, W.A. Sarache and C.E. Orrego. "Compuestos de poliéster reforzados con fibra de plátano/banano (*musa paradisiaca*) modificada químicamente. Comparación con fibra de vidrio y fique (*furcraea andina*)", *Información Tecnológica*, vol. 25, no. 5, pp. 27-34, 2014. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7376925>
- [18] H.S. Villada, H.A. Acosta y R.J. Velasco. "Investigación de almidones termoplásticos, precursores de productos biodegradables", *Información Tecnológica*, vol. 19, no. 2, pp. 3-14, 2008. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642008000200002>
- [19] M. Nevoralová, M., Koutný, A. Ujcic, Z. Starý, I. Šerá, H. Vlková, M. Šlouf, I. Fortelný and Z. Kruliš. "Structure Characterization and Biodegradation Rate of Poly(ϵ -caprolactone)/Starch Blends", *Front. Mater*, vol. 7, pp. 141, 2020 Doi: 10.3389/fmats.2020.00141
- [20] A.J. Barrios, S. García, R. Manríquez-González, J.J. Rivera y M.G. Lomelí. "Compósitos biodegradables elaborados a partir de almidón termoplástico y partículas de madera de fresno", *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, vol. 6, no. 28, pp. 26-41, 2015. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-11322015000200003&script=sci_arttext
- [21] G. León-Méndez, D. León-Méndez, M.R. Monroy-Arellano, S. Espriella-Angarita y A. Herrera-Barros. "Modificación química de almidones mediante reacciones de esterificación y su potencial uso en la industria cosmética", *Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica*, vol. 39, no. 5, pp. 620-629, 2020. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4263365>
- [22] R. Shi, Z. Zhang, Q. Liu, Y. Han, L. Zhang, D. Chen and W. Tian. "Characterization of citric acid/glycerol coplasticized thermoplastic starch prepared by melt blending", *Carbohydrate polymers*, vol. 69, no. 2, pp. 748-755, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.02.010>
- [23] W. Brooke Zhao. "Starch" in *Polymer Data Handbook*. Editor: James E. Mark, University of Cincinnati, USA: Published by Oxford University Press, 1999, pp. 975-979
- [24] A.A. Ledesma-Ugasiña, V.M. Dalgo-Flores, L.M. Flores-Fiallos y G.C. Chango-Lescano. "Bioplásticos de almidón de maíz y quinoa para uso como envolturas alimenticias biodegradables", *Dom. Cien.*, vol. 7, no. 4, pp. 39-56, 2021. Doi: <http://dx.doi.org/10.23857/dc.v7i4.2080>
- [25] O.O. Oluwasina, B. P. Akinyele, S.J. Olusegun, O.O. Oluwasina and N.D.S. Mohallem. "Evaluation of the effects of additives on the properties of starch-based bioplastic film", *SN Applied Sciences*, vol. 3, pp. 421, 2021. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04433-7>

- [26] E. Jalalvandi, R.A. Majid and T. Ghanbari. "Processing, morphological, thermal and absorption behavior of PLA/thermoplastic starch/montmorillonite nanocomposites". *International Journal of material and Metallurgical Engineering*, vol. 6, no. 12, pp.1128-1132, 2012. HYPERLINK "<https://doi.org/10.5281/zenodo.1080654>"doi. org/10.5281/zenodo.1080654
- [27] V.A. Alvarez and A. Vázquez. "Thermal degradation of cellulose derivatives/starch blends and sisal fibre biocomposites", *Polymer Degradation and Stability*, vol. 84, no. 1, pp. 13-21, 2004. Doi: 101016/j.polymdegradstab.2003.09.003
- [28] P. Meza, L. Quipuzco y V. Meza. "Elaboración de bioplásticos y determinación de su biodegradabilidad-Proyecto de laboratorio", *Rev. del Instituto de Investigación FIGMMG-UNMSM*, vol. 22, no. 43, pp. 67-80, 2019. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v22i43.16691>
- [29] K. Ezzeroug, N. Moulai-Mostefa and A. Hadjsadok. "Rheology, dynamic light scattering and physicochemical characterization of octenyl succinic anhydride (OSA) modified starch in aqueous solutions", *Journal. of Food Science Technology*, vol. 55, no. 11, pp. 4485-4491, 2018. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3377-6>

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Aplicación de pigmentos de Hibiscus sabdariffa L. en estampación textil

Application of Hibiscus sabdariffa L. pigments in textile printing

Carmen Elena Menjívar-Benítez¹, Milton Alejandro Ramírez-Aguirre², Freddy González-Zamora³


Fecha de recepción: 30 de setiembre, 2024


Fecha de aprobación: 8 de enero, 2025

Menjívar-Benítez, C.E.; Ramírez-Aguirre, M.A; González-Zamora, F. Aplicación de pigmentos de hibiscus sabdariffa l. En estampación textil. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 3. Julio-Setiembre, 2025. Pág. 14-25.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i3.7258>

1 Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, Departamento de Ingeniería de Procesos y Ciencias Ambientales. El Salvador.

 cmenjivar@uca.edu.sv


 <https://orcid.org/0000-0002-4540-5306>

2 Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, Maestría en Ingeniería de la Producción. El Salvador.

 00018309@uca.edu.sv

 <https://orcid.org/0009-0000-0306-5334>

3 Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, Departamento de Ingeniería de Procesos y Ciencias Ambientales. El Salvador.

 fgonzalez@uca.edu.sv

 <https://orcid.org/0000-0001-9702-4137>

Palabras clave

Extracción; estampado; caracterización cromática; solidez.

Resumen

Como una respuesta innovadora a los retos medioambientales y de desabastecimiento de materias primas que afronta la industria textil latinoamericana en la actualidad, se realizó la evaluación de los pigmentos extraídos de la flor de Jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.) como una alternativa para la fabricación de productos textiles estampados. Para la extracción de los pigmentos, se hizo pruebas con agua y con soluciones etanol:agua de 50%, 60%, 70%, 80% y 90% en volumen. A los resultados obtenidos, se les realizó un análisis ANOVA, encontrándose que no había diferencia significativa entre la extracción con agua y con las soluciones. El agua se seleccionó como solvente extractor por su conveniencia y compatibilidad para luego realizar el proceso de estampado, donde se realizó la caracterización cromática, encontrándose coincidencia de color con el Pantone 17-1510 TPG. Para evaluar la calidad del estampado, se realizó la comparación entre la solidez al frote, al lavado y a la luz, del estampado con flor de Jamaica y otro estampado del mismo color, el cual fue desarrollado con pigmentos sintéticos. Los resultados obtenidos indicaron que las estampaciones realizadas con flor de Jamaica tienen valores aceptables de solidez al frote y al lavado, sin embargo, los pigmentos sintéticos permiten estampados de mejor calidad.

Keywords

Extraction; printed; chromatic characterization; colorfastness.

Abstract

As an innovative response to the environmental challenges and shortage of raw materials currently facing the Latin American textile industry, the evaluation of pigments extracted from the Jamaica flower (*Hibiscus sabdariffa* L.) was carried out as an alternative for the manufacture of printed textile products. To extract the pigments, tests were carried out with water and with ethanol:water solutions of 50%, 60%, 70%, 80% and 90% by volume. An ANOVA analysis was performed on the results obtained, finding that there was no significant difference between the extraction with water and with the solutions. Water was selected as the extracting solvent for its convenience and compatibility to then carry out the stamping process, where the chromatic characterization was carried out, finding a color match with Pantone 17-1510 TPG. To evaluate the quality of the print, a comparison was made between the rubbing, washing and light fastness of the Jamaican flower print and another print of the same color, which was developed with synthetic pigments. The results obtained indicated that the prints made with Jamaica flower have acceptable values of fastness to rubbing and washing, however, synthetic pigments allow better quality prints.

Introducción

Desde la prehistoria, el ser humano ha buscado la forma de enriquecer la vestimenta a través de extracción de tintes y estampados en telas. En la actualidad, las prendas de vestir no solo cumplen su función básica, sino que se han convertido en un medio de comunicación y representación [1]. A medida que la globalización adquirió escalas inimaginables, una de las realidades que golpea la industria textil es el sobre consumo de ropa y accesorios con

obsolescencia programada, que lleva a la utilización de mayores cantidades de materia prima para la producción de prendas, conduciendo hacia problemas de sostenibilidad en todos los sentidos[2].

Lo anterior implica que la industria textil debe optimizar sus procesos, empleando principios científicos que guíen hacia la eficiencia, basándose en la cuantificación de datos y el uso de métodos y productos innovadores que comulguen con la sostenibilidad; por tal motivo, la industria textil lleva a cabo diversas investigaciones[3], [4], [5], [6] y estudios continuos de los procesos y materias primas para un acabado textil acorde a las exigencias del consumidor final; la pigmentación es uno de los principales intereses de la industria, ya que genera valor agregado al producto final, y es una característica clave para el desarrollo de la competitividad en el negocio textil [7], [8].

Los materiales utilizados para la coloración de textiles se dividen en pigmentos y colorantes. Los pigmentos son sustancias de moléculas grandes (entre 100 y 1,000 nm), prácticamente insolubles en el medio en que se aplican, por lo que se depositan sobre la superficie de las fibras textiles con la ayuda de una sustancia que actúe como ligante [9]. Casi todos los pigmentos y colorantes empleados en la industria textil se encuentran clasificadas en el Colour Index (C.I.), la cual es una base de datos única y definitiva, utilizada a nivel mundial, donde se encuentra el nombre común y las variantes comerciales registradas para ambas sustancias[10].

La búsqueda de materias primas, en este caso pigmentos orgánicos capaces de adaptarse a una industria tan exigente y volátil, requiere estudios especializados, adaptando y verificando métodos convencionales que garanticen la eficiencia y eficacia de las pigmentaciones en el producto final, donde obtienen relevancia la brillante coloración presentada por los extractos de la flor de Jamaica y su origen natural, proveniente de las antocianinas que son un grupo de pigmentos naturales hidrosolubles, presentes en los extractos celulares de una gran variedad de frutas, hortalizas y flores, responsables de los colores rojo, azul o violeta de estas especies vegetales [11], además se les confiere propiedades antioxidantes, lo que genera un atractivo importante en la industria textil, donde además de ser el color un importante atributo de calidad, actualmente hay una creciente demanda por el uso de pigmentos y colorantes naturales en todo el mundo [8]. En el presente artículo, se describen los resultados de la comparación de la calidad del estampado realizado con pigmentos naturales extraídos de la flor de Jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.) y el estampado realizado con pigmentos sintéticos. La calidad fue evaluada en función de la solidez al frote, al lavado y a la luz, sobre la base de las metodologías de la AATCC (Asociación Americana de Textiles Químicos Coloristas).

Materiales y métodos

Se realizó la extracción y concentración de los pigmentos naturales de la planta *Hibiscus sabdariffa* L., conocida como flor de Jamaica y se elaboró la pasta de estampación que fue aplicada en tejido plano de algodón; seguidamente, se realizó la caracterización cromática del pigmento estampado y finalmente, se evaluó la solidez al frote, al lavado y a la luz. Paralelamente, se realizó la estampación y evaluación de la solidez de un estampado realizado con una mezcla de pigmentos sintéticos que ofrecían la misma coloración del pigmento natural, con el fin de comparar la calidad de ambos estampados.

El proceso de extracción, estampación y verificación de calidad fue llevado a cabo en las instalaciones de Industrias Unidas S.A, (IUSA) localizadas en el kilómetro 11.5, Carretera Panamericana, Ilopango, San Salvador, El Salvador. Para la evaluación y comparación de la estampación de los pigmentos naturales y sintéticos se emplearon los métodos de la AATCC; los análisis estadísticos se realizaron con el software Statgraphics 18.

El estampado fue hecho sobre tela 100% algodón, blanqueada y mercerizada, de tejido plano (ligamento tafetán y peso, 135 g/m²), el número de hilos por pulgada en la dirección de la urdimbre es 126 y en la dirección de la trama es 70. La tela tenía un ancho final de 140 cm (55 pulgadas).

Pasta de estampación y pasta de pigmentos

La pasta de estampación es una mezcla de auxiliares textiles cuya función es permitir la aplicación de los pigmentos a la tela para ser posteriormente fijados por un proceso de curado; este último consiste en secar la tela en un horno por 2 minutos y 15 segundos a 155°C. La pasta es preparada con una elevada viscosidad (entre 4000 y 7000 cP), lo cual permite controlar la velocidad con la que sale del cilindro de estampación; las proporciones de cada componente de la pasta preparada, fueron establecidas de acuerdo con la experiencia de trabajo en IUSA y se presentan con un espesante (sintético de emulsión inversa) con una concentración de 1.9 % (m/m), antiespumante (mezcla de surfactantes, dispersantes y polisiloxanos) de 0.5% (m/m), ligante (dispersión acuosa de resina acrílica) 20.0% (m/m), fijador (resina melanina-formaldehído) 1.5% (m/m), pasta de pigmentos hasta alcanzar la coloración deseada y agua suavizada para completar el 100%.

Los pigmentos naturales se obtuvieron de un polvo fino a partir de los cálices de la flor de Jamaica, los cuales fueron adquiridos en un mercado local. Se realizó una selección cuidadosa, desechando las partes decoloradas, manchadas o deterioradas. Los cálices fueron secados en una estufa hasta humedad constante (45°C, se alcanzó 11.0% de humedad); posteriormente se pasaron por un molino de cuchillas de acero inoxidable a 5000 RPM durante 20 segundos, para luego ser tamizados en una malla 0.5 mm.

La investigación evaluó el rendimiento de la extracción, empleando tanto agua destilada como soluciones de etanol/agua de las siguientes concentraciones en volumen: 90%, 80%, 70%, 60% y 50%. Se mezcló 7.5 g del polvo seco obtenido en la molienda con 300 mL del solvente respectivo; posteriormente, la mezcla se sometió a agitación constante durante 1 hora a temperatura ambiente. La muestra macerada se pasó a través de un filtro de 0.125 mm; el filtrado se colocó en un crisol previamente tarado y se llevó a sequedad. Se obtuvo la masa del sólido resultante de la evaporación. El solvente con el cual se extrajo la mayor masa de sólidos fue seleccionado para realizar las extracciones posteriores, ya que este parámetro se usó como indicativo de una mayor extracción de pigmentos.

Dado que las antocianinas varían de color con el pH, se realizó pruebas variando este parámetro en el extracto preparado con el solvente elegido, con el fin de buscar una paleta de colores adicionales al color característico de la flor de Jamaica. El extracto, originalmente tiene un pH de 2.0. Se preparó tres extractos adicionales, ajustando el pH a 3.0, 5.0 y 9.0. Se eligió aquellos extractos en donde se observó diferencia significativa de coloraciones y se probó la compatibilidad de cada extracto con cada ingrediente de la pasta de estampación. Una vez encontrado el extracto compatible con todos los ingredientes de la pasta, se procedió a preparar suficiente pasta de pigmentos. Para ello, se empleó una relación 1:3 de polvo de los cálices: solvente, se agitó durante 1 hora, se filtró y calentó, hasta que se obtuvo una consistencia similar a la pasta de pigmentos sintéticos utilizada tradicionalmente en IUSA.

La pasta de estampación respectiva se preparó mezclando 57 g de espesante, 15 g de antiespumante, 600 g de ligante, 45 g de fijador, 550 g de pasta de pigmentos y suficiente agua suavizada hasta alcanzar 3000 g. Los ingredientes se mezclaron uno a uno, evitando hacer burbujas de aire. Con el fin de comparar el estampado de pigmentos naturales con pigmentos sintéticos, se preparó 3000 g de pasta de estampación con las mismas proporciones de aditivos.

Proceso de estampación

La pasta de estampación se colocó en los tanques de dosificación de la máquina de pantalla rotativa continua marca Stork RD-2, donde ingresó la tela a 40-45 metros por minuto y se aplicó la pasta a través de rodillos o tamices en las áreas requeridas; posterior a la aplicación de la pasta se realizó un proceso de secado y curado para eliminar humedad y para fijar los pigmentos.

Caracterización cromática del pigmento natural en el estampado

En la industria textil la caracterización de los pigmentos por medio de los parámetros de color del producto final es la base fundamental del control de calidad. Dicha caracterización se realizó comparando visualmente el tono de la tela obtenido contra el sistema de definición cromática o sistema de control de colores más reconocido y utilizado dentro del rubro textil, conocido como Pantone. El resultado fue traducido a los sistemas CIE LAB, RGB y CMYK.

Evaluación de la solidez del estampado

La solidez al frote fue evaluada utilizando el equipo conocido como Crock-O-Meter, siguiendo la metodología AATCC 8 “Ensayo para evaluar la solidez al frote” (Test Method for Colorfastness to Crocking: Crockmeter). La solidez al lavado se realizó siguiendo la metodología AATCC 61 “Ensayo acelerado para la evaluar la solidez al lavado” (Test Method for Colorfastness to Laundering: Accelerated). La solidez a la exposición a la luz se hizo con la metodología AATCC 16 “Ensayo para la evaluar la solidez a luz” (Test Method for Colorfastness to Light).

El análisis es llevado a cabo de forma visual por un “ojo experto”, a una condición de “luz de día” (iluminante D65). Se compara qué tan diferente son los colores de antes y después del ensayo y se establece el valor para dicha diferencia. En ambas escalas, la calificación va de 1 a 5 en intervalos de 0.5. Si no hay contraste, se califica como 5 (solidez excelente) y si hay un gran contraste, se califica como 1 (solidez muy baja). De acuerdo con lo expresado por los ingenieros de IUSA, sus clientes dan por aceptado un mínimo de 3 para solidez al frote en seco, un mínimo de 2 para solidez al frote en húmedo (solo se usa escala de transferencia) y un mínimo de 3 para solidez al lavado (para ambas escalas). En cuanto a la solidez a la luz, no se tiene un valor mínimo aceptado, ya que la tela no será usada para ser expuesta a la luz solar.

Resultados

Pasta de estampación y pasta de pigmentos

En el cuadro 1., se muestra los resultados del porcentaje de sólidos extraídos con los diferentes solventes, Comparando los promedios de las tres réplicas para cada concentración de solvente, se puede inferir que los pigmentos de la flor de Jamaica presentan una mejor afinidad con el agua en primer lugar (63.29%), seguido muy de cerca por las soluciones de etanol de 50% y 60%. En último lugar, se tiene la solución alcohólica al 90% con un rendimiento del 48.22%.

Cuadro 1. Porcentaje de sólidos totales de los extractos de flor de Jamaica con diferentes solventes.

Solventes	Soluciones de etanol: agua (%v/v)					Agua
	90%	80%	70%	60%	50%	
Réplica 1	47.73%	54.67%	57.33%	61.07%	62.27%	65.60%
Réplica 2	46.93%	55.73%	61.20%	61.73%	62.53%	62.13%
Réplica 3	50.00%	55.20%	60.40%	61.33%	62.27%	62.13%
Promedio	48.22%	55.20%	59.64%	61.38%	62.36%	63.29%
Desv Std	1.59	0.53	2.04	0.33	0.15	2.00
Coef Var	3.30%	0.96%	3.43%	0.54%	0.24%	3.17%

Realizando un análisis ANOVA entre las diferentes soluciones de extracción, se puede afirmar con un valor-P de la prueba-F es menor que 0.05, que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las extracciones de 90% y 80%, no obstante, no hay evidencia significativa que las extracciones del 70%, 60%, 50% sean diferentes a la extracción con agua; teniendo en consideración que esta última extracción emplea un solvente más amigable con el ambiente y de menor costo, se decidió emplear el agua para realizar la extracción. La diferencia entre las medias se presenta en la Figura 1.

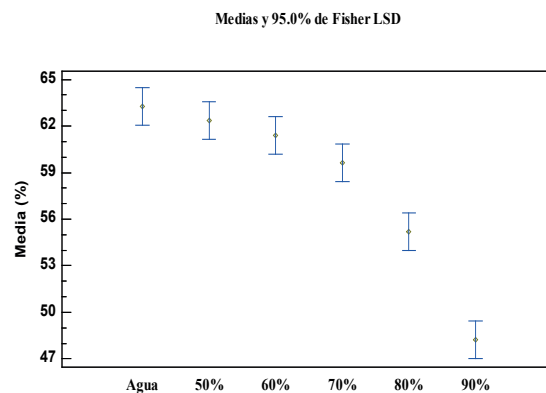


Figura 1. Diferencia entre las medias empleando distintos disolventes.

La extracción del pigmento de la flor de Jamaica requiere que el polvo fino obtenido sea macerado en un solvente apropiado. En la investigación de Nwuzor et al. [12] se reporta una extracción máxima del pigmento de 68.16%, empleando etanol 99.8% como solvente. En la investigación de Paez-Cartaya et al. [13] se logró extraer un máximo de 82.34% de las antocianinas contenidas en los cálices de la flor de Jamaica, empleando una relación 1:5 sólido: disolvente, siendo este último, una solución de etanol 40% v/v a una temperatura de 60°C; también se obtuvo una extracción del 76.60% con la misma relación sólido: disolvente, cuando este último fue agua destilada a 40°C. En otras investigaciones, la extracción se llevó a cabo empleando una relación 1: 25 material crudo: agua destilada, a pH 3; y relaciones 1:100, 2:100 y 4:100 sólido: agua, encontrándose una mejor extracción de antocianinas en la relación 2:100 con agua hirviendo durante 5 minutos [14], [15].

Se preparó cuatro extractos acuosos a los cuales se les modificó el pH, con el fin de observar las coloraciones, las cuales se presentan en la Figura 2.

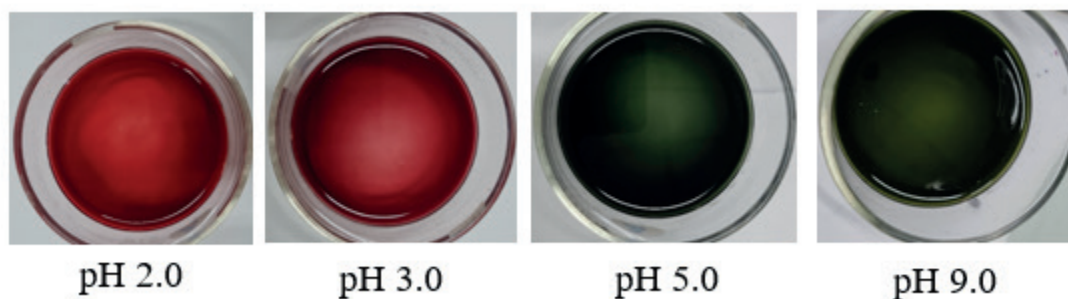


Figura 2. Coloraciones de los extractos acuosos a diferentes valores de pH.

Como puede observarse, la coloración del extracto de pH 5.0, no presentaba una variación apreciable en el color, con respecto al extracto de pH 9.0, por lo que las pruebas de compatibilidad se llevaron a cabo con el extracto original, con el de pH 3.0 y el de pH 5.0. Cada extracto fue mezclado por separado con cada ingrediente (ligante, espesante, antiespumante y fijador) y se dejaron reposando por 1 hora. Se observó que al mezclar el espesante con los extractos de pH modificado se obtenían viscosidades muy elevadas y grumos. Por lo que se estimó que las pastas de estampación podrían tapar los rodillos, generando mala calidad del estampado. En el cuadro 2 se resume las pruebas de compatibilidad realizadas.

Cuadro 2. Resumen de evaluación de compatibilidad de los extractos.

Extracto/ Solvente	Productos de pasta de estampación			
	Ligante	Espesante	Antiespumante	Fijador
Agua (sin modificar el pH)	O	O	O	O
Agua pH 3.0	O	X	O	O
Agua pH 5.0	O	X	O	O

Nota: O: compatible; X: genera problemas.

Proceso de estampación

En la primera prueba, se realizó un estampado de un solo color y en la segunda, un diseño multifloral. En la Figura 3 se muestra el estampado con ambas pastas, en un diseño de un solo color.



Figura 3. Comparativo de estampación para la primera prueba. A: Pigmentos Flor de Jamaica; B: Pigmentos convencionales.

Para la segunda prueba, se preparó una pasta con el extracto de flor de Jamaica para las flores violetas grisáceas y otras pastas con pigmentos sintéticos para las coloraciones amarillas, rosas y naranjas. En este caso también se realizó una estampación empleando únicamente pigmentos sintéticos. En la Figura 4 se muestra un comparativo entre ambas estampaciones.



Figura 4. Comparativo de estampación para la segunda prueba. A: Pigmentos Flor de Jamaica; B: Pigmentos sintéticos.

Caracterización cromática del pigmento natural en el estampado

Al producto estampado se le realizó una comparación visual contra el sistema de definición cromática o sistema de control de colores más reconocido y utilizado dentro del rubro textil, conocido como Pantone. En la Figura 5 se muestra la comparación del pigmento estampado contra la paleta de colores Pantone.



Figura 5. Comparación del color del pigmento estampado, contra el sistema Pantone.

Se observa en la comparación presentada, existe una coincidencia con el Pantone 17-1510 TPG Antler, con lo que pueden traducirse a otros sistemas de clasificación de color como el CIE LAB (L^* : 53.35; a^* : 8.81; b^* : 5.11), RGB (R: rojo 146; G: verde 122; B: azul 119) o CMYK (Cian: 42%; Magenta: 50%; Amarillo: 47%; Negro: 8%) [16]. Los parámetros representados en los sistemas de color del pigmento natural indican que el proceso de extracción y estampado pueden originar un producto estándar y de alto valor comercial como nueva fuente del sistema de producción de esta industria.

Evaluación de la solidez del estampado

La solidez del estampado con pigmentos naturales es menor que la de los pigmentos sintéticos. El valor presentado por el pigmento de flor de Jamaica es considerado aceptable en el mercado, donde generalmente se admite 3 o más para frote seco y 2 o más para frote húmedo. Los resultados de la solidez al lavado, empleando la escala de transferencia, se presentan en el cuadro 3 y con la escala de cambio de color, en el cuadro 4.

Cuadro 3. Resultados de solidez al lavado, con la escala de transferencia.

Diseño Acetato		Escala de transferencia para AATCC 61 2A					
		Poliéster	Nylon	Acrílico	Lana	Algodón	
Prueba 1	PFJ	5	5	5	5	5	4-5
	PS	5	5	5	5	5	4-5
Prueba 2	PFJ+ PS	5	4-5	5	5	5	4-5
	PS	5	4-5	5	5	5	4-5

PFJ: Pigmentos de Flor de Jamaica; PS: Pigmentos Sintéticos

Los resultados de la escala de transferencia no muestran diferencias entre los diseños en ambas pruebas, es decir, ambos estampados presentan una solidez muy buena, ya que se encuentra arriba de 3, que es el valor mínimo aceptado. Puede verse que la solidez a la luz es menor en el estampado con pigmentos de flor de Jamaica que en el de pigmentos sintéticos, de igual característica con la solidez al frote seco y húmedo. Aunque en este caso, no hay un valor mínimo establecido (Cuadro 4).

Cuadro 4. Resultados de solidez al lavado y a la luz, con la escala de cambio de color.

Diseño Solidez al lavado		Escala de cambio de color AATCC 61		Escala de transferencia para AATCC 8	
		Solidez a la luz	Solidez al frote Seco	Solidez al frote Húmedo	
Prueba 1	PFJ	3-2	1	4	3
	PS	5	4	4	4
Prueba 2	PFJ + PS	3-2	3-2	4	3-2
	PS	5	4	4-5	3-4

PFJ: Pigmentos de Flor de Jamaica; PS: Pigmentos Sintéticos

Los resultados con esta escala comprueban nuevamente la solidez al lavado de los pigmentos sintéticos es excelente, mientras que la solidez del pigmento natural es menor, e incluso, se encuentra por debajo del mínimo aceptado en el mercado, donde generalmente se admite 3 o más. En la Figura 6 se muestran los estampados antes y después del lavado. Se observa de manera apreciable la pérdida del color del estampado con pigmentos de flor de Jamaica, mientras que, en el estampado con pigmentos sintéticos, la pérdida de color no es notoria.



A: Pigmento de flor de Jamaica + pigmentos sintéticos antes del lavado



B: Pigmento de flor de Jamaica + pigmentos sintéticos después del lavado



C: Pigmento sintéticos antes del lavado



D: Pigmento sintéticos después del lavado

Figura 6. Inspección visual del estampado después del lavado.

Conclusiones

A pesar de que tanto el agua como las soluciones de etanol utilizados para la extracción de los pigmentos de la flor de Jamaica tuvieron rendimientos de alrededor del 50%, es posible concluir que el proceso utilizando agua es mucho más eficiente en cuanto al porcentaje de extracto obtenido, debido a que dicho proceso retiró un promedio de 63.29% en masa de la materia orgánica de las flores de Jamaica secas, por tanto, es posible deducir que para efectos de simplificación de proceso y disponibilidad del solvente, la extracción con agua es la alternativa más conveniente.

En un proceso de producción, los parámetros de compatibilidad entre los diferentes productos químicos utilizados son importantes, ya que definen el comportamiento durante las etapas de estampación de productos textiles, por lo que la interacción durante la mezcla de los pigmentos de Jamaica y los demás aditivos (ligante, espesante, antiespumante y fijador), en la formulación de la pasta de estampación, juegan un papel importante, ya que de ellos depende la factibilidad de la operación. Se encontró que el espesante no era compatible con los extractos acuosos con pH modificado, ya que formó pastas con viscosidad muy elevadas y grumos, las cuales podrían obstruir los rodillos de estampación. Fue la pasta preparada con el extracto al cual no se le modificó el pH la que presentó compatibilidad con el espesante y el resto de los aditivos.

Como resultado de la revisión visual del color estampado se pudo clasificar de acuerdo con el sistema de control de colores Pantone y fue luego traducido a otras escalas de color. Los pigmentos de la flor de Jamaica obtuvieron una coincidencia de color con el Pantone 17-1510 TPG Antler. El color expresado en las coordenadas cromáticas CIE $L^*a^*b^*$ fue: $L^*=53.35$; $a^*=8.81$ y $b^*=5.11$. En el sistema RGB, el color del estampado se expresa como R 146, G 122 y B 119. En el sistema CMYK, el color corresponde a Cian 42%, Magenta 50%, Amarillo 47% y Negro 8%.

La verificación de la solidez al frote según el método de ensayo AATCC 8, determinó que para el estampado con flor de Jamaica tiene un valor de 4 para el ensayo en seco y 2-3 para el ensayo húmedo; mientras que los pigmentos sintéticos obtuvieron 4-5 y 3-4 respectivamente. La estampación con flor de Jamaica presenta una solidez al frote menor que a la obtenida con pigmentos convencionales. Aun así, el valor presentado por el pigmento de flor de Jamaica es considerado aceptable en el mercado. En el ensayo de solidez al lavado AATCC 61, tanto la estampación con flor de Jamaica como la de pigmentos sintéticos presentaron una nota de 4-5 para todas las fibras en la escala de transferencia, indicando que no hay transferencias de color a otras telas adyacentes durante el lavado; por otro lado, la escala de cambio de color indica que la estampación con flor de Jamaica tiene una calificación de 2-3 y refleja desgaste durante el lavado, mientras que la estampación con pigmentos sintéticos convencionales es de 5 y no se observaron cambios durante el lavado, por lo que la estampación con flor de Jamaica presenta una solidez al lavado menor a la de los pigmentos sintéticos, obteniendo un valor, en la escala de cambio de color, que está por debajo del considerado aceptable. La solidez a luz según el método de ensayo AATCC 16, determinó que los estampados con flor de Jamaica alcanzaron un valor de 1 y de 3-2 respectivamente; mientras que, para los pigmentos sintéticos, se obtuvo un valor de 4 en ambas pruebas. En este caso, no se considera un valor mínimo, ya que la tela no será utilizada para ser expuesta a la luz.

Los resultados obtenidos en los ensayos de este estudio indican que las estampaciones realizadas con pigmentos de flor de Jamaica tienen valores aceptables de solidez al frote, tanto en la escala de transferencia como en la de cambio de color; mientras que para la solidez al lavado presenta valores aceptables en la escala de transferencia, mas no en la escala de cambio de color. En todos los casos, los pigmentos convencionales presentan mejores resultados, por lo que en futuros estudios se recomienda hacer un diseño experimental que incluya el uso de otros aditivos de estampación, para alcanzar o superar los resultados de los pigmentos sintéticos, con el fin de volverse competitivos en el mercado textil.

Referencias

- [1] A. Kramell *et al.*, "Dyes of late Bronze Age textile clothes and accessories from the Yanghai archaeological site, Turfan, China: Determination of the fibers, color analysis and dating," *Quaternary International*, vol. 348, pp. 214–223, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.05.012>.
- [2] M. İ. Bahtiyari, A. E. Körlü, and K. Bilisik, "Bioprocessing of natural textile fibres and clothes," in *Fundamentals of Natural Fibres and Textiles*, Elsevier, 2021, pp. 221–262.
- [3] Y. Yin, J. Jia, T. Wang, and C. Wang, "Optimization of natural anthocyanin efficient extracting from purple sweet potato for silk fabric dyeing," *J Clean Prod*, vol. 149, pp. 673–679, 2017.
- [4] N. Shen *et al.*, "Natural edible pigments: A comprehensive review of resource, chemical classification, biosynthesis pathway, separated methods and application," *Food Chem*, vol. 403, p. 134422, 2023.
- [5] F. Nazir, S. Javed, A. Nazir, T. Hussain, and S. Abid, "Natural plant extract-treated bioactive textiles for wound healing," in *Medical textiles from natural resources*, Elsevier, 2022, pp. 137–166.
- [6] R. Mansour and H. Ben Ali, "Exploring chitosan as an ecofriendly agent to improve sustainable dyeing properties of cotton fabric dyed with (*Opuntia Ficus-Indica* L) fruit peel and its UV protection activity," *Journal of Natural Fibers*, vol. 20, no. 1, p. 2134263, 2023.
- [7] C. Costa, N. Azoia, C. Silva, and E. Marques, "Textile industry in a changing world: Challenges of sustainable development," *U. Porto Journal of Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 86–97, 2020.
- [8] P. Quesado, S. Marques, R. Silva, and A. Ribeiro, "The balanced scorecard as a strategic management tool in the textile sector," *Adm Sci*, vol. 12, no. 1, p. 38, 2022.
- [9] E. J. Gilabert Pérez, "Química textil. Tomo I: materias textiles," *Colección Académica*, 2020.
- [10] "Welcome to the Colour Index | Colour Index." Accessed: Jun. 03, 2024. [Online]. Available: <https://colour-index.com/>
- [11] S. Badui Dergal, *Química de los alimentos*. México, Pearson Educación, 2016.

- [12] I. C. Nwuzor, B. J. Adinoyi, C. F. Okey-Onyesolu, and H. C. Oyeoka, "Hibiscus sabdariffa natural dye extraction process with central composite design for optimal extract yield," *Sustainable Chemistry for the Environment*, vol. 2, p. 100008, 2023.
- [13] I. Paez-Cartaya, J. L. Rodríguez-Sánchez, and L. Cruz-Viera, "Optimización de la extracción de antocianinas de Hibiscus sabdariffa L. y su caracterización cromática: Optimization of extraction of anthocyanins from Hibiscus sabdariffa L. and its chromatic characterization," *Ciencia y Tecnología de Alimentos*, vol. 28, no. 2, pp. 17–21, 2018.
- [14] H. S. Mostafa, "Production of low-tannin Hibiscus sabdariffa tea through D-optimal design optimization of the preparation conditions and the catalytic action of new tannase," *Food Chem X*, vol. 17, p. 100562, 2023.
- [15] H. T. N. Nhon, N. T. D. My, V. N. T. Vi, P. T. K. Lien, N. T. T. Minh, and D. T. A. Dao, "Enhancement of extraction effectiveness and stability of anthocyanin from Hibiscus sabdariffa L.," *J Agric Food Res*, vol. 10, p. 100408, 2022.
- [16] "Convertidor de color gratuito: sRGB, CMYK, LAB, XYZ, HEX y más." Accessed: Jun. 03, 2024. [Online]. Available: <https://www.nixsensor.com/free-color-converter/>

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Proyecto ferroviario David-Panamá: una revisión



David-Panama Railway Project: a review

Aranzazu Berbey-Alvarez¹, Humberto R. Alvarez-Alvarado², Juan De Dios Sanz-Bobi³

Fecha de recepción: 3 de setiembre, 2024
Fecha de aprobación: 18 de diciembre, 2024

Berbey-Alvarez, A; Alvarez-Alvarado, H.R; Sanz-Bobi, J.D.D.
Proyecto ferroviario David-Panamá: una revisión. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 3. Julio-Setiembre, 2025. Pág. 26-44.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i3.7290>

- 1 Universidad Tecnológica de Panamá. Panamá.
 aranzazu.berbey@utp.ac.pa
 <https://orcid.org/0000-0003-4278-5478>
- 2 Universidad Tecnológica de Panamá. Panamá.
 humberto.alvarez@utp.ac.pa
 <https://orcid.org/0000-0002-6206-8268>
- 3 Universidad Politécnica de Madrid. España
 juandedios.sanz@upm.es
 <https://orcid.org/0000-0002-8039-8527>

Palabras clave

Transporte ferroviario; tren David-Panamá; tren centroamericano; FODA y externalidades.

Resumen

Este artículo presenta una revisión del estado de la situación del proyecto ferroviario tren Panamá-David y su conexión con Costa Rica. La metodología corresponde a una revisión documental relativas al tema, análisis FODA del proyecto, identificación de las externalidades del proyecto, análisis de la ruta del tren Paso Canoas (conexión Costa Rica)-David (Chiriquí)-Panamá. Los resultados de estas tres herramientas evidencian la necesidad y potencialidad del proyecto y su vinculación con América Central. Finalmente se presentan las conclusiones.

Keywords

Rail transport; David-Panama train; Central American train; SWOT and externalities.

Abstract

This article presents a review of the status of the Panama-David railway project and its connection with Costa Rica. The methodology corresponds to a documentary review o the topic, SWOT analysis of the project, identification of the externalities of the project, analysis of the Paso Canoas train route (connection Costa Rica)-David (Chiriquí)- Panama. The results of these three tools show the need and potential of the project and its link with Central America. Finally, the conclusions are presented.

Introducción

Panamá tiene una larga tradición de más de un siglo de estudios de transportes[1]. El proyecto ferroviario del tren Chiriquí- Panamá es parte de otros proyectos mucho más amplios como el tren centroamericano-mesoamericano. La tradición inicia con el diseño y construcción del ferrocarril interoceánico en 1850-1855, el tranvía urbano de la Ciudad de Panamá (1893-1913 a 1941), el ferrocarril de Chiriquí (1916-1970) [2][3] [4], [5] [6] [7] [8][9]la renovación y construcción del ferrocarril interoceánico en 1998, la actual red de Metro de Panamá (líneas 1 y 2) y la línea 3 con tecnología monorriel. La etapa de planificación de un proyecto ferroviario comprende la ingeniería conceptual, básica, de detalle y los procesos licitatorios[10]. La ingeniería conceptual se refiere a la demanda de pasajeros[11] y/o mercancías, estudios de expansión, socio ambientales de los territorios o de impacto ambiental [12], estudio de catastro, estudios geotécnicos y de suelo, estudios arqueológicos e identificación de fuentes de financiamientos[13], [14]. La ingeniería básica corresponde a la operación conceptual[15], obras civiles[16], estaciones[17], vías férreas[18], componentes electromecánicos sistemas de accesibilidad[19], material rodante[12], sistemas de telecomunicaciones[20], sistemas de señalización y control de trenes[21], subsistema de ventilación menor y aire acondicionado[22], sistemas de bombeo[23], sistemas de acceso, detección de intrusos, video vigilancia[24], sistemas de cobros de peajes[25]. La ingeniería de detalle corresponde a las siguientes actividades: obras civiles, estaciones[26], vías férreas[27], diseño conceptual geométrico de la línea[28], componentes E&M (Equipamiento Electromecánico), material rodante[12], energía[29], patios y talleres [30] y sistemas contra incendios[31]. Los procesos licitatorios se caracterizan por aquellos relativos a la construcción de obras civiles y vías, de provisión de equipamiento electromecánico y de provisión de material rodante (trenes).

Estado del arte y contexto del proyecto

El proyecto ferroviario tren de Chiriquí a la Panamá y su vinculación con el tren centroamericano y el tren mesoamericano y la logística de Centroamérica se destacan en: JICA [25],[27]; un actor financiero de estudios ferroviarios de gran importancia regional ha sido el Banco centroamericano de Integración Económica (BCIE) [29], [33], [34]. La Secretaría de integración económica de Centroamérica (SIECA) y el Sica ha realizado estudios en materia de integración en el transporte [25], [28], [35], [36], [37], [38], [39], [49]. El BID [44] y la CEPAL[43] ha cooperado en el desarrollo de estos estudios y existen otros estudios [50],[51]. Las líneas y redes ferroviarias no son nuevos en América central [52]. La extensión a fines de 1951 era de 5,179 km con un tráfico 16 millones de pasajeros y 4 millones de toneladas de carga[53]. De esos 5,179 km, 2,899 Km ó sea el 56%, fueron construidos y son empleados exclusivamente para el servicio de las compañías bananeras [53]. En 1996 el transporte de carga por ferrocarril de Centroamérica representó apenas el 1% del correspondiente al carretero[54]. En 2001, El Salvador y Honduras contaban con servicios de transporte por ferrocarril. En 2005, Sánchez y Wilmsmeier [55], se realizó un diagnóstico en Centroamérica para el sector ferroviario, se concluyó que se requieren inversiones para una nueva red con altos estándares técnicos y con una densidad de tráfico competitiva. En la actualidad existen en operación un total de 121 kilómetros de vías férreas operativas en América Central [47]. Estas vías férreas se encuentran distribuidas en Honduras (carga), Costa Rica (pasajeros, carga) y Panamá (carga y pasajeros) y son utilizadas principalmente para el transporte de carga[56]. En la «X Cumbre de Jefes de Estado y de Gobierno del Mecanismo de Diálogo y Concertación de Tuxtla» [57], a través del Plan Puebla Panamá, en el punto 33: «*Evaluar la viabilidad de la modalidad ferroviaria como alternativa al transporte regional, bajo la coordinación de El Salvador*». De acuerdo con Clemente [10] existe una ola reactivadora de las distintas redes de ferrocarriles en América Latina. SIECA [47] a través del diagnóstico «*Política Marco Regional de Movilidad y Logística y su Plan Maestro*», indicó que América Central no cuenta con líneas ferroviarias regionales, pero existe interés por intervenir en este modo de transporte. Prueba de ello, los países cuentan con iniciativas y oficinas nacionales para el modo ferroviario y el principal desafío o dificultad que se enfrenta en la América Central es «*la invasión del derecho de vía*». Los principales desafíos indicados para el transporte ferroviario en América Central fueron: «*Marcos legales, regulatorios y administrativos obsoletos*»[47]. Por ello, el BCIE y SIECA han elaborado el «*Reglamento sobre especificaciones técnicas generales armonizadas en materia ferroviaria para Centroamérica*»[41][58],[47]. Se identificaron 6 áreas de intervención, siendo estas: «Promover el modo ferroviario regional para el transporte de mercancías y personas, interconectando proyectos ferroviarios a nivel nacional, desarrollar la infraestructura de conexión intermodal, fortalecer la administración de los sistemas ferroviarios en la región, capacitar al personal del sistema ferroviario, relocalizar asentamientos establecidos en vías férreas, *definir mecanismos de financiamiento sostenible en el modo ferroviario*»[47]. El proyecto del tren Panamá-David forma parte un proyecto más extenso, de unir Méjico y Panamá a través de una red de transporte ferroviario para mercancías y pasajeros. El BCIE realizó un diagnóstico de conectividad de proyecto ferroviario y el diseño para la conexión de Centroamérica desde Panamá hasta México[59], para unir las ciudades centroamericanas y sería fundamental en el marco del plan de desarrollo integral promovido por la CEPAL y el Gobierno de Méjico [60]. Este proyecto ferroviario corresponde a un trayecto de 2 mil 500 kilómetros es una distancia razonable y lo suficientemente grande para que el ferrocarril sea viable y se convierta en una variable que impacte el transporte marítimo[61]. Con respecto al proyecto del Tren centroamericano y la planificación de sus respectivos trayectos, «*la mayoría de estos formarán parte del corredor primario para concretar el proyecto del Gran Tren Centroamericano* [62]. Estas iniciativas son: *Tren Eléctrico del Gran Área Metropolitana de San José-Costa Rica* [51], *Tren del Pacífico – El Salvador* [63] *Tren Turístico Carmelitas – El Mirador – Guatemala*, *Tren de*

*Carga de Honduras, Corredor Ferroviario en Guatemala [64] e inclusive la Línea Santo Domingo –Santiago de los Caballeros- República Dominicana [65], esta última, no forma parte del Tren Centroamericano, pero sí de las acciones para que la región y sus países puedan tomar ventaja de ese medio de transporte, especialmente por sus costos competitivos, seguridad, confiabilidad y bajas emisiones de efecto invernadero»[66]. La Cepal concluyó que se pueden generar sinergias con el proyecto de interconexión ferroviaria México-Guatemala [67]. La propuesta del Parlamento Centroamericano (Parlacen) de llevar a cabo un proyecto ferroviario que conecte México y Panamá es promovida el SIECA, COMIECO y COMITRÁN [67] y el desarrollo de una Normativa Común Centroamericana sobre Especificaciones Técnicas Generales Armonizadas en Materia Ferroviaria para Centroamérica[62]. Las ventajas que tiene el proyecto del Tren centroamericano corresponden a una serie de externalidades positivas en el ámbito socioeconómico, ambiental, energético y de educación superior, tales como: la reducción de las emisiones de dióxido carbono, disminuir el congestionamiento vial, los accidentes viales y lograr un beneficio social para los centroamericanos [42], a través de la descarbonización de la economía. También el incremento en la competitividad económica del entorno, mejoras en la calidad de vida de los habitantes y una disminución en la contaminación atmosférica [51]. CECOM [68] [69] presentó un diagnóstico económico para la provincia de Chiriquí, indicando que un proyecto ferroviario entre la ciudad de Panamá y Chiriquí sería una alternativa nodal que impulsaría las comunicaciones internas y el comercio exterior de país [68]. También la extensión con el sector de Paso Canoas (Costa Rica) se indica, con su consecuente expansión hacia Centroamérica permitiendo la oportunidad de desarrollo para la logística del Panamá y la región [68]. El Ferrocarril de Chiriquí tuvo un valor estratégico para la defensa del país durante la construcción del Canal de Panamá, ya que transporto materiales y suministros desde el Pacífico para la construcción del canal en el Atlántico[5]. Recientemente, un estudio de factibilidad técnica de un ferrocarril que conecte las ciudades de David y Panamá fue financiado por el gobierno de China mediante un memorándum de entendimiento en 2017 [70] y forma parte de su macroproyecto de la ruta de la seda [71]. Este estudio fue realizado por la empresa *China Railway Design Corporation* (CRDC) y de acuerdo con la hemeroteca de noticias digitales «*fue entregado al gobierno de Panamá en el marzo del año 2019*» [72]. Cabe mencionar este tipo de acciones se hacen con el propósito de lograr que las empresas chinas tengan una mayor conectividad intra e interregional a través de una serie de propuestas de infraestructura [73], [74]. Franco [75], indica que el proyecto ferroviario de pasajeros y carga tendría un costo de 4100 Millones, con una distancia de 391.3 kilómetros [76] en 2.5 horas [77] o 3.5 horas [78]. Dorati *et al.*, [79] indica un costo de 5500 millones. El pasaje costaría 50 dólares [80] y transportaría 11000 pasajeros al día de los 80 mil pasajeros que «*viajan diariamente en buses, aviones y autos particulares en la ruta hacia el interior de la República de Panamá*». Dorati *et al.*, [79] en Crítica [81] indicó que «*el transporte de autobuses mueve anualmente algo más de 800 mil pasajeros entre Panamá y David. Además, desde Paso Canoas (CR) ingresan 204 mil pasajeros y salen 215 mil*». La composición del tren sería de 8 vagones [82], con capacidad para unos 750 pasajeros, con 21 paradas [83] 22 estaciones [82] «*que atravesaría por tierra (303.8 km), túneles (55.1 km) y puentes-viaductos (32.4 km)*»[80] con velocidades de 160 km/h(pasajeros) [79] y 80 km/h(carga) [84]. Las estaciones ferroviarias del tren Panamá David [78], según las noticias digitales de este estudio serían: «*Panamá, Panamá Pacífico, Ciudad Futuro, La Chorrera, Capira, Chame, San Carlos, Río Hato, Antón (solo carga), Penonomé, Nata (solo carga), Aguadulce, Divisa, Santa Rosa (solo carga), Santiago, Soná, Puerto Vidal (solo carga), Tolé, Cerrillos, San Lorenzo y David*». Sin embargo, cabe señalar, que ha sido difícil el acceso a dicho estudio de factibilidad por parte de los autores de este artículo de investigación, previo a la creación de, la Secretaria Nacional del Ferrocarril adscrita al Ministerio de la Presidencia mediante el Decreto N °130 (De miércoles 3 de julio de 2024) [85]. Centroamérica ha realizado estudios de factibilidad y desarrollos de proyectos de transporte ferroviario*

financiados por el Banco Centroamericano de Integración Económica (BCIE) [86] [89] [92] [93] [94] [95] [96] [41] [97] [98] [99] [100] y en el caso de la Metro de Panamá el BCIE ha financiado los estudios de demanda de la línea 5 del metro de Panamá [101]. En la región de América Central, se encuentra una serie de iniciativas de proyectos [32], estudios sobre corredores ferroviarios [32], en Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua y Costa Rica. En este sentido el BCIE ha apoyado inversiones en ferrocarriles tales como: el tren eléctrico de Costa Rica [41], el ferrocarril de carga del Atlántico (TELCA) en Costa Rica, el ferrocarril del Pacífico de El Salvador [63] [102] y el ferrocarril Trans Océánico de Guatemala [66] [103], tren de carga limonense de Costa Rica, línea 1 del metro de Panamá [104],[105], línea 3 del metro de Panamá [106] y otros ferrocarriles en cada país de Centroamérica [42]. Los organismos financieros corresponden a BCIE, Fondo fiduciario de Corea de Sur [107] [108], [39], [109], Banco Europeo de Inversiones [110], la Corporación Andina de Fomento(CAF) [111] [104],[105] entre otros como UBS (Suiza-NY) y su cesionaria Sparc EM SPC, Farallon Capital y su cesionaria Metro Lenders, Imbursa y su cesionaria Metro Trust [100], BID [112] para la línea 2 del metro de Panamá. Sieca [46] recomendó el desarrollo de los marcos legales y regulatorios comunes. Allí se destaca el «Reglamento sobre Especificaciones Técnicas Generales Armonizadas en Materia Ferroviaria para Centroamérica» [58]. Aunque los acuerdos del PARLACEN y SIECA no son vinculantes, es importante indicar que el BCIE, SIECA y Comitram desarrollaron este Reglamento [41] [58] el cual «contiene elementos relacionados con el *diseño, características técnicas, de operación y mantenimiento de proyectos ferroviarios comunes para toda Centroamérica, de aplicación para la construcción y modernización futura de redes que permitan el desarrollo armonizado de los proyectos de este tipo de transporte, interoperabilidad y conectividad regional de forma efectiva*»[58], facilitando la operación centroamericana regional y transfronteriza.

Metodología

La metodología consiste en el uso de 3 herramientas: FODA, externalidades y análisis de la ruta del tren Costa Rica (Paso Canoas)-David-Panamá. El FODA se basó en las experiencias: BID[113] y las estimaciones de las externalidades de proyectos ferroviarios en Panamá[114], [115], [116], [117] por parte del grupo de investigación *Panama Railway engineering research group*[118]. Para el análisis de la ruta, de acuerdo con Berbey-Alvarez *et al.*, [119], [120], se realizó una estimación probabilística basada en la clasificación de las estaciones por orden de importancia (estación con correspondencias, terminal de autobuses, carga, conexión a puertos, aeropuertos). Para efectos de esta investigación el nivel de importancia (factibilidad) de las estaciones del proyecto David-Chiriquí se tomaron en cuenta los siguientes criterios de ubicación: Frontera Panamá-Costa Rica (Paso Canoas), Cabeceras de provincias (David, Santiago), Conexiones a Puertos (Puerto de Aguadulce, Puerto de Pedregal, Puerto Barú), conexión con aeropuertos (Aeropuerto de Río Hato, Aeropuerto Enrique Malek (David), conexión con otras líneas ferroviarias existente (Ferrocarril-Panamá Colón), trasbordo con otras líneas ferroviarias de pasajeros (Ciudad del Futuro-Monorriel), conexiones con terminales de autobuses (Terminal Federal Mall, Terminal de Veraguas). Esta estimación se realiza mediante una escala numérica, asignando un número más alto a aquellas estaciones de mayor relevancia con respecto a otras, ya sea por sus actividades de carga portuaria, aeroportuaria, conexiones con terminales de autobuses provinciales de pasajeros, conexiones con límites fronterizos con otros países, etc (Ver cuadro 1).

Cuadro 1. Ponderación de la escala numérica a partir de Berbey-Alvarez[119].

Nodos	Calificación
Puertos, aeropuertos	4
Fronteras con otros países	4
Conexión con otras líneas ferroviarias, en algunos casos trasbordo	4
Centro logísticos de carga terrestres	3
Terminales de camiones de carga	2
Terminales de autobuses con viajes a otras provincias	1
Sin relevancia	0

Resultados y discusión

El FODA se desarrolló con la participación de 3 expertos en materia de ingeniería y transporte ferroviario, logística, identificación y análisis de externalidades y haciendo una revisión de la literatura existente. A continuación, se presenta el cuadro 5 con los resultados del FODA para el proyecto ferroviario del tren Panamá-David-Costa Rica, con el resumen de las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas más relevantes.

Cuadro 2. FODA del proyecto del tren Panamá-David-Costa Rica.

Fortalezas	Oportunidades[113]
Menor consumo energético[113],[56],[121], [122].	Aumento de los empleos de calidad y altamente tecnificados [56].
Promueve la economía verde[113][56][121], [122] [123].	Fortalecimiento y expansión de la red aéreo-ferro-portuaria panameña y regional[113].
Menor y mejor uso de suelo [113].	Mejoramiento de la posición ferroviaria del país y de la región[124].
Menos contaminante [113] [121].	Potencial real que existe en el sector occidental del país[125], [126]y [127] [128].
Menor inversión de las carreteras [113].	Fortalecimiento del Hub humanitario del país.
Contenerización de las mercancías[113].	Actualización de estudios de transporte de carga y pasajeros en Centroamérica [56], [34]
Ahorro en costos de seguridad[56].	Conservación y desarrollo del patrimonio ferroviario cultural del país[129].
Reducción de muertes y accidentes en comparación con la carretera[56].	
Debilidades	Amenazas
Materias de ingeniería ferroviaria.	La corrupción, desvío de fondos, convocatorias amañadas o sobrepagos [130] [131]..
Mayor cantidad y calidad de personal capacitado.	Costos de la energía, aspectos geológicos, sociales y de mercado.
Costos de expropiación de tierras.	Tensión, rivalidad geopolítica entre USA-China[132]
Falta de acceso abierto a estudios previos sobre el proyecto.	

El análisis FODA y las externalidades del proyecto del tren David- Chiriquí tiene conexión, sean estas positivas o negativas [133]. Los tipos de externalidades ferroviarias pueden incluir sociales, económicas, ambientales y energéticas. Estas son las externalidades del proyecto tren Costa Rica (paso Canoas)-David-Santiago- Ciudad de Panamá desde una perspectiva cualitativa.

Externalidades económicas. Aumento de la plusvalía en el entorno urbano y rural interprovincial, gracias a la disminución de los tiempos de viajes interprovinciales y su conexión con la capital de la República y por ende la optimización de la accesibilidad e intermodalidad a zonas de fuerte actividad económica, tanto en las provincias como en la capital de la República. Aumento del empleo directos e indirectos como resultado la construcción, operación, inspecciones y mantenimiento proyecto ferroviario Costa Rica-David- Panamá, gracias al aumento de la fuerza laboral calificada relativa a funciones especializadas en tópicos de ingeniería ferroviaria y afines, lo cual permite el aumento de productividad directa económica en los entornos de las cabeceras de las provincias de Chiriquí, Veraguas, Coclé, Panama. Indirecta: Bocas, Herrera y Los Santos. Atracción turística en áreas de cercanías al proyecto ferroviario David-Panamá. Aumento de la competitividad de exportación de productos panameños, gracias a la mejora de los tiempos de viajes de los productos de exportación a puertos[10].

Externalidades ambientales. Reducción de la congestión vehicular, por descompresión vial[10], lo cual permite la disminución de la contaminación atmosférica, gracias a la reducción de la circulación de los vehículos de motores de combustión interna, reducción de las emisiones de hidrocarburos, dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno[10] y reducción de la contaminación visual por exceso de vehículos, suciedad en las carreteras y animales muertos. Mejoramiento de las condiciones de ruido en áreas cercanas al proyecto ferroviario David- Panamá, mediante la reducción del ruido y vibraciones y el aumento del confort acústico[134]. Descongestionamiento humano en la capital, mejor distribución del talento humano del país.

Externalidades energéticas. Descarbonización de la matriz energética del Estado Panameño y por ende, una mayor autonomía e independencia de los combustibles de origen fósiles. Como bien indica la secretaria nacional de Energía de Panamá, *«las posibilidades del transporte eléctrico ya sea colectivo (Metro o trenes) e individual (carros eléctricos), tendrán influencia en la disminución importaciones futuras de petróleo y, paralelamente, y complementariamente en la generación de electricidad»*[135].

Externalidades sociales. Mejoramiento en las condiciones ambientales de salud pública de los ciudadanos (resfriados, estrés, alergias, enfermedades pulmonares, etc.), gracias a la reducción de la contaminación de los vehículos en la carretera. Mejoramiento en la seguridad de los traslados internos en el país y menor riesgo de accidentes, menor posibilidad de robos) por lo que se mejorar sustancialmente la calidad de servicio en el transporte público prestado para nacionales y turistas de calidad. Mejor manejo y traslado interprovincial de pacientes en el sector salud público y privado, gracias a un acceso al transporte digno a personas con discapacidad, adulto mayor, turistas médicos. Mejoramiento en la calidad de vida de la familia, más tiempo para compartir en familia en actividades interprovincial y la capital.

Ciencia, I+D, Academia. Fortalecimiento de las ingenierías y la creación y actualización de nuevas carreras universitarias gracias al aumento de los entrenamientos en cursos ferroviarios asociados a tópicos sobre mecánica de la vía, electrificación, diseño geométrico, operaciones horarias, control de trenes y seguridad en las universidades nacionales y regionales. Desarrollo de proyectos de I+D+i, investigación en materia de ingeniería, logística y transporte ferroviario y por ende, aparición y aumento de publicaciones científicas en áreas relacionadas con la ingeniería y transporte ferroviario.

Análisis de la ruta del tren Paso Canoas (conexión con Costa Rica)-David- Panamá

Propuesta actual

A continuación, por razones de extensión, se presenta algunos de los escenarios potenciales de la ruta Costa Rica-Ciudad de Panamá. La figura 1 muestra el ruta del proyecto ferroviario tren David-Panamá a partir de [83]. Cabe señalar que hay variaciones en la propuesta de este trazado, ya que en [84], [136] aparece la estación Chiriquí entre las estaciones de David y San Lorenzo, mientras que [137] la estación Chiriquí desaparece por la estación La Gloria y la Estación de Nata desaparece. En [137], la estación Ciudad del Futuro se cambia por la estación Arraiján y la estación final no hace referencia a la Estación Panamá Pacífico sino a la estación Panamá.

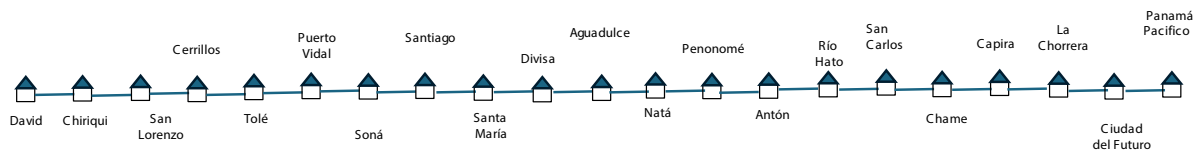


Figura 1. Trazado del tren David-Panamá a partir de [138][83][139].

Caso 1: Esquema básico Fase 1-factible

De acuerdo a la escala numérica presentada en el cuadro 3, las estaciones de David, Santiago, Puerto de Aguadulce (carga), Aeropuerto de Río Hato (pasajeros, carga), Ciudad del futuro (trasbordo con línea del monorriel), Panamá Pacífico (carga y pasajeros) y la de Panamá (conexión Ferrocarril Panamá-Colón) son estaciones críticas, ya que su valor o relevancia es mucho mayor con respecto al resto de las estaciones(La Gloria, Los Cerrillos, Tole, Puerto Vidal, Soná, Santamaría, Penonomé, San Carlos, Chame, La Chorrera, Arraiján) ya sea por sus actividades de carga portuaria, aeroportuaria, conexiones con terminales de autobuses provinciales de pasajeros, conexiones con límites fronterizos con otros países, etc. Este esquema básico responde a la necesidad de construir una primera fase básica factible a partir de la cual puedan irse agregando más estaciones y futuros ramales, es decir, garantiza la construcción y puesta en operación del proyecto ferroviario como polo de desarrollo y expandir la red logística panameña y su correspondiente Hub (Ver figura 2).

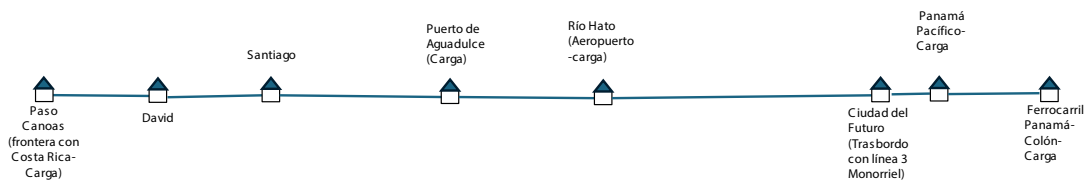


Figura 2. Esquema básico factible. Fase 1.

Cuadro 3. Estaciones prioritarias según casos 1, 2, 3 y 4.

1: calificación caso 1, 2: calificación caso 2, 3: calificación caso 3, 4: calificación caso 4							
Caso 1	1	Caso 2	2	Caso 3	3	Caso 4	4
Paso canoas (Frontera Costa Rica-Panamá)	4	Paso canoas (Frontera Costa Rica-Panamá)	4	Paso canoas (Frontera Costa Rica-Panamá)	4	Paso canoas (Frontera Costa Rica-Panamá)	4
David	4, 1	David 1	4, 1	David 1	4, 1	David 1	4, 1
Santiago	1	David 2	4	David 2	4	David 2	4
Puerto de Aguadulce(carga)	4	Puerto Barú	4	Puerto Barú	4	Puerto Barú	4
Rio Hato	4	Santiago	1	Boquete (ramal norte)	4	Boquete (ramal norte)	4
Ciudad del futuro	4	Puerto de Aguadulce (carga)	4	Cerro punta (ramal norte)	4	Cerro punta (ramal norte)	4
Panamá Pacífico	4,3	Rio Hato	4	Almirante (ramal norte)	4	Almirante (ramal norte)	4
Ferrocarril Panamá-Colon (Estación Panamá)	4,4	Ciudad del futuro	4	Santiago (conexión con Puerto Barú)	1	Santiago (conexión con Puerto Barú)	1
----	----	-----	----	Puerto de Aguadulce (carga)	4	Puerto de Aguadulce (carga)	4
----	----	-----	----	Rio Hato	4	Puerto 1 (ramal sur)	4
----	----	-----	----	Ciudad del futuro	4	Puerto 2 (ramal sur)	4
----	----	-----	----	-----	----	Rio Hato (conexión con puerto de aguadulce)	4
----	----	-----	----	-----	----	Ciudad del futuro	4

Caso 2: Esquema básico Fase 1-factible ampliado

El caso 2 denominado esquema básico fase 1-factible ampliado se deriva del caso 2 (Ver figura 3) con la diferencia de la especificación de la conexión de la vía ferroviaria en la provincia de Chiriquí, es decir, se indica la conexión con 2 estaciones (David 1 y 2). La primera de ellas estaría ubicada en el Centro comercial Federal Mall debido a la capacidad instalada (ya construida) y la disposición de este Centro comercial para ser la Terminal provincial de autobuses. Actualmente, ya existen otras 2 “*pseudoterminales de autobuses en la David*”, pero no reúnen la calidad de servicio de acuerdo con estándares internacionales de primer nivel para el transporte digno de pasajeros. Sin embargo, el Centro comercial Federal Mall cuenta con una sección para autobuses con plataformas adecuadas para el transporte de pasajeros con estándares internacionales. Otra conexión corresponde al Aeropuerto Enrique Malek, lo que potencia este aeropuerto a nivel regional para lograr nuevas conexiones aéreas que beneficiarían las externalidades económicas de la provincia de Chiriquí a través de la actividad turística de calidad y la tercera conexión serían con el proyecto de puerto Barú para fortalecer y expandir la plataforma logística panameña y de la región (Ver figura 3 y cuadro 8).

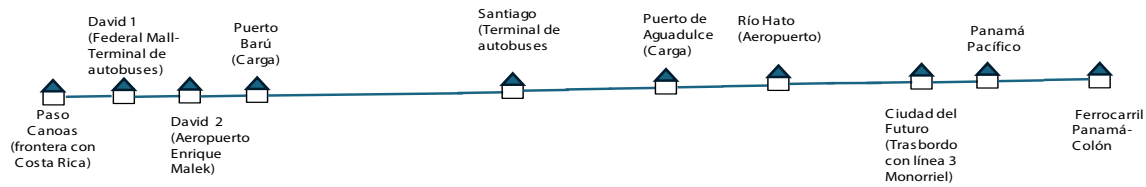


Figura 3. Esquema básico factible. Fase 1.

Caso 3: Esquema factible Fase 2

Esta fase está determinada por la puesta en operaciones del Puerto Barú en Chiriquí, impulsado fuertemente por el CECOM, y corresponde a una inversión privada de USA (Ver figura 4). Entre los argumentos para el diseño, construcción y desarrollo del puerto se encuentra los niveles de tránsitos vehiculares tanto del sector agrícola como el de turismo característicos de la Región Occidental de Panamá, siendo estos más del 80% de todos los productos agroindustriales que se importan y exportan en la República de Panamá. La Ciudad de David es el polo de desarrollo con mayor crecimiento anual en la República de Panamá (crecimiento poblacional y económico en porcentaje). Nuestros vecinos de sur de costa Rica experimentan una desconexión portuaria, lo que hace que se traslade la carga por carretera para salir por Puerto Balboa en Ciudad de Panamá, congestionando la red vial de Panamá. El proyecto puerto Barú permitirá regularizar vía impuestos, servicios de mantenimiento y demás actividades turísticas de los yates privados, mega-yates y mini-cruceros del circuito del Pacífico entre el sur de Costa Rica y el Golfo de Chiriquí[140].



Figura 4. Caso 3. Esquema factible Fase 2. Ramal norte.



Figura 5. Caso 4, Ramal hacia Azuero. Ramal sur.

Caso 4. Esquema Factible. Fase 3

Convendría realizar estudios para un ramal hacia la península de Azuero, el cual tuviese conexiones con los puertos y aeropuertos de las provincias de Herrera y Los Santos (Ver figura 5). La idea del ramal hacia la península de Azuero forma parte de la idea original del tren Chiriquí – Panamá con una ramal hacia esa zona del país[4]. Este proyecto dinamizaría las economías turísticas, hotelera y del sector de la agroindustria de esa zona del país. En un sentido regional, con el apoyo del financiamiento del BCIE, BID, Gobierno de Corea del Sur, Banco Mundial, los gobiernos de América Central han entendido la «*importancia que tienen las infraestructuras y el transporte para la economía, para la movilidad de las personas, de las mercancías y para las empresas*»[10], por lo que estos «están poniendo sus ojos en este tipo de proyectos»[10]. Entre los principales proyectos se encuentran, el Corredor Interoceánico de Guatemala (CIG)[10], el Proyecto Ferroviario México-Panamá[10].

Conclusiones y/o recomendaciones

Este artículo presenta una revisión del proyecto ferroviario del tren David-Panamá y su vinculación con 2 proyectos mucho más extensos que son el tren centroamericano y por ende, el tren mesoamericano. El Banco Centroamericano de Integración Económica (BCIE) trabaja en la actualidad en el desarrollo de una red integral regional de transporte ferroviario en América Central con su conexión con Méjico. Varios organismos de financiamiento internacional tales como el BCIE, el BID y el Banco Mundial han emitidos documentos para el asesoramiento de proyectos ferroviarios en materia de diagnóstico, diseño, construcción, gestión y reforma de líneas ferroviarias para pasajeros y para carga.

El proyecto del tren David-Panamá sería una nueva expansión de los activos logísticos de la República de Panamá para el transporte de carga y pasajeros. Este proyecto generaría externalidades positivas de tipo económicas, sociales, energéticas, ambientales, académicas y culturales entre otros derrames positivos para todo el país permitiendo el fortalecimiento y expansión de la plataforma logística del país y la región. Convendría actualizar los estudios de transporte de carga y pasajeros de toda la región mesoamericana, es decir, desde Méjico a Panamá.

Agradecimientos

Los autores queremos agradecer a la Universidad Tecnológica de Panamá, la Universidad Politécnica de Madrid (España), al BCIE, SIECA, SICA, COMITRAN, BID y CAF por hacer públicos estudios y publicaciones relativas al estado de la situación ferroviaria de América central.

Referencias

- [1] A. Berbey-Alvarez, F. Henríquez, and J. Sanz-Bobi, "UN SIGLO DE ESTUDIOS DE TRANSPORTE EN PANAMÁ: UNA REVISIÓN," in *Conference: XV Congreso iberoamericano de Ingeniería Mecánica*, Universidad Politécnica de Madrid, Ed., Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid, 2023, pp. 231–245. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/368809973_UN_SIGLO_DE_ESTUDIOS_DE_TRANSPORTE_EN_PANAMA_UNA_REVISION
- [2] A. Roy, "Inaguración del ferrocarril de Chiriquí," *Era republicana*.
- [3] C. Rodríguez, "El Ferrocarril Nacional de Chiriquí: proyecto pionero ferroviario en el interior del país," *Proyecto ciudad*.
- [4] J. . Lefevre, "Correspondencia de embajada de Panamá en USA," Gobierno de la República de Panamá. Secretaria de Relaciones Exteriores., Washington DC, USA, p. 1, 1913.
- [5] Ingeniería ferroviaria, "Ferrocarril de chiriquí: historia y legado en panamá," *Historia*.

- [6] República de Panamá, "LEY. 20. N° 20. 1913." Gaceta oficial, Panamá, República de Panamá, p. 5, 1913.
- [7] Wikipedia, "Ferrocarril de Chiriquí," Fundación Wikipedia. Accessed: Jan. 02, 2024. [Online]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Ferrocarril_de_Chiriquí
- [8] El informe de David, "Ferrocarril Nacional de Chiriquí un legado que se perdió en el ayer," Cultura.
- [9] E. Caballero, "El caballo que dejó de galopar," La Estrella de Panamá.
- [10] J. Clemente, "Situación actual de los metros y ferrocarriles de América Latina," *Bol. FAL - Facil. del Transp. y el Comer. en América Lat. y el Caribe*, vol. 326, no. 10, p. 16, 2013, [Online]. Available: http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/36138/FAL_326_es.pdf;jsessionid=420BCF793FBA3E6DA89C80223E3D9BC4?squence=1
- [11] Secretaría del Metro de Panamá, "Estudio de demanda para la línea 1 del sistema de transporte masivo de la ciudad de Panamá. Informe final," Panamá, República de Panamá, 2010. [Online]. Available: <https://www.elmetrodepanama.com/wp-content/uploads/2017/01/Capitulo-6-Anexo.pdf>
- [12] F. British Embassy Colombia, Cundinamarca, "Etapas de factibilidad en proyectos ferroviarios." British Embassy Colombia, Cundinamarca, Findeter, Colombia, pp. 1-129.
- [13] C. Zamorano, J. M. Bigas, and J. Sastre, "Manual de tranvías, metros ligeros y sistemas en plataforma reservada. Diseño, proyecto, financiación e implementación." Consorcio Regional de Transporte de Madrid, Madrid, España, p. 280, 2006.
- [14] C. Zamorano, J. Bigas, and J. Sastre, *Manual para la planificación, financiación e implantación de sistemas de transporte urbano*, Primera. Madrid, España: Comunidad de Madrid, 2004.
- [15] Secretaría del Metro de Panamá, *Ingeniería conceptual. Especificaciones funcionales, técnicas y contractuales TOMO II.- Equipamientos. II.o normas generales II.0.1. Ingeniería Conceptual de la Operación*. Panamá, República de Panamá: Secretaría del Metro de Panamá, 2010.
- [16] Secretaría del Metro de Panamá, "Ingeniería Conceptual, Especificaciones funcionales, técnicas y contractuales. Tomo I Obras civiles I.6. Secretaría del Metro de Panamá Arquitectura de estaciones. 1.6.1. memoria descriptiva , N°1, 17/03/2010," Panamá, República de Panamá, 2010.
- [17] Metro de Panamá, "Ingeniería conceptual Línea 2. Especificaciones funcionales y técnicas. Tomo I. Obras civiles. I.5. Estaciones." Metro de Panamá, Panamá, República de Panamá, p. 77, 2014.
- [18] Secretaría del Metro de Panamá, *Ingeniería conceptual Línea 2. Especificaciones funcionales, técnicas y contractuales. Tomo II. Equipamientos.II.1 Sistema de vías. Revisiones*. Panamá, República de Panamá: Secretaría del Metro de Panamá, 2014.
- [19] Metro de Panamá, *Ingeniería conceptual Línea 2. Especificaciones funcionales, técnicas y contractuales. Tomo II. Equipamientos.II.10.Sistemas de accesibilidad*. Panamá, República de Panamá: Metro de Panamá, 2014.
- [20] Metro de Panamá, *Ingeniería conceptual Línea 2. Especificaciones funcionales, técnicas y contractuales. Tomo II. Equipamientos. II.4 Sistema de telecomunicaciones*. Panamá, República de Panamá: Metro de Panamá, 2014.
- [21] Secretaría del Metro de Panamá, *Ingeniería conceptual. Especificaciones funcionales, técnicas y contractuales TOMO II Equipamientos. II.2.1. Sistemas de señalización y control. Línea 1*. Panamá, República de Panamá: Secretaría del Metro de Panamá, 2010.
- [22] Metro de Panamá, *Ingeniería conceptual Línea 2. Especificaciones funcionales, técnicas y contractuales. Tomo II. Equipamientos. II.5 Subsistema de ventilación menor y aire acondicionado*. Panamá, República de Panamá: Metro de Panamá, 2014.
- [23] Secretaria del Metro de Panamá, "Ingeniería conceptual Línea 2. Especificaciones funcionales, técnicas y contractuales. Tomo II. Equipamientos. II.9. Sistemas de bombeo." Secretaria del Metro de Panamá, Panamá, República de Panamá., p. 14, 2014.
- [24] Metro de Panamá, *Ingeniería conceptual Línea 2. Especificaciones funcionales, técnicas y contractuales. Tomo II. Equipamientos. Sistema de control de acceso y detección de intrusos – SCADI Especificaciones técnicas*. Panamá, República de Panamá.: Metro de Panamá, 2014.
- [25] S. del M. de Panamá., "Ingeniería conceptual Línea 2. Especificaciones funcionales, técnicas y contractuales. Tomo II. Equipamientos.II.6 Sistema de Cobro de Pasajes Revisiones." Secretaria del Metro de Panamá, Panamá, República de Panamá, p. 43.
- [26] Metro de Panamá, "Presentaciones Reuniones de Homologación Línea 2. Reunión 2. Presentación estaciones." Metro de Panamá, Panamá, República de Panamá, p. 39, 2014. [Online]. Available: <https://www.elmetrodepanama.com/linea-2/#tab-id-8>

- [27] Secretaría del Metro de Panamá, *Ingeniería conceptual. Especificaciones funcionales, técnicas y contractuales. Tomo II equipamientos. II.1 Sistemas de vías. II.1.1. Parámetros de diseño geométrico*. Panamá, Panamá, República de Panamá: Secretaría del Metro de Panamá, 2010.
- [28] Secretaría del Metro de Panamá, *Ingeniería conceptual. Especificaciones funcionales, técnicas y contractuales. Tomo II. Equipamientos. II. Sisvtemas de vías. II.1.2. Ingeniería conceptual diseño geométrico. Línea 1*. Panamá, República de Panamá: Secretaría del Metro de Panamá, 2010.
- [29] Metro de Panamá, "Presentaciones Reuniones de Homologación Línea 2. Reunión 7. Presentación energía." Metro de Panamá, Panamá, República de Panamá, p. 42, 2014. [Online]. Available: <https://www.elmetrodepamama.com/linea-2/#tab-id-8>
- [30] Secretaría del Metro de Panamá, "Ingeniería conceptual. Especificaciones, funcionales, técnicas y contractuales. Tomo II. Equipamientos II.8. Patios y talleres." Secretaría del Metro de Panamá, Panamá, Republica de Panamá, p. 34, 2014.
- [31] Secretaría del Metro de Panamá, "Ingeniería conceptual Línea 2. Especificaciones funcionales, técnicas y contractuales. Tomo II. Equipamientos.II.11.Sistemas contra incendios." Secretaría del Metro de Panama, Panamá, República de Panamá, p. 19, 2014.
- [32] JICA, "Revisión de los planes de movilidad y logística de Centroamérica," in *Proyecto de Estudios para diagnóstico, mapeo y diseño de la institucionalidad regional de la movilidad y logística en Centroamérica*, JICA, Ed., JICA, 2016, p. 205. [Online]. Available: https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/12285938_02.pdf
- [33] JICA, "Proyecto de estudios para diagnóstico, mapeo y diseño de la institucionalidad regioanl en la movilidad y logisitica en Centroamerica. Informe final." Agencia de cooperación de Japón, Japón, p. 235, 2017. [Online]. Available: <https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/12285920.pdf>
- [34] JICA, "Proyecto de estudios para diagnóstico, mapeo y diseño de la institucionalidad regional de la movilidad y logística en Centroamérica," Informe final. Accessed: Jun. 19, 2024. [Online]. Available: <https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/12285920.pdf>
- [35] JICA, "Proyecto para el Fortalecimiento de las Capacidades en la Elaboración del Plan Maestro Regional Indicativo de Movilidad y Logística para el Desarrollo Económico Regional Sostenible en el Marco de la Integración Económica Centroamericana." JICA, Tokio, p. 389, 2023. [Online]. Available: <https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/12349064.pdf>
- [36] JICA, SIECA, and y SICA, "Plan maestro regional de movilidad y logistica 2035." SIECA, Ciudad de Guatemala, p. 320, 2023. [Online]. Available: https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/12349072_03.pdf
- [37] J. Baraqui, "Restricciones y beneficios potenciales de la apertura en el sector transporte. Introducción." Sistema de la integracion de Centroamérica. Comisión económica para América latina y el CaribeAMÉRICA LATINA Y EL CARIBE, pp. 1–13, 2003. [Online]. Available: <https://www.sica.int/benecosto/inf/jb/capi.pdf>
- [38] BCIE, "Marcos de gestión ambiental y social. Proyecto del Tren Ligero para el Gran Área Metropolitana (GAM)." BCIE, San José, Costa Rica, pp. 1–106, 2022. [Online]. Available: https://www.bcie.org/fileadmin/bcie/espanol/archivos/operaciones/LRT_Costa_Rica__ESMF_Final_clean_SPANISH.pdf
- [39] BCIE, "Tren eléctrico de pasajeros 5." BCIE, San José, Costa Rica, p. 2. [Online]. Available: https://www.bcie.org/fileadmin/bcie/espanol/archivos/novedades/Datos_Generales_Tren_Electrico.pdf
- [40] BCIE, "Plan de accion ambiental y social. Tren rápido de pasajeros." BCIE, San José, Costa Rica, p. 14, 2021. [Online]. Available: <https://www.bcie.org/fileadmin/bcie/projects/Plan SIEMAS TRP Preliminar VF.pdf>
- [41] N. Quant-Rodríguez, "El impacto del financiamiento multilateral de los bancos de desarrollo el BCIE, Banco de desarrollo de la región," Universidad Centroamericana, 2011. [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/35139392.pdf>
- [42] C. Alvarado-Quesada, "El tren eléctrico de la GAM de Costa Rica, un proyecto para Centroamérica con el apoyo financiero del BCIE." BCIE, San José, Costa Rica, p. 3, 2021. [Online]. Available: https://www.bcie.org/fileadmin/user_upload/El_tren_electrico_de_la_GAM_de_Costa_Rica.pdf
- [43] A. Jaimurzina, G. Pérez, and R. Sánchez, "Logistics and mobility policies for sustainable development and regional integration: conceptual framework and regional experiences," *Facil. Transp. Trade Lat. Am. Caribb.*, vol. 1, no. 345, p. 8, 2016, [Online]. Available: https://www.cepal.org/sites/default/files/publication/files/39996/S1600141_en.pdf%0Ahttps://repositorio.cepal.org/handle/11362/39996
- [44] C. Trujillo, J. Jimenez, R. Yon-Siu, R. Coloane, L. Hidalgo, and M. Mariel, "PANAMA. PROGRAM FOR THE IMPROVEMENT OF THE PUEBLA-PANAMA PLAN'S PACIFIC CORRIDOR (DIVISA-SANTIAGO-EL PAJAL SECTION)," no. November. INTER-AMERICAN DEVELOPMENT BANK PANAMA, República de Panamá, p. 44, 2005. [Online]. Available: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=56714b40f5dceb33df0b9ff8d99ed11eb529b4ff>

- [45] Gobierno de Guatemala, "Transporte Transporte y Desarrollo Transgeneracional." Guatemala, p. 18, 2008. [Online]. Available: http://www.un.org/esa/dsd/dsd_aofw_ni/ni_pdfs/NationalReports/guatemala/transport.pdf
- [46] Secretaría de Integración Económica Centroamericana, "Corredor logístico de centroamérica. Logística comercial para el desarrollo sostenible y la integración de centroamérica," vol. 2000, no. Comitran Xxii. Secretaría de Integración Económica Centroamericana, 2000. [Online]. Available: <https://www.sica.int/cdoc/publicaciones/transform/catalogo/pdf-sp/III/10/10.pdf>
- [47] SIECA y COMITRAN, "Situación actual y principales a desarrollar hacia el año 2035, establecidas en la política, a fin de transformar a centroamérica en un nodo logístico de clases mundial." JICA, Guatemala, pp. 1–24, 2019. [Online]. Available: <https://web-sieca.s3.amazonaws.com/movilidad y logistica/JICA.pdf>
- [48] SIECA y COMITRAN, "Situación actual y principales acciones a desarrollar hacia el año 2035 establecidas en la política, a fin de transformar a centroamerica en un nodo logistico de clase mundial." JICA, Panamá, República de Panamá, p. 24, 2019. [Online]. Available: <https://web-sieca.s3.amazonaws.com/movilidad y logistica/JICA.pdf>
- [49] SICA, SIECA, and BCIE, "La integración Centroamericana y la Globalización Mundial," *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2018.
- [50] M. Pastor-Gómez, "Los corredores bioceánicos del istmo centroamericano, una fortaleza geoeconómica subregional." Instituto Español de Estudios Estratégicos, Madrid, España, pp. 1–18, 2016. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5992469>
- [51] Idom consulting engineering and architecture, "Estudios de Factibilidad Técnica, Económico- Financiera, Ambiental, Social y de vulnerabilidad para la Construcción, Equipamiento, Puesta en marcha, Operación y Mantenimiento, bajo la modalidad de Concesión de Obra con Servicio Público, del Sistema de Tre." Incofer-BCIE-CDG-IDOM, San José, Costa Rica, p. 543, 2020. [Online]. Available: <https://www.bcie.org/fileadmin/bcie/espanol/archivos/operaciones/Annex 6b Preliminary ESIA SPANISH.pdf>
- [52] J. Casey-Gaspar, "El ferrocarril al Atlántico en Costa Rica, 1871-1874," *Anu. Estud. Centroam.*, vol. 2, no. 1, pp. 291–344, 2012, [Online]. Available: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/anuario/article/view/3846>
- [53] Naciones Unidas, "El transporte en el istmo centroamericano," Naciones Unidas.
- [54] Coordinación del Plan Puebla-Panamá, "Plan Puebla-Panamá: Presentación Diagnóstico Centroamérica." Coordinación del Plan Puebla-Panamá. Presidencia de la República, Mexico DF, p. 118, 2001. [Online]. Available: https://www.diputados.gob.mx/comisiones/asunindi/diagnostico_centroamerica.pdf
- [55] R. Sánchez and G. Wilmsmeier, *Bridging infrastructural gaps in Central America: prospects and potential for maritime transport*, no. September. Santiago de Chile, Chile: United Nations Publication, 2005. [Online]. Available: <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/e30ee6c2-a555-4478-bb8c-129910fdce0a/content>
- [56] P. Iannicelli-Bugliones, "Análisis de Factibilidad Económica y Social de una Red Ferroviaria," Universidad Politécnica de Cataluña, 2021. [Online]. Available: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/351007/tfm-pierluigi-iannicelli.pdf?sequence=1>
- [57] SICA, "Declaración X cumbre del Mecanismo de Tuxtla, sobre temas varios - Tabasco, México, 28 de junio 2008." SICA, Tuxtla, Mejico, p. 9, 2008.
- [58] BCIE, "BCIE entrega reglamento centroamericano en materia ferroviaria," Noticias. Accessed: Jul. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.bcie.org/novedades/noticias/articulo/bcie-entrega-reglamento-centroamericano-en-materia-ferroviaria#:~:text=BCIE entrega reglamento centroamericano en materia ferroviaria,-15%2F05%2F2023&text=Con una cooperación técnica por,férreos desde Guate>
- [59] EGO, "¿Un tren centroamericano es posible?," El Pulso. Accessed: Jul. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.elpulso.hn/2019/09/26/un-tren-centroamericano-es-posible/>
- [60] Infobae, "El tren con el que se busca unir a México y Panamá para impulsar la economía de Centroamérica," SICA. Accessed: Jul. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.infobae.com/america/mexico/2019/07/31/el-tren-con-el-que-se-busca-unir-a-mexico-y-panama-para-impulsar-la-economia-de-centroamerica/>
- [61] P. Juárez, "Estudian tren para Centroamérica, de Chiapas a Panamá," Ferroviano. Accessed: Jul. 24, 2024. [Online]. Available: <https://t21.com.mx/ferroviano-2013-04-05-estudian-tren-centroamerica-chiapas-panama/>
- [62] Summa Media Group, "Un tren de carga y de pasajeros en Guatemala es viable, según BCIE," Revista Summa. Accessed: Jul. 24, 2024. [Online]. Available: <https://revistasumma.com/un-tren-de-carga-y-de-pasajeros-en-guatemala-es-viable-segun-bcie/#:~:text=BCIE - Revista Summa-,Un tr>
- [63] Secretaria de Prensa, "Tren del Pacífico," Gobierno del El Salvador. Accessed: Feb. 02, 2024. [Online]. Available: https://www.facebook.com/watch/live/?ref=watch_permalink&v=555384195790176

- [64] Vía Libre, "FGC asesorará a la empresa Corredor Interoceánico de Guatemala," Fundación de los Ferrocarriles Españoles. Accessed: Jul. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.vialibre-ffe.com/noticias.asp?not=9747#:~:text=El convenio%2C de dos años,trabajos del corredor ferroviario interoceánico.&text=Este proyecto ferroviario nada tiene,ferroviaria de este país centroamericano.>
- [65] BCIE, "Inician estudios para el desarrollo del tren entre Santiago de los Caballeros y Santo Domingo en República Dominicana," Noticias. Accessed: Jul. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.bcie.org/novedades/noticias/articulo/inician-estudios-para-el-desarrollo-del-tren-entre-santiago-de-los-caballeros-y-santo-domingo-en-republica-dominicana>
- [66] U. Gamarro, "Organismo internacional sugiere que cualquier proyecto ferroviario debe incluir a la capital, y podría financiarlo," Forbes Centroamerica. Accessed: Jul. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.prensalibre.com/economia/organismo-internacional-sugiere-que-cualquier-proyecto-ferroviario-debe-incluir-a-la-capital-y-podria-financiarlo/>
- [67] R. Morales, "Corredor del Istmo se unirá a red ferroviaria de Guatemala: Secretaría de Economía," Empresas. Accessed: Jul. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.eleconomista.com.mx/empresas/Corredor-del-Istmo-se-unira-a-red-ferroviaria-de-Guatemala-Secretaria-de-Economia-20230718-0113.html>
- [68] Centro de competitividad de la Región Occidental de Panamá, "Diagnóstico. Chiriquí." CECOM-SENACYT-ATclave, Panamá, República de Panamá, p. 152, 2018. [Online]. Available: http://www.atclave.es/publicaciones/descargas/estrategias_panamá/region_occidental/diagnostico_vision_chiriqui_2050.pdf
- [69] B. Centeno-Serrano, "Realidad, retos y oportunidades de desarrollo para la Provincia de Chiriquí.," *Rev. Plus Econ.*, vol. 3, pp. 16–21, 2015, doi: ISSN 2411-0353.
- [70] J. Asto, "China 's BRI in Latin America : A double-edged sword," in *Asian Studies Senior Seminar*, Asian Studies Senior Seminar, 2018, p. 37. [Online]. Available: https://renati.sunedu.gob.pe/bitstream/sunedu/741050/1/Asto_Laura_Jacquelyn.pdf
- [71] L. Herrera, M. Montenegro, C. Alden, A. Mendez, and V. Torres-Lista, *Nuevas relaciones diplomáticas entre Panamá y China: implicaciones geopolíticas y socioeconómicas*. Panamá, República de Panamá: SENACYT, USMA, LSE, 2021. [Online]. Available: <http://eprints.lse.ac.uk/id/eprint/113629>
- [72] R. González-Sáez, "The Chinese Project ' One Belt One Road ' Toward Latin America and the Caribbean. Economic-financial implications," *J. Evol. Stud. Bus.*, vol. 4, no. 2, pp. 108–131, 2019, doi: 10.1344/JESB2019.2.j062.
- [73] M. Myers and K. P. Gallagher, "Chinese development finance 'down but not out' in Latin America," *Glob. Am.*, no. March, p. 7, 2018, [Online]. Available: <https://theglobalamericans.org/2018/03/chinese-development-finance-not-latin-america/>
- [74] J. González Jauregui, "Latin American countries in the BRI: challenges and potential implications for economic development," *Asian Educ. Dev. Stud.*, vol. 10, no. 3, pp. 348–358, 2020, doi: 10.1108/AEDS-08-2019-0134.
- [75] M. Franco, "El tren costaría \$4 mil 100 millones," *Periodico La Prensa*, Panamá, República de Panamá, Mar. 2019. [Online]. Available: https://www.prensa.com/impresaeconomia/Tren-costaria-mil-millones_0_5259224065.html
- [76] Nacionales, "Te diremos cuáles serán las paradas del tren que va hasta Chiriquí," *Mi diario*. Accessed: Jul. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.midiario.com/panama/nacionales/te-diremos-cuales-seran-las-paradas-que-tendra-el-tren-que-va-hasta-chiriqui/>
- [77] Redacción, "Se estima que el recorrido del tren Panamá-David dure dos horas y media," *Economía*. Accessed: Jul. 24, 2024. [Online]. Available: <https://elcapitalfinanciero.com/recorrido-del-tren-panama-david-sera-dos-horas-media/>
- [78] E. Santamaría, "Presentan estudio de factibilidad para el Tren Panamá-David a empresarios de la Capac," Noticias. Accessed: Jul. 24, 2024. [Online]. Available: <https://sertv.gob.pa/estudio-de-factibilidad-para-el-tren-panama-david-fue-presentado-por-el-presidente-varela-a-empresarios-de-la-capac/>
- [79] Y. Dorati and J. De las Casas, "Inversión china: oportunidades de desarrollo para américa latina y Panamá agricultura, infraestructura, energías limpias y transporte," *Rev. Académica del Cent. Estud. Postgrado*, vol. 2, no. 2, pp. 30–39, 2018, [Online]. Available: <https://revistas.ulatina.edu.pa/index.php/genteclave/article/download/21/11/>
- [80] Redacción crítica, "50 dólares costaría pasaje del frustrado tren Panamá-David," *Periódico Crítica*. Accessed: Jan. 02, 2024. [Online]. Available: <https://www.critica.com.pa/nacional/50-dolares-costaria-pasaje-del-frustrado-tren-panama-david-557428>

- [81] Periódico La Crítica, “En 2 horas y media sería viaje Panamá-David en tren chino,” Secciones. Accessed: Jun. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.critica.com.pa/nacional/en-2-horas-y-media-seria-viaje-panama-david-en-tren-chino-497027>
- [82] En segundos Panama, “China entrega a Panamá estudio para construir un tren hasta Chiriquí,” Locales. Accessed: Jul. 24, 2024. [Online]. Available: <https://ensegundos.com.pa/2019/03/15/china-entrega-a-panama-estudio-para-construir-un-tren-hasta-chiriqui/>
- [83] Telemetro, “Entregan estudio de factibilidad para la construcción del tren Panamá-David,” Nacionales. Accessed: Jul. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.telemetro.com/nacionales/2019/03/15/entregan-estudio-factibilidad-construccion-panama-david/1048993.html>
- [84] E. Segundos, “Proyecto tren Panamá - David conquistaría 11 mil pasajeros diarios,” Logística. Accessed: Jul. 24, 2024. [Online]. Available: <https://ensegundos.com.pa/2019/09/09/proyecto-tren-panama-david-conquistaria-11-mil-pasajeros-diarios/>
- [85] Ministerio de la Presidencia, “Decreto Ejecutivo N °130 (De miércoles 3 de julio de 2024). Por el cual se crea la Secretaría Nacional del Ferrocarril, adscritas al Ministerio de la Presidencia y se establecen otras disposiciones,” no. 30066. Gaceta Oficial Digital, Panamá, República de Panamá, pp. 1–52, 2024. [Online]. Available: https://www.gacetaoficial.gob.pa/pdfTemp/30066/GacetaNo_30066_20240703.pdf
- [86] BCIE, “Con fondos BCIE avanza operación transfronteriza de trenes en Centroamérica,” Noticias. Accessed: Feb. 02, 2024. [Online]. Available: <https://www.bcie.org/novedades/noticias/articulo/con-fondos-bcie-avanza-operacion-transfronteriza-de-trenes-en-centroamerica>
- [87] BCIE, “PRE.125.2022 - Amplía el plazo para desembolsar la totalidad de los recursos del préstamo No. 2154 autorizado a la República de Nicaragua,” Mejoramiento de los Tramos de la Carretera Nejapa-El Crucero-Diriamba-Jinotepe-Nandaime. Accessed: Feb. 02, 2024. [Online]. Available: https://www.bcie.org/operaciones-y-proyectos/documentos/buscador-de-documentos/detalle-del-documento?tx_sptools365flex_sptoolsfesiingle%5Bid%5D=56461&cHash=d34dfeba4e25299ef0568420b35d8b88
- [88] BCIE, “PRE.136.2022 - Amplía el plazo para retiro de la totalidad de los recursos del préstamo No. 2177 autorizado a la República de Honduras,” Proyecto Construcción del Corredor Logístico Villa de San Antonio-Goascorán, Secciones II y III. [Online]. Available: https://www.bcie.org/operaciones-y-proyectos/documentos/buscador-de-documentos/detalle-del-documento?tx_sptools365flex_sptoolsfesiingle%5Bid%5D=56478&cHash=3c6ad6479046d13a15c680ab62fe4683
- [89] BCIE, “PRE.133.2022 - Modifica el PGI y amplía plazo de la cooperación autorizada mediante la Resolución No. PRE-16/2021,” Cooperación técnica para el Tren Interurbano (INCOFER). Accessed: Feb. 02, 2024. [Online]. Available: https://www.bcie.org/operaciones-y-proyectos/documentos/buscador-de-documentos/detalle-del-documento?tx_sptools365flex_sptoolsfesiingle%5Bid%5D=56475&cHash=8e64cfbc3fb1a041cc9896a5092fa50d
- [90] BCIE, “DI.39.2023 - Modifica el préstamo No. 2177 autorizado a la República de Honduras,” Proyecto Construcción del Corredor Logístico Villa de San Antonio-Goascorán, Secciones II y III. [Online]. Available: https://www.bcie.org/operaciones-y-proyectos/documentos/buscador-de-documentos/detalle-del-documento?tx_sptools365flex_sptoolsfesiingle%5Bid%5D=56621&cHash=0bd41cdd512a3dd4af37ea42b8ea4916
- [91] BCIE, “PRE.079.2022 - Modifica cooperación otorgada al PNUD mediante la Resolución No. PRE-61/2021,” Cooperación Financiera de Recuperación Contingente en el marco de Fontec. Accessed: Feb. 02, 2024. [Online]. Available: https://www.bcie.org/operaciones-y-proyectos/documentos/buscador-de-documentos/detalle-del-documento?tx_sptools365flex_sptoolsfesiingle%5Bid%5D=56363&cHash=cf496fde51737f340e8ba2d2e802613d
- [92] SIECA, “Centroamérica inicia trabajos regionales para la conectividad de proyectos ferroviarios,” En segundos. Accessed: Jul. 24, 2024. [Online]. Available: <https://aduananews.com/centroamerica-inicia-trabajos-regionales-para-la-conectividad-de-proyectos-ferroviarios/>
- [93] Redacción, “Con fondos BCIE avanza operación transfronteriza de trenes en Centroamérica,” Despertar nacional. [Online]. Available: <https://www.bcie.org/novedades/noticias/articulo/con-fondos-bcie-avanza-operacion-transfronteriza-de-trenes-en-centroamerica>
- [94] Aduana News, “Centroamérica inicia trabajos regionales para la conectividad de proyectos ferroviarios,” Transporte. Accessed: Jul. 24, 2024. [Online]. Available: <https://aduananews.com/centroamerica-inicia-trabajos-regionales-para-la-conectividad-de-proyectos-ferroviarios/>
- [95] E. Arrieta, “Tren rápido cuenta con \$550 millones de préstamo para construcción,” Nacionales. Accessed: Jul. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.larepublica.net/noticia/tren-rapido-cuenta-con-550-millones-de-prestamo-para-construccion#:~:text=Beneficiar a miles de costarricenses,construya un tren eléctrico interurbano.>

- [96] C. Watson, L. Schalteck, and A. Evéquoz, "Informe regional sobre financiamiento para el clima: América Latina." ODI Think change, Washington DC, USA y Canada, p. 4, 2022. [Online]. Available: https://climatefund-supdate.org/wp-content/uploads/2022/03/CFF6-America-Latina_ESP-2021.pdf
- [97] Bnamericas, "BCIE financiará estudios de 4 proyectos ferroviarios en Centroamérica," Reportaje. Accessed: Jul. 26, 2024. [Online]. Available: <https://www.bnamericas.com/es/reportajes/bcie-financiara-estudios-de-4-proyectos-ferroviarios-en-centroamerica>
- [98] D. Diana Palafox and I. Pantaleón, "Tres proyectos ferroviarios que buscan conectar a México y Centroamérica," Forbes Centroamerica. Accessed: Feb. 02, 2024. [Online]. Available: <https://forbescentroamerica.com/2021/02/18/tres-proyectos-ferroviarios-que-buscan-conectar-a-mexico-y-centroamerica>
- [99] J. Pelico, "Países impulsan un sistema ferroviario," Diario de Centroamerica. Accessed: Jul. 26, 2024. [Online]. Available: <https://dca.gob.gt/noticias-guatemala-diario-centro-america/paises-impulsan-un-sistema-ferroviario/>
- [100] R. Zamora, "Financiamiento de Transporte Público. Retos y oportunidades." Asociación Latinoamericana de Metros y Subterráneos (ALAMYS) y Metro de Santiago, Santiago de Chile, Chile, p. 32, 2020. [Online]. Available: <https://www.elmetrodepanama.com/wp-content/uploads/2020/03/03Retos-y-Oportunidad-de-Financiamiento-ALAMYS-y-Metro-de-Santiago.pdf>
- [101] M. De Leon, "Línea 5 del Metro en estudio," Enlace empresarial. Accessed: Jul. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.enlaceempresarialcciap.com/linea-5-del-metro-en-estudio/>
- [102] Mafex, "El BCIE se ha convertido en el socio estratégico de las naciones centroamericanas," Mafex. Accessed: Jul. 25, 2024. [Online]. Available: <https://magazine.mafex.es/el-bcie-se-ha-convertido-en-el-socio-estrategico-de-las-naciones-centroamericanas/>
- [103] Forbes centroamerica, "BCIE hará estudio para ferroviario en Guatemala con fondos de Corea del Sur," Forbes Centroamerica. Accessed: Jul. 20, 2024. [Online]. Available: <https://www.swissinfo.ch/spa/bcie-hará-estudio-para-ferroviario-en-guatemala-con-fondos-de-corea-del-sur/46288412>
- [104] Banco de Desarrollo de America Latina y El Caribe, "CAF aprueba USD 400 millones para construcción del Metro en Ciudad de Panamá," Noticias. Accessed: Jul. 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.caf.com/es/actualidad/noticias/2011/03/caf-aprueba-usd-400-millones-para-construccion-del-metro-en-ciudad-de-panama/#:~:text=CAF aprobó un préstamo por,los objetivos de este proyecto.>
- [105] Banco de Desarrollo de America Latina y El Caribe, "USD100 millones para la Línea 1 del Metro de Panamá," Noticias. Accessed: Jul. 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.caf.com/es/actualidad/noticias/2013/02/la-republica-de-panama-y-caf-suscriben-contrato-de-prestamo-por-usd100-millones-para-la-linea-1-del-metro-de-panama/#:~:text=La participación de CAF en,en la Ciudad de Panamá.>
- [106] Ministerio de Relaciones Exteriores de Panamá, "Panamá y Japón sellan acuerdo de financiamiento para la construcción de la línea 3 del Metro." Ministerio de Relaciones Exteriores de Panamá, Panamá, República de Panamá, 2016. [Online]. Available: <https://mire.gob.pa/panama-y-japon-sellan-acuerdo-de-financiamiento-para-la-construccion-de-la-linea-3-del-metro/>
- [107] Bnamericas, "BCIE da a conocer novedades sobre estudios ferroviarios en Centroamérica," Reportaje. Accessed: Jul. 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.bnamericas.com/es/reportajes/bcie-da-a-conocer-novedades-sobre-estudios-ferroviarios-en-centroamerica>
- [108] BCIE, "Estudios del tren de carga en Guatemala avanzan a paso firme con el apoyo del BCIE y Corea," Noticias. Accessed: Jul. 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.bcie.org/novedades/noticias/articulo/estudios-del-tren-de-carga-en-guatemala-avanzan-a-paso-firme-con-el-apoyo-del-bcie-y-corea#:~:text=Solicitudes de Información-,Estudios del tren de carga en Guatemala avanzan a paso,apoyo del BCIE y Corea&t>
- [109] BCIE, "Tren Eléctrico de Costa Rica," Costa Rica. Accessed: Feb. 02, 2024. [Online]. Available: <https://www.bcie.org/paises-socios/fundadores/costa-rica/tren-electrico-de-costa-rica>
- [110] Instituto Costarricense de Ferrocarriles, "Préstamo por \$250 Millones completaría monto que se requiere para impulsar el nuevo servicio de tren," Prensa. Accessed: Jul. 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.incofer.go.cr/prestamo-por-250-millones-completaria-monto-que-se-requiere-para-impulsar-el-nuevo-servicio-de-tren/>
- [111] Corporación Andina de Fomento (CAF), "Cómo aprovechar en Latinoamérica la construcción de infraestructuras ferroviarias de España," Noticias CAF. Accessed: Jul. 26, 2024. [Online]. Available: <https://www.caf.com/es/actualidad/noticias/2023/06/como-aprovechar-en-latinoamerica-la-construccion-de-infraestructuras-ferroviarias-de-espana/>
- [112] BID, "Apoyo a la Línea 2 del Metro de Panamá," Apoyo. Accessed: Jul. 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.iadb.org/es/proyecto/PN-T1117>

- [113] Banco Mundial, *La Reforma de los Ferrocarriles: Manual para Mejorar el Rendimiento del Sector Ferroviario*, Segunda. Washington DC, USA: Banco Mundial, 2017. [Online]. Available: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/497901517344273972/pdf/69256-SPANISH-RR-Toolkit-ES-New-2017-12-27.pdf>
- [114] A. Berbey-Álvarez, J. Guevara-Cedeño, G. Castillo, H. Álvarez, and I. De La Torre-Diez, "Perspectivas de las externalidades socioeconómicas de la línea 1 del Metro de Panamá en la productividad urbana. Perspectives of Socio-economic externalities of the Panama Metro Line 1 in Urban Productivity," *Trim*, vol. 13, no. January, pp. 37–56, 2017, [Online]. Available: <https://ridda2.utp.ac.pa/handle/123456789/13445>
- [115] A. Berbey-Alvarez, "Externalidades socioambientales de la línea 1 del Metro de Panamá," in *Encuentro Iberoamericano de Mujeres Ingenieras, Arquitectas y Agrimensoras. "Perspectiva de la mujer profesional Iberoamericana, ante las tendencias de la ingeniería y arquitectura sostenible,"* Universidad Tecnológica de Panamá, Ed., Panamá, República de Panamá: Editorial Tecnológica, 2014.
- [116] A. Berbey-Álvarez, J. Guevara-Cedeño, G. Castillo, H. Álvarez, and I. De La Torre-Diez, "Perspectivas de las externalidades socioeconómicas de la línea 1 del Metro de Panamá en la productividad urbana. Perspectives of Socio-economic externalities of the Panama Metro Line 1 in Urban Productivity," *TRIM*, vol. 13, pp. 37–56, 2017, [Online]. Available: <https://ridda2.utp.ac.pa/handle/123456789/13445>
- [117] "Ahorro en tiempos de viajes: Externalidad socio económicas ," in *X Reunión de Jóvenes Investigadores de Iberoamérica Centro Tordesillas de Relaciones con Iberoamérica de la Universidad de Valladolid, 31 de marzo del 2017*, ES, Mar. 2017. [Online]. Available: <http://jovenesinvestigadores.blogs.uva.es/x-reunion-2017/>
- [118] Berbey-Alvarez et al., "Grupo de investigación. Panama Railway engineering research group," Grupos de investigación. Universidad Tecnológica de Panamá. Accessed: Jun. 07, 2023. [Online]. Available: https://utp.ac.pa/documentos/2017/pdf/panama_railway_engineering_research_group1.pdf
- [119] A. Berbey-Álvarez, *Planificación en tiempo real de tráfico ferroviario*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid, 2008. [Online]. Available: <http://oa.upm.es/1853>
- [120] A. Berbey-alvarez, P. S. Segundo, J. De Dios, S. Bobi, and R. Caballero, "A real time rescheduling algorithm based in Lyapunov stability ' s index for metro lines," *Rev. Iberoam. Automática e Informática Ind.*, vol. 11, pp. 167–178, 2014, doi: 10.1016/j.riai.2014.03.005.
- [121] COOPERASUR, "Módulo 3. Operaciones Logísticas Humanitarias I Como." COOPERASUR, Panamá, República de Panamá, p. 13, 2024.
- [122] IEA-UIC, *Railway handbook*. Paris, France: International Energy Agency, 2017. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-59379-1%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-420070-8.00002-7%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.ab.2015.03.024%0Ahttps://doi.org/10.1080/07352689.2018.1441103%0Ahttp://www.chile.bmw-motorrad.cl/sync/showroom/lam/es/>
- [123] Office of Rail and Road, "Rail Emissions," no. November. Office of Rail and Road, United Kingdom, p. 23, 2023. [Online]. Available: <https://dataportal.orr.gov.uk/media/1dzb2awz/rail-emissions-2022-23.pdf>
- [124] M. Sarmiento-Hernández, "Panamá Ejemplo de Competitividad Internacional," Universidad de Bogotá, 2012. [Online]. Available: [https://expeditiorepositorio.utadeo.edu.co/bitstream/handle/20.500.12010/25741/Ensayo Final Panama 11-06-2012\[1\].pdf?sequence=1](https://expeditiorepositorio.utadeo.edu.co/bitstream/handle/20.500.12010/25741/Ensayo%20Final%20Panama%2011-06-2012%201.pdf?sequence=1)
- [125] L. Vásquez-Gonzalez, "Proyecto de extensión ferroviaria de la línea oeste-este de Panamá," Universidad Pontificia Comillas, 2017. [Online]. Available: <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/bitstream/handle/11531/26627/TFM000870.pdf?sequence=1>
- [126] E. Hall, "La energía eléctrica, motor impulsor del desarrollo tecnológico," vol. 4, pp. 4–8, 2016, [Online]. Available: <https://ridda2.utp.ac.pa/handle/123456789/88>
- [127] C. Gonzalez de La Lastra and A. Coriat, "Tren Panamá - David una obra que ayudaría a reactivar economía," En contexto. Accessed: Jun. 14, 2024. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=MvlfP1veAVc>
- [128] Redacción, "La construcción de un tren hasta Chiriquí podría reducir costos logísticos a nivel nacional, aseguran especialistas," *El capital financiero*. Accessed: Jul. 24, 2024. [Online]. Available: [https://elcapitalfinanciero.com/la-construccion-de-un-tren-hasta-chiriqui-podria-reducir-costos-logisticos-a-nivel-nacional-aseguran-especialistas/#:~:text=La construcción de un tren hasta Chiriquí%2C una obra cuyo,de factibilidad%2C concluyeron algunos e](https://elcapitalfinanciero.com/la-construccion-de-un-tren-hasta-chiriqui-podria-reducir-costos-logisticos-a-nivel-nacional-aseguran-especialistas/#:~:text=La%20construcci%20n%20de%20un%20tren%20hasta%20Chiriqu%20,de%20factibilidad%20concluyeron%20algunos%20e)
- [129] P. García, "Avanza restauración del ferrocarril de Bugaba," Patrimonio. Accessed: Jul. 24, 2024. [Online]. Available: <https://micultura.gob.pa/avanza-restauracion-del-ferrocarril-de-bugaba/>
- [130] C. Orgaz, "Por qué no se construyó en América Latina una poderosa red de trenes como la que conecta Europa," *BBC News Mundo*. Accessed: Feb. 02, 2024. [Online]. Available: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-62000473>
- [131] RENFE y otros, *Manual de ferrocarriles*, Primera. Madrid, España: RENFE, 2022.

- [132] Redacción, "Estados Unidos recomienda analizar 'muy bien' estudio del tren Panamá- David," Tren. Accessed: Jan. 02, 2024. [Online]. Available: <https://www.panamaamerica.com.pa/sociedad/estados-unidos-recomienda-analizar-muy-bien-estudio-del-tren-panama-david-1130263>
- [133] A. B. Alvarez and J. Guevara-Cedeño, "Railway Engineering," in *Latin American Women and Research Contributions to the {IT} Field*, {IGI} Global, 2021, pp. 371–395. doi: 10.4018/978-1-7998-7552-9.ch017.
- [134] M. Ferreiro and R. Arroyo, "Silencio, se rueda. Análisis del ruido y las vibraciones en el tráfico ferroviario," *Rev. la Ing. y Consult. del Transp.*, no. febrero, pp. 6–12, 2010, [Online]. Available: https://www.revistaitransporte.es/wp-content/uploads/2016/02/2010_28.pdf
- [135] Secretaría Nacional de Energía, "Plan Energético Nacional 2015-2050: 'Panamá, El Futuro Que Queremos.'" Secretaria Nacional de Energía de Panamá, Panamá, República de Panamá, p. 318, 2015. [Online]. Available: <https://biblioteca.olade.org/opac-trmpl/Documentos/cg00467.pdf>
- [136] Logística, "Proyecto tren Panamá - David conquistaría 11 mil pasajeros diarios," En segundos. Accessed: Jan. 02, 2024. [Online]. Available: <https://ensegundos.com.pa/2019/09/09/proyecto-tren-panama-david-conquistaria-11-mil-pasajeros-diaros/>
- [137] Redacción de TVN Noticias, "Gobierno de Cortizo 'no contempla' el tren Panamá-David." TVN Noticias, Panamá, República de Panamá, 2019. [Online]. Available: https://www.tvn-2.com/nacionales/gobierno-cortizo-no-contempla-tren-panama-david_1_1243262.html
- [138] Redacción, "Conozca las 16 estaciones que tendría el tren chino Panamá-David," Mi diario. Accessed: Jul. 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.midiario.com/uhora/nacionales/conozca-las-16-estaciones-que-tendria-el-tren-chino-panama-david/#:~:text=Ciudad de Panamá%2C Arraiján%2C La,Cerrillos%2C La Gloria y David.>
- [139] Redacción de TVN noticias, "Conoce la posible ruta y estaciones del tren Panamá-Chiriquí," TVN noticias. Accessed: Jul. 25, 2024. [Online]. Available: https://www.tvn-2.com/nacionales/conoce-posible-ruta-estaciones-panama-chiriqui_1_1387527.html#:~:text=De concretarse el proyecto%2C la,Cerrillos%2C La Gloria y David.
- [140] Planeta Panamá Consultores S.A., *Estudio de impacto ambiental categoría III del proyecto titulado: Proyecto Puerto Barú*. Panamá, República de Panamá: PLANETA PANAMÁ CONSULTORES S.A, 2024. [Online]. Available: https://puertobaru.com/wp-content/uploads/2023/06/Extracto-Ejecutivo-EsIA-Puerto-Baru-MZ_compressed.pdf

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Evaluación de dos fuentes orgánicas (humus de lombriz y excretas de *Zophobas morio*) en la germinación de semillas de lechuga (*Lactuca sativa* L.)

Phytotoxicity assessment in lettuce (*Lactuca sativa* L.) using germination indexes in two organic fertilizers: worm humus and *Zophobas morio* excreta

Daniel Alejandro García-López¹

Fecha de recepción: 18 de setiembre, 2024


Fecha de aprobación: 21 de enero, 2025

García-López, D.A. Evaluación de dos fuentes orgánicas (humus de lombriz y excretas de *Zophobas morio*) en la germinación de semillas de lechuga (*Lactuca sativa* L.). *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 3. Julio-Setiembre, 2025. Pág. 45-53.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i3.7508>

¹ TecNM: Instituto Tecnológico Superior de Libres, Departamento de Ingeniería en Innovación Agrícola Sustentable, Puebla. México.

 daniel.gl@libres.tecnm.mx.

 <https://orcid.org/0000-0001-8557-4895>

Palabras clave

Abono; calidad compost; vermicompost; enmienda; fertilidad; tóxico; inhibitorio.

Resumen

Zophobas morio es una especie de escarabajo que puede ser fuente potencial para la producción de abono orgánico a partir de sus excretas. En el presente trabajo se evaluó la germinación de semillas de lechuga y, se evaluó la fitotoxicidad mediante índices de germinación para comparar el desempeño de dos abonos orgánicos, humus de lombriz y excretas de *Zophobas morio*. Se observó una mejor respuesta del humus de lombriz ya que reportó un alto índice de germinación ($112.45 \pm 29.72\%$) en comparación a la respuesta obtenida por *Zophobas morio* ($25.74 \pm 5.87\%$). De igual forma los índices de porcentaje de germinación residual normalizado (IGN) y de elongación radical residual normalizado (IERN) catalogaron el humus de lombriz como un compuesto no fitotóxico, mientras que el extracto de zophobas mostró un IGN catalogado como toxicidad moderada y un IERN catalogado como muy tóxico. Se concluyó que las diferencias observadas entre ambos abonos pueden deberse a un mayor valor de conductividad eléctrica por parte del extracto de zophobas. Se demostró la eficacia del método de fitotoxicidad para evaluar la calidad de abonos orgánicos de manera rápida y eficiente.

Keywords

Fertilizer; compost quality; vermicompost; amendment; fertility; toxic; inhibitory.

Abstract

Zophobas morio is a beetle specie that can be a potential source for organic fertilizer production from its excreta. In the present work, lettuce seeds were used to evaluate both germination and phytotoxicity through indexes to compare the performance of two organic fertilizers, red worm vermicompost and *Zophobas morio* excreta. The best response was observed from the red worm vermicompost since it reported a high germination rate ($112.45 \pm 29.72\%$) compared to the response obtained by *Zophobas morio* excreta ($25.74 \pm 5.87\%$). Similarly, the indexes of normalized residual germination (IGN) and normalized residual root elongation (IERN) classified the worm vermicompost as a non-phytotoxic compound, while the zophobas extract showed an IGN classified as moderate toxicity and an IERN classified as very toxic. It was concluded that the differences observed between both fertilizers may be due to a higher value of electrical conductivity by the zophobas excreta. The effectiveness of the phytotoxicity method was demonstrated to evaluate the quality of organic fertilizers quickly and efficiently.

Introducción

La agricultura es una actividad imprescindible para la humanidad, su desarrollo desde hace más de 10 000 años fue el motor para la fundación de las primeras ciudades y sociedades complejas. A medida que la población ha incrementado, la agricultura ha buscado satisfacer la demanda de alimento para sostener el crecimiento poblacional mundial. Sin embargo, debido al incremento exponencial de la población desde principios de siglo XX, la agricultura ha buscado producir alimentos a un ritmo acelerado nunca antes visto, esto mediante el uso de agroquímicos y pesticidas si lograr con esto satisfacer la demanda de alimentos global; un ejemplo claro es México donde más del 50% de la población encuentra vulnerada su seguridad alimentaria [1].

Desafortunadamente, con el trascurso del tiempo, se ha hecho evidente que esta agricultura ha generado impactos negativos en la salud humana, contaminación de ríos, deterioro del medio ambiente, pérdida del suelo, y aumento del calentamiento global [2].

De manera reciente, existe un incremento en la tendencia de producir alimentos de una manera sostenible buscando alcanzar mediante el desarrollo de biofertilizantes y abonos orgánicos que promuevan el crecimiento vegetal para remplazar el uso de insumos químicos [3]. Los abonos orgánicos han mostrado múltiples [4]; por un lado, son una accesible comparado los altos costos en fertilizantes químicos, por otro lado, también poseen beneficios ambientales, ya que ayudan en la remediación de suelos al mejorar sus propiedades físico-químicas, aportan microorganismos benéficos y aportan al suelo materia orgánica como nitrógeno y fósforo [5].

No obstante, a pesar de sus ventajas, se deben tomar precauciones en el uso de abonos orgánicos. Se ha demostrado que algunos abonos orgánicos pueden producir efectos no deseados durante la germinación y crecimiento en plantas que presentan alto grado de sensibilidad a abonos orgánicos no estabilizados. Existen diferentes causas de estos efectos negativos, se puede destacar que se trate de abonos orgánicos donde el material de origen no tiene la calidad o grado de madurez adecuado; esto es muy común por malos manejos al momento de preparar o manipular abonos orgánicos, generando efectos fitotóxicos en el abono orgánico como altos contenidos de amonio, ácidos volátiles, sales y de metales pesados [5, 6]; es decir, presentan sustancias que inhiben la germinación de semillas o retardan el desarrollo de las raíces, por lo tanto, es necesario contar con métodos para detectar estos efectos no deseados.

Existen diferentes técnicas para probar la eficacia de una enmienda o abono orgánico, sin embargo, es necesario contar con métodos accesibles que aporten información relevante sobre el grado de toxicidad de un abono orgánico. Un método que detecta de manera indirecta la presencia de toxinas es el bioensayo de germinación. La prueba se basa en colocar semillas en contacto directo con el extracto acuoso del material a probar, el cual se compara contra datos de germinación que se obtienen de un testigo [5]. Este método propuesto por Zucconi et al. [7] destaca por la amplia versatilidad ya que fue empleado en ensayos que evalúan la calidad de compost, monitoreo ambiental y calidad de agua [8, 9, 10]. La prueba destaca por ser una prueba rápida, económica y que generan buenos resultados para identificar toxicidad durante la germinación de semillas.

En la producción de abonos orgánicos predominan varios procesos, siendo el compostaje el más conocido para el manejo de residuos orgánicos. No obstante, además del compostaje, existen procesos que involucran el uso de animales vivos para la transformación de la materia orgánica en abonos, destacando el uso de lombrices e insectos. El humus de lombriz es el resultado del tránsito de la materia orgánica a través del sistema digestivo de la lombriz, lo que produce una enmienda orgánica con altos beneficios para las plantas ya que contiene sustancias biológicamente activas que favorecen la regulación del crecimiento vegetal, y que por sus características físico-químicas mejora el suelo ya que facilita su drenaje y aireación, incrementando el rendimiento vegetal [11]. Además de las lombrices existe el potencial de emplear otros organismos para la producción de abonos orgánicos, un ejemplo son las larvas del género *Zophobas*. *Zophobas morio* es una especie de escarabajo que pertenece a la familia Tenebrionidae; estos organismos son conocidos por ser capaces de alimentarse de gran variedad de alimentos durante su etapa larval, generando gran cantidad de desechos. Debido a su composición en nutrientes y la presencia de microorganismos benéficos [12] existe el potencial de emplear desechos de *Zophobas morio* como abonos orgánicos dentro del enfoque de una agricultura sostenible. No obstante, es necesario demostrar su eficacia y su adecuado manejo para justificar su uso como potencial abono orgánico. De tal motivo, el presente proyecto buscó evaluar el uso de excretas de *zophobas* para comprobar su efecto

como abono orgánico para estimular el desarrollo vegetal, para lo cual se aplicaron bioensayos de fitotoxicidad comparando el potencial uso de excretas de zophobas contra humus de lombriz que es un probado compost orgánico.

Materiales y métodos

Preparación de las muestras

El trabajo se desarrolló durante marzo y abril del 2024 dentro del TecNM: Instituto Tecnológico Superior de Libres, en la ciudad de Libres, Puebla, México (19° 27' 52" N; 97° 41' 52" W). Se utilizaron dos tipos de muestras para el ensayo de fitotoxicidad. El humus que se empleó como testigo se obtuvo de una cama de lombricompostaje dentro de las instalaciones del TecNM, las lombrices fueron alimentadas con excretas de borrego y al momento de la cosecha el humus fue recolectado y separado mediante una criba de 2 mm. Por su parte, las excretas de *Zophobas morio* fueron donadas por el Instituto de Ecología, A.C., los organismos fueron alimentados con una dieta de avena y los desechos de su alimentación fueron colectados y empleados para esta prueba.

Para desarrollar la prueba de fitotoxicidad se requiere de muestras en estado líquido, por lo cual se procedió a obtener el extracto líquido de cada muestra sólida antes mencionada. Para realizar este procedimiento, por separado se colocaron en bolsas de papel filtro (Whatman 1) las muestras sólidas de humus de lombriz y estiércol de zophobas. Cada bolsa con muestra sólida se colocó en su respectivo contenedor con agua destilada a razón de 1:10 (p/v) y se calentó a 50 °C por 30 minutos; esto con el fin de hacer una extracción en líquido de cada muestra sólida de sustrato. Al término del proceso se recuperó el extracto líquido para realizar las sucesivas pruebas de fitotoxicidad.

Caracterización Físicoquímica

Se determinaron variables físicoquímicas en ambas muestras para tener una referencia de su composición. El pH se determinó directamente de las muestras líquidas de ambos abonos orgánicos. Las muestras se mantuvieron en agitación mientras se tomó la medición de pH con un parámetro de marca HANNA, previamente calibrado con soluciones de referencia a temperatura ambiente.

La conductividad eléctrica (CE) se obtuvo de las mismas muestras empleando el mismo parámetro. Para ambas variables la medición se realizó por quintuplicado, y se presentaron las medias y desviaciones estándar de los valores. Estos procedimientos se realizaron con base a la NOM-FF-109-SCFI-2007, sobre especificaciones y metodologías para trabajar con lombricomposta.

Prueba de fitotoxicidad

Para realizar la prueba de fitotoxicidad se emplearon placas Petri plásticas (100x15 mm) donde se desarrolló la germinación de semillas de lechuga durante 5 días; se utilizaron 6 placas por cada tratamiento: extracto de humus, el extracto de Zophoba y un control con agua destilada. En cada placa Petri se colocó papel filtro (Whatman 1), el cual se humedeció con 5 ml de efluente de cada respectivo tratamiento. Al finalizar se colocaron 10 semillas de lechuga orejona (*Lactuca sativa* L.) en cada placa Petri, mismas que fueron selladas con papel Parafilm y se permitió su germinación durante 5 días en condiciones de oscuridad dentro del laboratorio sin control de condiciones de crecimiento.

Al término del periodo de germinación se realizó el análisis de fitotoxicidad con base a la prueba de Zucconi et al. [7] para calcular el índice de germinación (IG) (Fórmula 1).

$$IG(\%) = \frac{(GRS \times CRR)}{100}$$

Fórmula 1

Donde:

$$GRS(\%) = \frac{\text{Número de semillas germinadas con el tratamiento}}{\text{Número de semillas germinadas con el testigo}} \times 100$$

$$CRR(\%) = \frac{\text{Longitud promedio de la radícula con el tratamiento}}{\text{Longitud promedio de la radícula con el testigo}} \times 100$$

Adicionalmente, se calcularon los índices de porcentaje de germinación residual normalizado (IGN) y de elongación radical residual normalizado (IERN), de acuerdo con Bagur-González et al. [13] (Fórmulas 2 y 3, respectivamente).

$$IGN = \frac{Germ_x - Germ_{testigo}}{Germ_{testigo}}$$

Fórmula 2

Donde $Germ_x$ es el porcentaje promedio de semillas germinadas en el tratamiento y $Germ_{testigo}$ es el porcentaje promedio de semillas germinadas en el testigo.

$$IERN(\%) = \frac{Elong_x - Elong_{testigo}}{Elong_{testigo}}$$

Fórmula 3

Donde $Elong_x$ es la longitud promedio de la radícula de semillas germinadas en el tratamiento y $Elong_{testigo}$ es la longitud promedio de la radícula de semillas germinadas en el testigo.

Análisis de los datos

Se implementó un diseño experimental completamente al azar con 60 semillas repartidos en 6 réplicas para cada tratamiento. En el caso de los datos de germinación, elongación y fisicoquímicos, se empleó la prueba de Análisis de varianzas (ANOVA) y una comparación de medias mediante la prueba de Tukey, se mantuvo un nivel de significancia de 5%. Los análisis fueron procesados mediante el software estadístico Minitab19.

Resultados y discusión

La valoración de los parámetros fisicoquímicos, pH y conductividad eléctrica (CE) se observan en el Cuadro 1. Al término de la prueba se observaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) en valores de pH, donde el humus presentó el mayor valor observado (8.81 ± 0.04), seguido del testigo (8.41 ± 0.06), y finalmente el extracto de zophobas presentó el menor valor de pH (8.034 ± 0.12). Por su parte, la CE de igual forma presentó diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$), teniendo en este caso el mayor valor de CE para el extracto de zophobas (2.556 ± 0.63), seguido del humus (1.61 ± 0.01) y el menor valor lo presentó el testigo (0.776 ± 0.01).

Respecto a la prueba de germinación, al término de 5 días se observaron diferencias visuales entre las cajas de las semillas germinadas en extracto de excretas de zophobas y las semillas germinadas tanto en el control como con las que germinaron en el extracto de humus, siendo las primeras las que desarrollaron menor radícula comparadas con las últimas.

Cuadro 1. Valores de pH y conductividad eléctrica (CE) obtenidos del testigo y los extractos empleados.

Variable	Testigo	Humus	Zophobas
pH	8.41 ± 0.06 ^b	8.81 ± 0.04 ^a	8.034 ± 0.12 ^c
CE (dS m ⁻¹)	0.776 ± 0.01 ^c	1.61 ± 0.01 ^b	2.556 ± 0.63 ^a

Letras diferentes muestran diferencias significativas ($p < 0.05$) de acuerdo a prueba de Tukey.

La observación cualitativa anterior se corroboró cuantitativamente mediante los índices de germinación calculados. En el Cuadro 2 se comparan los índices calculados de los tratamientos con extracto de humus de lombriz y con zophobas, para todos los índices se observaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre los resultados observados en cajas con extracto de humus contra las cajas con extracto de zophobas. El índice de germinación (IG) permite comparar los tratamientos experimentales respecto al control, de esta forma los valores se comparan de acuerdo a recomendaciones de Zucconi et al. [] donde se establece que un IG mayor al 70% corresponde a un sustrato no fitotóxico; un IG entre 70-50% corresponde a un sustrato medianamente fitotóxico, y finalmente, un IG menor de 50% corresponde a un sustrato fitotóxico. De acuerdo a esta clasificación, los resultados del humus mostraron un IG de $112.45 \pm 29.71\%$, este valor fue superior al 100% debido a que se calcula sobre los resultados del testigo y al superarlos demuestra que la presencia de este compuesto mejoró la germinación y elongación de semillas en comparación con el control. Por otro lado, el tratamiento con zophobas mostró un IG de $25.74 \pm 5.87\%$, la interpretación de este resultado de IG a partir de la metodología de Zucconi sugiere que el contenido del extracto con zophobas contiene algún componente “tóxico” que no permitió el desarrollo de lechuga e inhibió un crecimiento parecido a lo observado en el control y el tratamiento con humus de lombriz.

Cuadro 2. Valores calculados durante la germinación de semillas de lechuga con extractos de humus de lombriz y estiércol de zophobas.

Variable	Humus	Zophobas
GRS	100.63 ± 23.13 ^a	71.45 ± 10.35 ^b
CRR	111.45 ± 10.49 ^a	35.72 ± 3.37 ^b
IG	112.45 ± 29.71 ^a	25.74 ± 5.87 ^b
IGN	-0.01 ± 0.10 ^a	-0.29 ± 0.10 ^b
IERN	-0.11 ± 0.10 ^a	-0.64 ± 0.03 ^b

Letras diferentes muestran diferencias significativas ($p < 0.05$) de acuerdo a prueba de Tukey.

Para evaluar el índice de porcentaje de germinación residual normalizado (IGN) y de elongación radical residual normalizado (IERN); se tomaron como referencia las recomendaciones de Bagur-González et al. [12], donde valores superiores a 0 corresponden a sustratos que permiten el crecimiento, valores de 0 a -0.25 presentan baja o nula toxicidad, valores entre -0.25 a -0.5 indican toxicidad moderada, valores entre -0.5 a -0.75 presentan efectos tóxicos, y finalmente, valores de -0.75 a -1.0 representan una toxicidad muy alta. De acuerdo a estas referencias, el humus de lombriz presentó un IGN de -0.01 ± 0.10 y un IERN de -0.11 ± 0.10 , dichos valores se consideran dentro de baja o nula toxicidad, por lo cual ambos índices confirman que el humus de lombriz no genera efectos tóxicos ni inhibe el crecimiento en comparación con el grupo control. Por su parte, el extracto de zophobas presentó un IGN e IERN de -0.64 ± 0.03 y de

-0.29 ± 0.10 , respectivamente. Ambos índices muestran que el extracto de zophobas presentó efectos tóxicos para el crecimiento vegetal, siendo el IGN catalogado como toxicidad moderada y el valor del IERN como muy tóxico. Esta diferencia de índices que se observa en el extracto de zophobas es debido a que mientras el IGN considera únicamente valores de germinación de semillas, el IERN depende de la elongación de raíces. Por lo cual, el extracto de zophobas permitió la germinación, pero limitó el crecimiento y desarrollo normal radicular en comparación de los grupos control y con extracto de humus de lombriz.

Estos resultados se pueden discutir a partir de algunos estudios previamente documentados. Huerta et al. [5] probaron tres abonos orgánicos (comercial, vacuno, conejo) bajo tres concentraciones y bajo condición de esterilizado o no esterilizado. En dicho estudio observaron que de 20 diferentes condiciones experimentales, 18 mostraron un IG $> 80\%$ y solo los tratamientos de abono comercial (1.5:5.0 v/v) y estiércol comercial (1.0:5.0) mostraron IG de 55.9% y 65.9%, respectivamente. Los autores concluyeron que el tipo de fertilizante influyó en la caída del IG más que la concentración del mismo; además, observaron que las diferencias de pH y CE no ejercían mayores efectos en esta disminución del IG entre los tratamientos. Sin embargo, en otros estudios a cargo de Ramírez et al. [14] se evaluó la fitotoxicidad de un abono líquido producido de la fermentación de heces de alpaca; en dicho estudio se observó que la dilución (v/v) del abono líquido era necesaria ya que al 1% se obtuvo un IG de 18.66%, y una dilución al 0.1% mostró una IG de 94.24%; sin embargo, diluciones mayores de 0.01% y 0.001% mostraron IG de 70.65% y 578.01%, respectivamente, mostrando que el uso de un abono líquido debe realizarse a una dosificación adecuada. De manera similar, Florez et al. [9] evaluaron un fertilizante líquido a partir de la fermentación de subproductos de trucha, en su estudio observaron que al reducir la dilución (v/v) de 1% al 0.1% el IG aumentó de 61.77% a 129.1%, respectivamente. De manera similar y más reciente, Urriola et al. [15] observaron, al evaluar abonos orgánicos, que pasar de su uso del 100% a una dilución del 25%, el IG se modificaba de 0 a $>80\%$, respectivamente, mostrando que en algunos orgánicos es necesario reducir su concentración para su adecuado uso.

Es importante considerar que la fitotoxicidad proviene de compuestos inhibitorios o de una concentración elevada de algún compuesto que pueda limitar el desarrollo vegetal de especies sensibles como la lechuga que es un adecuado indicador de fitotoxicidad [10]. En el caso concreto del presente estudio, se puede sospechar que el tratamiento de excretas de zophobas presentó toxicidad debido a la concentración de sales que se observaron mediante la medición de la CE ($2.556 \pm 0.6 \text{ dS m}^{-1}$). Se ha reportado que la CE para el riego de lechuga debe mantenerse en valores menores a 1.5 dS m^{-1} ya que por encima de este valor se pueden presentar menores rendimientos en su desarrollo y crecimiento [16]. Esto podría explicar por qué en todos los índices evaluados los extractos de excretas de zophobas mostraron índices catalogados como fitotóxicos.

Finalmente, la Figura 1 muestra la comparación estadística entre el porcentaje de germinación y la longitud de radícula que se observaron entre el testigo con agua, los extractos de humus y zophobas. No se observaron diferencias significativas entre el testigo y el extracto de humus; sin embargo, el uso de extracto de estiércol de zophobas presentó los valores más bajos para ambas variables, confirmando los resultados observados de los índices de germinación.

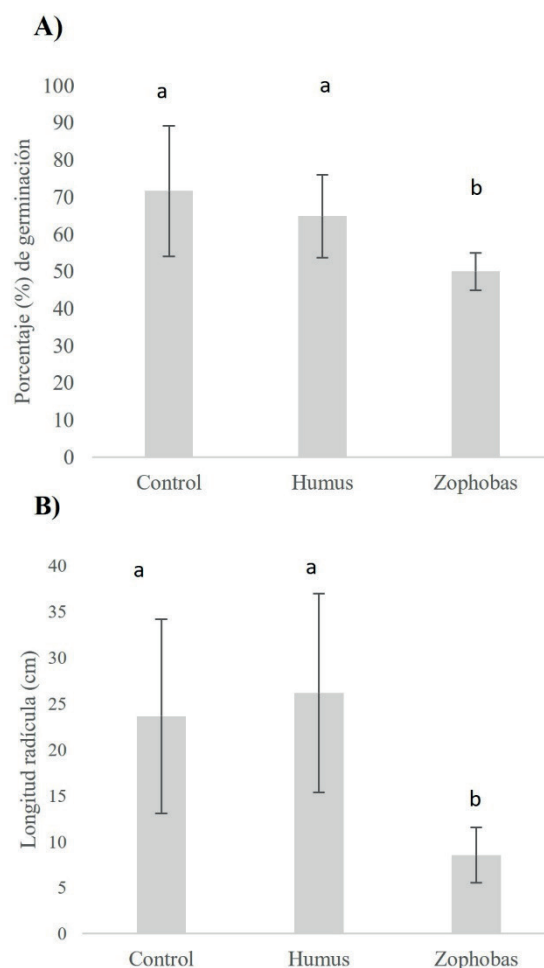


Figura 1. Efecto de los extractos de humus de lombriz y excretas *Zophobas morio* en el porcentaje de germinación (A) y longitud de la radícula (B) en lechuga orejona.

Conclusiones

La prueba de fitotoxicidad permitió comparar un abono orgánico probado como el humus de lombriz contra las excretas de *Zophobas morio*, siendo es estas últimas donde se observó un deficiente desarrollo vegetal durante la germinación de semillas de lechuga. Se considera que la alta conductividad eléctrica presente en las excretas de *Zophobas morio* pudo contribuir a los bajos índices durante las pruebas de fitotoxicidad. Por lo cual es necesario hacer modificaciones en abonos que presenten este tipo de características para no generar resultados negativos en la producción vegetal, se puede recomendar dosificar apropiadamente o explorar dietas en Zophobas que permitan obtener excretas con menores valores de CE.

Agradecimientos

Se agradece al TecNM: Instituto Tecnológico Superior de Libres por su apoyo mediante el proyecto DT-IIAS-0021-2023 "Tratamiento de residuos sólidos orgánicos mediante compostaje-lombricompostaje y su evaluación para mejorar suelos agrícolas". También se agradece al Dr. Luis Arturo Ibarra por facilitar las muestras de excretas de *Zophobas morio* que se emplearon para el desarrollo del proyecto.

Referencias

- [1] J. Zuñiga. "La seguridad alimentaria en México: Food security in Mexico. LATAM" Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades. vol. 5, 2024. <https://doi.org/10.56712/latam.v5i3.2135>
- [2] A. D. Bojórquez *et al.*, "Biofertilizantes en el desarrollo agrícola de México". Ra Ximhai: Revista Científica de Sociedad, Cultura y Desarrollo Sostenible, vol. 6, no. 1, pp. 51-56, 2010.
- [3] R. Sánchez-Hernández & D. Palma. "Abonos orgánicos para la mejora de suelos y cultivos". En: A. Cruz *et al.*, (Eds.). La biodiversidad en Tabasco. Estudio de estado (Primera edición, 2019). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 2019
- [4] A. Moreno-Reséndez *et al.*, "Capítulo VI: Abonos orgánicos: una alternativa sustentable en la agricultura". En: A. Moreno-Reséndez & J.L. Reyes C. (Eds) Tópicos selectos de sustentabilidad, un reto permanente para el nuevo milenio. AM Editores S. A. de C. V., 2020
- [5] E. Huerta *et al.*, "Toxicidad de fertilizantes orgánicos estimada con bioensayo de germinación de lechuga". Terra Latinoamericana, vol. 33, no. 2, pp.179-185, 2015.
- [6] J. Cruz-Hernández *et al.*, "Fitotoxicidad de abonos orgánicos líquidos en especies hortícolas indicadoras un método de pre selección". Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan, vol. 3, no. 5, pp. 964-971, 2015.
- [7] F. Zucconi *et al.*, "Evaluating toxicity in immature compost". Biocycle vol. 22, pp. 54-57, 1981.
- [8] A.J. Rodríguez *et al.*, "Índices de germinación y elongación radical de *Lactuca sativa* en el biomonitorio de la calidad del agua del río Chalma". Revista Internacional de Contaminación Ambiental, vol. 30, no. 3, pp. 307-316, 2014.
- [9] M. A. Florez *et al.*, "Evaluación de fitotoxicidad y caracterización de un fertilizante líquido elaborado mediante fermentación láctica utilizando subproductos del procesamiento de trucha (*Oncorhynchus mykiss*)". Ecología Aplicada, vol. 19, no. 2, pp. 121-131, 2020. <https://dx.doi.org/10.21704/rea.v19i2.1563>
- [10] L. Urriola *et al.*, "Evaluación de la fitotoxicidad de abonos orgánicos comerciales usando semillas de lechuga (*Lactuca sativa* L.) y pepino (*Cucumis sativus*)". Revista Semilla del Este, vol. 1, no. 2, pp. 1-11, 2021.
- [11] C.M. Acosta-Durán *et al.*, "Sustrato de lombricomposta para el cultivo de Belén (*Impatiens walleriana* Hook. f.)". Revista Bio ciencias, vol. 4, no. 5, pp. 1-14, 2017. <http://dx.doi.org/10.15741/revbio.04.05.04>
- [12] J.P. Arias. "Nuevos abonos a partir de excrementos de insecto: El caso del gusano de la harina (*Tenebrio molitor*)". Ingeniería y Región, vol. 19, pp. 1-10, 2018. <https://doi.org/10.25054/22161325.1840>
- [13] M.G Bagur-González *et al.*, "Toxicity assessment using *Lactuca sativa* L. bioassay of the metal(loid)s As, Cu, Mn, Pb and Zn in soluble-in-water saturated soil extracts from an abandoned mining site". Journal of Soil and Sediments, vol. 11, pp. 281-289, 2011. <https://doi.org/10.1007/s11368-010-0285-4>
- [14] H. Ramírez *et al.*, "Evaluación de la calidad de un abono líquido producido vía fermentación homoláctica de heces de alpaca". Ecología Aplicada, 2016. <https://dx.doi.org/10.21704/rea.v15i2.753>
- [15] L. Urriola *et al.*, "Efecto fitotóxico de extractos diluidos de abonos orgánicos en semillas de lechuga". Revista Semilla del Este, vol. 3, no. 1, pp. 114–126, 2022.
- [16] G. Araceli. "Aplicación de enmiendas en suelos salinizados y alcalinizados por efecto del riego con agua subterránea, en relación al rendimiento de lechuga bajo invernadero". SEMIÁRIDA, vol. 4, no. 1, pp. 70-71, 2014.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Efecto antimicrobiano de tres aceites esenciales de la familia Lamiaceae para el control *Ralstonia solanacearum*

Antimicrobial effect of three essential oils from the Lamiaceae family for control *Ralstonia solanacearum*

Jovanna Acero-Godoy¹, Tomás de Jesús Guzmán-Hernández²,
Wilman Antonio Delgado-Ávila³, Johan Steven Alcántara-
Cortés⁴, Mauricio Soto-Suárez⁵, Elizabeth Gil-Archila⁶


Fecha de recepción: 19 de setiembre, 2024

Fecha de aprobación: 20 de enero, 2025

Acero-Godoy, J; Guzmán-Hernández, T.J; Delgado-Ávila, W.A; Alcántara-Cortés, J.S; Soto-Suárez, M; Gil-Archila, E. Efecto antimicrobiano de tres aceites esenciales de la familia Lamiaceae para el control *Ralstonia solanacearum*. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 3. Julio-Setiembre, 2025. Pág. 54-68.


 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i3.7511>


1 Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca Bogotá-Colombia.

 jacerog@unicolmayor.edu.co


 <https://orcid.org/0000-0003-1656-6888>


2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.

 tjguzman@itcr.ac.cr


 <https://orcid.org/0000-0002-2719-8550>

3 Universidad Nacional de Colombia.

 wadelgadoa@unal.edu.co

 <https://orcid.org/0000-0001-8415-7950>


4 Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, Colombia.

 jalcantara@unal.edu.co

 <https://orcid.org/0000-0003-1176-2599>

5 AGROSAVIA.

 msoto@agrosavia.co

 <https://orcid.org/0000-0002-2392-2839>

6 Pontificia Universidad Javeriana. Colombia.

 egil@javeriana.edu.co

 <https://orcid.org/0000-0002-1774-970X>

Palabras clave

Bioplaguicidas; concentración mínima bactericida (CMB); concentración mínima inhibitoria (CMI); *Ralstonia solanacearum*; *Origanum majorana*; *Rosmarinus officinalis*; *Thymus vulgaris*.

Resumen

Rosmarinus officinalis L., *Origanum majorana* L. y *Thymus vulgaris* L., son plantas aromáticas que pertenecen a la familia Lamiaceae, sus aceites esenciales han sido ampliamente estudiados como sustancias antimicrobianas de bacterias fitopatógenas entre las que se encuentra *Ralstonia solanacearum*. El objetivo de la presente investigación fue determinar la composición química de los aceites esenciales y la actividad antimicrobiana contra *R. solanacearum*. Los aceites esenciales (AE) fueron obtenidos de hojas y tallos por el método de arrastre con vapor y la composición química por medio de CG-MS. Se determinó la concentración mínima inhibitoria (CMI) y concentración mínima bactericida (CMB) para cada uno de los aceites esenciales. El compuesto mayoritario para *O. majorana* y *T. vulgaris* fue γ -terpineno (17,32 %, 33,47 % respectivamente) y para *R. officinalis* α -pineno (22,47%). La densidad promedio de los tres aceites esenciales fue 0,85 mg/mL y el mayor rendimiento de los aceites esenciales se obtuvo para *R. officinalis* 0,86 % (% p/p). Los tres aceites esenciales generaron efecto tanto inhibitorio como bactericida contra *R. solanacearum*; para *O. majorana*, *T. vulgaris* y *R. officinalis* con CMI de 0,545 mg/mL, 0,625 mg/mL y 1,09 mg/mL respectivamente y el valor de las CMB 1,09 mg/mL, 1,25 mg/mL y 2,18 mg/mL, respectivamente. Los resultados obtenidos permiten proponer el uso de los aceites esenciales como posibles bioplaguicidas como una alternativa para disminuir el uso de químicos sintéticos convencionales, mitigando el impacto que estos producen en aguas, suelos y en el consumidor final; el ser humano.

Keywords

Biopesticides; minimum bacterial concentration (MBC); minimum inhibitory concentration; *Ralstonia solanacearum*; *Origanum majorana*; *Rosmarinus officinalis*; *Thymus vulgaris*.

Abstract

Rosmarinus officinalis L., *Origanum majorana* L., and *Thymus vulgaris* L. are aromatic plants that belong to the Lamiaceae family. Their essential oils have been widely studied as antimicrobials against phytopathogenic bacteria, including *R. solanacearum*. The objective of the present investigation was to determine the chemical composition of essential oils and the antimicrobial activity against *R. solanacearum*. The essential oils were obtained from leaves and stems by Steam distillation method, and chemical composition was determined using CG-MS; Minimum inhibitory concentration (MIC) and minimum bactericidal concentration tests were developed for each essential oil. Most found compounds for *O. majorana* and *T. vulgaris* were γ -terpinene 17,32 %, and 33,47 % respectively for *R. officinalis* α -pinene 22,47 %. The average density of three essential oils was 0,85 mg/mL, and the highest essential oil (EO) yield was obtained for *R. officinalis* 0,86 % (% w/w). All essential oils generated both inhibitory and bactericidal effects against *R. solanacearum*: for *O. majorana*, *T. vulgaris*, and *R. officinalis* the MIC were 0,545 mg/mL, 0,625 mg/mL, and 1,09 mg/mL respectively and the MBC value was 1,09 mg/mL, 1,25 mg/mL and 2,18 mg/mL respectively. These results allow us to propose using essential oils as biopesticides as an alternative to reduce the application of conventional synthetic chemicals, mitigating the impact that these produce on water, soil, and the final consumer, humans.

Introducción

Ralstonia solanacearum antes conocida como *Pseudomonas solanacearum* es considerada como un complejo de especies (RSSC) filogenéticamente relacionadas, fitopatógenas y cosmopolita con un alto impacto en la agricultura en cultivos de importancia económica como tomate, papa y banano, produciendo marchitamiento bacteriano en plantas solanáceas, podredumbre negra en papa y enfermedad de moko en plátano. Su difícil erradicación ha dificultado el desarrollo de estrategias de control efectivas entre las que se han implementado el uso de métodos químicos tipo plaguicidas, tratamientos físicos como solarización, prácticas culturales como rotación de cultivos y el control biológico tanto con microorganismos o con derivados de plantas como los aceites esenciales [1], [2].

La familia Lamiácea antiguamente llamada Labiatae es una de las familias botánicas más numerosas representada por hierbas, plantas herbáceas, arbustos o especies de árboles distribuidos en 240 géneros y casi 7000 especies, ampliamente distribuidas en el mundo a diferentes alturas entre las cuales sobresalen el tomillo, orégano y romero. Al igual que otras plantas aromáticas posee compuestos bioactivos como terpenoides, alcaloides, fenilpropanoides, fenoles, ésteres, cetonas, ácidos orgánicos encontrados en los aceites esenciales de las mismas que son sustancias aromáticas y volátiles ubicadas en diferentes partes de la planta como hojas, flores raíces, semillas frutos y cuya concentración de compuestos puede variar dentro de la misma especie dependiendo de factores ambientales, edad del cultivo, condiciones edafoclimáticas, método de recolección y extracción, que se han convertido en una alternativa viable para el desarrollo de nuevas sustancias que pueden ser utilizadas como antioxidantes, antiinflamatorios, antivirales, antifúngicos, antibacteriales entre muchas otras propiedades que poseen. La capacidad antibacterial de los aceites esenciales de plantas como *Origanum majorana* L., *Rosmarinus officinalis* L. y *Thymus vulgaris* L., ha sido demostrada contra microorganismos de interés clínico como *Escherichia coli*, *Staphylococcus epidermidis*, *Salmonella enteritidis*, *Klebsiella pneumoniae*, *Saprolegnia parasitica* y fitopatógenos como *Pseudomonas syringae* pv. *phaseolicola*. Por las anteriores razones el objetivo del presente trabajo es determinar el potencial antimicrobiano de los aceites esenciales de *Origanum majorana* L., *Rosmarinus officinalis* L. y *Thymus vulgaris* L. extraídos por el método de arrastre con vapor, su caracterización química, rendimientos y la concentración mínima inhibitoria (CMI) y concentración mínima bactericida (CMB) para establecer si presentan actividad antimicrobiana contra el fitopatógeno *Ralstonia solanacearum*, como posible alternativa a los métodos de control alternativos a los plaguicidas convencionales que generan una alta contaminación en el medio ambiente [3], [4], [5], [6], [7], [8].

Materiales y métodos

Material vegetal e identificación taxonómica

Las hojas de cada especie se adquirieron en el centro de acopio “la plaza de mercado Samper Mendoza”, (Bogotá, Colombia), el material provino en su totalidad de la sabana de Bogotá y siempre fue adquirido con el mismo proveedor. Un ejemplar de cada especie se depositó en el Herbario Nacional Colombiano para su determinación, bajo los códigos: COL 616745 para *Origanum majorana*, COL 612138 para *Rosmarinus officinalis* L. y COL 612139 para *Thymus vulgaris* L.

Extracción y rendimiento de los aceites esenciales

Para la obtención de los aceites esenciales, las hojas del material vegetal fresco de cada planta fueron sometidas a destilación por arrastre con vapor en un equipo de destilación que comprendía un vaso de extracción de 12 litros, una caldera o alambique y una trampa tipo Clevenger para la recolección y separación de los aceites esenciales para luego ser conservados con sulfato de sodio (Na_2SO_4) y mantenidos a -10°C .

El rendimiento de los aceites esenciales con respecto a su biomasa vegetal se calculó por medio de la ecuación:

$$\% \text{ rendimiento} = \frac{\text{PESO (g) DE A.E.}}{\text{PESO (g) MATERIAL VEGETAL.}} * 100 \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde, peso (g) de A.E. son los gramos del aceite esencial obtenido y peso (g) del material vegetal corresponde al peso en gramos del material vegetal fresco [9].

Densidad relativa del aceite esencial 20°C e índice de refracción:

La densidad se determinó mediante el método oficial AOAC 940.28 de 1990; se utilizó un picnómetro de 1,0 ml de capacidad, el cual fue pesado vacío después, se llenó con 1,0 ml del aceite esencial, se pesó el conjunto y por diferencia de pesos se determinó la densidad relativa del aceite esencial empleando la ecuación 2 [10].

$$\text{Densidad } \rho \left(\frac{\text{g}}{\text{mL}} \right) = \frac{(\text{peso picnómetro} + \text{muestra}) - (\text{peso picnómetro}) (\text{g})}{\text{Vol. AE en mL}} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Para el índice de refracción se utilizó el método oficial AOAC 919.28:1990. La prueba fue realizada utilizando un refractómetro (*Sper Scientific*), se adicionaron 50 μL del aceite esencial en el prisma a 20°C y se realizó la lectura [10].

Cromatografía Gases acoplada a Espectrometría de Masas (GC-MS)

Los aceites esenciales obtenidos se analizaron en un cromatógrafo de gases *Shimadzu GC 2010*, con inyector *split/splitless* acoplado a un detector selectivo de masas *MS/GCT 8040*, modo de ionización *EI*, analizador de masas triple cuadrupolo y dos sistemas de separación. El primero empleó una columna apolar *RTX-5MS* (60 m x 0,25 mm x 0,25 μm) bajo las siguientes condiciones de operación: el gas de arrastre fue helio a un flujo de 1,5 ml/min. La temperatura del horno se programó desde 40°C (2 min) hasta 125°C (2 min) a $4^\circ\text{C}/\text{min}$, luego se incrementó hasta 160°C (5 min) a $4^\circ\text{C}/\text{min}$, posteriormente se aumentó hasta 220°C (8 min) a $5^\circ\text{C}/\text{min}$ y, finalmente, la temperatura aumentó a 280°C (4 min) a $5^\circ\text{C}/\text{min}$. La temperatura en el puerto de inyección fue de 250°C y la de la línea de transferencia de 290°C , la relación de *split* 1:20 y el voltaje de ionización fue de 70 eV a una corriente de 60 μA . La adquisición de los espectros de masas se realizó en un rango de masas entre 30-600 m/z. El segundo sistema de separación fue una columna polar *DB-WAX* (60 m x 0,25 mm x 0,25 μm) operado bajo las mismas condiciones excepto por la programación de la temperatura del horno que fue de la siguiente forma: 45°C (4 min) hasta 250°C (8 min) a $4^\circ\text{C}/\text{min}$. Se inyectó 1,0 μl de cada solución analizada. Dilución 1/40 (25 μl aceite a 1.0 ml utilizando hexano como diluyente).

La identificación de los compuestos se basó en la comparación de los índices de retención (IR) y sus espectros de masas con los reportados en las librerías *NIST08*, *Wiley 9L*, *Pherobase* y en *Adams* [11]. Los IR se calcularon teniendo en cuenta los tiempos de retención de una serie homóloga de n-alcanos (C8 – C 28) corridos bajo las mismas condiciones de análisis

cromatográficas que el aceite esencial. La integración de la corriente iónica total, expresada en porcentaje de abundancia, se utilizó como un parámetro aproximado para determinar la composición relativa del aceite.

Cepa de *Ralstonia solanacearum*

La bacteria *Ralstonia solanacearum* fue registrada en el Registro Nacional de Colecciones (RNC129) y colectada bajo el permiso marco número 1466 de Agrosavia de 2014, actualizado por la resolución 04039 del 19 de julio de 2018. pertenece a un aislamiento obtenido de tomate que estaba conservada a -80° C en glicerol, y según la caracterización molecular pertenece al filotipo americano II. La bacteria fue activada en medio TZC durante 48 a 72 horas a 28° C [12].

Método de difusión en agar

La actividad antimicrobiana de cada aceite esencial se evaluó por medio del método de difusión en pozo (perforación en gel de agar), en el cual se realizaron 6 perforaciones con un diámetro de 5,0 mm; la cepa de *R. solanacearum* se homogenizó en caldo nutritivo hasta alcanzar una concentración de 1×10^8 UFC/ml y se inoculó en la superficie de todo el medio; en cada uno de los pozos se colocaron 20 µl de los diferentes aceites esenciales a 24 concentraciones diferentes (500, 280, 240, 200, 180, 160, 140, 120, 100, 80, 60, 50, 40, 20, 10, 5.0, 2.0, 1.0, 0.5, 0.25, 0.10, 0.05, 0.025, 0.01 mg/mL), los aceites esenciales se diluyeron con acetona al 99%, como controles negativos se utilizó acetona y agua destilada, y como control positivo rifampicina; una vez inoculadas las cajas, se incubaron a 28° C durante 24 a 48 horas, posterior a la incubación se midió el halo de inhibición del crecimiento (mm) y se calculó para cada aceite esencial el porcentaje de efecto inhibitorio relativo, con respecto al control positivo con la siguiente ecuación [13], [14].

$$\% \text{ efecto inhibitorio} = \frac{\text{Media diámetro halo de inhibición}}{\text{Diámetro halo inhibición control positivo}} \times 100 \quad (\text{Ecuación 3})$$

Determinación de Concentración mínima inhibitoria (CMI) y concentración mínima bactericida (CMB), método micro dilución

La CMI es la concentración más baja de la sustancia que puede inhibir el crecimiento visible de un microorganismo después de incubar durante 24 horas y la CMB es la concentración más baja que puede inhibir el crecimiento de un microorganismo después de ser subcultivado en un medio libre del compuesto evaluado. Para realizarlo se utilizó el método de microdilución (ISO 10932, IDF 223:2010) se suspendió una colonia de bacterias en 5,0 ml de caldo nutritivo y se incubó a 28° C durante 24 horas en agitación, después se realizó una dilución para obtener un valor de absorbancia en el espectrofotómetro que correspondía a una concentración de $1,5 \times 10^8$ UFC/ml (0,1 D.O a 600 nm). Se prepararon una serie de diluciones de los aceites esenciales con acetona, y en una caja de Elisa de 96 pozos con un volumen final de trabajo de 200 µl, se colocaron 2,0 µl del microorganismo para obtener una concentración final de $1,0 \times 10^6$ ufc/ml y 10 µl del aceite esencial diluido, además de caldo nutritivo como medio de crecimiento; como control positivo se utilizó *R. solanacearum* con el medio de cultivo únicamente, como control negativo se utilizó el microorganismo con el medio de cultivo (caldo nutritivo) y rifampicina 5,0 µg/ml; se evaluó además la acetona para determinar que no generará inhibición en el crecimiento de la bacteria ya que era el diluyente de los aceites esenciales; se midió la absorbancia en el tiempo 0 y 24 horas después, cada prueba se realizó por triplicado la concentración inhibitoria mínima (CMI) y se determinó como la concentración más baja de compuestos ensayados que causó una inhibición del crecimiento del 100% en comparación con el control [15]. Para determinar la concentración mínima bactericida (CMB), se sembraron asépticamente en agar alícuotas de la

suspensión bacteriana (100 µl) que no mostraban turbidez visible; La CMB se consideró como la concentración más baja de aceite esencial que inhibe el crecimiento de colonias visibles en el medio [14], [16].

Análisis estadístico

Para llevar a cabo el análisis del perfil químico encontrado dentro de cada aceite esencial se utilizaron boxplots y la prueba ANOVA para comparar de manera individual la concentración de los compuestos. Posteriormente se realizó un análisis de componentes principales (PCA) para evaluar los posibles compuestos que presentaron una mayor influencia dentro de cada AE. Para realizar los análisis de los datos de inhibición en placa, se utilizaron gráficos de barras y se realizó una prueba ANOVA con una prueba post-hoc de Tukey ($p\text{-value} < 0,05$). Finalmente, para los análisis de los datos de las pruebas de inhibición en medio líquido se utilizaron barras y se realizó una prueba t pareada por cada tratamiento con una corrección de Bonferroni ($p\text{-value} < 0,05$). Todos los datos fueron analizados usando *Rstudio v4.4.1* (RStudio team, 2024) y las librerías ggplot2, ggpubr, stats, tidyr, dplyr, tidyverse y svglite. Previo al análisis de todos los grupos de datos se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk y Levene para confirmar los supuestos de normalidad [17].

Resultados

Análisis de la composición fisicoquímica de los aceites esenciales

La composición química de los tres aceites esenciales obtenidos se organizó en cuatro grupos de metabolitos: monoterpenos oxigenados (MO), monoterpenos hidrocarburos (MH), sesquiterpenos hidrocarburos (SH) y sesquiterpenos oxigenados (SO). De los 39 compuestos determinados en los tres aceites esenciales, inicialmente se comparó la presencia de sus compuestos de manera univariada estableciendo los porcentajes de abundancia encontrados para cada uno de ellos. Se destaca para el aceite esencial de *O. majorana* L., la presencia de ocho compuestos como Allo-Aromadendreno (SH), Anisol (MO), cis-*b*-Ocimeno (MH), Germacreno A (SH), *p*-menta-2,4(8)-dieno (MO), Trans *b*-Terpineol (MO), *b*-Omiceno E (MH) y δ -Amorfeno (SH), donde se observa la presencia de los tres grupos de metabolitos encontrados en este estudio (MH, MO y SH), enfatizando la alta producción de los compuestos de tipo MO y SH, entre ellos el Anisol con el 8,24 % de abundancia. Para el caso de *R. officinalis* L., se resalta la presencia de los compuestos exclusivos Canfor (MO) (12,49 %), Trans-piperitol (MO) y α -terpinoleno (MH). Finalmente, en cuanto a *T. vulgaris* L., sobresale presencia de compuestos como Aromadreno (SH), Geraniol (MO) y Octeno 2Z (ALC) (tres compuestos) (Figura 1).

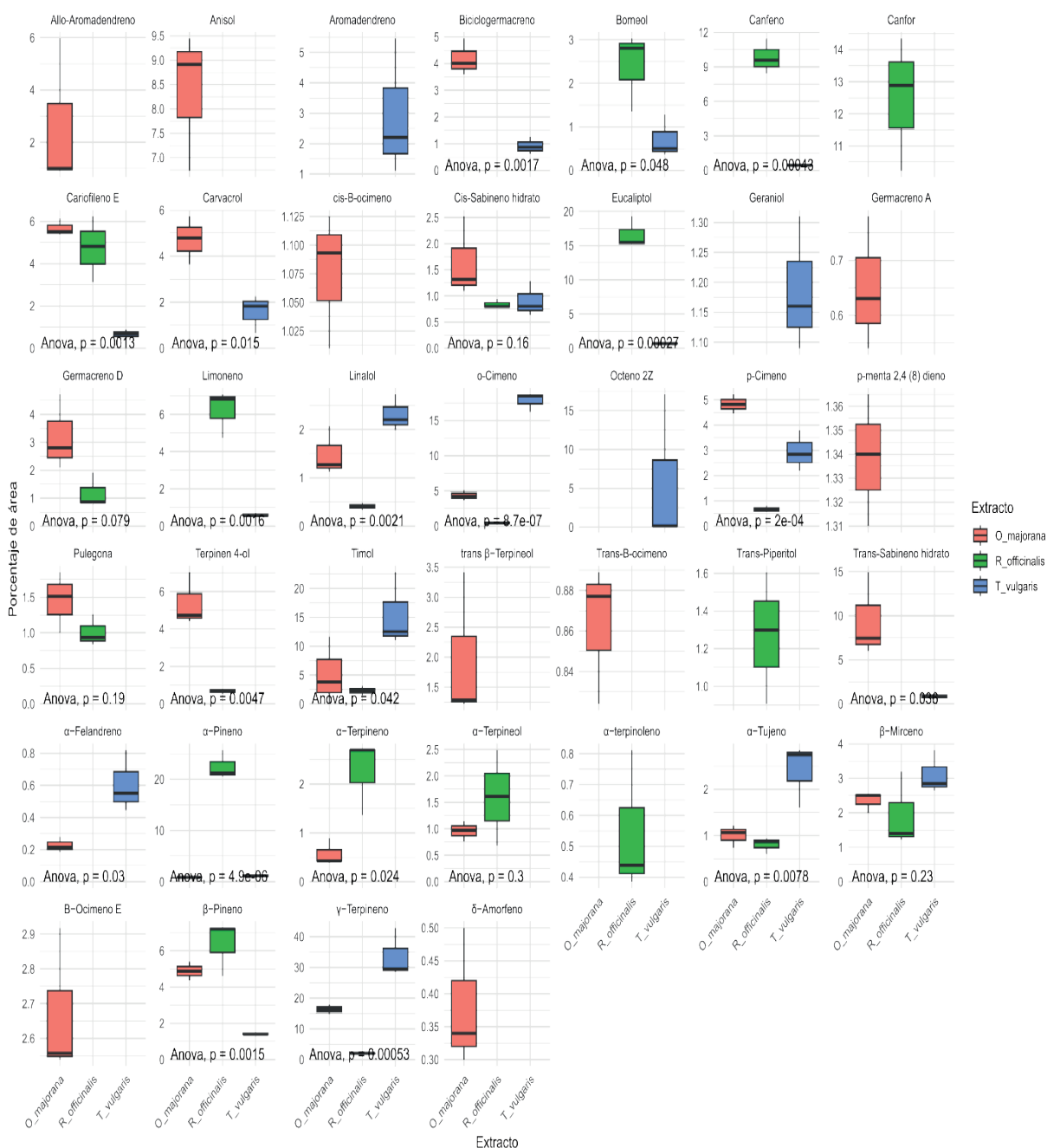


Figura 1. Análisis univariado de las concentraciones de los 39 compuestos encontrados en los aceites esenciales de *Origanum majorana* (naranja), *Rosmarinus officinalis* (verde) y *Thymus vulgaris* (azul).

Se realizó un análisis de componentes principales (PCA) para comparar la composición de los tres aceites esenciales. Inicialmente se observa que cada uno de los aceites evaluados presenta una composición particular, por lo que cada una de las réplicas se agrupa en un cuadrante.

Los resultados muestran que el aceite que presenta mayor influencia, a nivel bioquímico, en su composición es *O. majorana*; esta planta se encuentra enriquecida con 18 compuestos dentro de los que se resalta un alto contenido de MO (8 compuestos), seguido de SH (6 compuestos) y MH (4 compuestos), cuyos compuestos principales son γ -Terpineno (16,82 %) y *trans*-Sabineno hidrato (9,57 %). En segundo lugar, se encuentra en el aceite esencial de *R. officinalis*, con 11

compuestos que corresponden a los más abundantes en el aceite, principalmente del tipo MH (6 compuestos) y MO (5 compuestos) siendo los compuestos principales el α -Pinenos (22,48 %) y Eucaliptol (16,62 %). Finalmente, en *T. vulgaris* los 10 compuestos más abundantes son del tipo MH (6 compuestos), SH (3 compuestos) y un compuesto de tipo alcano (ALC), entre ellos se destaca el γ -Terpineno (33,47 %) y α -Cimeno (17,22 %). Es posible que la actividad antibacteriana de los aceites esenciales se atribuya a estos compuestos que están presentes en mayor abundancia (Figura 2).

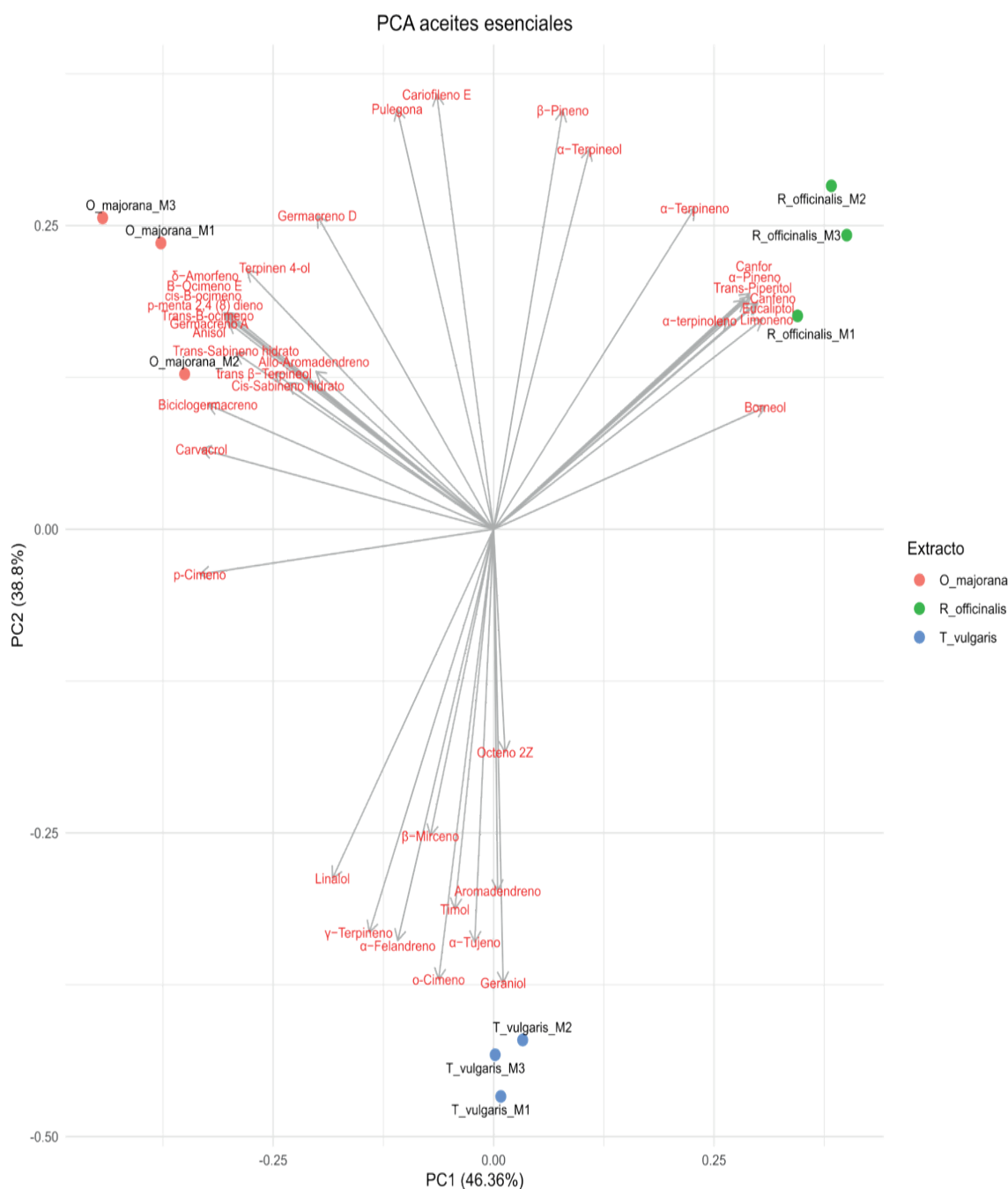


Figura 2. Análisis de componentes principales de la composición de aceites esenciales encontrada en las plantas *O. majorana* (naranja), *R. officinalis* (verde) y *T. vulgaris* (azul).

Para llevar a cabo un análisis que permitiera comparar las variables densidad y rendimiento del aceite esencial con respecto a la biomasa, los resultados permitieron demostrar que no existió una diferencia estadísticamente significativa al comparar la densidad obtenida entre cada uno la cual oscilo entre 0,83-0,87 mg/mL. Sin embargo, se observaron diferencias en los rendimientos; siendo el aceite con el mayor rendimiento el de *R. officinalis* (0,86 % p/p), seguido del aceite de *T. vulgaris* (0,31% p/p) y el aceite de *O. majorana* (0,16 % p/p), los rendimientos encontrados para cada aceite reflejan resultados significativos entre cada uno de ellos Finalmente, se determinó el índice de refracción para *O. majorana* (1,4877), *R. officinalis* (1,5121) y *T. vulgaris* (1,4882) (Figura 3).

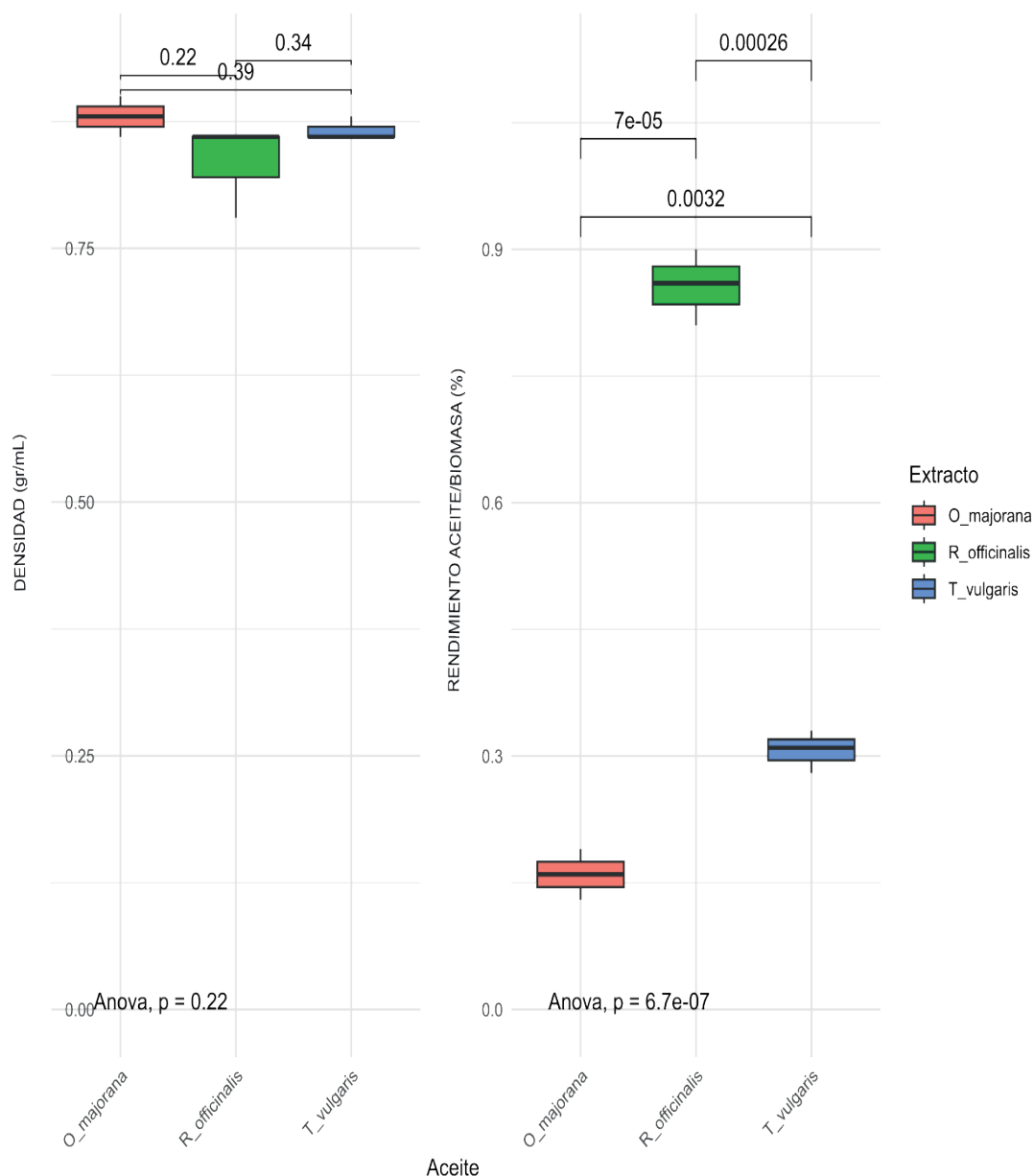


Figura 3. Análisis de densidad (mg/mL) y rendimiento aceite esencial/biomasa (% p/p) para los aceites esenciales encontrados en las especies *O. majorana* (naranja), *R. officinalis* (verde) y *T. vulgaris* (azul). En la parte superior se encuentra el resultado del t-test con el nivel de significancia (p-value < 0,05) y en la inferior se encuentra el resultado de la prueba ANOVA (p-value < 0,05).

Actividad antimicrobiana de los tres aceites esenciales frente a *Ralstonia solanacearum*, por el método de difusión en agar

Los aceites esenciales han demostrado tener efecto antimicrobiano contra diferentes microorganismos de interés en fitopatología. Dentro de los resultados encontrados se resalta que todos los tratamientos evaluados mostraron un porcentaje de inhibición significativo al compararlos frente al control negativo, lo que determina que los tres aceites esenciales tienen potencial antimicrobiano contra el patógeno. En cuanto a los tratamientos con mayores efectos inhibitorios, los aceites esenciales extraídos para el género *O. mejorana* (160 mg/mL) y *T. vulgaris* (80 mg/mL) mostrarían los resultados de inhibición con mayores porcentajes. En cuanto a los resultados obtenidos para *R. officinalis*, los datos indicarían que, en altas concentraciones, los aceites esenciales tendrían un efecto menor. Por último, los tratamientos y concentraciones propuestas no tendrían diferencias significativas al comparar con el control positivo, lo que indicaría que su efecto no difiere de lo obtenido con el control positivo (rifampicina), exceptuando el resultado que se obtuvo para la concentración de *R. officinalis* (180 mg/mL) donde se obtendría un porcentaje de inhibición diferente al control positivo (37 % de inhibición) Figura 4 y Tabla1.

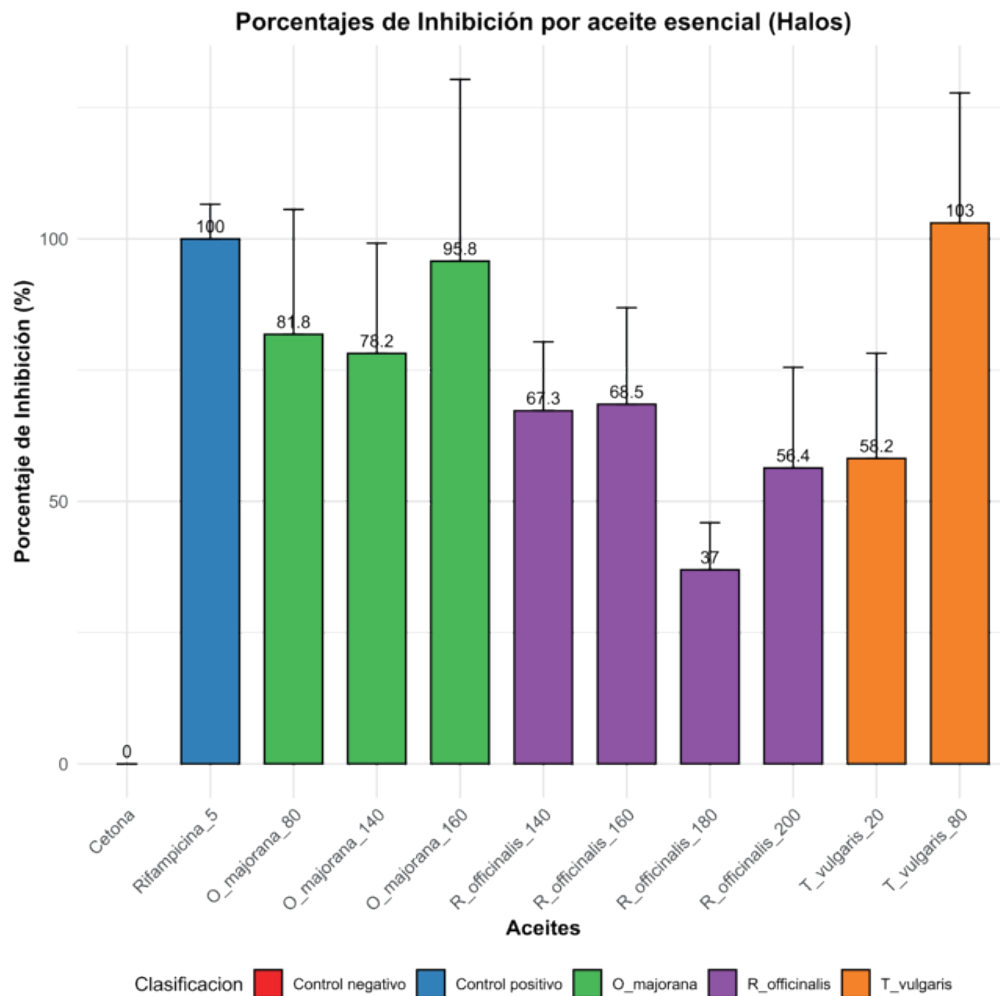


Figura 4 Barplot obtenidos para las pruebas de inhibición en placa de los aceites esenciales obtenidos de *O. mejorana*, *R. officinalis* y *T. vulgaris* en diferentes concentraciones.

Concentración mínima inhibitoria (CMI) y concentración mínima bactericida (CMB)

Se observó que los tratamientos con *O. majorana* (0,545 mg/mL), *R. officinalis* (4,37 mg/mL) y *T. vulgaris* (0,625 mg/mL) presentan inhibición frente a *R. solanacearum* comparable con el control positivo (rifampicina) al cabo de 24 horas. En algunos casos, el aumento en la concentración de algunos de los aceites puede llevar a un aumento de O.D., sin necesariamente implicar una disminución de la actividad bactericida o antimicrobiana, principalmente por la influencia que pueden presentar factores como la absorbancia del aceite o el medio. Estas concentraciones mantienen un umbral de 12 UFC o menos en todos los tratamientos realizados. Menores concentraciones de aceite en medio líquido podrían llevar al aumento de UFC. Finalmente, los tres aceites esenciales evaluados, son altamente eficientes para la inhibición de crecimiento bacteriano de bacterias como *Ralstonia solanacearum*, demostrando el alto potencial que tienen para inhibir el crecimiento de patógenos tras su aplicación a nivel agrícola (Figura 5), obteniéndose las CMI y CMB para cada uno de los aceites esenciales presentadas en el cuadro 1.

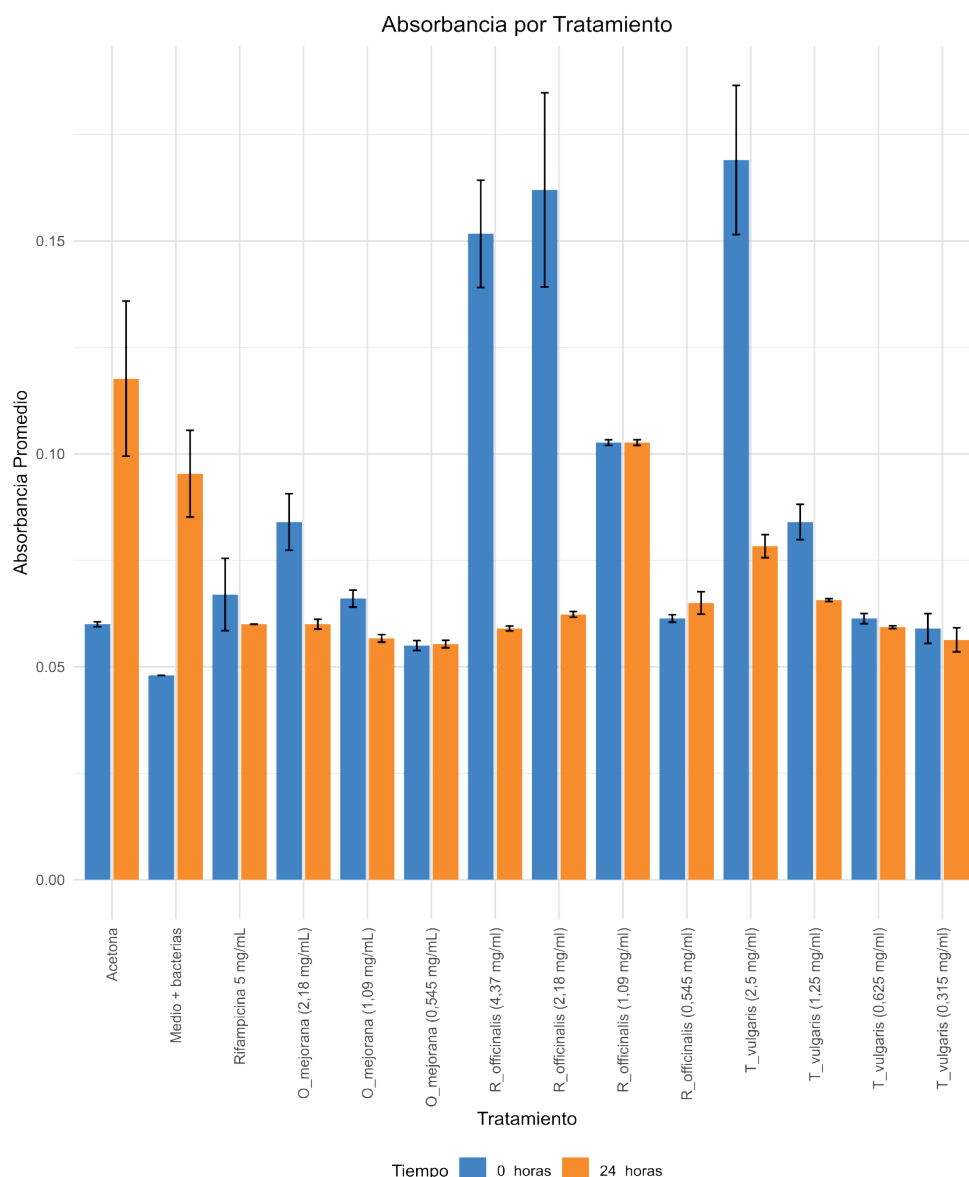


Figura 5. Gráfico de barras de la absorbancia obtenida a las 0 horas y 24 horas para la evaluación del crecimiento de *Ralstonia solanacearum* en medio líquido durante la interacción con los tres aceites esenciales en diferentes concentraciones.

Cuadro 1. Concentración mínima inhibitoria (CMI) y concentración mínima bactericida (CMB) para cada aceite esencial evaluado frente a *Ralstonia solanacearum*.

Aceite Esencial	CMI (mg/L)	CMB (mg/mL)
<i>O. majorana</i> L.	0,545 mg/mL	1,09 mg/MI
<i>R. officinalis</i> L.	1,09 mg/mL	2,18 mg/mL
<i>T. vulgaris</i> L.	0,625 mg/mL	1,25 mg/mL

Los anteriores resultados permiten demostrar que los aceites esenciales *O. majorana*, *R. officinalis* y *T. vulgaris* tienen efecto antimicrobiano contra el fitopatógeno *R. solanacearum* en diversas concentraciones.

Discusión y conclusiones

Los aceites esenciales son una mezcla de compuestos que pueden ser extraídos por diferentes métodos, entre los más utilizados se encuentra la hidrodestilación y la destilación por arrastre por vapor, influyendo estos en el rendimiento aceite esencial/biomasa que se pueda obtener. A los aceites esenciales se les han identificado diferentes actividades incluyendo la antimicrobiana, pero su acción depende de la mezcla y cantidad de compuestos, atribuyéndose dicha actividad a la sinergia de sus componentes. Los aceites esenciales pueden representar una alternativa para disminuir o erradicar el uso de plaguicidas químicos sintéticos que generan tanto daño en la cadena trófica y se biodegradan lentamente en el medio ambiente, además, de la producción de compuestos secundarios que pueden ser mucho más tóxicos que los originales, por tal razón es necesario realizar estudios *in vitro* para determinar si los aceites esenciales funcionan contra diferentes microorganismos que producen enfermedades a nivel de humanos, animales, plantas y proponer una biosolución amigable con el medio ambiente.

Por lo anterior es necesario conocer las características fisicoquímicas de cada aceite esencial y compararlas con las de otros aceites esenciales obtenidos de la misma especie. Por ejemplo, Mehanna y colaboradores (2022), determinaron para *O. majorana* L. un rendimiento del 1,1 % p/p, densidad 0,9350 g/mL-0,9430 g/mL e índice de refracción 1,500-1,530, estos valores son superiores a los del presente estudio (0,16 % p/p, 0,87 mg/mL y 1,487, respectivamente). Según los estándares de la farmacopea europea para el aceite de *R. officinalis* L., el índice de refracción oscila entre 1,464 - 1,473, en el presente estudio el valor fue 1,5121; mientras que para la densidad y el rendimiento se obtuvieron valores dentro del rango establecido. Lugo y colaboradores (2019), para *T. vulgaris* L. encontraron los valores de densidad (0,934 mg/mL) y del índice de refracción (1,559) superiores los obtenidos en el presente estudio (0,86 mg/mL y 1,482, respectivamente); mientras que el rendimiento se encontró en el mismo 0,15 - 0,57 % p/p. Es importante destacar que el rendimiento al igual que la composición química de los aceites esenciales, depende de diversos factores tales como el método de extracción ya que puede incidir en la obtención de mayor o menor cantidad de aceite, el cultivo, las condiciones edafológicas, geográficas, los periodos de recolección, la altitud, la radiación solar, entre otros [18], [19], [20], [21], [22].

Comparando los resultados de composición química y actividad antimicrobiana de los tres aceites esenciales estudiados, Della y colaboradores (2019) evaluaron el aceite de *O. majorana* contra bacterias de interés agrícola como *P. syringae* pv. *phaseolica*, *Xanthomonas campestris*, *Clavibacter michiganensis*, los cuales ejercieron actividad antimicrobiana en concentraciones de 12 mg/mL y 6 mg/mL con porcentajes de inhibición entre el 20 al 60%, en estos aceites e identificaron principalmente Terpinen-4-ol (29,6 %) y δ -2-Careno (20 %), que no se detectaron en nuestro aceite esencial [8]. Mohammed y su grupo de colaboradores determinó para *R. officinalis* que produjo halos de inhibición entre 8 - 10 mm para diversas bacterias (*S. aureus*, *K.*

pneumoniae, *P. vulgaris*), identificando en el aceite esencial 1,8-cineol (17 %) y α -pineno (16,9 %) [6] which endanger antibiotic efficacy. The essential oil of some plants have antimicrobial activity without enhancing the antibiotic resistance. \nMethods: In this study, *Rosmarinus officinalis* L. from Marivan (Kurdistan Province, Iran. Gedikoğlu y colaboradores (2019 para *T. vulgaris* determinaron como compuesto principal el timol (51 %), seguido de *p*-Cimeno (11 %), este último se detectó en el presente trabajo; la acción antimicrobiana se presentó contra bacterias patógenas de interés humano produciendo halos de inhibición entre 13 - 31 mm de diámetro (*E. coli*, *S. typhimurium*) sin especificar concentraciones de los aceites [5].

R. solanacearum es un fitopatógeno que ha generado gran preocupación a nivel agrícola por ser cosmopolita y generar grandes pérdidas económicas poniendo en riesgo la seguridad alimentaria, a pesar de que el control químico reduce este tipo de microorganismos a largo plazo producen consecuencias ambientales y metabólicas ya que los microorganismos diana de estas sustancias modifican sus rutas metabólicas para evadir la forma de acción, agravando la situación de los químicos sintéticos. El modo de acción de los aceites esenciales contra *R. solanacearum* es atribuido a compuestos fenólicos y terpenoides como en los trabajos donde se utilizan aceites esenciales de palmarosa, limoncillo, clavo, eucalipto, *Ocimum gratissium*, *Coriandrum savitum*. Hosseini y colaboradores demostraron que el aceites esenciales de *Thymus vulgaris* generaba inhibición de crecimiento contra *R. solanacearum* desde 6,5 hasta 35 mm en concentraciones ascendentes desde 0,5 % hasta 100 % y CMI y CMB (1 mg/ml); y de 6,5 a 11 mm (25 – 100 %), CMI (250 mg/ml) y CMB (500 mg/ml) para *Rosmarinus officinalis* [23]. Hosseinzadeh también trabajo con *T. vulgaris* cuyo componente mayoritario era el timol y determino una CMB (1,15 ppm) para *R. solanacearum* [24]. Tanto los datos obtenidos en el presente trabajo como en trabajos similares permiten determinar que la función de los aceites esenciales es la alteración de la membrana por fraccionamiento de lípidos y daño mitocondrial, haciendo estos órganos permeables, causando la salida de moléculas y iones importantes para la bacteria; también se documenta la inhibición de la producción de enzimas como la amilasa y proteasa lo que detiene la producción de toxinas [25]. Es importante mencionar que la diferencia en las concentraciones de los aceites esenciales para la técnica difusión en agar y CMI, CMB, se debe al tipo de soporte líquido y sólido donde esta se desarrolla.

Como conclusión se puede determinar que gracias a la gran variedad de compuestos que poseen los aceites esenciales que han sido ampliamente probados como antimicrobianos contra diversos microorganismos patógenos es posible asegurar que su uso podría reemplazar a los plaguicidas convencionales o por lo menos disminuirlos ya que causan un gran daño a la salud humana, animal y el medio ambiente; los datos de la presente investigación prueban que no todos los aceites esenciales funcionan de la misma manera contra *Ralstonia solanacearum* tanto en la técnica de difusión en agar como hallando la CMI y CMB. La familia Lamiaceae y los aceites esenciales probados en la presente investigación tienen gran potencial como bioplaguicidas.

Agradecimientos

Facultad de ciencias de la salud de la Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca; Dr. Luis Enrique Cuca Suárez Laboratorio de productos naturales y vegetales UNAL, a Magda Roció Gómez Marroquín y el equipo del Centro de investigación Tibaitatá AGROSAVIA (Mosquera-Colombia).

Referencias

- [1] F. Vailleau y S. Genin, «*Ralstonia solanacearum*: an arsenal of virulence strategies and prospects for resistance», *Annu. Rev. Phytopathol.*, vol. 61, n.º 1, pp. 25-47, sep. 2023, doi: 10.1146/annurev-phyto-021622-104551.

- [2] A. Abdurahman *et al.*, «Molecular epidemiology of *Ralstonia solanacearum* species complex strains causing bacterial wilt of potato in Uganda», *Phytopathology®*, vol. 109, n.º 11, pp. 1922-1931, nov. 2019, doi: 10.1094/PHYTO-12-18-0476-R.
- [3] L. R. Ramos da Silva *et al.*, «Lamiaceae essential oils, phytochemical profile, antioxidant, and biological activities», *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, vol. 2021, pp. 1-18, dic. 2021, doi: 10.1155/2021/6748052.
- [4] T. M. Karpiński, «Essential oils of Lamiaceae family plants as antifungals», *Biomolecules*, vol. 10, n.º 1, p. 103, ene. 2020, doi: 10.3390/biom10010103.
- [5] A. Gedikoğlu, M. Sökmen, y A. Çivit, «Evaluation of *Thymus vulgaris* and *Thymbra spicata* essential oils and plant extracts for chemical composition, antioxidant, and antimicrobial properties», *Food Sci Nutr*, vol. 7, n.º 5, Art. n.º 5, may 2019, doi: 10.1002/fsn3.1007.
- [6] J. J. M. J. Al Zuhairi, F. Jookar Kashi, A. Rahimi-Moghaddam, y M. Yazdani, «Antioxidant, cytotoxic and anti-bacterial activity of *Rosmarinus officinalis* L. essential oil against bacteria isolated from urinary tract infection», *European Journal of Integrative Medicine*, vol. 38, p. 101192, sep. 2020, doi: 10.1016/j.eujim.2020.101192.
- [7] S. Nardoni, B. Najar, B. Fronte, L. Pistelli, y F. Mancianti, «*In vitro* activity of essential oils against *Saprolegnia parasitica*», *Molecules*, vol. 24, n.º 7, Art. n.º 7, ene. 2019, doi: 10.3390/molecules24071270.
- [8] T. Della Pepa *et al.*, «Antimicrobial and Phytotoxic Activity of *Origanum heracleoticum* and *O. majorana* Essential Oils Growing in Cilento (Southern Italy)», *Molecules*, vol. 24, n.º 14, Art. n.º 14, jul. 2019, doi: 10.3390/molecules24142576.
- [9] C. Granados, X. Yáñez, y D. Acevedo, «Evaluación de la actividad antioxidante del aceite esencial *Myrcianthes leucoxyla* de Norte de Santander (Colombia)», *Inf. tecnol.*, vol. 25, n.º 3, Art. n.º 3, 2014, doi: 10.4067/S0718-07642014000300003.
- [10] AOAC, *Official methods of analysis*, 15.^a ed., vol. 1, 5 vols. Washington, DC: AOAC Inc., 1995. Accedido: 12 de septiembre de 2020. [En línea]. Disponible en: <https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/002/aoac.methods.1.1990.pdf>
- [11] R. Adams, *Identification of essential oils components by Gas Chromatography/mass spectrometry*, 4th edition., vol. 1. Carol Stream Illinois: Allured Pub Corp, 2007.
- [12] C. D. Vargas Baquero, «Bacterias ácido lácticas como biocontroladoras de la marchitez vascular ocasionada por *Fusarium oxysporum* y *Ralstonia solanacearum* en tomate», Tesis Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá- Colombia, 2020.
- [13] A. Cruz-Carrillo, N. Rodríguez, y Rodríguez Carlos Eduardo, «Evaluación *in vitro* del efecto antibacteriano de los extractos de *Bidens pilosa*, *Lantana camara*, *Schinus molle* y *Silybum marianum*», *Rev. U.D.CA Act. & Div. Cient.*, vol. 13, n.º 2, Art. n.º 2, 2010.
- [14] L. E. Ramírez y D. Marín Castaño, «Metodologías para evaluar *in vitro* la actividad antibacteriana de compuestos de origen vegetal», *Scientia et Technica*, vol. XV, n.º 42, Art. n.º 42, 2009.
- [15] M. Balouri, M. Sadiki, y S. K. Ibensouda, «Methods for *in vitro* evaluating antimicrobial activity: A review», *Journal of Pharmaceutical Analysis*, vol. 6, n.º 2, pp. 71-79, abr. 2016, doi: 10.1016/j.jpha.2015.11.005.
- [16] L. Orzali, M. T. Valente, V. Scala, S. Loreti, y N. Pucci, «Antibacterial activity of essential oils and *Trametes versicolor* extract against *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis* and *Ralstonia solanacearum* for Seed treatment and development of a rapid *in vivo* assay», *Antibiotics*, vol. 9, n.º 9, Art. n.º 9, sep. 2020, doi: 10.3390/antibiotics9090628.
- [17] *RStudio team*. (2024). [En línea]. Disponible en: <http://www.posit.co/>
- [18] T. H. Barak, E. Bölükbaş, y H. Bardakci, «Evaluation of Marketed Rosemary Essential Oils (*Rosmarinus officinalis* L.) in Terms of European Pharmacopoeia 10.0 Criteria», *tjps*, vol. 20, n.º 4, pp. 253-260, ago. 2023, doi: 10.4274/tjps.galenos.2022.78010.
- [19] L. Lugo-Estrada, S. Galindo-Rodríguez, L. Pérez-López, N. De Torres, y R. Álvarez-Román, «Headspace-solid-phase microextraction gas chromatography method to quantify *Thymus vulgaris* essential oil in polymeric nanoparticles», *Phcog Mag*, vol. 15, n.º 63, p. 473, 2019, doi: 10.4103/pm.pm_277_18.
- [20] S. Mehanna, M. Y. Issa, N. H. Hassan, A. M. Hussien, M. A. Ibrahim, y E. I. Hassanen, «*Origanum majorana* essential oil improves the rat's sexual behavior and testicular oxidative damage induced by imidacloprid via modulating the steroidogenesis pathways», *Saudi Pharmaceutical Journal*, vol. 30, n.º 9, pp. 1315-1326, sep. 2022, doi: 10.1016/j.jsps.2022.06.016.

- [21] M. Chetouani, R. Chetouani, E. Loukili, y B. Hammouti, «The qualitative and quantitative study of Rosmarinus officinalis essential oils under the effect of water stress at the juvenile and adult stages in greenhouse», *J. Mater. Environ. Sci.*, vol. 14, n.º 8, pp. 967-977, 2023.
- [22] A. Raffo *et al.*, «Effect of Different Soil Treatments on Production and Chemical Composition of Essential Oils Extracted from Foeniculum vulgare Mill., Origanum vulgare L. and Thymus vulgaris L.», *Plants*, vol. 12, n.º 15, p. 2835, jul. 2023, doi: 10.3390/plants12152835.
- [23] M. Hosseini Nezhad, L. Alamshahi, y N. Panjehkeh, «Biocontrol efficiency of medicinal plants against Pectobacterium carotovorum, Ralstonia solanacearum and Escherichia coli», *TOPROCJ*, vol. 3, n.º 1, pp. 46-51, nov. 2012, doi: 10.2174/1876326X01203020046.
- [24] S. Hosseinzadeh, M. Shams-Bakhsh, y E. Hosseinzadeh, «Effects of sub-bactericidal concentration of plant essential oils on pathogenicity factors of *Ralstonia solanacearum*», *Archives of phytopathology and plant protection*, vol. 46, n.º 6, pp. 643-655, abr. 2013, doi: 10.1080/03235408.2012.749698.
- [25] B. R. Ghalem, «Essential Oils as Antimicrobial Agents Against Some Important Plant Pathogenic Bacteria and Fungi», en *Plant-Microbe Interaction: An Approach to Sustainable Agriculture*, D. K. Choudhary, A. Varma, y N. Tuteja, Eds., Singapore: Springer Singapore, 2016, pp. 271-296. doi: 10.1007/978-981-10-2854-0_13.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Moneda complementaria basada en tecnología blockchain en Territorio Indígena de Costa Rica

Complementary currency based on blockchain technology in Indigenous Territory, Costa Rica

Paula Arzadun¹, Alan Henderson-García²


Fecha de recepción: 26 de setiembre, 2024


Fecha de aprobación: 7 de febrero, 2025

Arzadun, P; Henderson-García, A. Moneda complementaria basada en tecnología blockchain en territorio indígena de Costa Rica . *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 3. Julio-Setiembre, 2025. Pág. 69-76.


 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i3.7534>

1 Cooperativas de las Américas, Oficina Regional de la Alianza Cooperativa Internacional, San José, Costa Rica. Departamento de Economía y Administración de la Universidad Nacional de Quilmes, Argentina.

 paula.arzadun@unq.edu.ar

 <https://orcid.org/0000-0002-9241-0255>

2 Director de Extensión, Vicerrectoría de Investigación y Extensión, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 ahenderson@tec.ac.cr

 <https://orcid.org/0009-0006-1776-5458>

Palabras clave

Blockchain; monedas complementarias; población indígena; ecosistema socioeconómico; Costa Rica.

Resumen

En Costa Rica, existe una notable disparidad en el desarrollo socioeconómico entre las distintas regiones. En particular, las comunidades indígenas presentan algunos de los índices más bajos de Desarrollo Social del país, situándose en el grupo denominado *Área de Menor Desarrollo Relativo*, con un nivel muy bajo. A pesar de los avances en proyectos orientados a fortalecer estas comunidades mediante iniciativas socio-productivas locales, persisten numerosas limitaciones, como el acceso a bienes no producidos localmente, la necesidad de superar economías de subsistencia, las dificultades para interactuar con otros actores socioeconómicos y el acceso a servicios básicos. En este contexto, el proyecto *Estrategias para el Desarrollo Socioeconómico Territorial mediante el Uso de Monedas Complementarias Basadas en Tecnología Blockchain* tuvo como objetivo analizar la viabilidad de implementar una moneda complementaria basada en blockchain en territorios indígenas como estrategia de desarrollo territorial. Para ello, se empleó un enfoque metodológico mixto que permitió examinar experiencias previas con monedas complementarias en contextos de vulnerabilidad socioeconómica, evaluar el estado de los recursos y capacidades locales, analizar el ecosistema existente y diseñar la moneda complementaria.

Keywords

Blockchain; complementary currencies; indigenous population; socioeconomic ecosystem; Costa Rica.

Abstract

In Costa Rica, there is a notable disparity in socio-economic development across different regions. Indigenous communities exhibit some of the lowest Social Development indices in the country, placing them in the group known as the *Area of Lower Relative Development*, with a very low level. Despite progress in projects aimed at strengthening these communities through local socio-productive initiatives, numerous limitations persist, such as access to goods not produced locally, the need to overcome subsistent economies, difficulties in interacting with other socio-economic actors, and access to basic services. In this context, the project *Strategies for Territorial Socioeconomic Development through the Use of Complementary Currencies Based on Blockchain Technology* aims to analyze the feasibility of implementing a blockchain-based complementary currency in indigenous territories as a territorial development strategy. To this end, a mixed-methods approach was employed, allowing for the examination of previous experiences with complementary currencies in socio-economically vulnerable contexts, the assessment of local resources and capacities, the analysis of the existing ecosystem, and the design of the complementary currency.

Introducción

El dinero ha desempeñado diversas funciones a lo largo de su evolución, siendo una de las principales la facilitación del intercambio de bienes. Con el tiempo, se han establecido instituciones encargadas de su emisión. Sin embargo, las recurrentes crisis socioeconómicas que restringen el acceso a la moneda de curso legal han impulsado la creación de estrategias

alternativas para la supervivencia y han llevado a una reconsideración del sistema social y económico tradicional, así como del desarrollo socioeconómico territorial. Un ejemplo de estas estrategias es la implementación de monedas complementarias [1].

Las monedas complementarias son introducidas por comunidades que acuerdan utilizarlas como medio de intercambio, especialmente cuando la moneda de curso legal es escasa, con el objetivo de preservar sus economías locales [2]-[5]. En los últimos años, la tecnología blockchain se ha incorporado al desarrollo de estas monedas debido a su naturaleza descentralizada, compartida y sustentada en una base de datos pública [6].

La pandemia de COVID-19 ha resaltado la importancia de las estructuras de intercambio mediadas por nuevas tecnologías, aunque no sin desafíos y críticas [7], [8]. En este contexto, es crucial fomentar estrategias consensuadas por la comunidad para garantizar su sostenibilidad [1], [5]. En Costa Rica, la pandemia provocó un aumento significativo en el desempleo y el cierre de numerosas micro, pequeñas y medianas empresas (mipymes).

El Tecnológico de Costa Rica (TEC), a través de su interacción con la sociedad, enriquece su labor y se retroalimenta continuamente, lo que le permite enfocarse en abordar los problemas prioritarios del país en general y de la Región Huetar Caribe en particular, con un firme compromiso hacia la mejora de la calidad de vida de los costarricenses. La colaboración entre la universidad y las comunidades indígenas, basada en un enfoque de construcción conjunta de soluciones, ha permitido el desarrollo de capacidades locales en áreas como el fortalecimiento de sistemas de producción y comercialización, la formación de redes locales, la producción y el turismo sostenibles, así como la organización comunitaria [9], [10].

Dado que las comunidades indígenas se encuentran entre los sectores más vulnerables debido a la pobreza y el desarrollo limitado, es fundamental seguir apoyando estas iniciativas. A pesar de los avances en el fortalecimiento socio-productivo de las organizaciones comunitarias, persisten desafíos como el acceso a bienes no producidos localmente, la superación de economías de subsistencia, la interacción con otros actores socioeconómicos y el pago de servicios. Reconociendo estas limitaciones, se formuló el Proyecto “Estrategias para el Desarrollo Socioeconómico Territorial mediante el Uso de Monedas Complementarias Basadas en Tecnología *Blockchain*”.

El objetivo general del proyecto consistió en analizar la potencial implementación de una moneda complementaria basada en tecnología *blockchain* en territorio indígena. Así, se formularon los siguientes objetivos específicos:

- OE1. Estudiar experiencias de implementación de monedas complementarias en entornos de vulnerabilidad socioeconómica
- OE2. Definir la matriz de recursos y capacidades locales para la implementación de una moneda complementaria
- OE3. Identificar el potencial ecosistema en la implementación de una moneda local
- OE4. Estudiar la percepción de la población local sobre el uso de monedas complementarias
- OE5. Co-diseñar un piloto de moneda complementaria

Estrategia de abordaje: materiales y métodos

Se adoptó un enfoque metodológico mixto para profundizar en las experiencias de implementación de monedas complementarias en contextos de vulnerabilidad socioeconómica, así como en el análisis del estado de los recursos y capacidades locales, el ecosistema y el diseño de la moneda complementaria.

Con base en la experiencia adquirida a lo largo de varios años en proyectos de extensión, en los que el equipo del TEC ha colaborado con mujeres indígenas Cabécar, se empleó una perspectiva intercultural, de género y de derechos humanos. Este enfoque busca facilitar el diálogo entre los conocimientos ancestrales y los universitarios, con el fin de identificar estrategias más efectivas para apoyar el buen vivir indígena. Se inscribe dentro del desarrollo económico local como una estrategia de crecimiento “de abajo hacia arriba”, promoviendo una concertación basada en planteamientos colectivos y permitiendo que la población juegue un papel activo en los procesos futuros de su propio desarrollo comunitario.

Este enfoque contrasta con las estrategias “de arriba hacia abajo”, que históricamente han contribuido al rezago económico y social en la Región Caribe costarricense, especialmente en la población indígena [11]. Para el logro del propósito del proyecto se trabajó tal como se detalla en el cuadro 1.

Cuadro 1. Ficha técnica del abordaje metodológico.

Oe	Enfoque	Técnica	Instrumento	Unidad muestral	Unidad respondiente
1	Cualitativo	Entrevista en profundidad	Guion de entrevista	Experiencias de monedas complementarias en entornos de vulnerabilidad socioeconómica	Líderes y lideresas comunitarios Impulsores de monedas complementarias Detractores de monedas complementarias Diseñadores de tecnología blockchain
2	Mixto	Entrevista	Cuestionario	Comunidades del territorio Cabécar	Líderes y lideresas comunitarios Tejedoras
		Entrevista en profundidad	Guion de entrevista		
3	Cualitativo	Sociograma	Mapa de grupos de interés	Actores del ecosistema de implementación de monedas complementarias con tecnología blockchain	Actores públicos, privados, nacionales, internacionales
4	Mixto	Entrevista	Cuestionario	Comunidades del territorio Cabécar	Líderes y lideresas comunitarios Tejedoras
		Entrevista en profundidad	Guion de entrevista		
5	Cualitativo	Diseño de servicio (Blueprint)	Mapa de diseño	Equipo dinamizador	Integrantes del equipo dinamizador

La población meta ha sido familias pertenecientes a las siguientes comunidades del territorio Cabécar: Los Ángeles, San Miguel, San Vicente, Sibujú, China Kichá, Gavilán Canta, Orochico, Monte Sión y El Progreso.

La coordinación con los grupos meta se logró a través del trabajo conjunto que se ha consolidado con anteriores proyectos de extensión [11] y articulando con la Junta Directiva de la Asociación Kabata Konana.

Resultados

Entre los resultados más relevantes que se han co-desarrollado entre el TEC y los grupos comunitarios de mujeres indígenas, se destacan:

- Evaluación del Estado de Conectividad: Relevamiento del estado actual de la conectividad en la región.
- Acceso a Dispositivos Electrónicos: Relevamiento del acceso a dispositivos electrónicos por parte de la población, desglosado por comunidades.
- Identificación de Recursos y Capacidades Necesarias: Identificación de recursos y capacidades que faltan pero son esenciales.
- Matriz de Recursos y Capacidades Locales: Elaboración de una matriz que detalla los recursos y capacidades locales actuales y ausentes necesarios para implementar una moneda complementaria.
- Mapeo del Ecosistema de Actores: Mapeo del ecosistema de actores públicos, privados, nacionales e internacionales relevantes.
- Formación de un Equipo Dinamizador Local: Creación de un equipo local encargado de impulsar la moneda complementaria.
- Relevamiento de Usos Potenciales: Identificación de posibles usos para la moneda complementaria.
- Identificación de Usuarios Potenciales: Relevamiento de los posibles usuarios de la moneda complementaria.
- Co-diseño de la Moneda Complementaria: Diseño conjunto de la moneda complementaria.

Además, como parte de los Trabajos Finales de Graduación realizados por estudiantes del Bachillerato en Administración de Empresas, se han obtenido los siguientes productos:

- Identificación del Ecosistema Potencial: Análisis del ecosistema potencial para la implementación de una moneda complementaria basada en tecnología blockchain en el territorio indígena de Talamanca, Costa Rica.
- Experiencias en Argentina: Revisión de experiencias de implementación de monedas complementarias en contextos de vulnerabilidad socioeconómica en Argentina.

Además, los resultados han sido presentados en encuentros y congresos, y se han generado diversos productos académicos [12].

Es importante destacar la estrategia de apropiación social del conocimiento. Desde su formulación, el proyecto ha promovido que la población objetivo se apropie del conocimiento generado, el cual ha sido construido mediante metodologías participativas desarrolladas de manera conjunta. En este proceso, las participantes han asumido un rol activo en la creación, apropiación y aplicación del saber.

El proyecto se sustenta en el fortalecimiento y la sostenibilidad a largo plazo de iniciativas de extensión previas, impulsadas desde 2013 con mujeres indígenas Cabécar. Estas iniciativas abarcan la gobernabilidad autónoma, la defensa de los derechos indígenas, el fortalecimiento de capacidades socio-organizativas y el desarrollo local. Se espera que la consolidación de estos proyectos contribuya a mejorar la calidad de vida de las mujeres indígenas y sus familias, respetando su cosmovisión y derechos, y fomentando su autogestión.

Resulta fundamental resaltar la colaboración entre las mujeres indígenas y el equipo universitario en la resolución de problemas locales, asegurando así la sostenibilidad del proyecto a largo plazo. Para ello, ha sido clave atender las percepciones y necesidades de las lideresas comunitarias indígenas, reconociendo su rol central en los procesos de sensibilización y diseño. En última instancia, el fortalecimiento de las capacidades de estos grupos de mujeres busca impulsar el desarrollo local en el territorio Cabécar de Talamanca, mejorando sus condiciones socioeconómicas, culturales y ambientales. Asimismo, se pretende transferir buenas prácticas a otras comunidades indígenas.

Para reforzar la integración con la academia, se han implementado diversas estrategias, como la inclusión de estudiantes a través de Trabajos Finales de Graduación, la elaboración de una nota técnica para la Cátedra de Economía de la Escuela de Administración de Empresas, el desarrollo de talleres con resultados preliminares y la organización de conversatorios sobre monedas complementarias basadas en tecnología blockchain.

Conclusiones y recomendaciones

Las monedas complementarias han surgido como una solución viable para fortalecer economías locales en contextos de vulnerabilidad socioeconómica, especialmente cuando la moneda de curso legal es escasa. La incorporación de tecnología blockchain ha optimizado la eficiencia, transparencia y seguridad en la gestión de estas monedas. La pandemia de Covid-19 acentuó la necesidad de fomentar estructuras de intercambio innovadoras y mejorar la capacidad de adaptación a nuevas tecnologías. En este sentido, las monedas complementarias basadas en blockchain representan una alternativa prometedora para facilitar el acceso a recursos y servicios en comunidades vulnerables.

La colaboración entre el Tecnológico de Costa Rica (TEC) y las comunidades indígenas Cabécar ha sido clave para el éxito del proyecto. El enfoque de construcción conjunta ha permitido fortalecer capacidades locales y diseñar soluciones adaptadas a las necesidades específicas de la comunidad. De esta manera, se ha dado continuidad al fortalecimiento de iniciativas previas dirigidas a mejorar la calidad de vida de las mujeres indígenas y sus familias, promoviendo su autogestión y respetando su cosmovisión.

Sin embargo, persisten desafíos importantes, como el acceso a bienes no producidos localmente, la superación de economías de subsistencia y la integración con otros actores socioeconómicos. Abordar estos desafíos es fundamental para garantizar la efectividad y sostenibilidad de las monedas complementarias.

Desde una perspectiva de futuro, se considera esencial mantener y ampliar el apoyo a las comunidades indígenas, especialmente en el contexto de la implementación de monedas complementarias. Para ello, es crucial continuar con la capacitación y garantizar el acceso a los recursos necesarios que aseguren la sostenibilidad del proyecto. Desde su formulación, el proyecto ha priorizado la búsqueda de soluciones sostenibles, lo que permitirá seguir fortaleciendo las capacidades locales y promoviendo nuevas iniciativas socioeconómicas en la comunidad.

Una de las líneas de trabajo futuras será profundizar en el mapeo y análisis del ecosistema de actores clave en la implementación de las monedas complementarias. Esto incluirá la colaboración con sectores públicos, privados y organizaciones nacionales e internacionales, con el fin de consolidar una red de apoyo diversa y sólida.

En términos de inclusión tecnológica, se debe reforzar la formación técnica de los miembros de las comunidades en el uso y gestión de nuevas tecnologías, lo que contribuirá a su apropiación efectiva y a la autonomía en la administración de las monedas complementarias. Asimismo, es necesario desarrollar estrategias que garanticen la sostenibilidad a largo plazo, incorporando modelos de negocio sostenibles y promoviendo la autogestión comunitaria.

El impacto de este proyecto trasciende las fronteras de las comunidades participantes, ya que la transferencia de experiencias a otras comunidades indígenas y grupos vulnerables no solo resulta inspiradora, sino que también facilita la creación de redes de colaboración.

En este sentido, la integración de la academia sigue siendo un pilar fundamental. La inclusión de estudiantes en investigaciones relacionadas, la elaboración de notas técnicas y la organización de eventos académicos contribuirán a mantener la relevancia y actualización de los conocimientos aplicados en el proyecto.

Es imprescindible mantener un enfoque participativo que atienda y respete las percepciones y necesidades de las lideresas comunitarias indígenas. Su participación activa es clave para diseñar e implementar soluciones adaptadas a la realidad local, asegurando así la sostenibilidad del proyecto.

El proyecto ha generado aportes a Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular a ODS 1 (Fin de la pobreza), ODS 5 (Igualdad de género), ODS 8 (Trabajo decente y crecimiento económico), ODS 10 (Reducción de desigualdades) y ODS 17 (Alianzas para lograr los objetivos). La implementación de monedas complementarias fortalece la economía local, promueve la inclusión financiera y fomenta la participación de las mujeres indígenas en la toma de decisiones económicas.

Asimismo, en el marco del Año Internacional de las Cooperativas 2025, declarado por Naciones Unidas, este proyecto representa un modelo de economía social solidaria que puede ser replicado en otros contextos. Las monedas complementarias basadas en blockchain ofrecen una herramienta innovadora para fortalecer la economía social y solidaria, promoviendo modelos de intercambio justos y sostenibles. La experiencia acumulada servirá como referencia para explorar nuevas formas de cooperación y desarrollo inclusivo en comunidades indígenas y otros sectores vulnerables.

En conclusión, el proyecto ha demostrado ser una estrategia efectiva para el desarrollo socioeconómico territorial mediante el uso de monedas complementarias basadas en blockchain. La colaboración continua, el apoyo sostenido y la adaptación a las necesidades locales serán fundamentales para alcanzar los objetivos propuestos y mejorar las condiciones de vida en las comunidades indígenas de Talamanca y más allá.

Referencias

- [1] R. Paiva, *Nuevo Dinero para la Sostenibilidad - ¿Por qué Necesitamos Otros Tipos de Dinero para Promover el Desarrollo Sostenible? Herramientas para Alcanzar el Desarrollo Sostenible*. Londres, Inglaterra: Sustainability School, 2016.
- [2] I. Cortés et al., "Monedas complementarias, desarrollo territorial y gobiernos locales. Dina Huapi como caso de estudio", *Eutopía. Revista de Desarrollo Económico Territorial*, vol. 25, pp. 123-140, 2024.
- [3] K. Hart, *World, The Memory Bank: Money in an Unequal World*. London, England: Profile Books, 2000.
- [4] R. Orzi, "¿Otra moneda para 'otra economía'? La necesidad de las monedas complementarias para el desarrollo sustentable de los emprendimientos de la economía social y solidaria," *Revista del Departamento de Ciencias Sociales*, vol. 3, pp. 155-171, 2017.
- [5] J. Stodder, "Complementary credit networks and macroeconomic stability: Switzerland's Wirtschaftsring", *Journal of Economic Behavior & Organization*, vol. 1, pp. 79-95, 2009.

- [6] S. Valdecantos et al., "Cryptocurrencies for Social Change: The Experience of Moneda PAR in Argentina". *International Journal of Community Currency Research*, Vol. 1, 2021.
- [7] P. Arzadun et al., *Iniciativas económicas colaborativas y de economía social solidaria en América Latina*, Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica, 2021. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/13395>
- [8] M. Hossain, "The effect of the Covid-19 on sharing economy activities". *Journal of Cleaner Production*, 280, 124782, 2021.
- [9] P. Arzadun y R. Picado, "Funciones sustantivas universitarias y economía social solidaria: una experiencia de Costa Rica". *Masquedós-Revista de Extensión Universitaria*, vol.9, no.12, 10-10, 2024.
- [10] A. Henderson, "La extensión en el TEC como estrategia para promover el desarrollo local y regional del caribe costarricense". Ponencia presentada en el Congreso Latinoamericano de Extensión y Acción Social, La Habana, Cuba, 2015
- [11] A. Henderson y L. Queralt, "El estanco virtual indígena Cabécar: una estrategia para la reactivación productiva y socioeconómica sostenible postpandemia de las mujeres productoras indígenas del territorio Cabécar de Talamanca", en *Experiencias de mejora en procesos de gestión organizacional en Costa Rica*, P. Arzadun y A. Henderson, segunda ed. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica, 2023, pp.27-34.
- [12] P. Arzadun y A. Henderson, *Experiencias de mejora en procesos de gestión organizacional en Costa Rica*. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica, 2022. <https://hdl.handle.net/2238/13878>

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Emisiones en exceso provenientes de vehículos en ralentí en Comalcalco, Tabasco

Excess emissions from idling vehicles in Comalcalco, Tabasco

Fernando Pérez-Márquez¹, Rudy Solís-Silván²,
Milni de los Ángeles Hernández-Nolasco³

Fecha de recepción: 26 de setiembre, 2024
Fecha de aprobación: 6 de enero, 2025

Pérez-Márquez, F; Solís-Silván, R; Hernández-Nolasco, M.A.
Emisiones en exceso provenientes de vehículos en ralentí en
Comalcalco, Tabasco. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 3.
Julio-Setiembre, 2025. Pág. 77-87.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i3.7532>

1 Tecnológico Nacional de México/ITS de Comalcalco, Departamento de Ingeniería Ambiental. Tabasco, México.

 fernando.perez@comalcalco.tecnm.mx

 <https://orcid.org/0000-0002-6673-1311>

2 Tecnológico Nacional de México/ITS de Comalcalco, Departamento de Ingeniería Ambiental. Tabasco, México.

 rudy.solis@comalcalco.tecnm.mx

 <https://orcid.org/0000-0001-6373-0893>

3 Egresada del Tecnológico Nacional de México/ITS de Comalcalco, Departamento de Ingeniería Ambiental. Tabasco, México.

 angeleshernandeznolasco64@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0003-1069-7745>

Palabras clave

Contaminación ambiental; gases de efecto invernadero; vehículos de peso liviano; dióxido de carbono; metano; dióxido de nitrógeno.

Resumen

Los vehículos automotores se han convertido en instrumentos de gran importancia para el desarrollo de actividades humanas. El objetivo fue estimar gases de efecto invernadero producidos en exceso por vehículos ligeros en condiciones de ralentí en el Municipio de Comalcalco, Tabasco. Del 30 de agosto al 6 de diciembre de 2023, se recolectaron 471 datos de vehículos en condiciones de ralentí iguales o mayores a un minuto en el municipio mencionado anteriormente. Se determinó que existe un tiempo en ralentí en exceso de 1,058.4 min, lo que produce un mínimo de 25.9 kg de CO_2 , 9.3 g de CH_4 y 3 g de N_2O . En términos de emisión de CO_2 , se podrían emitir como mínimo 1,114.8 kg CO_2e diariamente por el funcionamiento en ralentí de los 20,277 vehículos de motor registrados en el Municipio hasta diciembre de 2016. Anualmente, esto equivale a una generación de 406.982 toneladas de CO_2e por el consumo de 166,249.87 litros de combustible.

Keywords

Environmental pollution; greenhouse gases; light weight vehicles; carbon dioxide; methane; nitrogen dioxide.

Abstract

Motor vehicles have become instruments of great importance for the development of human activities. The objective was to estimate greenhouse gases produced in excess by light vehicles in idling conditions in the Municipality of Comalcalco, Tabasco. From August 30 to December 6, 2023, 471 data were collected from vehicles in idling conditions equal to or greater than one minute in the municipality mentioned above. It was determined that there is an idle time in excess of 1058.4 min, which produces a minimum of 25.9 kg of CO_2 , 9.3 g of CH_4 and 3 g of N_2O . In terms of CO_2 emission, at least 1,114.8 kg CO_2e could be emitted daily from the idling operation of the 20,277 motor vehicles registered in the Municipality until December 2016. Annually, this is equivalent to a generation of 406,982 tons of CO_2e due to the consumption of 166,249.87 liters of fuel.

Introducción

Uno de los problemas que aqueja a la sociedad hoy en día es el incremento de los gases de efecto invernadero (GEI) que producen a su vez el denominado efecto invernadero. Sánchez [1] indica que el efecto invernadero es el “Fenómeno por el cual determinados gases, denominados de efecto invernadero (GEI), que son componentes de una atmósfera planetaria, retienen parte de la energía que la tierra emite por haber sido calentada por la radiación solar”; asimismo, menciona que “los modelos climáticos prevén que la temperatura media global aumentará entre 2°C y 5°C para el año 2100”. Por lo tanto, los GEI son en gran parte responsables de que se den las condiciones idóneas para la vida, pero su incremento a causa de las actividades antropogénicas, provocan el actual incremento de las temperaturas, lo que se conoce como “El cambio climático”.

Los principales gases de efecto invernadero son el vapor de agua (H_2O), bióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) y ozono (O_3) [2].

En la actualidad, el uso de vehículos automotores se ha convertido en una necesidad para el desarrollo de las diferentes actividades humanas, tanto domésticas como productivas. Dentro de los tipos de vehículos que se emplean, destaca el uso del vehículo ligero que, de acuerdo con la NOM-163-SEMARNAT-ENER-SCFI-2013 [3], se refiere al “Vehículo de pasajeros o camioneta ligera que no excede los 3 857 kilogramos de peso bruto vehicular”. Este tipo de vehículo (al igual que muchos otros) requiere de combustibles fósiles para moverse. La quema de éstos genera contaminantes que pueden provocar diferentes efectos hacia el entorno y repercutir en la salud humana, lo que ha sido tema de preocupación a nivel internacional. Una de las medidas de atención, por lo tanto, es la minimización en el consumo de dichos combustibles.

Martínez et al. [4] calcularon, a partir del uso de factores de emisión por tipo de combustible proporcionados por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), la línea base de los GEI y su proyección a futuro para el sector Transporte del Estado de Veracruz, México, correspondiente al 2010-2026, concluyendo que las emisiones asciendan de 10.34 millones de toneladas de CO₂e (2010) a 15.3 millones de toneladas de CO₂e en 2026 (incremento de aproximadamente el 48%).

Milla et al. [5] determinaron los factores de emisión de gases contaminantes de un vehículo a gasolina al efectuar una prueba en ruta en la ciudad de Quito (Ecuador) ubicada a 2,810 metros sobre el nivel del mar. Concluyeron que las emisiones contaminantes de monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno disminuyen significativamente al aplicar una conducción eficiente.

Hernández et al. [6] presentaron una metodología para la cuantificación de emisiones de algunos contaminantes producidos por el parque vehicular en circulación de la zona metropolitana de San Luis Potosí (México). Lograron actualizar, a través del uso de factores de emisión, el inventario de algunos contaminantes criterio y precursores emitidos por automóviles, motocicletas, taxis y camiones de pasajeros.

En México, la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía [7] indica que hay causas importantes que propician un pobre rendimiento de combustible, las cuales son: hábitos de conducción (calentar el motor del automóvil por más de un minuto, acelerar rápidamente desde un alto, viajar a altas velocidades, tránsito denso, usar inmoderadamente el aire acondicionado y cargar cosas inútiles en la cajuela) y condiciones mecánicas de los automóviles (filtro de aire sucio, mantenimiento deficiente y presión incorrecta de las llantas). Al respecto, un automóvil consume 100 mL por cada 10 minutos (min) de funcionamiento en vacío, lo cual se encuentra asociado al funcionamiento en ralentí, mismo que es definido por la NOM-045-SEMARNAT-2017 [8] como “las Revoluciones Por Minuto (RPM) mínimas gobernadas del motor, que proveen la potencia necesaria para vencer la fuerza de inercia de los componentes mecánicos del motor”. Asimismo, dicha norma indica que Revoluciones Por Minuto (RPM) es la “Unidad de medida de la velocidad de rotación en los motores de combustión interna”. Es así como un vehículo automotor, cuando está encendido, sin acelerar, se encuentra en ralentí.

El presente estudio tiene como finalidad estimar gases de efecto invernadero producidos en exceso por vehículos ligeros en condiciones de ralentí en el Municipio de Comalcalco, Tabasco. El estudio no está basado en una estimación directa de las emisiones, sino en la observación del tiempo que tardan los vehículos ligeros en condición de ralentí y el uso de factores de emisión.

La información aquí presentada es de utilidad para autoridades estatales y municipales, organizaciones públicas y privadas, investigadores y sociedad en general interesada en la conducción eficiente y preocupada por el medio ambiente.

Metodología

Muestra y muestreo

El muestreo realizado fue de tipo probabilístico, ya que se seleccionaron los vehículos al azar y fueron estadísticamente representativos [9], con un tamaño de muestra de 471.

La muestra para la determinación del tiempo en ralentí estuvo conformada por vehículos ligeros ubicados en distintos estacionamientos dentro del Municipio de Comalcalco, Tabasco. La medición del tiempo en ralentí se realizó en segundos (s), con ayuda de un cronómetro.

Recolección de datos

La recolección de datos se realizó en un total de 46 días, comprendidos dentro del periodo del 30 agosto al 6 de diciembre de 2023, mediante el método de observación, el cual permite codificar numéricamente los datos y analizarlos como texto [9]. El instrumento de recolección de datos empleado es un cuadro el cual corresponde a un esquema con casilleros integrados por renglones y columnas, se lleva al campo y se toman los datos necesarios [10]. En este caso, el cuadro incluyó los siguientes apartados: número de identificación, fecha, hora, ubicación, particularidades del vehículo, tiempo en ralentí.

Para cada evento observado, se consideró lo siguiente: 1) la recolección de datos fue de primera mano, por lo que se identificó un solo vehículo a la vez, en su arranque y salida, o en su llegada y apagado del motor, cuantificando en cada ocasión en tiempo en ralentí, con ayuda del cronómetro; 2) discreción, el conductor del vehículo no era consciente de que se estaba cuantificando el tiempo en ralentí de su vehículo; 3) se descartaron los datos en los que, por distintos motivos, no pudo identificarse y registrarse todos los datos del evento observado. Cabe mencionar que, previo a la recolección de datos, en primera instancia se capacitó al personal correspondiente. Asimismo, se realizó una prueba piloto con 22 vehículos, para validar el procedimiento de recolección y el instrumento de recolección de datos.

Procesamiento de los datos

Los datos se procesaron con ayuda del software Microsoft Excel ® con la finalidad de obtener los valores totales de tiempo en ralentí y calcular la cantidad de gases de efecto invernadero producidos por vehículos ligeros en condiciones de ralentí en el Municipio de Comalcalco, Tabasco. Para ello, primero se calculó el tiempo total en ralentí, posteriormente se determinó la cantidad de combustible consumido y finalmente se estimaron los gases de efecto invernadero a partir del empleo de factores de emisión.

Tiempo en ralentí

Para la determinación del tiempo en ralentí se realizó la sumatoria de los tiempos en segundos (s), calculando así el tiempo total. Para efectos del uso posterior en las fórmulas, se hizo la conversión del tiempo a minutos aplicando las equivalencias correspondientes.

Combustible consumido

Para el cálculo del combustible consumido por el uso en ralentí de los vehículos, se consideró que se utilizan 100 mL (0.1 L) de combustible por cada 10 min de funcionamiento en vacío [7]. Así fue posible determinar la cantidad de combustible en litros (L) a partir de la ecuación 1.

$$\text{Combustible consumido (L)} = (\text{Minutos en ralentí}) * (0.01 \text{ L})$$

Ecuación 1

Gases de efecto invernadero

Para el cálculo de los gases de efecto invernadero producidos por el tiempo en ralenti de los vehículos, se tomó como referencia el *Acuerdo que establece las particularidades técnicas y las fórmulas para la aplicación de metodologías para el cálculo de emisiones de gases o compuestos de efecto invernadero* [11]; las fórmulas empleadas fueron tomadas de su artículo 5°, fracción II, el cual indica que “para determinar la emisión directa de Gases de efecto invernadero derivada del consumo y oxidación de combustibles en motores de combustión interna en fuentes móviles, se deberán aplicar las siguientes fórmulas”:

$$E_{CO_2} = \sum_{i=1}^n VC_i * PC_i * FE_{CO_{2i}}$$

Ecuación 2

$$E_{CH_4} = \sum_{i=1}^n VC_i * PC_i * FE_{CH_{4i}}$$

Ecuación 3

$$E_{N_2O} = \sum_{i=1}^n VC_i * PC_i * FE_{N_2O_i}$$

Ecuación 4

$$E_{CO_2e(CO_2)} = E_{CO_2}$$

Ecuación 5

$$E_{CO_2e(CH_4)} = E_{CH_4} * PCG_{CH_4}$$

Ecuación 6

$$E_{CO_2e(N_2O)} = E_{N_2O} * PCG_{N_2O}$$

Ecuación 7

Donde:

E_{CO_2}	Emisión de bióxido de carbono (t CO ₂)
E_{CH_4}	Emisión de metano (kg CH ₄)
E_{N_2O}	Emisión de óxido nitroso (kg N ₂ O)
VC_i	Consumo del i-ésimo combustible (t o m ³)
PC_i	Poder calorífico del i-ésimo combustible (MJ/m ³ o MJ/t)
$FE_{CO_{2i}}$	Factor de emisión de bióxido de carbono del i-ésimo combustible (t/MJ)
$FE_{CH_{4i}}$	Factor de emisión de metano del i-ésimo combustible (kg/MJ)
$FE_{N_2O_i}$	Factor de emisión de óxido nitroso del i-ésimo combustible (kg/MJ)
i	El i-ésimo combustible empleado en el año de reporte
n	El número de combustibles que se emplearon en el año de reporte
$E_{CO_2e(CO_2)}$	Emisión de bióxido de carbono equivalente (t CO ₂ e)

$E_{CO_2e(CH_4)}$	Emisión de bióxido de carbono equivalente proveniente de las emisiones de metano (kg CO ₂ e)
$E_{CO_2e(N_2O)}$	Emisión de bióxido de carbono equivalente proveniente de las emisiones de nitroso (kg CO ₂ e)
PCG_{CH_4}	Potencial de calentamiento global del metano (kg CO ₂ /kg CH ₄)
PCG_{N_2O}	Potencial de calentamiento global del óxido nitroso (kg CO ₂ /kg N ₂ O)

De acuerdo con datos de la misma fuente, los factores de emisión para la gasolina se muestran en el cuadro 1.

Cuadro 1. Factores de emisión para las gasolinas.

Descripción	Factores de emisión		
	CO ₂ (t/MJ)	CH ₄ (kg/MJ)	N ₂ O (kg /MJ)
Gasolinas	0.000069300	0.000025000	0.000008000

Fuente: Artículo sexto, inciso a) del Acuerdo que establece las particularidades técnicas y las fórmulas para la aplicación de metodologías para el cálculo de emisiones de gases o compuestos de efecto invernadero [12].

Con relación a los datos restantes a utilizar para el cálculo en las ecuaciones 2 a 7, se tomó en cuenta lo siguiente:

- La *Lista de combustibles y sus poderes caloríficos 2024 que se considerarán para identificar a los usuarios con un patrón de alto consumo, así como los factores para determinar las equivalencias en términos de barriles equivalentes de petróleo* [13], indica que el poder calorífico (PC) para las gasolinas y naftas es de 5,613 MJ/bl, lo que equivale a 35,304.70584 MJ/m³.
- El *Acuerdo que establece los gases o compuestos de efecto invernadero que se agrupan para efectos de reporte de emisiones, así como sus potenciales de calentamiento* [12], en el artículo tercero, en sus fracciones VII y VIII, establece que los potenciales de calentamiento global (PCG) para el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O) son de 28 y 265, respectivamente, mismos que deben ser considerados para el cálculo Emisiones equivalentes para aquellos GEI distintos al dióxido de carbono.

Resultados

Tiempo en ralentí

El tiempo en ralentí promedio para los 471 vehículos muestreados corresponde a 3.247 min, dando un tiempo total de 1529.4 min. A su vez, la moda fue de 3.48 minutos. El tiempo más bajo en ralentí fue de 1.066 min, mientras que el más alto fue de 15.466 min. En el cuadro 2 se muestra la frecuencia según la cantidad de minutos en ralentí (figura 1); se puede observar que el 91.3% de los casos está representado por tiempos en ralentí desde 1 hasta <5 min, mientras que tiempos iguales o superiores a 7 minutos no son mayoría (2.33%).

Cuadro 2. Tabla de frecuencias.

Clase	Frecuencia	Frecuencia relativa	Frecuencia acumulada
1 a <2 min	98	20.81%	20.81%
2 a <3 min	131	27.81%	48.62%
3 a <4 min	127	26.96%	75.58%
4 a <5 min	74	15.71%	91.30%
5 a <6 min	19	4.03%	95.33%
6 a <7 min	11	2.34%	97.66%
7 a <8 min	2	0.42%	98.09%
8 a <9 min	3	0.64%	98.73%
9 a <10 min	2	0.42%	99.15%
10 a <11 min	2	0.42%	99.58%
11 a <12 min	0	0.00%	99.58%
12 a <13 min	1	0.21%	99.79%
13 a <14 min	0	0.00%	99.79%
14 a <15 min	0	0.00%	99.79%
15 a 16 min	1	0.21%	100.00%
Total	471	100.00%	

Fuente: Elaboración propia con base en los datos recopilados del estudio sobre emisiones en exceso provenientes de vehículos en ralentí en Comalcalco, Tabasco.

Combustible consumido

El resultado obtenido de aplicar la ecuación 1, con el valor de tiempo (total) en ralentí de 1,529.4 min, es de 15.294 L. Si se tiene en cuenta que para el uso de cada vehículo se descuenta un minuto como margen de tiempo utilizado para calentamiento del mismo y/o para apagado [7], el tiempo en exceso es de 1,058.4 min, por lo que el combustible consumido para este caso es de 10.584 L.

Gases de efecto invernadero

Los resultados de la aplicación de las ecuaciones 2 a 7 se resumen en las tablas 3 y 4. Como se puede observar en la tabla 3, considerando el tiempo total de funcionamiento en condiciones de ralentí de los 471 vehículos (1,529.4 min), la cantidad de emisiones de dióxido de carbono fueron de 0.0374 t CO₂, lo cual equivale a 37.4 kg CO₂, representando un promedio por vehículo de 79.405 g CO₂. Por otra parte, en la tabla 4 se observa que se existe un tiempo en exceso de 1,058.4 min, produciendo así 0.0259 t CO₂e (25.9 kg CO₂e), equivalente a un promedio por vehículo de 54.978 g CO₂e (2.247 min en ralentí). Por consiguiente, la sumatoria de las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O para el tiempo en exceso es de 25.9123 kg.

Cuadro 3. Resultados de la aplicación de ecuaciones 2 a 7 para tiempo total.

Tipo de emisión de GEI	Tiempo total (1,529.4 min, VC= 0.01529 m ³)
(t CO ₂)	0.0374
(kg CH ₄)	0.0135
(kg N ₂ O)	0.0043
(t CO ₂)	0.0374
(kg CO ₂ /kg CH ₄)	0.3780
(kg CO ₂ /kg N ₂ O)	0.1209

Nota: El tiempo total se refiere al tiempo recolectado para los 471 vehículos en condiciones de ralentí.
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del estudio sobre emisiones en exceso provenientes de vehículos en ralentí en Comalcalco, Tabasco (2024).

Cuadro 4. Resultados de la aplicación de ecuaciones 2 a 7 para tiempo en exceso.

Tipo de emisión de GEI	Tiempo en exceso (1,058.4 min, VC= 0.01058 m ³)
(t CO ₂)	0.0259
(kg CH ₄)	0.0093
(kg N ₂ O)	0.0030
(t CO ₂)	0.0259
(kg CO ₂ /kg CH ₄)	0.2616
(kg CO ₂ /kg N ₂ O)	0.0837

Nota: El tiempo en exceso considera el tiempo para los 471 vehículos después de un minuto de funcionamiento.
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del estudio sobre emisiones en exceso provenientes de vehículos en ralentí en Comalcalco, Tabasco (2024).

Por otro lado, los tiempos en ralentí para tiempos datos agrupados se muestran en la tabla 5.

Cuadro 5. Resultados de emisiones acumuladas en diferentes tiempos en exceso.

Condición de tiempo en ralentí	< 5 min	>= 5 min
Tiempo acumulado en exceso	817.8 min	240.6 min
Porcentaje que representa del total	77.27 %	22.73 %
(t CO ₂)	0.02	0.0059
(kg CH ₄)	0.0072	0.0021
(kg N ₂ O)	0.0023	0.0007
(t CO ₂)	0.02	0.0059
(kg CO ₂ /kg CH ₄)	0.2021	0.0595
(kg CO ₂ /kg N ₂ O)	0.0647	0.0190

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del estudio sobre emisiones en exceso provenientes de vehículos en ralentí en Comalcalco, Tabasco (2024).

Discusión

El tiempo en ralentí para los 471 vehículos evaluados representa un volumen de combustible diario de 10.58 L (0.01058 m^3) lo que equivale a $25.9 \text{ kg CO}_2\text{e}$; en caso de recurrencia periódica bajo esta condición, dichos valores representan un consumo anual de 3,861.7 L de combustible con emisiones de $9,451.7 \text{ kg CO}_2\text{e}$, $95.47 \text{ kg ECO}_2\text{e}(\text{CH}_4)$ y $30.55 \text{ ECO}_2\text{e}(\text{N}_2\text{O})$. Por otra parte, el 91.3% de los casos presenta tiempos en ralentí desde 1 hasta $<5 \text{ min}$, lo que sugiere que la mayoría de los conductores no mantiene su vehículo en tiempos en ralentí de forma prolongada, representando así el 77.27% de las emisiones; el resto de los casos (8.7%) oscilan en tiempos desde 5 hasta 16 minutos; sin embargo, lo anterior no significa que la cantidad de emisiones a la atmósfera sea mínima, pues representa el 22.73% de las emisiones.

De acuerdo con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía [14], al 31 de diciembre de 2016, de los 40,311 vehículos de motor registrados en circulación en el Municipio de Comalcalco, 20,277 (50.3% del total) correspondían a automóviles (oficial, público y particular). Si se toma como referencia este valor y bajo el supuesto de que cada vehículo entra en circulación a diario generando $54.978 \text{ g CO}_2\text{e}$, se obtiene una generación de consumo en exceso por $1,114.8 \text{ kg CO}_2\text{e}$, es decir, más de una tonelada de CO_2e por día y $406.903 \text{ t CO}_2\text{e}$ al año, esto por el consumo de $166,312.7 \text{ L}$ de combustible.

De forma comparativa, el valor obtenido ($406.903 \text{ t CO}_2\text{e}$ al año o 406.903 t CO_2 al año) es superior a lo que calcularon Hernández et al. [15], quienes determinaron las emisiones adicionales de dióxido de carbono (319.67 t CO_2 al año) por automóviles en estado ralentí, debido a las obras que se realizaban en el CETRAM (Centro de Transferencia Modal) Indios Verdes y que obstruían la vialidad, sólo en el periodo de enero a junio de 2023.

Hernández et al. [16], menciona que los factores de emisión (FE) juegan un papel crucial en la estimación precisa de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Estos valores representan la cantidad de gases liberados a la atmósfera por una actividad específica, permitiendo calcular las tasas de emisión con exactitud.

En el caso de los vehículos en ralentí, la aplicación de FE nos ha permitido determinar que cada vehículo contribuye con $54.978 \text{ g CO}_2\text{e}$ por día, resultando en un total de 406.903 toneladas de CO_2e anuales para el municipio de Comalcalco. Esta metodología destaca la relevancia de utilizar FE precisos para cuantificar las emisiones y facilitar la formulación de políticas efectivas.

En 2016, la generación mundial de gases de efecto invernadero (GEI) se estimó en 1600 millones de toneladas de CO_2 equivalente (CO_2e), con una proyección de aumento a 2600 millones de toneladas para el año 2050 [17]. Estas cifras globales representan un desafío significativo a nivel mundial. En el contexto municipal, las emisiones de CO_2e provenientes de los vehículos en ralentí representan una carga considerable sobre el medio ambiente, contribuyendo de manera tangible al deterioro de la calidad del aire.

Conclusiones

La cantidad de gases de efecto invernadero producidos en exceso por los 471 vehículos ligeros analizados en condiciones de ralentí en el Municipio de Comalcalco, Tabasco, corresponde a 25.9 kg de CO_2 , 9.3 g de CH_4 y 3 g de N_2O . En términos únicamente de emisión de CO_2 , se podrían emitir como mínimo $1,114.8 \text{ kg CO}_2\text{e}$ diariamente por el funcionamiento en ralentí de los 20,277 vehículos de motor registrados hasta diciembre de 2016, lo que anualmente equivale a una generación de $406.982 \text{ t CO}_2\text{e}$ al año por el consumo de $166,249.87 \text{ L}$ de combustible.

La mayoría de los vehículos analizados (91.3%) tienen un tiempo en ralentí de 1 a <5 minutos, lo que indica que la mayoría de los automovilistas no mantienen tiempos en ralentí prolongados. Sin embargo, el 8.7% restante (5 a 16 minutos) genera el 22.73% de las emisiones.

Es importante la realización de más estudios enfocados al impacto que se producen por las emisiones por tiempo en ralentí en los vehículos en general, buscando así promover la concientización a la población sobre la importancia de minimizar dichos tiempos.

Referencias

- [1] F. Sánchez, "Emisión de gases de efecto invernadero," p. 7-11, 2020.
- [2] Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, "Gases y compuestos de efecto invernadero," 18 de mayo de 2018. [En línea]. Disponible: <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero>. [Accedido: 1 de febrero de 2024].
- [3] *NORMA Oficial Mexicana NOM-163-SEMARNAT-ENER-SCFI-2013*, "Emisiones de bióxido de carbono (CO₂) provenientes del escape y su equivalencia en términos de rendimiento de combustible, aplicable a vehículos automotores nuevos de peso bruto vehicular de hasta 3 857 kilogramos."
- [4] M. Martínez, L. Campos, y J. Castillo, "Cálculo de la línea base de las emisiones de gases de efecto invernadero y proyecciones a futuro para el sector transporte en el estado de Veracruz, México," *Tecnología en Marcha*, pp. 118-133, 2019. DOI: <https://doi.org/10.8845/tm.v32.i1.4123>.
- [5] J. Milla, E. Cedeño, y J. Hoyos, "Impacto del Ecodriving sobre las emisiones y consumo de combustible en una ruta de Quito," *Enfoque UTE*, pp. 68-83, 2020. DOI: <https://doi.org/10.29019/enfoque.v11n1.500>.
- [6] C. Hernández, A. Ávila, y D. Cerda, "Impacto de la movilidad urbana en la calidad del aire de la zona metropolitana de San Luis Potosí, México," *Ciencias Ambientales*, pp. 143-169, 2023a. DOI: <http://doi.org/10.15359/rca.57-1.8>.
- [7] Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, "Causas que afectan el rendimiento de combustible de un automóvil," 30 de septiembre de 2016. [En línea]. Disponible: <https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/causas-que-afectan-el-rendimiento-de-combustible-de-un-automovil>. [Accedido: 1 de febrero de 2024].
- [8] *NORMA Oficial Mexicana NOM-045-SEMARNAT-2017*, "Protección ambiental. - Vehículos en circulación que usan diésel como combustible. - Límites máximos permisibles de opacidad, procedimiento de prueba y características técnicas del equipo de medición."
- [9] R. Hernández, C. Fernández, y P. Baptista, *Metodología de la investigación*, 5ª ed. McGraw-Hill, 2010, pp. 580-582.
- [10] G. Baena, *Metodología de la investigación*, 3ª ed. Grupo Editorial Patria, 2017, p. 73.
- [11] Diario Oficial de la Federación, "ACUERDO que establece los gases o compuestos de efecto invernadero que se agrupan para efectos de reporte de emisiones," 14 de agosto de 2015a. [En línea]. Disponible: https://www.semarnat.gob.mx/sites/default/files/documentos/dof_acuerdo_de_agrupacion.pdf. [Accedido: 15 de marzo de 2024].
- [12] Diario Oficial de la Federación, "ACUERDO que establece las particularidades técnicas y las fórmulas para la aplicación de metodologías para el cálculo de emisiones de gases o compuestos de efecto invernadero," 3 de septiembre de 2015b. [En línea]. Disponible: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5406149&fecha=03/09/2015#gsc.tab=0. [Accedido: 5 de febrero de 2024].
- [13] Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, "Lista de combustibles y sus poderes caloríficos 2024," 2024. [En línea]. Disponible: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/894023/Lista_de_combustibles_2024.pdf. [Accedido: 20 de marzo de 2024].
- [14] Instituto Nacional de Estadística y Geografía, "Anuario estadístico y geográfico de Tabasco 2017," 2017. [En línea]. Disponible: https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2017/702825095123.pdf, p. 370.
- [15] S. Hernández, L. Castillejos, N. Millán, R. Palacios, y A. Pérez, "De indios verdes a indios grises; estimación de emisiones adicionales de dióxido de carbono (CO₂) debido al tránsito ocasionado por la obstrucción de la vialidad en CETRAM Indios Verdes, en el norte de CDMX," *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, Asunción, Paraguay, pp. 818-858, 2023b. DOI: <https://doi.org/10.56712/latam.v4i3.1116>.

- [16] G. Hernández-Gerónimo, J. R. Laines-Canepa, I. Ávila-Lázaro, R. Solís-Silvan, y J. A. Sosa-Olivier, "Cálculos estequiométricos de factores de emisión para estimar emisiones fugitivas de gases de efecto invernadero en un centro de acopio de residuos sólidos," **Revista internacional de contaminación ambiental**, vol. 38, 2022.
- [17] D. Hoornweg y P. Bhada-Tata, "What a waste: A global review of solid waste management," **Urban development series; knowledge papers no. 15**, World Bank, Washington, DC, 2012. [En línea]. Disponible: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/173>.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Uso de anticuerpos monoclonales como opción terapéutica para el tratamiento del cáncer de mama: reseña

Use of monoclonal antibodies as a therapeutic option for breast cancer treatment: A review

Aldeir Alvarado-Arce¹, Nazareth Rueda-Carrillo², Sebastián Ramírez-Chaves³, Mónica Vargas-Salas⁴, Steven Vargas-Cascante⁵


Fecha de recepción: 20 de noviembre, 2024


Fecha de aprobación: 18 de febrero, 2025

Alvarado-Arce, A; Rueda-Carrillo, N; Ramírez-Chaves, S; Vargas-Salas, M; Vargas-Cascante, S. Uso de anticuerpos monoclonales como opción terapéutica para el tratamiento del cáncer de mama: reseña. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, Nº 3. Julio-Setiembre, 2025. Pág. 88-96.


 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i3.7592>

1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 aldalvarado@estudiantec.cr


 <https://orcid.org/0009-0003-9621-9460>


2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 nrueda@estudiantec.cr


 <https://orcid.org/0000-0001-8727-305X>


3 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 sebramirez@estudiantec.cr


 <https://orcid.org/0009-0009-1593-4336>

4 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 movargas@estudiantec.cr

 <https://orcid.org/0009-0001-5182-0020>

5 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 stevargas@estudiantec.cr

 <https://orcid.org/0009-0001-3746-9633>

Palabras clave

Biotecnología; biomédica; sistema inmune; anticancerígeno; terapia dirigida.

Resumen

[Objetivo] El objetivo de la investigación fue compilar/analizar la información disponible sobre el uso de anticuerpos monoclonales como terapia contra el cáncer de mama. [Metodología] Se realizó una revisión bibliográfica a través de bases de datos y publicaciones de revistas que abordaran los anticuerpos monoclonales como tratamiento contra la enfermedad del cáncer. Durante la revisión se procuró tomar datos actuales, que reflejaran los alcances y limitaciones de la terapia monoclonal en distintos tipos de cáncer. Así mismo, se sugirió una estrategia para mitigar los efectos secundarios negativos que acarrea el tratamiento en el paciente. [Resultados] Las células hibridomas actúan sobre receptores responsables de la proliferación de células cancerígenas, como el HER2 en el cáncer de mama, inhibiendo su multiplicación y facilitando que el sistema inmune pueda atacar las células dañadas mediante linfocitos. A pesar de ser un tratamiento prometedor, tiene asociado efectos secundarios negativos, por lo que se propone un plan de tratamiento de supresión inmunológica para contrarrestarlos sin afectar la efectividad del tratamiento. En Costa Rica, debe de promoverse la investigación que incluya a los anticuerpos monoclonales como posible tratamiento contra el cáncer para aumentar la calidad de vida de los pacientes. [Conclusiones] El uso de anticuerpos monoclonales como tratamiento contra el cáncer de mama ha dado resultados positivos en los pacientes, ya que es una técnica muy específica. No obstante, aún hay muchos obstáculos en la aplicación de esta, generando brechas que dificultan la investigación para mejorar la prognosis de los pacientes.

Keywords

Biotechnology; biomedical; immune system; anticancer; targeted therapy.

Abstract

[Objective] The objective of the research was to compile/analyze the information available about the use of monoclonal antibodies as a therapy for breast cancer. [Methodology] A bibliographic review was conducted using databases and journal publications addressing monoclonal antibodies as a treatment for cancer. The review focused on current data reflecting the scope and limitations of monoclonal therapy in different types of cancer. Additionally, a strategy was proposed to mitigate the negative side effects associated with the treatment in patients of cancer. [Results] Hybridoma cells target receptors responsible for the proliferation of cancer cells, such as HER2 in breast cancer, inhibiting their multiplication and facilitating the immune system's ability to attack damaged cells through lymphocytes. Despite being a promising treatment, it has associated negative side effects. Therefore, an immunosuppression treatment plan is proposed to counteract these effects without compromising the therapy's effectiveness. In Costa Rica, research including monoclonal antibodies as a potential cancer treatment should be promoted to improve patients' quality of life. [Conclusions] The use of monoclonal antibodies as a treatment for breast cancer has shown positive results in patients, as it is a highly specific technique. However, many obstacles remain in its application, creating gaps that hinder research aimed at improving patient prognosis.

Introducción

Los anticuerpos monoclonales (mAbs), son moléculas producidas y diseñadas para ser anticuerpos sustitutos que restauran, mejoran o imitan el ataque del sistema inmunológico a las células cancerosas al unirse a sus antígenos [1]. Estos anticuerpos son producidos por clones de una célula B única, todos los cuales se unen a porciones específicas de un antígeno o epítipo [2].

El cáncer de mama es la neoplasia maligna más frecuente en mujeres en todo el mundo y es curable en ~70–80% de las pacientes con enfermedad no metastásica en etapa temprana, de estar más avanzado con metástasis en órganos distantes, es considerado incurable [3]. En lo que Costa Rica respecta, en el año 2020 se reportaron 13139 casos nuevos de cáncer, siendo 1624 casos (24.5%) diagnosticados de cáncer de mama en mujeres, haciéndolo el tipo de cáncer más frecuente en mujeres del país [4].

En el cáncer de mamá generalmente se utilizan anticuerpos humanizados o quiméricos, que se crean uniendo sus regiones hipervariables murinas de las cadenas ligeras y pesadas a una estructura de anticuerpos humanos [1] [5].

En cuanto a la producción de mAbs, el método principal es la tecnología de hibridomas. Se utilizan modelos animales que son inmunizados con el antígeno de interés y una vez alcanzada la inmunización deseada, se extraen las células B del bazo mediante centrifugación en gradiente de densidad, y los anticuerpos en el suero se detectan mediante técnicas como ELISA o citometría de flujo [6].

El siguiente paso es fusionar las células B con células de mieloma sometidas a las que se ha silenciado la expresión de la enzima HGPRT lo cual se utiliza como marcador genético. La HGPRT convierte a la hipoxantina a inosina monofosfato, y a la guanina a guanina monofosfato; y el análogo de purina 8-azaguanina (8-AG) compite con la HGPRT activa. Las células con HGPRT funcional se incuban con 8-AG, metabolizan el análogo, produciendo un nucleótido 8-AG que se incorpora a la síntesis de ácidos nucleicos, resultando en muerte celular para las células HGPRT no mutadas, dejando a las células HGPRT– vivas [6].

Una vez seleccionados, las hibridomas se clonan mediante dilución limitante para asegurar que cada línea celular provenga de una única célula productora de anticuerpos. Tras el crecimiento de los clones, se realiza una prueba de ELISA para confirmar la producción de anticuerpos específicos, garantizando su monoclonalidad y estabilidad. Posteriormente, las hibridomas pueden propagarse *in vivo*, usualmente en ratones, o *in vitro* en medios de cultivo celular, siendo esta una opción de bajo costo y producción continua [6].

Este conjunto de procedimientos asegura la producción estable y continua de anticuerpos monoclonales específicos, que pueden utilizarse para aplicaciones biomédicas y terapéuticas. El objetivo de esta revisión es evaluar el uso terapéutico de anticuerpos monoclonales para tratar el cáncer de mama, tomando en cuenta su mecanismo de acción, su uso actual y las limitaciones que posee.

Mecanismos de acción

Bloqueo de señales de crecimiento en las células cancerosas.

Las células cancerosas por lo general presentan sobreexpresión de receptores que promueven el crecimiento y la proliferación descontrolada [7]. La posibilidad de inhibir o inhabilitar estos receptores, resulta en una disminución de la proliferación celular. Uno de los receptores más conocidos en el cáncer de mama es el HER2 [8]. HER2 desempeña un papel en la regulación

de la proliferación y crecimiento celular, pero en ciertas formas de cáncer de mama como el subtipo HER2+ se produce una sobreexpresión de este receptor [9], lo que produce un crecimiento acelerado de las células.

Anticuerpos monoclonales como el Trastuzumab (Herceptin®), se diseñan específicamente para su unión con HER2 en su dominio extracelular IV [10], bloqueando la señalización, al evitar que se envíen señales de crecimiento dentro de la célula, impidiendo la dimerización de HER2, que se relaciona con la proliferación de tumores [11].

Marcaje de células cancerígenas

Otro mecanismo de acción de los anticuerpos monoclonales es marcar las células cancerosas para que el sistema inmune las reconozca y destruya más fácilmente [12]. Al unirse a antígenos específicos de la célula, los anticuerpos funcionan como señales que identifican las células cancerígenas. Esto permite que células inmunitarias como los linfocitos eliminen las células malignas [13]. Trastuzumab ha demostrado ser efectivo al señalar las células cancerosas que sobreexpresan HER2, facilitando su eliminación por el sistema inmune [14].

Activación de genes supresores de tumores (TSG)

Los TSG son los responsables de la regulación del crecimiento celular y promover la muerte programada de las células cuando se requiere. En muchos tipos de cáncer, los TSG se encuentran silenciados o inactivos, permitiendo el desarrollo descontrolado del cáncer [15]. Algunos anticuerpos monoclonales pueden revertir este proceso al modificar el entorno celular y reactivar la función de TSG, como lo es en el caso de p53, [16]. Además de activar los TSG, algunos anticuerpos monoclonales inactivan oncogenes al bloquear la acción de proteínas; por ejemplo, Bevacizumab se une al factor de crecimiento endotelial vascular [17], reduciendo la formación de nuevos vasos sanguíneos, que es crucial para el crecimiento tumoral.

Uso de los anticuerpos monoclonales en la actualidad

Investigaciones recientes muestran cómo las células cancerosas logran esquivar el ataque del sistema inmunológico aprovechando receptores inhibidos en los linfocitos T que suelen regular la respuesta inmune para evitar afectación a tejidos sanos. Esta interacción es la que se explota en la terapia con anticuerpos monoclonales, que bloquean esos receptores, permitiendo que el sistema inmune recupere su capacidad de reconocer y atacar al cáncer [5] [18].

Actualmente, los anticuerpos monoclonales se consideran una herramienta eficaz para tratar varios tipos de cáncer al atacar moléculas específicas que las células tumorales usan para evitar ser detectadas por el sistema inmune. Un buen ejemplo es el cáncer de mama HER2 positivo, en el que el anticuerpo *trastuzumab* bloquea la proteína HER2, responsable de estimular el crecimiento del tumor. Al hacerlo, este tratamiento ralentiza la proliferación de las células malignas y mejora las tasas de supervivencia de los pacientes [19]. De manera similar, en el carcinoma colorrectal, cetuximab inhibe el receptor EGFR, lo que limita la señalización que favorece la división celular, reduciendo el crecimiento del tumor [20].

El carcinoma microcítico de pulmón, un tipo de tumor muy agresivo pero que responde bien a la quimioterapia, pero esta acarrea muchos efectos secundarios que implicarían la ingesta de más medicamentos para contrarrestar su sintomatología. Este tipo de cáncer está muy relacionado con el consumo de tabaco, lo que provoca una alta cantidad de mutaciones. Esto lo convierte en un buen candidato para este tipo de terapia. La terapia con anticuerpos monoclonales ha mostrado que los efectos secundarios graves son significativamente menores en comparación

con la quimioterapia tradicional; sin embargo, aunque estos anticuerpos pueden activar una respuesta inmune contra las células tumorales, también pueden provocar enfermedades autoinmunes [18] [21].

Es importante destacar la detección temprana del cáncer de pulmón para mejorar las opciones de tratamiento. Además, aunque hay estudios que han demostrado la eficacia de los anticuerpos monoclonales, aún no queda claro en qué tipo específico de cáncer de pulmón podrían ser más beneficiosos [21].

Limitaciones de los anticuerpos monoclonales

A pesar de presentar resultados prometedores en su aplicación, los anticuerpos monoclonales presentan complicaciones que comprometen su uso. A nivel farmacológico, sus principales limitaciones se basan en los efectos adversos que pueden ocasionar en los pacientes, conocidos como reacciones de infusión, las cuales pueden manifestarse con la utilización de los mAbs y causar erupciones cutáneas, síntomas pseudogripales, problemas cardiovasculares, entre otros; sin embargo, todos estos pueden ser contrarrestados con la aplicación de otros fármacos pre y post tratamiento en el paciente [22].

Aunque no se ha logrado eliminar por completo la incidencia de efectos adversos, se ha logrado determinar que según los anticuerpos monoclonales utilizados se puede aumentar o disminuir la incidencia de estos síntomas, por lo que se opta por realizar tratamientos altamente individualizados, con el propósito de aplicar una terapia específica, tomando en consideración desde el tipo de cáncer, hasta el estado general del paciente y su respuesta al tratamiento, ejemplo de esto sería el planteamiento en la investigación de [23] donde se busca combinar el tipo de quimioterapia aplicada con los mAbs específicos para mejorar su efectividad y disminuir los posibles riesgos. De esta forma una terapia y monitoreo personalizado permitirá tanto una mayor efectividad del tratamiento como la disminución de afectaciones secundarias por parte de este, volviéndolo menos invasivo para el organismo.

Otra limitante frecuente es la ineficacia de la terapia, en este caso no relacionada a los efectos adversos del paciente, si no por la resistencia de cáncer en sí ante el tratamiento, provocada tanto por los mecanismos de resistencia de las células cancerígenas, como por la respuesta inmunológica de los organismos tratados. En el primer caso esto es determinado principalmente por la fisiología del tumor, ya que en casos donde estos son sólidos o con un alto grado de desarrollo, dificulta o anula considerablemente el efecto de los mAbs, debido a la alta producción de antígenos que restringe el funcionamiento de los anticuerpos a zonas de bajo impacto en el tumor [24]. Así mismo, como es frecuente con otros medicamentos o tratamientos, se han reportado casos en que el cuerpo de los pacientes genera respuestas inmunes para contrarrestar los efectos de los anticuerpos monoclonales introducidos, así como estimular la inmunidad para los fármacos pre y post operatorios, generando antígenos que logran inhibir sus efectos, y por ende anulan su efectividad [25]; bajo este nuevo reto se busca modificar los mAbs de forma que no sean detectados por el sistema inmune, o bien aplicarlos bajo el efecto de represores que impidan la respuesta inmunológica en casos como el antes mencionado. No obstante, todas estas limitantes siguen en investigación, y en su mayoría han logrado superarse mediante la hibridación de esta terapia con otras ya aplicadas, por lo que no resultan en una problemática mayor para utilizar esta tecnología.

Panorama actual del tratamiento con anticuerpos monoclonales en cáncer de mama

Las reacciones adversas son un desafío en la aplicación a los pacientes, lo que lleva a buscar alternativas que compensen o minimicen estas, pero que no comprometan la eficacia de los anticuerpos monoclonales.

Una manera de lograr esto es usando mAbs humanos, ya que las reacciones inmunológicas se ven engañadas al no haber una combinación con células provenientes de otras especies; sin embargo, esto mismo significa un desafío, puesto que hace que el costo de fabricación de esta terapia aumente. Además de que implica una limitación en la obtención, debido a las consideraciones éticas y de salud en las personas donantes. Es por lo que los anticuerpos monoclonales de origen quimérico son los más comunes y analizados [26], lo que lleva a plantear su uso, pero afectando otras vías de respuesta de manera selectiva para combatir las consecuencias negativas.

Por otro lado, respecto al sistema inmune con los antígenos, se generan y liberan las células T-helper (específicamente Th2), que inducen la respuesta de los linfocitos T [27]. Estas pueden provocar efectos adversos, llevando a que, si se hace el uso de fármacos para suprimir de manera controlada el sistema inmune, se puede reducir notoriamente las reacciones desencadenadas por las células T [28]. Al suprimir el sistema inmune de forma temporal, se permite la aplicación del tratamiento, y que luego se pueda restablecer.

Además, si esta técnica es acoplada con mAbs biespecíficos, se aumenta la precisión del tratamiento, ya que los receptores del sistema inmune pueden ser unidos al antígeno y a la célula inmunitaria simultáneamente, y aunque pueden desencadenar reacciones inmunológicas adversas, este efecto es contrarrestado por lo planteado anteriormente [26].

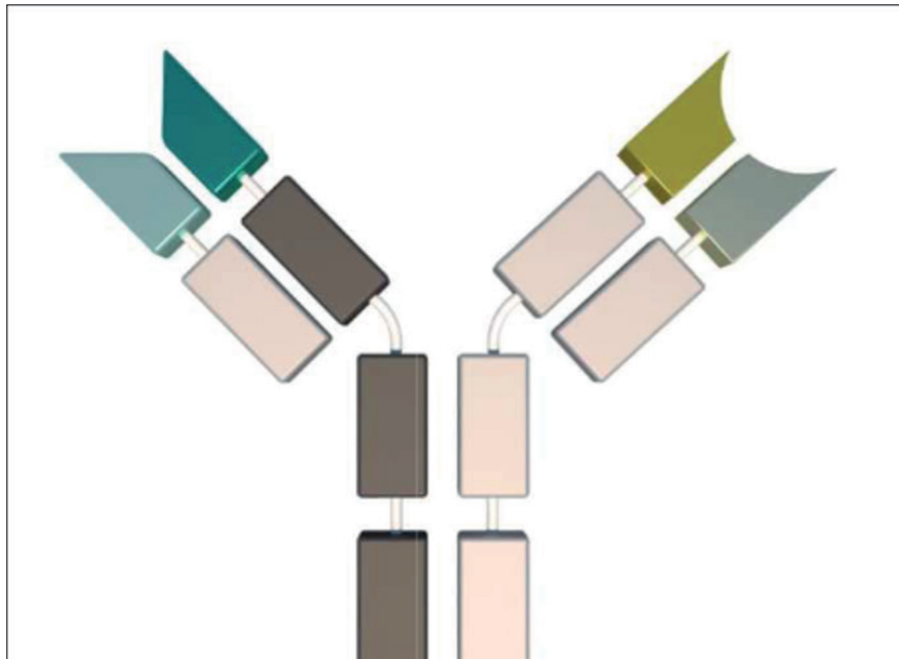


Figura 1. Diseño de un mAbs biespecífico [29].

Con esta propuesta se consigue una terapia más precisa y con la posibilidad de contrarrestar los efectos secundarios, puesto que se dirigen las células del sistema inmune directamente a las del cáncer mediante la biespecificación, mientras se ofrece una alternativa para minimizar los efectos adversos de la terapia, sin generar consecuencias perjudiciales permanentes al paciente.

Una de las mayores limitantes de los mAbs se encuentra en la aplicación de esta técnica, refiriéndose en el área económica y de accesibilidad. La producción, testeo y comercialización de los mAbs resulta sumamente compleja y meticulosa lo que implica un costo elevado de obtención, y por ende aumenta la brecha de obtención para países menos desarrollados o

pacientes que no tengan la posibilidad de costear el tratamiento. Si bien la FDA pronostica este tipo de terapias como un mercado en ascenso, y que por ende se esperaría que su costo se reduzca en los próximos años, actualmente en Estados Unidos un año de tratamiento para una sola persona puede superar los cien mil dólares [30], lo que claramente limita la aplicación de esta terapia a zonas con alto capital monetario, por lo que trabajar en la reducción de costos debe ser prioridad entre los objetivos de la aplicación de tratamientos con anticuerpos monoclonales.

El mAb tipo Rituximab (en diferentes presentaciones) es el único disponible en Costa Rica para tratamiento de enfermedades oncológicas de acuerdo con [31] en su última actualización del medicamento, que, en comparación con la consulta realizada por [29], en el año 2018 había 2 tipos más de mAbs. Esto dificulta la investigación e implementación de estos tratamientos, provocando un retroceso en materia de calidad de vida y tratamientos actuales en el país, impactando directamente a los pacientes de enfermedades oncológicas, donde la medicación apropiada y temprana es vital para la calidad y oportunidad de vida de los pacientes.

Conclusiones

En conclusión, la implementación de anticuerpos monoclonales para el tratamiento del cáncer (como el de mama) es una opción viable y efectiva en la que el cuerpo inhibe el desarrollo de más células cancerosas, activa genes relacionados a la detección de estas para ser fagocitadas de manera muy precisa, y permitiendo un tipo de terapia más exacta según el tipo de cáncer.

La elaboración de estos anticuerpos implica el uso de hibridomas quiméricos, diseñados para facilitar su integración en el organismo del paciente. Durante su desarrollo, se realizan diversas pruebas para confirmar que son funcionales y capaces de unirse específicamente a los antígenos objetivo. Además, el proceso de clonación asegura que todos los anticuerpos producidos provengan de una misma línea celular, garantizando uniformidad y especificidad en su acción.

No obstante, su implementación enfrenta desafíos desde distintos ámbitos. En la perspectiva farmacológica, es un tratamiento que no deja de tener efectos secundarios que impactan negativamente al paciente. Además, no es una terapia 100% infalible, por lo que pueden existir casos de resistencia o baja efectividad. Implementar combinaciones de técnicas es una buena alternativa para contrarrestar estos efectos, pero esto debe ser investigado más a fondo.

Otro desafío importante es la manera tan precaria en la que se maneja este tratamiento en el país, que actualmente resulta limitante para la investigación y el mejoramiento en tratamientos oncológicos.

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

Declaración de la contribución de los autores

Todos los autores afirman que se leyó y aprobó la versión final de este artículo.

Los roles de los autores según CRediT fue: A.A.A.: Supervisión, Conceptualización, Redacción-Borrador Original, Redacción-Revisión y edición. N.R.C.: Supervisión, Conceptualización, Redacción-Borrador Original, Redacción-Revisión y edición. S.R.C.: Supervisión, Conceptualización, Redacción-Borrador Original, Redacción-Revisión y edición. M.V.S.:

Supervisión, Conceptualización, Redacción-Borrador Original, Redacción-Revisión y edición. S.V.C.: Supervisión, Conceptualización, Redacción-Borrador Original, Redacción-Revisión y edición.

El porcentaje total de contribución de este artículo fue el siguiente: A.A.A. 20%, N.R.C. 20%, S.R.C. 20%, M.V.S. 20%, S.V.C. 20%.

Declaración de la disponibilidad de los datos

El intercambio de datos no es aplicable, ya que en este estudio no se crearon ni analizaron nuevos datos.

Referencias

- [1] V. Bayer, "An Overview of Monoclonal Antibodies," *Seminars in Oncology Nursing*, vol. 35, no. 5, p. 150927, Oct. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.soncn.2019.08.006>.
- [2] D. Zahavi and L. Weiner, "Monoclonal Antibodies in Cancer Therapy," *Antibodies*, vol. 9, no. 3, p. 34, Jul. 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/antib9030034>.
- [3] N. Harbeck *et al.*, "Breast cancer," *Nature Reviews Disease Primers*, vol. 5, no. 1, Sep. 2019, doi: <https://doi.org/10.1038/s41572-019-0111-2>.
- [4] A. Astorga-Ramírez, J. Sánchez-Portuguez, and S. M. Solís-Barquero, "Revisión de los factores de riesgo y factores protectores para el cáncer de mama," vol. 64, no. 4, pp. 1–11, Dec. 2022, doi: <https://doi.org/10.51481/amc.v64i4.1177>.
- [5] A. Barquero-Solano, G. Guevara-Saborío, J. Montero-Rivera, L. Vargas-Sandoval, L. D. Velásquez-Alfaro, and J. J. Mora-Román, "Inmunoterapia activa con anticuerpos monoclonales como opción terapéutica para el tratamiento del cáncer de páncreas," *Revista Tecnología en Marcha*, Jun. 2022, doi: <https://doi.org/10.18845/tm.v35i3.5612>.
- [6] A. Waller-Pulido *et al.*, "Production of monoclonal antibodies for therapeutic purposes: A review," *International Immunopharmacology*, vol. 120, pp. 110376–110376, Jul. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.intimp.2023.110376>.
- [7] P. A. Jones and S. B. Baylin, "The Epigenomics of Cancer," *Cell*, vol. 128, no. 4, pp. 683–692, Feb. 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cell.2007.01.029>.
- [8] S. M. Borgan, L. Romeus, S. Rahman, and A. Asmar, "Internal Medicine Residents and the Practice of Defensive Medicine: A Pilot Study Across Three Internal Medicine Residency Programs," *Cureus*, Feb. 2020, doi: <https://doi.org/10.7759/cureus.6876>.
- [9] A. Samuel-Eziokwu *et al.*, "Real-world Outcomes of Cyclin-dependent Kinase Inhibitors Continued Beyond First Disease Progression in Hormone Receptor-positive Metastatic Breast Cancer," *Clinical Breast Cancer*, vol. 21, no. 3, pp. 205–209, Jun. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.clbc.2020.09.010>.
- [10] E. Quaquerini *et al.*, "Prognostic and Predictive Roles of HER2 Status in Non-Breast and Non-Gastroesophageal Carcinomas," *Cancers*, vol. 16, no. 18, pp. 3145–3145, Sep. 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/cancers16183145>.
- [11] Z. Li, G. Xue, and Y. Mei, "Applications of Electrochemical Analytical Techniques in HER2 Detection for Breast Cancer," *International Journal of Electrochemical Science*, pp. 100813–100813, Sep. 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2024.100813>.
- [12] R. Ladak, B.A. Fifield, L. Porter, K. Hirmiz, and C. Hamm, "Long-Term Survival in Human Epidermal Growth Factor Receptor 2-Positive Bone-Only Metastatic Breast Cancer: Trastuzumab, Denosumab, and Potential Synergistic Effects," *Cureus*, Sep. 2024, doi: <https://doi.org/10.7759/cureus.68576>.
- [13] T. Dajsakdipon, W. Pipatsakulroj, and T. Dejthevaporn, "Incidence and Prognostic Values in Human Epidermal Growth Factor Receptor 2-Low Expression Metastatic Breast Cancer in Southeast Asian Population: A 10-Year Retrospective Study," *JCO Global Oncology*, no. 10, Sep. 2024, doi: <https://doi.org/10.1200/go.24.00132>.
- [14] V. Sankarapandian *et al.*, "A review on tyrosine kinase inhibitors for targeted breast cancer therapy," *Pathology - Research and Practice*, vol. 263, pp. 155607–155607, Sep. 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.prp.2024.155607>.

- [15] H. Yun, L. Jing, J. Zhou, Y. Liu, and J. Zhang, "Poncirin Impact on Human HER2 Breast Cancer Cells: Inhibiting Proliferation, Metastasis, and Tumor Growth in Mice Potentially through The PI3K/AKT Pathway.," *PubMed*, vol. 26, no. 8, pp. 496–504, Oct. 2024, doi: <https://doi.org/10.22074/cellj.2024.2014892.1441>.
- [16] D. G. Hicks and B. M. Turner, "Optimized biomarker evaluation and molecular testing in the era of breast cancer precision medicine," *Biotechnic & Histochemistry*, pp. 1–13, Sep. 2024, doi: <https://doi.org/10.1080/10520295.2024.2390179>.
- [17] S. M. Lee, B. S. Jang, J. H. Chang, K. Kim, and K. H. Shin, "Risk Factors of Radiation Pneumonitis in Breast Cancer with Internal Mammary Chain Irradiation," *International Journal of Radiation Oncology*Biophysics*, vol. 120, no. 2, p. e319, Oct. 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2024.07.704>.
- [18] J. Sánchez de Cos Escuin, "New Immunotherapy and Lung Cancer," *Archivos De Bronconeumologia*, vol. 53, no. 12, pp. 682–687, Dec. 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.arbres.2017.06.016>.
- [19] D. J. Slamon *et al.*, "Use of Chemotherapy plus a Monoclonal Antibody against HER2 for Metastatic Breast Cancer That Overexpresses HER2," *New England Journal of Medicine*, vol. 344, no. 11, pp. 783–792, Mar. 2001, doi: <https://doi.org/10.1056/nejm200103153441101>.
- [20] D. Cunningham *et al.*, "Cetuximab Monotherapy and Cetuximab plus Irinotecan in Irinotecan-Refractory Metastatic Colorectal Cancer," *New England Journal of Medicine*, vol. 351, no. 4, pp. 337–345, Jul. 2004, doi: <https://doi.org/10.1056/nejmoa033025>.
- [21] E. Herrero-García. "GRADO EN ENFERMERÍA Trabajo Fin de Grado," 2019. Accessed: Nov. 19, 2024. [Online]. Disponible en: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/40652/TFG-L2570.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [22] M. D. Rombouts, E. L. Swart, A. J. M. van den Eertwegh, and M. Crul, "Systematic Review on Infusion Reactions to and Infusion Rate of Monoclonal Antibodies Used in Cancer Treatment," *Anticancer Research*, vol. 40, no. 3, pp. 1201–1218, Mar. 2020, doi: <https://doi.org/10.21873/anticancer.14062>.
- [23] J. Q. Wei *et al.*, "Anti-PD-1 Monoclonal Antibodies (mAbs) Are Superior to Anti-PD-L1 mAbs When Combined with Chemotherapy in First-Line Treatment for Metastatic Non-Small Cell Lung Cancer (mNSCLC): A Network Meta-Analysis," *Biomedicine*, vol. 11, no. 7, pp. 1827–1827, Jun. 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/biomedicines11071827>.
- [24] B. M. Bordeau and J. P. Balthasar, "Strategies to enhance monoclonal antibody uptake and distribution in solid tumors," *Cancer Biology and Medicine*, vol. 18, no. 3, pp. 649–664, 2021, doi: <https://doi.org/10.20892/j.issn.2095-3941.2020.0704>.
- [25] A. Vaisman-Mentesh, M. Gutierrez-Gonzalez, B. J. DeKosky, and Y. Wine, "The Molecular Mechanisms That Underlie the Immune Biology of Anti-drug Antibody Formation Following Treatment With Monoclonal Antibodies," *Frontiers in Immunology*, vol. 11, p. 1951, 2020, doi: <https://doi.org/10.3389/fimmu.2020.01951>.
- [26] A. Behl *et al.*, "Monoclonal antibodies in breast cancer: A critical appraisal," *Critical Reviews in Oncology/Hematology*, vol. 183, p. 103915, Mar. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.critrevonc.2023.103915>.
- [27] G. F. Bomfim, S. B. A. Cau, A. S. Bruno, A. G. Fedoce, and F. S. Carneiro, "Hypertension: a new treatment for an old disease? Targeting the immune system," *British Journal of Pharmacology*, vol. 176, no. 12, pp. 2028–2048, Jul. 2018, doi: <https://doi.org/10.1111/bph.14436>.
- [28] A. O'Garra and P. Vieira, "Regulatory T cells and mechanisms of immune system control," *Nature Medicine*, vol. 10, no. 8, pp. 801–805, Aug. 2004, doi: <https://doi.org/10.1038/nm0804-801>.
- [29] K. Bermúdez-Carvajal, G. H. Carrillo, R. M. Mata, K. R. Mora, B. Y.-A. Sánchez, and J. J. M. Román, "Anticuerpos monoclonales biespecíficos: desarrollo, producción y uso como terapia anticancerígena," *Revista Médica de la Universidad de Costa Rica*, vol. 13, no. 1, pp. 19–19, Apr. 2019, doi: <https://doi.org/10.15517/rmucr.v13i1.37573>.
- [30] A. San-Juan-Rodriguez, I. Hernandez, N. Parekh, and T. Newman, "Pricing of monoclonal antibodies in the United States," *Global Journal on Quality and Safety in Healthcare*, vol. 1, no. 1, p. 4, 2018, doi: https://doi.org/10.4103/jqsh.jqsh_1_18.
- [31] Caja Costarricense del Seguro Social, "Caja Costarricense de Seguro Social | Lista oficial medicamentos," Nov. 2024, Recuperado de: <https://www.ccss.sa.cr/lom>.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Cuantificación del parasitismo natural de Braconidae e Ichneumonidae (Hymenoptera) en larvas de gusano cogollero del maíz (*Spodoptera frugiperda* Smith), en Santa Cruz, Guanacaste

Quantification of natural parasitism by Braconidae and Ichneumonidae (Hymenoptera) in larvae of the corn earworm (*Spodoptera frugiperda* Smith) in Santa Cruz, Guanacaste

Jairo Mora-Prendas¹


Fecha de recepción: 30 de setiembre, 2024


Fecha de aprobación: 23 de enero, 2025

Mora-Prendas, J. Cuantificación del parasitismo natural de braconidae e ichneumonidae (Hymenoptera) en larvas de gusano cogollero del maíz (*Spodoptera frugiperda* Smith), en Santa Cruz, Guanacaste. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 3. Julio-Setiembre, 2025. Pág. 97-105.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i3.7543>

¹ Docente e investigador de la carrera Agronomía en la Universidad de Costa Rica, Sede de Guanacaste, Finca Experimental de Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica.

 jairo.mora@ucr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0002-6195-935X>

Palabras clave

Reguladores poblacionales; avispas parasitoides; especies; riqueza; abundancia; larvas.

Resumen

Las poblaciones de *Spodoptera frugiperda* son reguladas naturalmente por enemigos naturales como los parasitoides y depredadores. A pesar de ello, el desconocimiento de estos grupos ecológicos y la alta dependencia a insecticidas sintéticos en los sistemas productivos, reducen drásticamente la entomofauna benéfica. Con el fin de conocer el complejo de parasitoides asociados a *S. frugiperda*, así como su riqueza y abundancia en la Finca Experimental de Santa Cruz, se realizaron colectas quincenales de inmaduros de la plaga en el año 2021. Las larvas fueron criadas en laboratorio hasta que completaron su ciclo biológico o la emergieron los parasitoides. Se registraron un total de 233 larvas parasitadas, clasificadas en cuatro especies de parasitoides, que ejercieron una regulación del 38,77%. Las especies reportadas fueron: *Chelonus insulares*, *Chelonus cautos*, *Archytas sp.* y *Pristomerus spinator*. Se concluye que la plaga presenta una regulación importante en la FESC. No obstante, se recomienda aumentar las localidades en estudio con el fin conocer la distribución y composición faunística de los parasitoides de *S. frugiperda* en Guanacaste.

Keywords

Population regulators; parasitoid wasps; species; richness; abundance; larvae.

Abstract

Spodoptera frugiperda populations are naturally regulated by natural enemies such as parasitoids and predators. Despite this, the lack of knowledge about these ecological groups and the heavy reliance on synthetic insecticides in production systems drastically reduce beneficial entomofauna. To understand the complex of parasitoids associated with *S. frugiperda*, as well as their richness and abundance at the Finca Experimental de Santa Cruz, biweekly collections of immature stages of the pest were conducted in 2021. The larvae were reared in the laboratory until they completed their biological cycle or parasitoids emerged. A total of 233 parasitized larvae were recorded, classified into four species of parasitoids, which exerted a regulation of 38.77%. The reported species were: *Chelonus insularis*, *Chelonus cautus*, *Archytas sp.*, and *Pristomerus spinator*. It is concluded that the pest shows significant regulation at the FESC. However, it is recommended to increase the study locations to better understand the distribution and faunal composition of *S. frugiperda* parasitoids in Guanacaste.

Introducción

El gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda* Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) es un insecto fitófago ampliamente distribuido a nivel mundial [1], su gran capacidad reproductiva [2] [3] asociada a su amplio rango de hospederos, le han otorgado el estatus de plaga en más de 80 cultivos agrícolas [1] [4]. A pesar de su versatilidad alimenticia, los estados inmaduros de la plaga presentan mayor afinidad por las poáceas, especialmente el maíz [4], donde pueden llegar a reducir el rendimiento hasta en un 20% [5].

El control de la plaga tradicionalmente está basado en insecticidas sintéticos [6] que inciden negativamente sobre la entomofauna local [7]. Su uso indiscriminado altera el equilibrio existente en los campos agrícolas [8] promoviendo la pérdida de reguladores naturales de la plaga, tales como parasitoides y depredadores [9]

La mayoría de los parasitoides de *S. frugiperda*, pertenecen a la superfamilia Icheumonoidea (Ichneumonidae y Braconidae) [10], superfamilia de gran importancia ecológica, encargados de regular las poblaciones de otros organismos, a través de su alta capacidad parasítica [11]. Sus hábitos parasíticos asociados a su gran distribución geográfica, ha convertido a este grupo de avispas en indicadores del estado del ecosistema; debido a que su éxito reproductivo se encuentra asociado de manera directa con la diversidad y abundancia de los hospederos que atacan [12].

Son muchas las investigaciones realizadas en *S. frugiperda*, y México sin duda, es tierra fértil para el estudio de parasitoides de plaga. Posicionando el país, como la base de muchas investigaciones enfocadas en la cuantificación e identificación de parasitoides del gusano cogollero del maíz. En el año 2012, Gutiérrez *et al.*, [13]; colectó 1836 larvas de *S. frugiperda* de las cuales 284 estuvieron parasitadas por himenópteros (seis especies de Braconidae y tres especies de Ichneumonidae). En este mismo año, Cipriano *et al.*, [13]; colectó 1600 larvas y reportó 316 parasitadas; de estas emergieron cuatro especies Braconidae y dos especies Ichneumonidae. En otro estado de México, Ordoñez *et al.*, [14]; identificó cuatro especies de himenópteros parasitoides (Icheumonoidea) en 153 larvas de *S. frugiperda* parasitadas.

A pesar de la existencia de estudios sobre parasitoides asociados a la plaga, en Costa Rica es poco lo que se conoce del tema. Según la literatura consultada, únicamente se ha realizado una investigación científica en el país [15], este estudio fue realizado el año 1985 en la zona atlántica del país. Reflejando la importancia de generar estudios de este tipo, ya que ofrece la posibilidad de aumentar el conocimiento de la fauna benéfica presente en el país.

Materiales y métodos

La investigación fue realizada en la Finca Experimental de Santa Cruz (FESC), propiedad de la Universidad de Costa Rica, situada en la localidad de Santa Cruz, provincia de Guanacaste en las coordenadas geográficas: 10° 15' 06 " latitud norte y 85° 41' 07" longitud oeste (Figura 1). Durante los meses de febrero a octubre del 2021

El objetivo principal de la investigación fue describir y cuantificar el parasitismo natural de Braconidae e Ichneumonidae sobre inmaduros de *S. frugiperda*, para ello, se realizaron siembras escalonadas de maíz (*Zea mays*) blanco Híbrido HR-245, en intervalos de 6 a 8 semanas. La primera siembra fue realizada el 1 de febrero y la última el 31 de octubre del año 2021.

En cuanto al manejo agronómico del cultivo, se realizó de forma convencional, sin uso de insecticidas. Previo a la siembra el terreno fue preparado con tres pases de rastra e implementos para el encamado de la superficie efectiva. Una vez preparado el terreno, se procedió a realizar la siembra del cultivo a razón de dos semillas por golpe (45 cm entre golpe y 80 cm entre surco). Posterior a la siembra, fue necesario realizar una aplicación preventiva de herbicidas (Prowl® 45,5 SC y Gesaprim® 90WG), según la dosificación proporcionada en los panfletos correspondientes. Para satisfacer los requerimientos hídricos del cultivo, fue necesario la instalación de un sistema de riego por goteo, aplicando un tiempo efectivo de riego de dos horas diarias (durante todo el ciclo). Con respecto a la nutrición del cultivo, esta fue suplida con la 10-30-10 (8 días posteriores a la siembra) y urea granular (35 días posteriores a la siembra).



Figura 1. Ubicación del sitio de estudio. Finca Experimental de Santa Cruz (FESC).

Colecta de especímenes

Las larvas se colectaron en intervalos quincenales (15 colectas en total). Para esto, se seleccionó las líneas centrales de la plantación de maíz, excluyendo los bordes. Cada evento de muestreo consistió en 40 minutos, tiempo en el cual, se procedió a recolectar el mayor número de larvas presentes en plantas con daño; para ello, se realizó una incisión vertical en el ápice de la planta con el fin de exponer al insecto, posteriormente fue retirado con ayuda de un pincel fino y colocado individualmente en un vaso plástico con tapa de tergal, al cual se le adiciono hojas frescas de maíz como alimento.

Cría de larvas

Posterior a cada colecta, los especímenes fueron trasladados al laboratorio de entomología de la FESC. Donde se mantuvieron en los mismos recipientes de colecta a una temperatura de 17°C y un 57% de humedad relativa. Las larvas fueron revisadas cuatro veces por semana, con el fin de observar su compartimiento y efectuar cambios necesarios de alimento. Durante dichas observaciones, se contabilizó el número de larvas parasitadas, decesos y emergencia de adultos, tanto de parasitoides como de *S. frugiperda*.

Procesamiento e identificación de parasitoides

Los parasitoides emergidos fueron guardados en viales de vidrio con alcohol al 95%, para su posterior identificación. Paralelamente, se elaboró, una caja entomológica de especímenes voucher; los cuales fueron montados en alfileres entomológicos, con sus respectivas etiquetas de ubicación y clasificación taxonómica.

Análisis de datos

Las variables fueron analizadas por medio de estadística descriptiva (promedios, suma y porcentajes). Así como análisis de normalidad de los datos (Shapiro-Wilk) y pruebas no paramétricas de Kruskal Wallis ($p < 0,05$), utilizando el programa estadístico R Project.

Resultados y discusión

Durante las 15 colectas realizadas en el 2021, se logró capturar 671 inmaduros de *S. frugiperda*, de los cuales el 233 ($n=34,7\%$) estuvieron parasitados, 70 ($n=10,4\%$) murieron por condiciones desconocidas y el 368 ($n=54,8\%$) restantes completaron su ciclo biológico como adultos de *S. frugiperda* (Figura 2). Tomando como referencia los resultados anteriores, se reporta un 38,77% de parasitismo natural en la especie estudiada (época de colecta). Estas cifras superan la reportadas por Ordoñez *et al.* [14], quienes encontraron un 22,09% de parasitismo en la localidad de Chihuahua, México. Así mismo, otros autores mexicanos reportan tasas de parasitismo de 59,7% [16], 25,6% [17] y 29,7% [18]. Porcentajes inferiores a los encontrados por Marengo y Saunders [15], en su estudio realizado en Turrialba, Costa Rica, con un 65% de parasitismo. Así como en estudios realizados en Guanacaste, Costa Rica, por Mora y Blanco [19], quienes reportaron un 60% de parasitismo natural.



Figura 2. Abundancia de insectos clasificados según su condición final (parasitados, muertos o adultos), colectados en Finca Experimental de Santa Cruz (FESC), Santa Cruz, Guanacaste.

Al analizar la abundancia de parasitoides en función del mes de colecta, no se observaron diferencias significativas entre los meses ($X^2=7$, g.l.=7, $p=0.4289$, Kruskal-Wallis) (Figura 3). No obstante, se observó la mayor abundancia en el mes de septiembre ($n=46$ especímenes) y la menor abundancia en junio ($n=14$). Los restantes meses de colecta mostraron abundancias oscilantes entre dichas cifras (octubre ($n=15$), marzo ($n=26$), agosto ($n=28$), mayo ($n=29$), julio ($n=37$) y abril ($n=38$)).

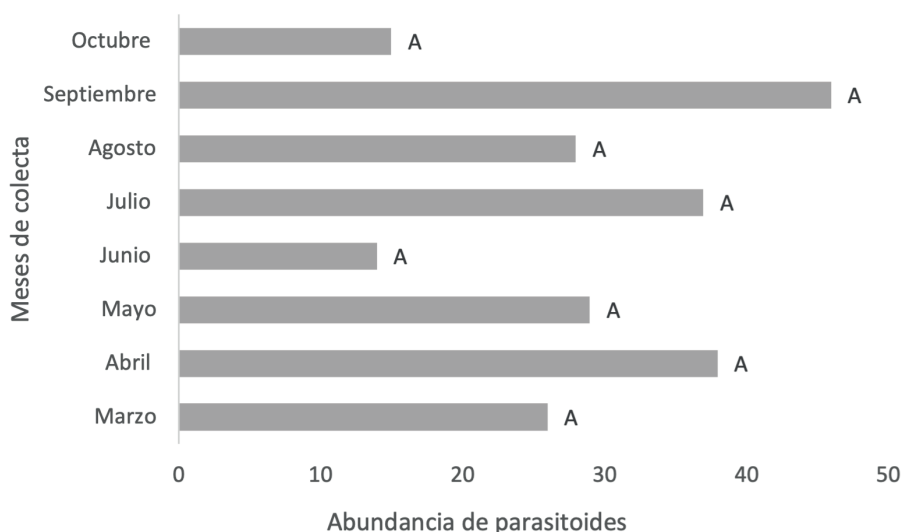


Figura 3. Abundancia de parasitoides emergidos de inmaduros de *S. frugiperda*, colectados en Finca Experimental de Santa Cruz (FESC), Santa Cruz, Guanacaste.

Con respecto a la abundancia de parasitoides emergidos, fue posible identificar cuatro especies presentes en el sitio de estudio. La especie con mayor abundancia fue *Chelonus insularis* (Hymenoptera: Braconidae) con una abundancia de 77 especímenes emergidos, seguida por *Chelonus cautos* (Hymenoptera: Braconidae) con 34 individuos, *Archytas sp.* (Diptera: Tachinidae) con 13 parasitoides y por último *Pristomerus spinator* (Hymenoptera: Ichneumonidae) con 7 especímenes emergidos. Mora y Blanco [18], en estudios previos en la Finca Experimental de Santa Cruz, reportaron una abundancia de 88 especímenes del género *Chelonus sp.*, siendo la única especie de parasitoides reportada en su estudio.

Riqueza de parasitoides

Durante los 15 periodos de colecta realizados en el año 2021, fue posible determinar cuatro (4) especies de parasitoides asociadas a larvas de *S. frugiperda*. Tres de estas especies correspondieron a himenópteros de la superfamilia Ichneumonoidea (Braconidae e Ichneumonidae). Mientras que, la especie restante, se clasificó dentro del orden Diptera (este orden de insectos a pesar de no formar parte de la investigación inicial se consideró importante su reporte en el área de estudio). Los resultados anteriores son inferiores a los reportados por Marengo y Saunders [15], quienes identificaron ocho especies de parasitoides asociados a inmaduros de *S. frugiperda* (*Chelonus insularis*, *Eiphosoma vitticole*, *Pristomerus spinator*, *Cotesia marginiventris*, *Ophion sp.*, *Archytas marmoratus*, *Chelonus Cautus* y *Homolobus truncator*) en la zona Atlántica del país.

Para el análisis de la riqueza de parasitoides de *S. frugiperda* en para la localidad de Santa Cruz. La familia con mayor riqueza de especies fue Braconidae con dos representantes (*Chelonus insularis* (Figura 4) y *Chelonus cautos* (Figura 5)), seguida por Ichneumonidae y Tachinidae, de las cuales únicamente fue posible obtener una especie de cada una, *Pristomerus spinator* (Figura 6) y *Archytas sp.* (Figura 7) respectivamente.

Con respecto a la abundancia de parasitoides. La especie con mayor abundancia fue *Chelonus insularis* (Hymenoptera: Braconidae) con una abundancia de 77 especímenes emergidos, seguida por *Chelonus cautos* (Hymenoptera: Braconidae) con 34 individuos, *Archytas sp.* (Diptera: Tachinidae) con 13 parasitoides y por último *Pristomerus spinator* (Hymenoptera: Ichneumonidae) con 7 especímenes emergidos.



Figura 4. Especimen de *Chelonus insularis* (Hymenoptera: Ichneumonidae) obtenido a partir de inmaduros de *S. frugiperda* en Santa Cruz Guanacaste. a. Vista lateral, b. Vista dorsal, c. Vista ventral.



Figura 5. Especimen de *Chelonus cautos* (Hymenoptera: Ichneumonidae) obtenido a partir de inmaduros de *S. frugiperda* en Santa Cruz Guanacaste. a. Vista lateral, b. Vista dorsal, c. Vista frontal.

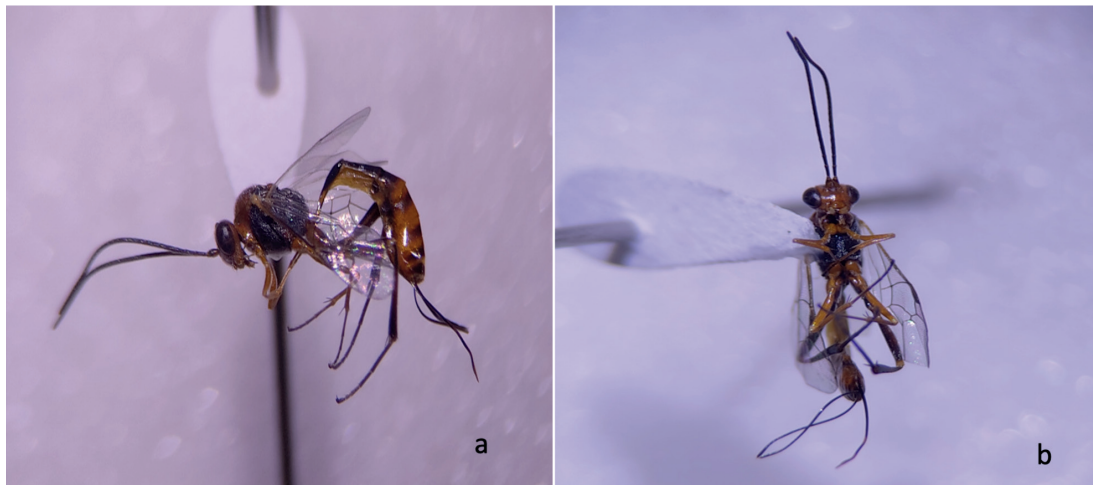


Figura 6. Especimen de *Pristomerus spinator* (Hymenoptera: Ichneumonidae) obtenido a partir de inmaduros de *S. frugiperda* en Santa Cruz, Guanacaste. a. Vista lateral, b. Vista ventral.



Figura 7. Especimen de *Archytas* sp. (Diptera: Tachinidae) obtenido a partir de inmaduros de *S. frugiperda* en Santa Cruz Guanacaste. a. Vista lateral, b. Vista dorsal, c. Vista ventral.

Conclusiones y recomendaciones

El parasitismo natural de *S. frugiperda* para la localidad de Santa Cruz, fue 38, 77%.

A pesar de la baja riqueza de especies encontrada ($n=4$), se obtuvo una alta abundancia de parasitoides ($n=335$). Cifras que reflejan una regulación eficiente de la población plaga (*S. frugiperda*) presente en las plantaciones de maíz.

Para futuras investigaciones se debe aumentar las localidades de estudio (Santa Cruz, Carrillo, Nicoya, Belén y Liberia) y años de colecta, con el fin de conocer la distribución y compasión de la entomofauna benéfica en estudio.

Agradecimientos

El autor agradece a la Universidad de Costa Rica y a la Vicerrectoría de Investigación por financiar el proyecto C0106 “Cuantificación del parasitismo natural de Braconidae e Ichneumonidae (Hymenoptera) en larvas de gusano cogollero del maíz (*Spodoptera frugiperda* Smith), en Santa Cruz, Guanacaste”. Además, se agradece a los colaboradores de la Finca Experimental de Santa Cruz (FESC), por su valiosa contribución en el establecimiento y manejo agronómico de las parcelas en campo.

Referencias

- [1] EPPO, “Mundial del gusano cogollero *Spodoptera frugiperda*,” European and Mediterranean Plant Protection Organization, 2020. Recuperado de: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/ddadf636-14b5-4aae-a13e-a239fe9a3b6d/content>
- [2] R. L. Flores-Quinches, P. S. Castillo-Carrillo, y J. C. Silva-Alvarez, “Influencia de la alimentación con hoja de arroz (*Oryza sativa* L.) en la biología de *Spodoptera frugiperda* (JE Smith, 1797),” *Manglar*, vol. 18, no. 2, pp. 103-109, 2021.
- [3] M. Suárez, “Uso de bioinsecticidas en el control del gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*) en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.) en condiciones controladas (laboratorio),” Tesis de Licenciatura, Univ. Téc. Estatal de Quevedo, Quevedo, Ecuador, 2015, p. 14.
- [4] A. Casmuz, M. L. Juárez, M. G. Socías, M. G. Murúa, S. Prieto, S. Medina, y G. Gastaminza, “Revisión de los hospederos del gusano cogollero del maíz, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae),” *Revista de la Sociedad Entomológica Argentina*, vol. 69, no. 3-4, pp. 209-231, 2010.
- [5] J. L. Capinera, “Fall Armyworm, *Spodoptera frugiperda* (JE Smith) (Insecta: Lepidoptera: Noctuidae): EENY098/IN255, rev. 7/2000,” *Edis*, vol. 7, pp. 01-06, 2002.

- [6] O. Valarezo, "Utilización de nim (*Azadirachta indica*) en la generación y transferencia de alternativas para el manejo de *Spodoptera frugiperda* en maíz," Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias, FAO, Portoviejo, Ecuador, pp. 2-3, 2003.
- [7] C. E. T. Perdomo, "Los plaguicidas: aliados contra la biodiversidad de los insectos benéficos," *Revista de Análisis de la Realidad Nacional*, vol. 142, 2018.
- [8] L. L. Vázquez, J. Alfonso, Y. Matienzo, y M. Veitía, "Conservación y manejo de enemigos naturales de insectos fitófagos en los sistemas agrícolas de Cuba," Editorial CIDISAV, Cuba, pp. 198-198, 2008.
- [9] E. Viñuela Sandoval, "La importancia de la compatibilidad de enemigos naturales y plaguicidas en los modernos sistemas productivos," 2011. Recuperado de: <https://oa.upm.es/12456/>
- [10] G. Cipriano, M. González, y A. González, "Parasitismo natural de Braconidae e Ichneumonidae (Hymenoptera) sobre *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae)," *Revista Colombiana de Entomología*, vol. 39, no. 2, pp. 211-215, 2013.
- [11] E. Ruiz y D. R. Dmitri, "Una nueva especie del género *Xorides* Latreille (Hymenoptera: Ichneumonidae) del estado de Tamaulipas, México," *Centro de Investigación UAM, Universidad Autónoma de Tamaulipas*, vol. 80, pp. 1-3, 2000.
- [12] E. Ruiz, D. Rafaelevich, A. Gonzales, A. Ivanovich, y J. Coronado, "Biodiversidad de Ichneumonidae (Hymenoptera) en México," *Revista Mexicana de Biodiversidad*, vol. 85, pp. 385-391, 2014.
- [13] A. Gutiérrez-Ramírez, J. Robles-Bermúdez, C. Cambero-Campos, M. Santillán-Ortega, J. M. Ortiz-Catón, y M. Coronado-Blanco, "Parasitoides de *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) Encontrados en Nayarit, México," *Southwestern Entomologist*, vol. 40, no. 3, 1 sep. 2015.
- [14] M. A. G. Ordóñez-García, J. C. Bustillos-Rodríguez, J. E. S. Loya-Márquez, C. L. Ríos-Velasco, and J. L. Jacobo-Cuellar, "Parasitoides de *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) en Chihuahua, México," *Métodos en Ecología y Sistemática*, vol. 10, no. 1, pp. 67-72, 2015.
- [15] R. A. Marengo y J. L. Saunders, "Parasitoides del gusano cogollero, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) en maíz, Turrialba Costa Rica," *Manejo Integrado de Plagas*, vol. 27, pp. 18-23, 1993.
- [16] V. Ávila-Rodríguez, D. Rivera-Zamarripa, U. Nava-Camberos, A. Czaja, M. C. García-de la Peña, J. L. Estrada-Rodríguez, and A. I. Ortega-Morales, "Parasitismo natural de *Spodoptera frugiperda* en maíz en la Comarca Lagunera, México," *Southwestern Entomologist*, vol. 48, no. 1, pp. 195-202, 2023.
- [17] J. Molina-Ochoa, J. J. Hamm, R. Lezama-Gutiérrez, M. López-Edwards, M. González-Ramírez, and A. Pescador-Rubio, "A survey of fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) parasitoids in the Mexican states of Michoacán, Colima, Jalisco, and Tamaulipas," *Florida Entomologist*, pp. 31-36, 2001.
- [18] O. E. Virgen, J. C. Campos, A. R. Bermudez, C. R. Velasco, C. C. Cazola, N. I. Aquino, and E. R. Cancino, "Parasitoids and entomopathogens of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in Nayarit, Mexico," *Southwestern Entomologist*, vol. 38, no. 2, pp. 339-344, 2013.
- [19] J. Mora Prendas and H. Blanco Metzler, "Evaluation of botanical insecticides in controlling the population of fall armyworms (*Spodoptera frugiperda* Smith) present on corn crops (*Zea mays*) located in Santa Cruz, Guanacaste," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, pp. 1-10, 2018.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Para la revisión gramatical y ortográfica de este artículo, empleamos la herramienta de Inteligencia Artificial ChatGPT. Esta nos permitió identificar errores y mejorar la fluidez del texto. No obstante, realizamos una revisión final para garantizar que el artículo cumpliera con los estándares de calidad de la revista.

Enfermedad de Crohn, colitis ulcerosa y artritis reumatoide: La relación entre la microbiota intestinal y el desarrollo de enfermedades autoinmunes

Crohn's Disease, Ulcerative Colitis, and Rheumatoid Arthritis: The Relationship Between Gut Microbiota and the Development of Autoimmune Diseases


Juan Carlos González-Vásquez¹, Nicole Brigitte Granados-Rojas²,
Jimena Juárez-González³, Juan Pablo Rodríguez-Quesada⁴


Fecha de recepción: 14 de noviembre, 2024
Fecha de aprobación: 2 de marzo, 2025

González-Vásquez, J.C; Granados-Rojas, N.B; Juárez-González, J; Rodríguez-Quesada, J.P. Enfermedad de Crohn, colitis ulcerosa y artritis reumatoide: la relación entre la microbiota intestinal y el desarrollo de enfermedades autoinmunes. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 3. Julio-Setiembre, 2025. Pág. 106-119.


 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i3.7584>


1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 juank1514@estudiantec.cr


 <https://orcid.org/0009-0006-9687-0300>


2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 08.nicole@estudiantec.cr


 <https://orcid.org/0009-0004-3638-500X>


3 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 jjuares@estudiantec.cr

 <https://orcid.org/0009-0002-1863-0812>

4 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 ju.rodriguez@estudiantec.cr

 <https://orcid.org/0009-0008-3275-5367>

Palabras clave

Disbiosis; sistema inmunológico; microorganismos; intestino; huésped.

Resumen

La microbiota intestinal es fundamental para la regulación inmune y homeostática de varios sistemas. Su desequilibrio se ha asociado con enfermedades autoinmunes, lo que subraya la necesidad de investigar a fondo su impacto en la etiología y las complicaciones sistémicas de estas condiciones. En este estudio se describe cómo la disbiosis intestinal es un factor crucial en el desarrollo o evolución de enfermedades inflamatorias como la enfermedad de Crohn, la colitis ulcerosa y la artritis reumatoide, principalmente a través de su capacidad para modular las respuestas inmunitarias, y se destaca estrategias terapéuticas prometedoras. La modulación de la microbiota intestinal ofrece no solo un potencial terapéutico, sino también enfoques preventivos para minimizar la ocurrencia de enfermedades autoinmunes.

Keywords

Dysbiosis; immune system; microorganisms; gut; host.

Abstract

The gut microbiota is fundamental for immune and homeostatic regulation of various systems. Its imbalance has been associated with autoimmune diseases, which underscores the need to thoroughly investigate its impact on the etiology and systemic complications of these conditions. This study describes how intestinal dysbiosis is a crucial factor in the development or evolution of inflammatory diseases such as Crohn's disease, ulcerative colitis, and rheumatoid arthritis, mainly through its ability to modulate immune responses, and highlights promising therapeutic strategies. The modulation of gut microbiota offers not only therapeutic potential but also preventive approaches to minimize the occurrence of autoimmune diseases.

Introducción

Como parte de su rol en el ecosistema, los organismos se relacionan entre sí independientemente de su reino o grado evolutivo. Estas interacciones pueden ser tanto perjudiciales como beneficiosas, llegando a formar vínculos tan estrechos que su supervivencia depende de esta simbiosis. Un ejemplo de esta relación es la microbiota humana, compuesta por diversos microorganismos, entre los cuales se encuentran aproximadamente un trillón de bacterias que habitan tanto en el interior como en el exterior del ser humano, donde responden a estímulos y afectan al hospedero [1].

Se denomina microbiota a las diversas comunidades microbianas que habitan en un lugar específico de un organismo, donde establecen relaciones de simbiosis tanto entre sí como con su hospedador. Estas comunidades tienen la capacidad de otorgar beneficios como protección contra infecciones, proveer nutrientes, promover el desarrollo del sistema inmunológico o incluso afectar las funciones cognitivas [2]. Sin embargo, el crecimiento descontrolado de estos microorganismos puede resultar perjudicial, ya que priorizan su propio desarrollo sobre los beneficios al hospedador, llegando incluso a dañar al organismo principal con tal de cumplir su objetivo [2]. De igual forma, su ausencia traería consecuencias que pueden ser tanto positivas como negativas.

Al hacer referencia al término microbiota intestinal, se alude a las diversas comunidades microbianas que residen a lo largo del intestino delgado y grueso. Estas comunidades representan el 75% de los microorganismos autóctonos y constituyen 1 a 2 kg del peso corporal [3]. La microbiota intestinal tiene implicaciones en lo que consta a digestión y absorción de los nutrientes, y además está involucrada en procesos homeostáticos relacionados con el sistema nervioso, inmune y endocrino [3]. Por esta razón, la disbiosis, un desequilibrio en la cantidad o tipo de microorganismos, puede conllevar a graves problemas de salud.

En el intestino se encuentra la zona inmunitaria más compleja y peculiar de todo el organismo, puesto que contempla la barrera epitelial de la mucosa y el tejido linfóide organizado y difuso [3]. Estos forman parte de la inmunidad innata y adaptativa que defienden al cuerpo de los patógenos.

La disbiosis intestinal está implicada en enfermedades inflamatorias, especialmente en el tracto gastrointestinal, como el síndrome de intestino irritable (IBS, por sus siglas en inglés) y el cáncer colorrectal. Sin embargo, también pueden estar relacionada con condiciones inflamatorias en la diabetes tipo 1, el síndrome metabólico y en artropatías inflamatorias musculoesqueléticas [4]. En este trabajo, se enfatiza en dos condiciones gastrointestinales específicas: la enfermedad de Crohn y la colitis ulcerosa, además de una artropatía inflamatoria musculoesquelética, conocida como artritis reumatoide.

La enfermedad de Crohn se caracteriza por presentar una inflamación y ulceración segmentaria en todo el tracto digestivo (de boca a ano) [5]. La zona más frecuentemente afectada es el área terminal del íleon, pues la presencia del apéndice y la válvula ileocecal promueve una alta interacción con microorganismos [7]. La sintomatología de los pacientes suele incluir fiebre, dolor abdominal, pérdida de peso, diarrea, entre otros, a causa de la afectación de la pared intestinal, normalmente encargada de absorber nutrientes y agua [5]. Esta enfermedad afecta a todas las edades, es crónica e idiopática, por lo que se cree que está relacionada a factores genéticos, ambientales, antígenos de bacterias o alteraciones en la inmunidad de la mucosa [7].

A diferencia de la enfermedad de Crohn, la colitis ulcerosa presenta inflamación únicamente en el intestino grueso (colon) y en el recto [7]. Este es el tipo de IBS más común y en los últimos 30 años ha aumentado su incidencia un 37.8%, con una tasa de fallecimientos de 68.7% [8]. La sintomatología incluye diarrea disentérica, dolor abdominal tipo cólico y tenesmo, en casos severos también puede mostrar fiebre, anemia y deshidratación [7]. La colitis ulcerosa es idiopática, pero se cree es causada por una desregulación de factores genéticos, ambientales, inmunológicos y de la microbiota; por esta razón los pacientes tienen un riesgo 1.5 veces mayor de padecer a largo plazo cáncer colorrectal [9].

La artritis reumatoide es una enfermedad autoinmune que se caracteriza por la degeneración de articulaciones, compromiso sistémico y presencia de auto-anticuerpos, como los anticuerpos antipeptidos cíclicos citrulinados (ACPAs, por sus siglas en inglés) [10]. Su evolución es variable y generalmente se manifiesta de manera simétrica en las extremidades periféricas, donde se produce destrucción del cartílago, erosión ósea y deformidades articulares [11]. La sintomatología presentada es dolor articular en zonas periféricas, hipersensibilidad y rigidez matutina, además puede haber afecciones extraarticulares en pulmones, ojos, corazón, piel, entre otros [11].

En el presente trabajo se discute cómo, a través de la modulación de las respuestas inmunitarias, la disbiosis intestinal desempeña un papel crucial en la patogénesis de enfermedades inflamatorias, como la enfermedad de Crohn, la colitis ulcerosa y la artritis reumatoide, lo que resulta en un mayor riesgo de complicaciones sistémicas.

Microbiota Intestinal: Composición y Funciones

El microbioma humano es un ecosistema formado por más de 1×10^{13} microorganismos que conviven con las células del cuerpo humano, desempeñando un papel crucial en la salud. Estos microbios ayudan en la digestión y la síntesis de nutrientes, y además colaboran con el sistema inmunológico para proteger contra patógenos invasores. El microbioma, también conocido como flora microbiana comensal, varía según la zona anatómica, difiriendo entre la boca, el tracto respiratorio, el sistema gastrointestinal, la piel, el tracto urogenital, entre otros, y adaptándose a factores como el pH, la temperatura, humedad y nutrientes [12].

La cavidad oral, que significa el 25% del microbioma humano en términos de cantidad, contiene alrededor de 700 especies de procariotas, las cuales forman biopelículas bacterianas [13]. En situaciones patológicas como la caries, el número de estas especies disminuye considerablemente, lo que sugiere un papel protector de las bacterias de población disminuida.

El esófago, aunque no se considera que tenga un microbiota permanente, puede verse invadido por microorganismos arrastrados por los alimentos, afectando su equilibrio en casos de patologías como el reflujo. El estómago, tradicionalmente visto como estéril, alberga bacterias capaces de adaptarse a su ambiente ácido. El microbioma vaginal está dominado por varias especies de *Lactobacillus*, que protege contra infecciones, pero en general, el microbioma de la piel y de las mucosas aún presenta incógnitas en cuanto a su relación con la salud. El microbioma intestinal es uno de los más grandes y diversos, responsable de funciones clave como la digestión y la síntesis de vitaminas, y su composición varía en función de la dieta [12].

En el intestino adulto, el 90% de las bacterias pertenecen a los filos *Bacteroidetes* y *Firmicutes*, mientras que el 10% restante incluye *Proteobacterias*, *Actinobacterias*, *Fusobacterias* y *Verrucomicrobia*, además de algunas especies de Arqueas. El microbiota intestinal también incluye levaduras, fagos y protistas, con los bacteriófagos desempeñando un papel crucial en la regulación del ecosistema microbiano [14]. A nivel individual, cada persona alberga un patrón único de cepas microbianas que varía a lo largo del tubo digestivo y en respuesta a factores como la dieta o el uso de fármacos.

El microbiota intestinal fermenta carbohidratos complejos para generar ácidos grasos de cadena corta (AGCC) como el ácido acético, propiónico y butírico, los cuales son utilizados por los enterocitos o pasan al torrente sanguíneo para cumplir funciones importantes en órganos distales [15], [16]. También produce vitaminas B y K, y transforma compuestos dietéticos inactivos en moléculas bioactivas [17]. Sin embargo, puede generar compuestos tóxicos como la trimetilamina, vinculada con el riesgo cardiovascular [18]. Además, el microbiota regula el almacenamiento de lípidos, lo que la vincula con el desarrollo de obesidad y de síndrome metabólico [19].

Entre los efectos que generan los metabolitos bacterianos con relación a la respuesta inmune, destacan los ácidos grasos de cadena corta, como el butirato, propionato y acetato, producidos por la fermentación de fibra por el microbiota, desempeñan un papel clave en la regulación de la respuesta inmune. El butirato, por ejemplo, promueve la acetilación de histonas en células T, favoreciendo su diferenciación hacia Treg y suprimiendo la producción de citoquinas proinflamatorias [20].

El polisacárido A es producido por *Bacteroides fragilis*, este metabolito activa TLR2, aumentar la producción de IL-10 y reduce la IL-17, con lo que contribuye a mantener la tolerancia inmune y prevenir respuestas autoinmunes [21].

El microbiota intestinal juega un papel crucial en la maduración y regulación del sistema inmunitario y de la barrera intestinal, protegiendo al organismo frente a agentes externos y manteniendo la tolerancia hacia el microbiota comensal. La barrera intestinal, formada

principalmente por células epiteliales, impide el contacto directo entre los microorganismos y el sistema inmune. Además, las células especializadas como las células caliciformes y las células Paneth, secretan sustancias como mucinas y péptidos antimicrobianos que refuerzan esta barrera [22]. El microbiota también regula la expresión de defensinas, contribuyendo a la homeostasis inmunológica y evitando la colonización microbiana excesiva [22], [23].

A nivel intestinal, el sistema inmunológico cuenta con mecanismos complejos para diferenciar entre patógenos y microorganismos beneficiosos. Las bacterias comensales ayudan a la producción de células T reguladoras (Tregs), que son esenciales para evitar respuestas inflamatorias innecesarias y mantener la tolerancia inmunológica. Las interacciones entre las bacterias y las células dendríticas influyen en la activación de linfocitos B y T, generando una producción eficiente de inmunoglobulina A (IgA), que neutraliza patógenos sin causar inflamación excesiva [24]. Estas dinámicas son fundamentales para prevenir la aparición de enfermedades inflamatorias y trastornos autoinmunes [21].

Mecanismos bioquímicos en la relación microbiota-autoinmunidad

La microbiota es crucial para la homeostasis de diversos sistemas, pero cuando ocurre una disbiosis esta más bien juega un papel crucial en la desregulación del sistema inmunológico y el desencadenamiento de respuestas autoinmunes. Este desequilibrio altera la simbiosis normal entre la microbiota y el huésped, generando cambios en la flora intestinal que pueden ser específicos de cada enfermedad [25]. La pérdida de bacterias beneficiosas y el aumento de patógenos, como *Clostridioides difficile*, contribuyen a la inflamación crónica y afectan la capacidad del sistema inmunológico para mantener la homeostasis, favoreciendo enfermedades como la enfermedad de Crohn y la colitis ulcerosa [26], [27].

La disbiosis puede provocar cambios significativos en la producción de citoquinas, que se traducen en un aumento de citoquinas proinflamatorias, como IL-6 e IL-1 β , y una disminución de citoquinas antiinflamatorias, como IL-10, creando un entorno inflamatorio que puede desencadenar respuestas autoinmunes [28]. Por otro lado, algunas bacterias patógenas presentan estructuras que imitan antígenos del huésped, un fenómeno conocido como mimetismo molecular. Esto puede inducir al sistema inmunológico a atacar no solo a las bacterias, sino también a las propias células del organismo, contribuyendo aún más a la autoinmunidad [29]. Factores como el uso indiscriminado de medicamentos y la mala alimentación pueden inducir disbiosis, que si ocurren en el periodo perinatal alteran el desarrollo inmunológico y predispone a enfermedades autoinmunes en la adultez [30]. El microbiota, por lo tanto, es fundamental para la tolerancia inmunológica y la prevención de respuestas autoinmunes patológicas.

Los receptores de reconocimiento de patrones (PRR) en las células del epitelio intestinal, como el NOD-1 en las células de Paneth, juegan un papel crucial en la modulación de las respuestas inmunes mediante la interacción con metabolitos específicos del microbiota. La activación de estos PRR puede inducir la producción de quimiocinas y citocinas como IL-18 y IL-22, que promueven la producción de péptidos antimicrobianos, y además modulan el metabolismo de los microorganismos comensales, disminuyendo la expresión de genes virulentos [31].

Por otro lado, los metabolitos derivados del microbiota, como los ácidos grasos de cadena corta (AGCC), juegan un papel esencial en la regulación de la respuesta inmunitaria. Por ejemplo, el butirato, producido por la fermentación de *Clostridium spp*, promueve la diferenciación de linfocitos T reguladores al reducir la producción de IL-12 e IL-6 por células dendríticas. Además, el polisacárido A de *Bacteroides fragilis*, reconocido por TLR2, favorece la producción de IL-10 y disminuye la producción de IL-17, lo que contribuye a un equilibrio entre las respuestas inmunes Th17 y Treg, crucial para mantener la homeostasis intestinal y prevenir la inflamación excesiva [32], [33].

Entre las vías de señalización más relevantes que modulan la interacción microbiota intestinal-sistema inmunológico se encuentran las asociadas a los receptores de reconocimiento de patrones (PRR), como los receptores Toll-like (TLR) y los NOD-like (NLR), que detectan metabolitos y componentes bacterianos, activando cascadas de señalización que influyen en la función inmunológica y la vía del ácido retinóico.

En el caso de los TLR, estos receptores son cruciales para la detección de patrones moleculares asociados a patógenos (PAMP). La activación de TLR puede inducir la producción de citoquinas proinflamatorias, que favorecen respuestas Th1 y Th17, relacionadas con la autoinmunidad y, como describen [34], esta clase de PRR (TLR) juegan un papel esencial en la inmunidad innata al detectar infecciones.

Los receptores NOD-like (NLR) son fundamentales en la detección de componentes bacterianos, y su activación conduce a la producción de citoquinas y la activación de células inmunitarias. Los NLRs son esenciales para la detección de PAMPs y DAMPs, y su activación regula la inflamación y la respuesta inmune [35]. Los metabolitos bacterianos, como el ácido retinoico, derivados de la conversión de vitamina A por bacterias intestinales, son importantes porque influyen en la diferenciación de linfocitos T reguladores (Treg), promoviendo una respuesta inmune antiinflamatoria y modulando la autoinmunidad. Si este proceso no se cumple adecuadamente, se favorece la aparición de un cuadro inflamatorio [36]. Por último, el ATP liberado por bacterias puede ser detectado por células dendríticas en la lámina propia, promoviendo la producción de IL-6 e IL-23. Esto favorece la diferenciación de células Th17, lo que puede estar relacionado con la autoinmunidad, especialmente en enfermedades inflamatorias intestinales [37].

Microbiota y enfermedades autoinmunes específicas

Enfermedad de Crohn

En personas con enfermedad de Crohn activa, se presenta una disbiosis marcada, con una disminución significativa de bacterias productoras de butirato. Esta reducción es aún más pronunciada en pacientes con niveles elevados de proteína C-reactiva, un marcador de inflamación. La falta de butirato se ha relacionado con una alteración en la diferenciación y expansión de células T reguladoras (Treg), lo que contribuye al desequilibrio inmunológico y a la inflamación crónica en el intestino, características principales de la enfermedad de Crohn [38].

La disbiosis presentada por la enfermedad de Crohn se caracteriza por una disminución de bacterias pertenecientes al filo *Firmicutes*, como *Faecalibacterium prausnitzii*, y un aumento de bacterias proinflamatorias del filo *Proteobacteria*, como *Escherichia coli* [39].

Colitis Ulcerosa

La colitis ulcerosa (CU) es una patología inflamatoria crónica, limitada al colon y recto. Aunque su etiología es desconocida, sujetos genéticamente predispuestos parecen tener una respuesta inmune descontrolada contra el medio ambiente y el microbiota intestinal, lo que determina inflamación y daño en la mucosa. Su incidencia ha aumentado en países industrializados, lo que sugiere que factores ambientales jugarían un rol en su etiopatogenia [40].

El microbiota intestinal de los pacientes con colitis ulcerosa (CU) presenta un desequilibrio tanto en su cantidad como en su diversidad, en comparación con individuos sanos. La diversidad bacteriana en estos pacientes es considerablemente menor, con un incremento en el número

de microorganismos patógenos. Uno de los principales factores que perpetúan la inflamación es la producción sostenida de citocinas proinflamatorias, como TNF- α e IL-1 β , que amplifican la respuesta inmune y provocan daño tisular continuo en el colon [41].

Además, la presencia de un estrés oxidativo elevado en CU, derivado de la producción excesiva de especies reactivas de oxígeno (ROS), daña el epitelio intestinal y perpetúa la inflamación [42]. Esta inflamación crónica se ve exacerbada por una activación desregulada del sistema inmunológico, que juega un papel central en la progresión de la enfermedad [43].

Artritis Reumatoide

Dentro de la patología común se incluye la limitación en la movilidad de las articulaciones periféricas y disminución del estado funcional, aunque también puede presentar úlceras o nódulos, entre otras afecciones [44].

En pacientes con RA se ha observado que las poblaciones de especies productoras de butirato disminuyen, mientras que la cantidad de especies consumidoras aumentan [10]. Esta disminución de butirato ocasiona que no se esté regulando a las células T reguladoras ni foliculares auxiliares, así que se promueve la formación de ACPA por las células B, este compuesto se unirá a las proteínas que hayan atravesado por una citrulinación, lo cual genera la respuesta inflamatoria y posterior destrucción por otras células inmunitarias como los macrófagos [10].

Las prostaglandinas (PG) son lípidos creados por las ciclooxigenasas (COX), las PG estas regulan las respuestas ante una situación de daños en el cuerpo, así que dentro de sus funciones se encuentra el proceso inflamatorio y la comunicación con células del sistema inmune [45]. La prostaglandina E2 (PGE2) se ha descrito como un importante mediador de la destrucción de cartílago y hueso en la artritis reumatoide y otras enfermedades como las IBD [46]. En estudios de enfermedades periodontales se ha demostrado que el butirato estimula la producción de PGE2, la expresión de COX y regula los receptores de PGE2 (EP1 y EP2) [47]. Lo cual, en una enfermedad crónica como la artritis reumatoide, empeoraría los síntomas al producir mayor inflamación descontrolada y atraer a células del sistema inmune que destruirían el tejido sano.

Sin embargo, aún se desconoce cómo se relacionan las PGE2 y las células T reg en el intestino, aunque se sabe que ambas se asocian con disbiosis y la modulación de los fagocitos mononucleares [45]. Además, a pesar de que ambas parecen regularse con butirato lo hacen de forma inversa, puesto que el aumento de este metabolito promueve la regulación controlada de células T y aumenta la respuesta inflamatoria con las PGE2. Aunque, se ha visto que los pacientes con RA suelen tener polimorfismos en el gen PTGER4 donde se codifica el receptor EP4 de la PG3, lo que ocasiona que se sobreexpresa y pueda ser más sensible a la PG3 [45]. Así que la participación de la PG3 en la AR puede estar más ligado a factores genéticos, aunque se ocupan más estudios para confirmarlo.

Estrategias terapéuticas basadas en la modulación de la microbiota

Se han desarrollado muchas moléculas que tienen un efecto modulador sobre la microbiota intestinal, entre las cuales predominan los antibióticos, prebióticos, probióticos y simbióticos. Algunas moléculas, originalmente conocidas por su acción antimicrobiana, pueden mejorar el equilibrio de la microbiota intestinal. Estas no encajan en las categorías terapéuticas tradicionales, ya que su acción no es estrictamente antimicrobiana, sino eubiótica [48]. Con

el progreso en la comprensión de la relación entre el huésped y su microbiota, han surgido terapias basadas en su modulación, como el trasplante de microbiota fecal (FMT) y técnicas moleculares.

Los probióticos son microorganismos vivos que, cuando se administran en cantidades adecuadas, confieren un beneficio para la salud del huésped [48]. Su uso ha ganado atención en el tratamiento de enfermedades autoinmunes debido a su capacidad para modular el microbiota intestinal. Uno de los probióticos más conocidos para el tratamiento de la enfermedad inflamatoria intestinal (EII) es VSL#3, el cual es una mezcla probiótica que incluye las bacterias *Bifidobacterium breve*, *B. longum*, *B. infantis*, *Lactobacillus acidophilus*, *L. plantarum*, *L. paracasei*, *L. delbrueckii*, *subsp Bulgaricus* y *Streptococcus thermophilus*. Mejora los síntomas de la EII al beneficiar el entorno intestinal, incrementar la diversidad microbiana y modular la concentración de bacterias específicas, como aumentar la *Bifidobacterium* y disminuir la de *Turicibacter* en modelos animales [49]. Asimismo, *F. prausnitzii* desempeña un papel importante en la regulación de la inmunidad al reducir citocinas proinflamatorias y aumentar citocinas antiinflamatorias, lo que es relevante para la enfermedad de Crohn. Además, *Lactococcus lactis* transfectado con péptidos antiinflamatorios derivados de *F. prausnitzii* ha demostrado aliviar la colitis inducida por ácido dinitrobenzenosulfónico (DNBS) en ratones, lo que resalta el potencial de esta bacteria y sus metabolitos en el manejo de la enfermedad de Crohn y otros trastornos inflamatorios intestinales [49].

Por otro lado, los prebióticos son componentes alimentarios típicamente no digeribles que estimulan selectivamente el crecimiento y la actividad de una pequeña cantidad de bacterias en el tracto digestivo [50]. Favorecen el crecimiento de bacterias beneficiosas en el tracto gastrointestinal, mejorando así el metabolismo del huésped. En pacientes con enfermedad de Crohn, la ingesta de oligofructosa e inulina ha incrementado la abundancia de *Bifidobacteria*, lo que sugiere un impacto positivo en el ambiente intestinal y sugiere que los prebióticos pueden ser efectivos para tratar enfermedades inflamatorias intestinales [51].

Asimismo, los simbiotes combinan prebióticos y probióticos, han demostrado ser más efectivos que los prebióticos o probióticos por separado, ya que mejoran la salud del huésped y alivian los síntomas de enfermedad inflamatoria intestinal. Un metanálisis mostró que la administración de simbióticos resulta en una mayor mejora en comparación con los otros grupos, destacando su potencial en la intervención de enfermedades autoinmunes [52].

Los productos naturales, como la evodiamina, han mostrado un gran potencial en la modulación del microbiota intestinal y la prevención de enfermedades inflamatorias. Es un alcaloide presente en *Evodia fructus*, ha demostrado propiedades antimicrobianas e inmunomoduladoras. En estudios preclínicos, el tratamiento con evodiamina redujo el crecimiento de bacterias patógenas y aumenta la abundancia de bacterias beneficiosas. Además, el uso de evodiamina en modelos murinos con colitis inducida químicamente resultó en una inhibición significativa de la inflamación, mejorando la integridad de la barrera intestinal mediante el aumento de la expresión de proteínas de unión estrecha, como ocludina y ZO-1. Asimismo, mostró eficacia en la reducción del tamaño tumoral en modelos de cáncer colorrectal [51].

Por otro lado, los polifenoles, presentes en diversas plantas y alimentos como las uvas y los arándanos, también desempeñan un papel crucial en la modulación del microbiota intestinal. Resveratrol, uno de los polifenoles más estudiados, ha mostrado efectos antiinflamatorios y antioxidantes, restableciendo el equilibrio microbiano en modelos murinos de daño intestinal. Su administración incrementa la producción de ácidos grasos de cadena corta (SCFA) y promueve la proliferación de células T reguladoras (Tregs), que contribuyen a la supresión de respuestas inflamatorias exacerbadas [48].

El trasplante de microbiota fecal (FMT) es un procedimiento terapéutico de trasplantar bacterias fecales de donantes sanos a pacientes, con la finalidad de restaurar la diversidad microbiana y disminuir la abundancia de géneros microbianos desfavorables, lo que conduce a un microbiota intestinal equilibrada y logra el tratamiento de enfermedades intestinales y extraintestinales [53]. El microbiota representa el 55% del material fecal trasplantado, mientras que los componentes solubles que incluyen moco, proteínas, grasa, ácidos biliares, SCFA, metabolitos de moléculas pequeñas y colonocitos representan el 24% [50].

La necesidad de hacer del FMT un procedimiento equitativo, accesible, generalizado y seguro ha llevado al desarrollo de bancos de heces y selección rigurosa de donantes. Además, se puede administrar por vías gastrointestinales superiores, cápsulas y por vías gastrointestinales inferiores. Se sabe que la colonoscopia y la administración de cápsulas son las vías más efectivas en el tratamiento de la *Clostridioides difficile* recurrente, con una tasa de curación de casi el 90% para las colonoscopias y del 85% para las cápsulas. El éxito clínico se incrementa con el uso de una cantidad adecuada de heces (> 50 g) o con un protocolo que emplea múltiples infusiones [48]. También, el precondicionamiento con antibióticos puede mejorar la eficacia clínica del FMT, al eliminar las cepas albergadas del receptor con el fin de que las bacterias recién trasplantadas sobrevivan con menos competencia por el espacio y los recursos [50].

El FMT ha demostrado ser eficaz en el tratamiento de la colitis ulcerosa y la enfermedad de Crohn, dos trastornos gastrointestinales asociados a la disbiosis intestinal. En pacientes con colitis ulcerosa activa, el FMT ha inducido remisión sin eventos adversos significativos. Para la enfermedad de Crohn, revisiones sistemáticas concluyeron que el FMT puede lograr tasas satisfactorias de remisión clínica sin riesgos de seguridad. Además, las alteraciones iniciales en el microbiota intestinal podrían predecir qué pacientes responderán al FMT en la enfermedad de Crohn [50]. Sin embargo, la flora intestinal no es estática, sino que está continuamente influenciada por varios factores epigenéticos y ambientales. Esta naturaleza dinámica del microbiota intestinal plantea desafíos para lograr la eficacia a largo plazo a través de FMT [53].

Las técnicas actuales para modular el microbiota intestinal enfrentan la limitación de no poder actuar con precisión sobre miembros específicos de comunidades microbianas complejas. Para superarlo se ha propuesto: introducir bacterias modificadas genéticamente de manera *ex vivo* o aprovechar el ecosistema microbiano intestinal mediante la modificación genética del microbioma directamente *in situ* utilizando bacteriófagos modificados [48].

El método *ex vivo* implica la modificación de bacterias fuera del organismo para que produzcan moléculas terapéuticas o biomarcadores. Con ello, las bacterias intestinales modificadas se pueden dividir en probióticos de fábrica de fármacos y bacterias intestinales de diagnóstico [54].

Los probióticos de fábrica de fármacos, ejemplo de ello es *Lactococcus lactis* modificado para secretar IL-10 o nanocuerpos anti-TNF han demostrado ser más efectivos que los fármacos administrados sistémicamente. Asimismo, las bacterias intestinales de diagnóstico son capaces de detectar biomarcadores específicos de enfermedades, como se ha visto con *E. coli* Nissle 1917 en la detección de metástasis hepática y colitis. Sin embargo, una de las principales dificultades en este campo es conseguir que estas bacterias modificadas se establezcan de manera permanente en el microbioma humano. Además, existe cierta inquietud sobre la posibilidad de que estas bacterias perturben el balance microbiano natural o se reproduzcan de manera descontrolada. Por consiguiente, es necesario desarrollar métodos de biocontención para garantizar su aplicación clínica sin riesgos [48].

Por otro lado, la terapia basada en fagos surge como un enfoque innovador para regular el microbioma intestinal y combatir diversas enfermedades, incluyendo las autoinmunes. Utiliza bacteriófagos para eliminar bacterias patógenas específicas, restaurando el equilibrio del

microbiota, lo que puede reducir la inflamación asociada. También, los cócteles de fagos, que combinan diferentes fagos para evitar resistencia, son efectivos en enfermedades crónicas y agudas, la combinación de fagos y antibióticos mejora la eficacia contra bacterias, mientras que los sistemas CRISPR/Cas9 pueden dirigirse a genes específicos de virulencia o resistencia [55]. Además, existe la posibilidad de modificar genéticamente los fagos para incrementar la generación de metabolitos beneficiosos, como los SCFA. No obstante, a pesar del potencial prometedor de esta terapia, se requieren más investigaciones clínicas para validar completamente su eficacia y seguridad [56].

Desafíos y perspectivas futuras

Los estudios actuales sobre el microbiota intestinal y su relación con las enfermedades autoinmunes enfrentan varios desafíos. Uno de los principales es la complejidad y variabilidad del microbioma humano, lo que dificulta identificar con precisión qué microorganismos están involucrados en la patogénesis de estas enfermedades. Además, el microbiota es altamente dinámica y está influenciada por factores ambientales, dieta, medicamentos y genética, lo que añade más variables a controlar en los estudios [57]. El trasplante de microbiota fecal, aunque prometedor, presenta dificultades en su estandarización y en la selección de donantes [58].

El desarrollo de nuevas técnicas para estudiar el microbiota intestinal ha abierto áreas de investigación emergentes. Una dirección prometedora es la ingeniería genética de bacterias para producir moléculas terapéuticas o identificar biomarcadores de enfermedades autoinmunes [58]. Además, el uso de bacteriófagos modificados para atacar bacterias patógenas específicas dentro del microbioma ofrece un enfoque novedoso para restaurar el equilibrio microbiano sin afectar las bacterias beneficiosas [59].

Las terapias basadas en la modulación del microbiota, como los probióticos y prebióticos simbióticos, ya han mostrado beneficios clínicos en la mejora de la salud intestinal y la reducción de la inflamación en pacientes con enfermedades autoinmunes. Por ejemplo, la administración de VSL#3 ha demostrado ser efectiva en el manejo de la enfermedad inflamatoria intestinal al aumentar la diversidad microbiana y modular la concentración de bacterias clave [49]. Asimismo, el trasplante de microbiota fecal ha inducido la remisión en pacientes con colitis ulcerosa y ha mejorado los síntomas en la enfermedad de Crohn, aunque su eficacia a largo plazo aún necesita más investigación [50].

Conclusión

La evidencia actual enfatiza firmemente el papel fundamental del microbiota intestinal en la patogénesis de enfermedades autoinmunes como la enfermedad de Crohn, la colitis ulcerosa y la artritis reumatoide. La disbiosis, entendida como un desequilibrio microbiano, altera la homeostasis inmune y contribuye directamente al desarrollo de estas patologías. En las enfermedades inflamatorias del intestino, la pérdida de bacterias beneficiosas y la proliferación de patógenos empeoran la inflamación y comprometen la barrera intestinal. De manera similar, en la artritis reumatoide, la reducción de metabolitos como el butirato afecta la regulación inmunitaria, promoviendo respuestas autoinmunes incontroladas.

Las terapias basadas en la modulación del microbiota, incluyendo probióticos, prebióticos, simbióticos y el trasplante de microbiota fecal, ofrecen enfoques prometedores para restablecer el equilibrio microbiano y mejorar la salud del paciente. Sin embargo, persisten desafíos significativos en cuanto a la estandarización y comprensión precisa de los mecanismos involucrados. A medida que la investigación avanza, será clave desarrollar estrategias de tratamiento más específicas y personalizadas. La modulación del microbiota no solo promete

soluciones terapéuticas innovadoras, sino que también puede abrir la puerta a enfoques preventivos más efectivos para las enfermedades autoinmunes. En definitiva, la modulación del microbiota no solo tiene el potencial de mejorar los tratamientos actuales, sino también de abrir nuevas oportunidades para la prevención y manejo integral de las enfermedades autoinmunes.

Referencias

- [1] M. T. Henke and J. Clardy, "Molecular messages in human microbiota," *Science*, vol. 366, no. 6471, pp. 1309–1310, 2019, doi: 10.1126/science.aaz4164.
- [2] J. Wilde, E. Slack, and K. R. Foster, "Host control of the microbiome: Mechanisms, evolution, and disease," *Science*, vol. 385, no. 6706, p. eadi3338, 2024, doi: 10.1126/science.adi3338.
- [3] M. Fuente, "La microbiota. Su función en la fisiología humana," in *Fisiología humana*, 5th ed., J. A. Fernández-Tresguerres, V. Cachofeiro, D. P. Cardinali, E. Delpón, E. Díaz-Rubio, E. Escriche, V. Juliá, F. Teruel, and M. Pardo, Eds. McGraw-Hill Education, 2020. [Online]. Available: <https://accessmedicina.proxyucr.elogim.com/content.aspx?bookid=2987§ionid=265255676>.
- [4] K. N. Thompson, K. S. Bonham, N. E. Ilott, G. J. Britton, P. Colmenero, S. J. Bullers, L. J. McIver, S. Ma, L. H. Nguyen, A. Filer, I. Brough, C. Pearson, C. Moussa, V. Kumar, L. H. Lam, M. A. Jackson, A. Pawluk, S. Kiriakidis, P. C. Taylor, and C. Huttenhower, "Alterations in the gut microbiome implicate key taxa and metabolic pathways across inflammatory arthritis phenotypes," 2023. [Online]. Available: <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10175013>
- [5] J. A. Maisel, "Trastornos que se presentan inicialmente con diarreas," in *Manual de Urgencias Médicas de Tintinalli*, 8th ed., R. K. Cydulka, M. T. Fitch, S. A. Joing, V. J. Wang, D. M. Cline, and O. Ma, Eds. McGraw-Hill Education, 2018. [Online]. Available: <https://accessmedicina.proxyucr.elogim.com/content.aspx?bookid=2441§ionid=199581857>.
- [6] A. Kaser and R. S. Blumberg, "The road to Crohn's disease," *Science*, vol. 357, no. 6355, pp. 976–977, 2017, doi: 10.1126/science.aao4158.
- [7] K. G. Greene and D. G. Trembath, "Pathology of the gastrointestinal tract," in *Pathology: A Modern Case Study*, 2nd ed., H. M. Reisner, Ed. McGraw-Hill Education, 2020. [Online]. Available: <https://accessmedicine.proxyucr.elogim.com/content.aspx?bookid=2748§ionid=230841869>.
- [8] R. Luo, J. Liu, Q. Cheng, M. Shionoya, C. Gao, and R. Wang, "Oral microsphere formulation of M2 macrophage-mimetic Janus nanomotor for targeted therapy of ulcerative colitis," *Science Advances*, vol. 10, no. 26, p. eado6798, 2024, doi: 10.1126/sciadv.ado6798.
- [9] A. T. Mayer, D. R. Holman, A. Sood, U. Tandon, S. S. Bhate, S. Bodapati, G. L. Barlow, J. Chang, S. Black, E. C. Crenshaw, A. N. Koron, S. E. Streett, S. S. Gambhir, W. J. Sandborn, B. S. Boland, T. Hastie, R. Tibshirani, J. T. Chang, G. P. Nolan, and S. Rogalla, "A tissue atlas of ulcerative colitis revealing evidence of sex-dependent differences in disease-driving inflammatory cell types and resistance to TNF inhibitor therapy," *Science Advances*, vol. 9, no. 3, p. eadd1166, 2023, doi: 10.1126/sciadv.add1166.
- [10] J. He, Y. Chu, J. Li, Q. Meng, Y. Liu, J. Jin, Y. Wang, J. Wang, B. Huang, L. Shi, X. Shi, J. Tian, Y. Zhufeng, R. Feng, W. Xiao, Y. Gan, J. Guo, C. Shao, Y. Su, and Z. Li, "Intestinal butyrate-metabolizing species contribute to autoantibody production and bone erosion in rheumatoid arthritis," *Science Advances*, vol. 8, no. 6, p. eabm1511, 2022, doi: 10.1126/sciadv.abm1511.
- [11] J. Jameson, A. S. Fauci, D. L. Kasper, S. L. Hauser, D. L. Longo, and J. Loscalzo, Eds., "Artritis reumatoide (RA, rheumatoid arthritis)," in *Harrison. Manual de Medicina*, 20th ed. McGraw-Hill Education, 2020. [Online]. Available: <https://accessmedicina.proxyucr.elogim.com/content.aspx?bookid=2943§ionid=252750892>.
- [12] J. R. Marchesi, D. H. Adams, F. Fava, G. D. A. Hermes, G. M. Hirschfield, G. Hold, M. N. Quraishi, J. Kinross, H. Smidt, K. M. Tuohy, L. V. Thomas, E. G. Zoetendal, and A. Hart, "The gut microbiota and host health: A new clinical frontier," *Gut*, vol. 65, no. 2, pp. 330–339, 2016, doi: 10.1136/gutjnl-2015-309990.
- [13] R. E. Ley, D. A. Peterson, and J. I. Gordon, "Ecological and evolutionary forces shaping microbial diversity in the human intestine," *Cell*, vol. 124, no. 4, pp. 837–848, 2006, doi: 10.1016/j.cell.2006.02.017.
- [14] J. Álvarez, J. M. Fernández Real, F. Guarnere, M. Gueimonde, J. M. Rodríguez, M. Saenz de Pipaon, and Y. Sanz, "Microbiota intestinal y salud," *Gastroenterología y Hepatología*, vol. 44, no. 7, pp. 519–535, 2021, doi: 10.1016/j.gastrohep.2021.01.009.
- [15] A. Koh, F. De Vadder, P. Kovatcheva-Datchary, and F. Bäckhed, "From dietary fiber to host physiology: Short-chain fatty acids as key bacterial metabolites," *Cell*, vol. 165, no. 6, pp. 1332–1345, 2016, doi: 10.1016/j.cell.2016.05.041.

- [16] P. Louis and H. J. Flint, "Formation of propionate and butyrate by the human colonic microbiota," *Environmental Microbiology*, vol. 19, no. 1, pp. 29-41, 2017, doi: 10.1111/1462-2920.13589.
- [17] I. Rowland, G. Gibson, A. Heinken, K. Scott, J. Swann, I. Thiele, and K. Tuohy, "Gut microbiota functions: Metabolism of nutrients and other food components," *European Journal of Nutrition*, vol. 57, no. 1, pp. 1-24, 2018, doi: 10.1007/s00394-017-1445-8.
- [18] W. H. Tang and S. L. Hazen, "The contributory role of gut microbiota in cardiovascular disease," *Journal of Clinical Investigation*, vol. 124, no. 10, pp. 4204-4211, 2014, doi: 10.1172/JCI72331.
- [19] S. A. Smits, J. Leach, E. D. Sonnenburg, C. G. González, J. S. Lichtman, G. Reid, and J. L. Sonnenburg, "Seasonal cycling in the gut microbiome of the Hadza hunter-gatherers of Tanzania," *Science*, vol. 357, no. 6353, pp. 802-806, 2017, doi: 10.1126/science.aan4834.
- [20] N. Arpaia, C. Campbell, X. Fan, S. Dikiy, J. Van der Veeken, P. de Ross, H. Liu, J. Cross, K. Pfeffer, P. Coffey, and A. Rudensky, "Metabolites produced by commensal bacteria promote peripheral T cell tolerance," *Nature*, vol. 504, no. 7480, pp. 446-450, 2013, doi: 10.1038/nature12726.
- [21] J. L. Round and S. K. Mazmanian, "The gut microbiota shapes intestinal immune responses during health and disease," *Nature Reviews Immunology*, vol. 9, no. 5, pp. 313-323, 2009, doi: 10.1038/nri2515.
- [22] Y. Sanz, M. Olivares, A. Moya-Pérez, and C. Agostoni, "Understanding the role of gut microbiome in metabolic disease risk," *Pediatric Research*, vol. 83, no. 1, pp. 300-310, 2018, doi: 10.1038/pr.2017.252.
- [23] N. Cerf-Bensussan and V. Gaboriau-Routhiau, "The immune system and the gut microbiota: Friends or foes?" *Nature Reviews Immunology*, vol. 10, no. 10, pp. 735-744, 2010, doi: 10.1038/nri2850.
- [24] L. V. Hooper, D. R. Littman, and A. J. Macpherson, "Interactions between the microbiota and the immune system," *Science*, vol. 336, no. 6086, pp. 1268-1273, 2012, doi: 10.1126/science.1223490.
- [25] M. Schirmer, S. P. Smeeckens, H. Vlamakis, M. Jaeger, M. Oosting, E. A. Franzosa, and R. J. Xavier, "Linking the human gut microbiome to inflammatory cytokine production capacity," *Cell*, vol. 167, no. 4, pp. 1125-1136, 2016, doi: 10.1016/j.cell.2016.10.020.
- [26] A. D. Kostic, M. R. Howitt, and W. S. Garrett, "Exploring host-microbiota interactions in animal models and humans," *Genes & Development*, vol. 27, no. 7, pp. 701-718, 2013, doi: 10.1101/gad.212522.112.
- [27] C. M. Theriot, M. J. Koenigsknecht, P. E. Carlson, G. E. Hatton, A. M. Nelson, B. Li, et al., "Antibiotic-induced shifts in the mouse gut microbiome and metabolome increase susceptibility to *Clostridium difficile* infection," *Nature Communications*, vol. 5, p. 3114, 2014, doi: 10.1038/ncomms4114.
- [28] A. C. Shaw, D. R. Goldstein, and R. R. Montgomery, "Aging and the immune system: The impact of age on immune responses," *Nature Reviews Immunology*, vol. 18, no. 10, pp. 649-661, 2018. doi: 10.1038/s41577-018-0041-y.
- [29] S. L. Klein, K. L. Flanagan, and K. Davis, "Sex differences in immune responses," *Nature Reviews Immunology*, vol. 18, no. 9, pp. 537-549, 2018. doi: 10.1038/s41577-018-0021-1.
- [30] M. G. Dominguez-Bello, E. K. Costello, M. Contreras, M. Magris, G. Hidalgo, N. Fierer, and R. Knight, "Delivery mode shapes the acquisition and structure of the initial microbiota across multiple body habitats in newborns," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 107, no. 26, pp. 11971-11975, 2011. doi: 10.1073/pnas.1002601107.
- [31] J. M. Cohen, B. Boursi, and R. Mamtani, "The role of the microbiota in modulating the immune response," *Nature Reviews Immunology*, vol. 18, no. 9, pp. 549-560, 2018. doi: 10.1038/s41577-018-0032-y.
- [32] J. C. Clemente, L. K. Ursell, L. W. Parfrey, and R. Knight, "The impact of the gut microbiota on human health: An integrative view," *Cell*, vol. 148, no. 6, pp. 1258-1270, 2012. doi: 10.1016/j.cell.2012.01.035.
- [33] A. M. Mowat, "100 years of immunology: the gut and its microbiota," *Nature Reviews Immunology*, vol. 18, no. 2, p. 102, 2018. doi: 10.1038/nri.2017.108.
- [34] T. Kawai and S. Akira, "The role of pattern-recognition receptors in innate immunity: update on Toll-like receptors," *Nature Immunology*, vol. 11, no. 5, pp. 373-384, 2010. doi: 10.1038/ni0509-373.
- [35] J. H. Fritz, R. L. Ferrero, D. J. Philpott, and S. E. Girardin, "Nod-like receptors in the immune system," *Nature Reviews Immunology*, vol. 11, no. 10, pp. 689-702, 2011. doi: 10.1038/nri3061.
- [36] Mora, J. R., Iwata, M., Eksteen, B., Song, S.-Y., Junt, T., Senman, B., Otipoby, K. L., Yokota, A., Takeuchi, H., Ricciardi-Castagnoli, P., Rajewsky, K., Adams, D. H., and von Andrian, U. H., "Generation of gut-homing IgA-secreting B cells by intestinal dendritic cells," *Nature*, vol. 455, no. 7211, pp. 528-532, 2008. doi: 10.1038/nature07255.

- [37] A. Chiba, Y. Marusawa, M. Yamada, S. Seno, Y. Watanabe, K. Kobayashi, "Role of Th17 cells and IL-17 in the pathogenesis of inflammatory bowel disease," *Frontiers in Immunology*, vol. 13, Art. no. 1055914, 2022. doi: 10.3389/fimmu.2022.1055914
- [38] M. F. Tumani, C. Pavez, and A. Parada, "Microbiota, hábitos alimentarios y dieta en enfermedad inflamatoria intestinal," *Revista chilena de nutrición*, vol. 47, no. 5, pp. 822-829, 2020. doi: 10.4067/s0717-75182020000500822.
- [39] M. E. Icaza-Chávez, "Microbiota intestinal en la salud y la enfermedad," *Revista de Gastroenterología de México*, vol. 78, no. 4, pp. 240-248, 2013. doi: 10.1016/j.rgmx.2013.04.004.
- [40] G. Pizarro, R. Quera, and C. Figueroa, "Factores pronósticos en colitis ulcerosa de reciente diagnóstico," *Revista médica de Chile*, vol. 145, no. 10, pp. 1319-1329, 2017. doi: 10.4067/S0034-98872017001001319.
- [41] B. E. Sands, "Inflammation in ulcerative colitis," *Gastroenterology Clinics of North America*, vol. 49, no. 4, pp. 647-664, 2020. doi: 10.1016/j.gtc.2020.09.002.
- [42] G. Rogler, "Chronic intestinal inflammation: cytokines, reactive oxygen species, and the effects of antioxidant therapy," *Digestive Diseases*, vol. 29, no. 4, pp. 379-384, 2011. doi: 10.1159/000331517.
- [43] C. Abraham and J. H. Cho, "Inflammatory bowel disease," *New England Journal of Medicine*, vol. 361, no. 21, pp. 2066-2078, 2009. doi: 10.1056/NEJMra0804647.
- [44] W. W. Piette, "Rheumatoid arthritis, juvenile idiopathic arthritis, adult-onset still disease, and rheumatic fever," in *Fitzpatrick's Dermatology*, S. Kang, M. Amagai, A. L. Bruckner, A. H. Enk, D. J. Margolis, A. J. McMichael, and J. S. Orringer, Eds., 9th ed., McGraw-Hill Education, 2019. [Online]. Available: <https://accessmedicine.proxyucr.elogim.com/content.aspxbookid=2570§ionid=210426944>.
- [45] S. Crittenden, M. Goepf, J. Pollock, C. T. Robb, D. J. Smyth, Y. Zhou, R. Andrews, V. Tyrrell, K. Gkikas, and A. Adima, "Prostaglandin E2 promotes intestinal inflammation via inhibiting microbiota-dependent regulatory T cells," *Science Advances*, vol. 7, no. 7, eabd7954, 2021.
- [46] A. Alunno, F. Carubbi, R. Giacomelli, and R. Gerli, "Cytokines in the pathogenesis of rheumatoid arthritis: new players and therapeutic targets," *BMC Rheumatology*, vol. 1, no. 1, p. 3, 2017. doi: 10.1186/s41927-017-0001-8.
- [47] M. Chang, Y. Tsai, E. J. Liou, C. Tang, T. Wang, H. Liu, M. Liao, S. Yeung, C. Chan, and J. Jeng, "Effect of Butyrate on Collagen Expression, Cell Viability, Cell Cycle Progression and Related Proteins Expression of MG-63 Osteoblastic Cells," *PLOS One*, vol. 11, no. 11, e0165438, 2016. doi: 10.1371/journal.pone.0165438.
- [48] C. Ariola, A. Severino, S. Porcari, W. Fusco, B. H. Mullish, A. Gasbarrini, G. Cammarota, F. R. Ponziani, and G. Ianaro, "Modulación futura de la microbiota intestinal: de los eubióticos al FMT, las bacterias diseñadas y la terapia con fagos," *Antibióticos*, vol. 12, no. 5, p. 868, 2023.
- [49] Y. Haneishi, Y. Furuya, M. Hasegawa, A. Picarelli, M. Rossi, and J. Miyamoto, "Enfermedades inflamatorias del intestino y microbiota intestinal," *Revista Internacional de Ciencias Moleculares*, vol. 24, no. 4, pp. 4-5, 2023.
- [50] E. Zikou, C. Koliaki, and K. Makrilakis, "El papel del trasplante de microbiota fecal (FMT) en el tratamiento de enfermedades metabólicas en humanos: una revisión narrativa," *Biomedicine*, vol. 12, no. 8, p. 1871, 2024.
- [51] D. Zheng, T. Liwinski, and E. Elinav, "Interaction between microbiota and immunity in health and disease," *Cell Research*, vol. 30, no. 6, pp. 492-506, 2020.
- [52] K. R. Pandey, S. R. Naik, and B. V. Vakil, "Probióticos, prebióticos y simbióticos: una revisión," *Journal of Food Science and Technology*, vol. 52, no. 12, pp. 7577-7587, 2015.
- [53] L. Zeng, Y. Deng, K. Yang, J. Chen, Q. He, and H. Chen, "Safety and efficacy of fecal microbiota transplantation for autoimmune diseases and autoinflammatory diseases: A systematic review and meta-analysis," *Frontiers in Immunology*, vol. 13, p. 944387, 2022. doi: 10.3389/fimmu.2022.944387.
- [54] B. Hsu, T. E. Gibson, V. Yeliseyev, Q. Liu, L. Bry, P. A. Silver, and G. K. Gerber, "Precision microbiota engineering to restore barrier function in an inflamed gut," *Science*, vol. 365, no. 6457, 2019.
- [55] A. Paule, D. Frezza, and M. Edeas, "Microbiota y terapia con fagos: Desafíos futuros en medicina," *Medical Sciences*, vol. 6, no. 4, p. 86, 2018.
- [56] S. Federici, S. Kreda, F. Valdés, D. Kviatkovsky, E. Weinstock, Y. Matiuhin, Y. Silberberg, K. Atarashi, M. Furuchi, A. Oka, B. Liu, M. Fibelman, I. Nadav, E. Khabra, N. Cullin, N. Ben, D. Ibar, H. Ben, J. Niceborm, N. Kowalsman, & E. Elinav, "Targeted suppression of human IBD-associated gut microbiota commensals by phage consortia for treatment of intestinal inflammation," *Cell*, vol. 185, no. 16, pp. 2879-2898, 2022.
- [57] Y. Zhang and Y. Peng, "Autoimmune diseases and gut microbiota: a bibliometric and visual analysis from 2004 to 2022," *Clinical and Experimental Medicine*, vol. 23, no. 6, 2023. doi: 10.1007/s10238-023-01028-x. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10238-023-01028-x>.

- [58] L. Haddad, J. Mendoza, and C. Jobin, "Bacteriophage-mediated manipulations of microbiota in gastrointestinal diseases," *Frontiers in Microbiology*, vol. 13, Nov. 2022. doi: 10.3389/fmicb.2022.1055427.
- [59] J. Fujiki and B. Schnabl, "Phage therapy: Targeting intestinal bacterial microbiota for the treatment of liver diseases," *JHEP Reports*, vol. 5, no. 12, pp. 100909, Sep. 2023. doi: 10.1016/j.jhepr.2023.100909.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Tacaco (*Sechium tacaco*): relaciones entre características morfológicas del fruto

Tacaco (*Sechium tacaco*): relations among morphological characteristics of the fruit

José Eladio Monge-Pérez¹, Michelle Loría-Coto²


Fecha de recepción: 16 de octubre, 2024

Fecha de aprobación: 27 de enero, 2025

Monge-Pérez, J.E; Loría-Coto, M. Tacaco (*Sechium tacaco*): relaciones entre características morfológicas del fruto. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 3. Julio-Setiembre, 2025. Pág. 120-136.


 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i3.7559>

1 Finca Experimental Interdisciplinaria de Modelos Agroecológicos, Universidad de Costa Rica, Turrialba, Costa Rica.

 jose.mongeperez@ucr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0002-5384-507X>.

2 Escuela de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Estatal a Distancia, Sabánilla, Costa Rica.

 michelle_loria@yahoo.com

 <https://orcid.org/0000-0003-0456-2230>

Palabras clave

Cucurbitaceae; Costa Rica; correlación de Spearman; fruto; espinas.

Resumen

Se cuantificó la relación entre características morfológicas del fruto de tacaco. Se colectaron frutos de 22 accesiones de tacaco, y se evaluaron las siguientes características: peso (g), longitud (mm), ancho (mm), grosor (mm), número de suturas longitudinales completas, número de suturas longitudinales incompletas, número total de suturas longitudinales, número de espinas, relación longitud:ancho, relación longitud:grosor, y relación ancho:grosor. Se calculó la correlación de Spearman para la relación entre todas las variables, y también para la relación entre la altitud del sitio de recolección y las demás variables. Se compararon las accesiones de tacaco con y sin espinas, mediante la prueba de Kruskal Wallis. Se hallaron 10 correlaciones entre variables que fueron altas ($r \geq 0,63$) y significativas ($p \leq 0,05$). Se obtuvo una correlación positiva moderada entre la altitud del sitio de recolección y: peso ($r = 0,40^{**}$), longitud ($r = 0,26^{**}$), ancho ($r = 0,32^{**}$) y grosor del fruto ($r = 0,38^{**}$). Se encontraron diferencias significativas en 10 variables entre las accesiones de tacaco con y sin espinas. Se concluye que, en comparación con los frutos sin espinas, los frutos espinosos mostraron valores significativamente menores en peso, longitud, ancho, grosor, relación longitud:ancho y relación longitud:grosor, y valores mayores en el número de suturas longitudinales incompletas, número total de suturas longitudinales, número de espinas, y relación ancho:grosor. Este trabajo constituye el primer informe sobre el estudio de las relaciones entre características morfológicas de los frutos de tacaco.

Keywords

Cucurbitaceae; Costa Rica; Spearman correlation; fruit; spines.

Abstract

The relationship between morphological characteristics of the tacaco fruit was quantified. Fruits from 22 tacaco accessions were collected, and the following characteristics were evaluated: weight (g), length (mm), width (mm), thickness (mm), number of complete longitudinal sutures, number of incomplete longitudinal sutures, total number of longitudinal sutures, number of spines, length:width ratio, length:thickness ratio, and width:thickness ratio. Spearman's correlation was calculated for the relationship between all variables, and also for the relationship between the altitude of the collection site and the other variables. Spineless and spiny tacaco accessions were compared using the Kruskal Wallis test. Ten correlations were found between variables that were high ($r \geq 0,63$) and significant ($p \leq 0,05$). A moderate positive correlation was found between altitude of the collection site and: weight ($r = 0,40^{**}$), length ($r = 0,26^{**}$), width ($r = 0,32^{**}$) and thickness ($r = 0,38^{**}$) of the fruit. Significant differences were found in 10 variables between spineless and spiny tacaco accessions. It is concluded that, compared to spineless fruits, the spiny fruits showed significantly lower values in weight, length, width, thickness, length:width ratio and length:thickness ratio, and higher values in the number of incomplete longitudinal sutures, total number of longitudinal sutures, number of spines, and width:thickness ratio. This work constitutes the first report on the study of the relationships between morphological characteristics of tacaco fruits.

Introducción

El tacaco, *Sechium tacaco* (Pittier) C. Jeffrey, es una planta endémica de Costa Rica que pertenece a la familia Cucurbitaceae, y sus frutos son consumidos como hortaliza o postre [1] [2].

Entre las principales características morfológicas de los frutos se encuentran: peso, longitud, ancho, grosor, número de suturas longitudinales completas, número de suturas longitudinales incompletas, número total de suturas longitudinales, número de espinas, relación longitud:ancho, relación longitud:grosor, y relación ancho:grosor [2] [3] [4] [5].

En otras investigaciones se han estudiado las relaciones entre diversas características morfológicas de los frutos de varias especies, como pepino [6] [7] [8], tomate [9] [10] [11], melón [12] [13], berenjena [14] [15] [16], pimiento [17] [18] [19], uchuva (*Physalis peruviana*) [20], manzana [21], fresa [22], okra [23], ayote (*Cucurbita moschata*) [24], así como en la cucurbitácea *Benincasa hispida* [25], y la especie *Caesalpinia ebano* [26].

El análisis de correlación mide el grado de asociación entre rasgos cuantitativos [8]. Cuando los datos de una variable no se ajustan a una distribución normal, entonces se requiere del uso de la estadística no paramétrica; en este caso, para el estudio de las relaciones entre variables se utiliza la correlación de Spearman [27] [28].

El objetivo del trabajo fue cuantificar la relación entre características morfológicas del fruto de 22 accesiones de tacaco.

Materiales y métodos

Se realizaron colectas de frutos de 22 accesiones de tacaco (*Sechium tacaco*), desde junio de 2013 hasta setiembre de 2019, provenientes de seis de las siete provincias de Costa Rica (cuadro 1). Se colectaron entre 6 y 90 frutos sazones por accesión, según la disponibilidad al momento de la colecta, para un total de 1099 frutos evaluados. Se registró la altitud y las coordenadas geográficas de cada sitio de colecta, mediante un medidor modelo GPS-MAP 78S, marca Garmin.

Se evaluaron las siguientes características en los frutos: PF: peso (g); LF: longitud (mm); AF: ancho (mm); GF: grosor (mm); NSLC: número de suturas longitudinales completas; NSLI: número de suturas longitudinales incompletas; NTSL: número total de suturas longitudinales; y NE: número de espinas. Además, se calcularon las relaciones entre longitud y ancho del fruto (L/A), longitud y grosor del fruto (L/G), y ancho y grosor del fruto (A/G). Se utilizó la metodología de evaluación descrita en un trabajo anterior [2].

Para todas las variables, se aplicó la prueba de Shapiro-Wilks modificado, la cual confirmó que los datos de todas las variables no se ajustaron a una distribución normal. Por lo tanto, para el análisis de la relación entre las variables, se calculó el coeficiente de correlación de Spearman, y para aquellas combinaciones de variables en que se encontró una alta correlación ($r \geq 0,63$) y significancia estadística ($p \leq 0,05$), se obtuvo el diagrama de dispersión de los datos. Las correlaciones se obtuvieron tanto entre el total de las 22 accesiones, como según el tipo de fruto (con o sin espinas). También se obtuvo la correlación de Spearman entre cada variable y la altitud del sitio de colecta. Asimismo, se realizó el análisis de varianza no paramétrica para la comparación entre los tacacos con y sin espinas, mediante la prueba de Kruskal Wallis ($p \leq 0,05$), para cada variable. Para todos los análisis de datos se utilizó el paquete estadístico InfoStat [27].

Cuadro 1. Accesiones de tacaco (*Sechium tacaco*) colectadas.

Accesión	Lugar de recolección	Coordenadas geográficas		Altitud (msnm)	Presencia de espinas en el fruto
		Latitud Norte	Longitud Oeste		
1	Escazú, San José	9° 54' 55,545"	84° 8' 3,581"	1147	Sí
2	El Yas de Paraíso, Cartago	9° 51' 41,433"	83° 49' 12,375"	1261	Sí
3	La Flor de Paraíso, Cartago	9° 52' 13,048"	83° 48' 28,142"	1264	No
4	La Flor, Paraíso, Cartago	9° 52' 20,127"	83° 48' 54,333"	1387	No
5	El Yas, Paraíso, Cartago	9° 51' 31,143"	83° 49' 5,127"	1213	Sí
7	San Isidro de Alajuela	10° 4' 49,061"	84° 11' 43,073"	1363	No
9	El Dos de Tilarán, Guanacaste	10° 22' 41,174"	84° 53' 57,627"	939	Sí
11	Pilas Arriba, Alajuela, Alajuela	10° 3' 55,614"	84° 11' 43,205"	1248	No
12	San Isidro, Alajuela, Alajuela	10° 4' 0,205"	84° 11' 40,022"	1288	Sí
13	Tapezco, Zarcero, Alajuela	10° 13' 18,231"	84° 24' 19,202"	1786	No
14	San Juan, Naranjo, Alajuela	10° 7' 22,217"	84° 24' 8,701"	1254	No
15	Zarcero, Alajuela	10° 10' 33,549"	84° 24' 4,734"	1619	Sí
16	Aguas Claras, Coto Brus, Puntarenas	8° 51' 9,326"	82° 57' 54,122"	909	Sí
17	Copalito, Coto Brus, Puntarenas	8° 46' 9,612"	82° 57' 1,888"	1111	Sí
18	Copal, Coto Brus, Puntarenas	8° 46' 41,033"	82° 56' 54,569"	1156	Sí
19	Piedades Norte, San Ramón, Alajuela	10° 8' 5,271"	84° 30' 51,834"	1081	Sí
20	Piedades Norte, San Ramón, Alajuela	10° 8' 5,271"	84° 30' 51,834"	1081	Sí
21	San Jerónimo, Naranjo, Alajuela	10° 6' 13,320"	84° 21' 29,455"	1006	Sí
22	Barrio Jesús, Santa Bárbara, Heredia	10° 3' 20,022"	84° 9' 4,286"	1293	Sí
23	Las Trojas, Sarchí, Alajuela	10° 7' 52,576"	84° 19' 22,461"	1397	No
24	Naranjo de Platanares, Pérez Zeledón, San José	9° 12' 22,496"	83° 37' 50,109"	718	Sí
25	Barrio Jesús, Atenas, Alajuela	9° 58' 10,938"	84° 26' 4,352"	987	Sí

Resultados y discusión

En el cuadro 2 se muestran los estimadores estadísticos de las variables evaluadas en este ensayo. La mayor variabilidad de los datos se halló en el número de suturas longitudinales incompletas y en el número de espinas del fruto, mientras que la menor variación se encontró en la relación ancho: grosor, la relación longitud: ancho, y en el grosor del fruto.

Cuadro 2. Estimadores estadísticos de características morfológicas de frutos de tacaco.

Variable	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Valor mínimo	Valor máximo	Mediana
PF	34,79	6,66	19,14	14,60	58,50	35,20
LF	58,58	5,66	9,66	40,60	77,20	58,30
AF	40,43	2,91	7,20	29,40	47,90	40,80
GF	29,20	1,89	6,46	21,10	35,80	29,20
NSLC	5,34	0,57	10,64	4,00	8,00	5,00
NSLI	1,16	1,08	93,66	0	5,00	1,00
NTSL	6,50	1,07	16,44	5,00	10,00	6,00
NE	11,54	10,22	88,53	0	40,00	14,00
L/A	1,45	0,09	6,40	1,24	1,87	1,43
L/G	2,01	0,17	8,64	1,58	2,74	1,99
A/G	1,39	0,07	5,16	1,12	1,65	1,39

Nota: PF: peso del fruto (g); LF: longitud del fruto (mm); AF: ancho del fruto (mm); GF: grosor del fruto (mm); NSLC: número de suturas longitudinales completas del fruto; NSLI: número de suturas longitudinales incompletas del fruto; NTSL: número total de suturas longitudinales del fruto; NE: número de espinas del fruto; L/A: relación longitud: ancho del fruto; L/G: relación longitud: grosor del fruto; A/G: relación ancho: grosor del fruto.

Con respecto a la correlación entre la altitud del sitio de recolección y las diversas características morfológicas del fruto de tacaco, el valor más alto se encontró con el peso del fruto ($r=0,40^{**}$) (cuadro 3); sin embargo, ninguna correlación se consideró como alta.

Cuadro 3. Coeficientes de correlación de Spearman (r) entre la altitud del sitio de recolección y características morfológicas de frutos de tacaco.

Variable	Altitud (msnm)
PF	0,40 ^{**}
LF	0,26 ^{**}
AF	0,32 ^{**}
GF	0,38 ^{**}
NSLC	0,16 ^{**}
NSLI	-0,06 [*]
NTSL	-0,09 ^{**}
NE	-0,31 ^{**}
L/A	0,07 [*]
L/G	0,07 [*]
A/G	0,01 ^{ns}

Nota: PF: peso del fruto (g); LF: longitud del fruto (mm); AF: ancho del fruto (mm); GF: grosor del fruto (mm); NSLC: número de suturas longitudinales completas del fruto; NSLI: número de suturas longitudinales incompletas del fruto; NTSL: número total de suturas longitudinales del fruto; NE: número de espinas del fruto; L/A: relación longitud: ancho del fruto; L/G: relación longitud: grosor del fruto; A/G: relación ancho: grosor del fruto; altitud: altitud sobre el nivel del mar (msnm); ns: no significativa; *: significativa ($p \leq 0,05$); **: altamente significativa ($p \leq 0,01$).

Las correlaciones positivas moderadas halladas para el peso, longitud, ancho y grosor del fruto sugieren que los valores de dichas variables tienden a aumentar conforme aumenta la altitud del sitio de recolección, al menos para las 22 accesiones de tacaco evaluadas. Esto podría deberse a las diferentes condiciones ambientales en cada sitio de recolección, en especial la temperatura, que es menor conforme aumenta la altitud; sin embargo, no hay datos en la literatura sobre el efecto de las variables ambientales en las características morfológicas del fruto de tacaco. Por otra parte, en el cultivo de chayote (*Sechium edule*), que comparte el mismo género que el tacaco, se encontró un resultado contrario al hallado en la presente investigación, pues se halló una correlación negativa entre la altitud y las características de peso, longitud, ancho y grosor del fruto; es decir, a mayor altitud, menores valores para dichas variables [29].

Con respecto a la comparación entre las accesiones de tacaco con espinas y sin espinas en el fruto, se hallaron diferencias significativas para 10 de las características evaluadas; únicamente no se encontró diferencias para el número de suturas longitudinales completas (cuadro 4). En general, en comparación con los frutos sin espinas, los frutos espinosos mostraron valores significativamente menores en peso, longitud, ancho, grosor, relación longitud:ancho y relación longitud:grosor, y valores significativamente mayores en el número de suturas longitudinales incompletas, número total de suturas longitudinales, número de espinas, y relación ancho:grosor.

Cuadro 4. Comparación estadística entre accesiones de tacaco con y sin espinas.

Variable	Accesiones	
	Con espinas	Sin espinas
PF	33,30 a	37,68 b
LF	56,80 a	62,03 b
AF	40,07 a	41,11 b
GF	28,87 a	29,84 b
NSLC	5,31 a	5,40 a
NSLI	1,28 b	0,92 a
NTSL	6,58 b	6,33 a
NE	17,44 b	0,08 a
L/A	1,42 a	1,51 b
L/G	1,97 a	2,08 b
A/G	1,39 b	1,38 a

Nota: PF: peso del fruto (g); LF: longitud del fruto (mm); AF: ancho del fruto (mm); GF: grosor del fruto (mm); NSLC: número de suturas longitudinales completas del fruto; NSLI: número de suturas longitudinales incompletas del fruto; NTSL: número total de suturas longitudinales del fruto; NE: número de espinas del fruto; L/A: relación longitud:ancho del fruto; L/G: relación longitud:grosor del fruto; A/G: relación ancho:grosor del fruto; medias que comparten una misma letra no muestran diferencias significativas, según prueba Kruskal Wallis ($p \leq 0,05$).

En el cuadro 5 se muestran los coeficientes de correlación de Spearman entre todas las variables evaluadas. Se hallaron 10 correlaciones entre variables que fueron altas ($r \geq 0,63$) y significativas ($p \leq 0,05$).

Cuadro 5. Coeficientes de correlación de Spearman (r) entre características morfológicas de frutos de tacaco.

	LF	AF	GF	NSLC	NSLI	NTSL	NE	L/A	L/G	A/G
PF	0,79**	0,92**	0,79**	0,20**	0,02 ^{ns}	0,04 ^{ns}	-0,22**	0,14**	0,28**	0,26**
LF		0,66**	0,46**	0,17**	-0,05 ^{ns}	-0,05 ^{ns}	-0,30**	0,63**	0,72**	0,37**
AF			0,71**	0,16**	0,08**	0,07*	-0,09**	-0,09**	0,22**	0,45**
GF				0,24**	0,04 ^{ns}	0,10**	-0,20**	-0,07*	-0,19**	-0,22**
NSLC					-0,01 ^{ns}	0,40**	0,14**	0,17**	0,08**	0,05 ^{ns}
NSLI						0,85**	0,16**	-0,09**	-0,03 ^{ns}	0,08**
NTSL							0,10**	-0,09**	-0,11**	-0,03 ^{ns}
NE								-0,32**	-0,18**	0,12**
L/A									0,76**	0,04 ^{ns}
L/G										0,63**

Nota: PF: peso del fruto (g); LF: longitud del fruto (mm); AF: ancho del fruto (mm); GF: grosor del fruto (mm); NSLC: número de suturas longitudinales completas del fruto; NSLI: número de suturas longitudinales incompletas del fruto; NTSL: número total de suturas longitudinales del fruto; NE: número de espinas del fruto; L/A: relación longitud:ancho del fruto; L/G: relación longitud:grosor del fruto; A/G: relación ancho:grosor del fruto; ns: no significativa; *: significativa ($p \leq 0,05$); **: altamente significativa ($p \leq 0,01$).

A continuación, se detallan los coeficientes de correlación en general, y según la presencia o ausencia de espinas, así como el diagrama de dispersión de los datos, para esas correlaciones.

Con respecto a la relación entre longitud y peso del fruto (cuadro 6 y figura 1), la correlación fue alta, positiva y altamente significativa, tanto para el total de accesiones, como para los frutos con y sin espinas. Esta relación es lógica, pues un fruto más largo generalmente tiene mayor peso. Para esta relación, al igual que en el presente estudio, también se encontró una correlación alta y positiva en pepino ($r=0,68-0,99^{**}$) [6] [7] [8], berenjena ($r=0,98^{**}$) [15], tomate ($r=0,64-0,69^{**}$) [9] [10], melón ($r=0,76^{**}$) [12], *Caesalpinia ebano* ($r=0,98^{**}$) [26], *Benincasa hispida* ($r=0,86^{**}$) [25], y ayote (*Cucurbita moschata*) ($r=0,91^{*}$) [24], mientras que en manzana la correlación fue moderada ($r=0,59^{*}$) [21], al igual que en pimiento ($r=0,62^{**}$) [17] y berenjena ($r=0,60^{**}$) [14]. Por el contrario, en otro estudio en pimiento la correlación hallada entre estas variables fue negativa y moderada ($r=-0,50^{**}$) [19], mientras que dicha correlación no fue significativa en los cultivos de uchuva [20], fresa [22], berenjena [16], y en otro estudio en pimiento [18].

Cuadro 6. Coeficientes de correlación de Spearman entre longitud y peso del fruto de tacaco.

Tipo de fruto	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad
Total (n=22)	0,79	**
Con espinas (n=15)	0,76	**
Sin espinas (n=7)	0,77	**

Nota: **: altamente significativa ($p \leq 0,01$).

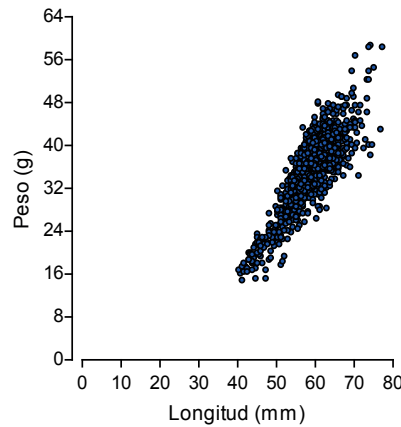


Figura 1. Diagrama de dispersión de la relación entre longitud y peso del fruto de 22 accesiones de tacaco.

En cuanto a la relación entre ancho y peso del fruto (cuadro 7 y figura 2), la correlación fue alta, positiva y altamente significativa, tanto para el total de accesiones, como para los frutos con y sin espinas. Esta relación es lógica, pues un fruto más ancho generalmente tiene mayor peso. Para esta relación, al igual que en el presente ensayo, en otra investigación con pepino también se obtuvo una correlación alta y positiva ($r=0,66-0,67^{**}$) [6] [7], y lo mismo se halló en pimienta ($r=0,89^{**}$) [19], berenjena ($r=0,76-0,92^{**}$) [14] [15], tomate ($r=0,75^{**}$) [9], melón ($r=0,84-0,88^{**}$) [12] [30], *Caesalpinia ebano* ($r=0,80^{**}$) [26], *Benincasa hispida* ($r=0,91^{**}$) [25], y ayote (*Cucurbita moschata*) ($r=0,95^{**}$) [24]. Sin embargo, en otro ensayo con pepino se halló una correlación moderada ($r=0,39^{**}$) entre estas variables [8], y lo mismo sucedió en uchuva ($r=0,43^{*}$) [20], pimienta ($r=0,57-0,61^{**}$) [17] [18], fresa ($r=0,59^{**}$) [22], manzana ($r=0,59^{*}$) [21], y berenjena ($r=0,47^{**}$) [16]. Por otra parte, en otro estudio en tomate, esta correlación no fue significativa [10].

Cuadro 7. Coeficientes de correlación de Spearman entre ancho y peso del fruto de tacaco.

Tipo de fruto	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad
Total (n=22)	0,92	**
Con espinas (n=15)	0,94	**
Sin espinas (n=7)	0,94	**

Nota: **: altamente significativa ($p \leq 0,01$).

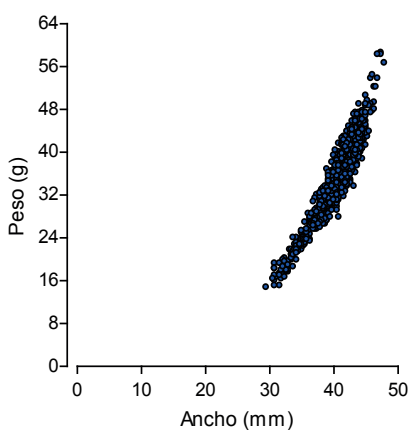


Figura 2. Diagrama de dispersión de la relación entre ancho y peso del fruto de 22 accesiones de tacaco.

Para la relación entre grosor y peso del fruto (cuadro 8 y figura 3), la correlación fue alta, positiva y altamente significativa, tanto para el total de accesiones, como para los frutos con y sin espinas. Esta relación es lógica, pues un fruto más grueso generalmente tiene mayor peso. Para esta relación, en *Benincasa hispida* se halló una correlación alta y positiva ($r=0,78^{**}$) [25], al igual que en el presente trabajo en tacaco; de forma contraria, en *Caesalpinia ebano* dicha correlación no fue significativa [26].

Cuadro 8. Coeficientes de correlación de Spearman entre grosor y peso del fruto de tacaco.

Tipo de fruto	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad
Total (n=22)	0,79	**
Con espinas (n=15)	0,82	**
Sin espinas (n=7)	0,74	**

Nota: **: altamente significativa ($p \leq 0,01$).

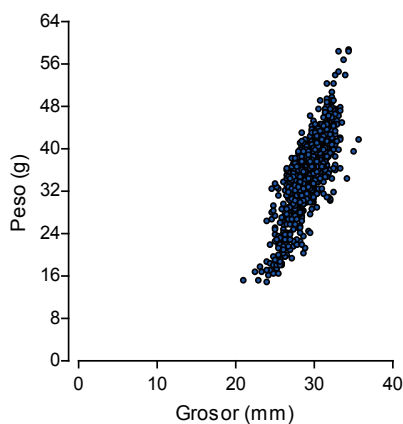


Figura 3. Diagrama de dispersión de la relación entre grosor y peso del fruto de 22 accesiones de tacaco.

Con respecto a la relación entre longitud y ancho del fruto (cuadro 9 y figura 4), la correlación fue alta, positiva y altamente significativa, tanto para el total de accesiones, como para los frutos con y sin espinas. Esta relación no es necesariamente lógica; sin embargo, es una característica importante a tener en cuenta en programas de fitomejoramiento, pues permitiría utilizar como criterio de selección únicamente una de estas variables, por ejemplo, la longitud del fruto. De la misma forma que en el presente ensayo, en berenjena la correlación entre estas variables fue positiva y alta ($r=0,66-0,95^{**}$) [14] [15], y lo mismo se obtuvo en ayote (*Cucurbita moschata*) ($r=0,90^{*}$) [24], pepino ($r=0,86^{**}$) [6], melón ($r=0,86^{**}$) [12], tomate ($r=0,67^{**}$) [9], *Caesalpinia eban* ($r=0,73^{*}$) [26], *Benincasa hispida* ($r=0,73^{*}$) [25], y uchuva ($r=0,75^{**}$) [20]. Por el contrario, en otro estudio en pepino se halló una correlación moderada ($r=0,47-0,49^{**}$) entre estas variables [31] [8], y lo mismo se obtuvo en pimiento ($r=0,25^{**}$) [17] y okra ($r=0,55^{**}$) [23], mientras que en otro estudio en pimiento la correlación hallada fue negativa ($r=-0,76^{**}$) [19], al igual que en fresa ($r=-0,29^{*}$) [22], y berenjena ($r=-0,47^{**}$) [16]. Por otra parte, dicha correlación no fue significativa en manzana [21], ni en otros estudios en tomate [10] y pimiento [18].

Cuadro 9. Coeficientes de correlación de Spearman entre longitud y ancho del fruto de tacaco.

Tipo de fruto	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad
Total (n=22)	0,66	**
Con espinas (n=15)	0,71	**
Sin espinas (n=7)	0,63	**

Nota: **: altamente significativa ($p\leq0,01$).

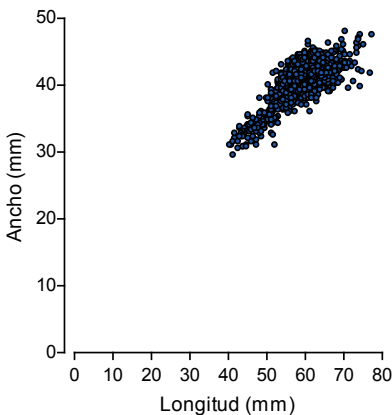


Figura 4. Diagrama de dispersión de la relación entre longitud y ancho del fruto de 22 accesiones de tacaco.

En cuanto a la relación entre longitud y relación longitud:ancho del fruto (cuadro 10 y figura 5), la correlación fue alta, positiva y altamente significativa, tanto para el total de accesiones, como para los frutos sin espinas, pero no fue alta para los frutos espinosos. Esta es una relación lógica, debido a que la variable LF corresponde al numerador de la relación L/A. Para esta relación, al igual que en el presente ensayo, en fresa también se encontró una correlación alta y positiva ($r=0,79^{**}$) [22], y lo mismo se obtuvo en manzana ($r=0,81^{*}$) [21].

Cuadro 10. Coeficientes de correlación de Spearman entre longitud y relación longitud:ancho del fruto de tacaco.

Tipo de fruto	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad
Total (n=22)	0,63	**
Con espinas (n=15)	0,44	**
Sin espinas (n=7)	0,80	**

Nota: **: altamente significativa ($p \leq 0,01$).

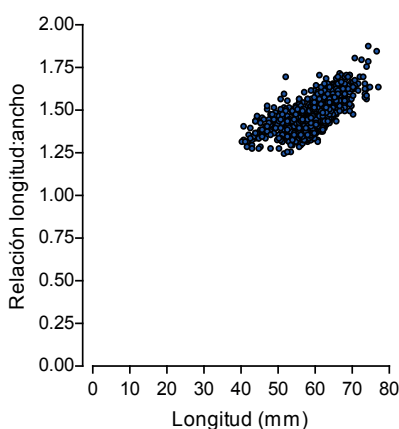


Figura 5. Diagrama de dispersión de la relación entre longitud y relación longitud:ancho del fruto de 22 accesiones de tacaco.

Para la relación entre longitud y relación longitud: grosor del fruto (cuadro 11 y figura 6), la correlación fue alta, positiva y altamente significativa, tanto para el total de accesiones, como para los frutos con y sin espinas. Nuevamente, esta es una relación lógica, ya que la variable LF corresponde al numerador de la relación L/G. No se encontraron referencias en la literatura sobre esta relación.

Cuadro 11. Coeficientes de correlación de Spearman entre longitud y relación longitud:grosor del fruto de tacaco.

Tipo de fruto	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad
Total (n=22)	0,72	**
Con espinas (n=15)	0,64	**
Sin espinas (n=7)	0,80	**

Nota: **: altamente significativa ($p \leq 0,01$).

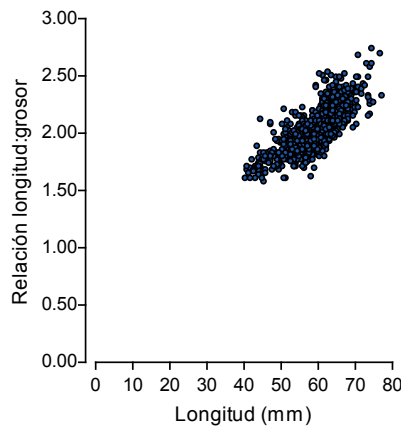


Figura 6. Diagrama de dispersión de la relación entre longitud y relación longitud:grosor del fruto de 22 accesiones de tacaco.

Con respecto a la relación entre ancho y grosor del fruto (cuadro 12 y figura 7), la correlación fue alta, positiva y altamente significativa, tanto para el total de accesiones, como para los frutos con y sin espinas. Esta relación no es necesariamente lógica; sin embargo, es una característica importante a tener en cuenta en programas de selección y fitomejoramiento. Para esta relación, de la misma forma que en el presente estudio, en la especie *Benincasa hispida* se obtuvo una correlación positiva y alta ($r=0,81^{**}$) [25], pero en *Caesalpinia ebano* esta correlación no fue significativa [26].

Cuadro 12. Coeficientes de correlación de Spearman entre ancho y grosor del fruto de tacaco.

Tipo de fruto	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad
Total (n=22)	0,71	**
Con espinas (n=15)	0,70	**
Sin espinas (n=7)	0,73	**

Nota: **: altamente significativa ($p \leq 0,01$).

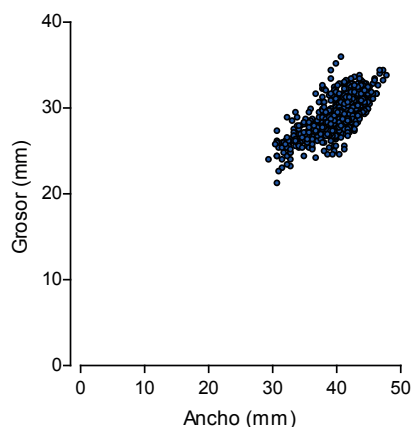


Figura 7. Diagrama de dispersión de la relación entre ancho y grosor del fruto de 22 accesiones de tacaco.

En cuanto a la relación entre número de suturas longitudinales incompletas y número total de suturas longitudinales del fruto (cuadro 13 y figura 8), la correlación fue alta, positiva y altamente significativa, tanto para el total de accesiones, como para los frutos con y sin espinas. Esta es una relación lógica, pues el NSLI es parte del NTSL. Para esta relación no se hallaron informes en la literatura.

Cuadro 13. Coeficientes de correlación de Spearman entre número de suturas longitudinales incompletas y número total de suturas longitudinales del fruto de tacaco.

Tipo de fruto	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad
Total (n=22)	0,85	**
Con espinas (n=15)	0,88	**
Sin espinas (n=7)	0,76	**

Nota: **: altamente significativa ($p \leq 0,01$).

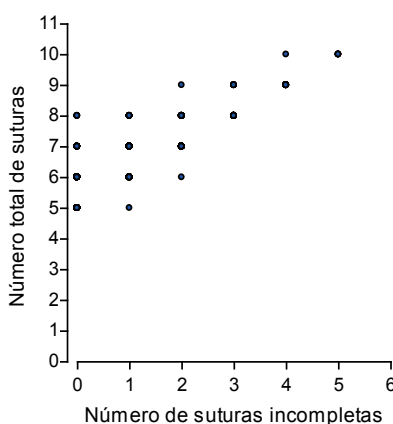


Figura 8. Diagrama de dispersión de la relación entre número de suturas longitudinales incompletas y número total de suturas longitudinales del fruto de 22 accesiones de tacaco.

Para la correlación entre relación longitud:ancho y relación longitud: grosor del fruto (cuadro 14 y figura 9), la correlación fue alta, positiva y altamente significativa, tanto para el total de accesiones, como para los frutos con y sin espinas. Esta es una relación lógica, pues ambas variables comparten a LF en el numerador. Para esta relación no se hallaron informes en la literatura.

Cuadro 14. Coeficientes de correlación de Spearman entre relación longitud:ancho y relación longitud:grosor del fruto de tacaco.

Tipo de fruto	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad
Total (n=22)	0,76	**
Con espinas (n=15)	0,64	**
Sin espinas (n=7)	0,92	**

Nota: **: altamente significativa ($p \leq 0,01$).

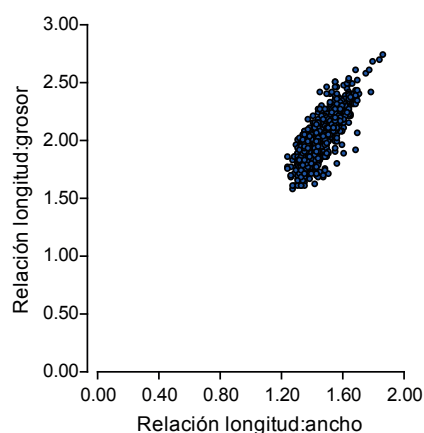


Figura 9. Diagrama de dispersión de la relación entre relación longitud:ancho y relación longitud:grosor del fruto de 22 accesiones de tacaco.

Con respecto a la correlación entre relación longitud:grosor y relación ancho:grosor del fruto (cuadro 15 y figura 10), la correlación fue alta, positiva y altamente significativa, tanto para el total de accesiones, como para los frutos con y sin espinas. Esta es una relación lógica, pues ambas variables comparten a GF en el denominador. No se hallaron informes en la literatura para esta relación.

Cuadro 15. Coeficientes de correlación de Spearman entre relación longitud:grosor y relación ancho:grosor del fruto de tacaco.

Tipo de fruto	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad
Total (n=22)	0,63	**
Con espinas (n=15)	0,69	**
Sin espinas (n=7)	0,73	**

Nota: **: altamente significativa ($p \leq 0,01$).

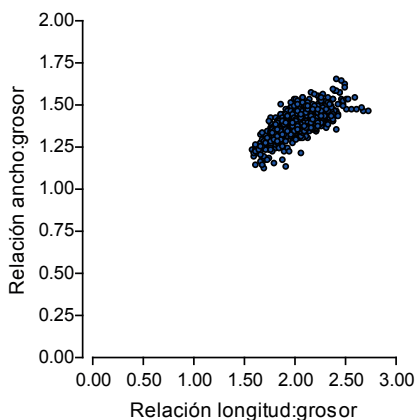


Figura 10. Diagrama de dispersión de la relación entre relación longitud:grosor y relación ancho:grosor del fruto de 22 accesiones de tacaco.

Como comentario adicional, en varias otras especies se ha informado sobre una relación negativa entre la presencia de espinas y el tamaño del fruto [32]; un resultado similar se halló en el presente ensayo, pues la correlación entre el peso y el número de espinas del fruto fue negativa ($r=-0,22^{**}$); sin embargo, dicha correlación no fue alta.

Conclusiones

Se hallaron 10 correlaciones entre características morfológicas de los frutos de tacaco, que fueron altas ($r \geq 0,63$) y significativas ($p \leq 0,05$).

En comparación con los frutos sin espinas, los frutos espinosos mostraron valores significativamente menores en peso, longitud, ancho, grosor, relación longitud:ancho y relación longitud:grosor, y valores significativamente mayores en el número de suturas longitudinales incompletas, número total de suturas longitudinales, número de espinas, y relación ancho:grosor.

Este trabajo constituye el primer informe sobre el estudio de las relaciones entre características morfológicas de los frutos de tacaco.

Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento recibido de parte de la Universidad de Costa Rica, para la realización de esta investigación.

Referencias

- [1] A. Brenes, «Situación actual y perspectivas del tacaco [*Sechium tacaco* (Pittier) C. Jeffrey] en Costa Rica,» *Boletín Agrario*, vol. 11, n° 39, pp. 1-23, 1992.
- [2] J. E. Monge-Pérez y M. Loría-Coto, «Caracterización de frutos de cinco genotipos de tacaco [*Sechium tacaco* (Pittier) C. Jeffrey] en Costa Rica,» *Tecnología en Marcha*, vol. 30, n° 3, pp. 71-84, 2017.
- [3] J. E. Monge-Pérez y M. Loría-Coto, «Cuantificación de la variabilidad entre progenies de tacaco (*Sechium tacaco*),» *Revista Pensamiento Actual*, vol. 18, n° 30, pp. 67-77, 2018.
- [4] J. E. Monge-Pérez y M. Loría-Coto, «Variabilidad morfológica en frutos de una población de tacaco [*Sechium tacaco* (Pittier) C. Jeffrey] a través del tiempo,» *Tecnología en Marcha*, vol. 31, n° 4, pp. 15-24, 2018.
- [5] J. E. Monge-Pérez y M. Loría-Coto, «Morfometría básica de frutos espinosos de "accesiones" de tacaco (*Sechium tacaco*; Cucurbitaceae),» *Cuadernos de Investigación UNED*, vol. 16, p. e5268, 2024.
- [6] O. A. Umeh, I. S. Umeh, J. I. Ulas, E. R. Keyagha y C. O. Cooke, «Principal component and correlation analyses study on fruit yield in cucumber (*Cucumis sativus* L.) genotypes,» *Electronic Journal of Plant Breeding*, vol. 15, n° 2, pp. 532-537, 2024.
- [7] K. Chacón-Padilla y J. E. Monge-Pérez, «Producción de pepino (*Cucumis sativus* L.) bajo invernadero: correlaciones entre variables,» *Revista Posgrado y Sociedad*, vol. 18, n° 2, pp. 53-70, 2020.
- [8] J. A. Cruz-Coronado, J. E. Monge-Pérez y M. Loría-Coto, «Pepino (*Cucumis sativus* L.) cultivado en ambiente protegido: correlaciones entre variables,» *Tecnología en Marcha*, vol. 34, n° 4, pp. 75-91, 2021.
- [9] D. Arya, A. K. Pal, A. K. Singh, B. Kumar y A. Rathour, «Studies of correlation and path coefficients for tomato yield and quality attributes (*Solanum lycopersicum* L.),» *International Journal of Environment and Climate Change*, vol. 13, n° 10, pp. 381-388, 2023.
- [10] Y. Kousar, B. Tooheed, M. Z. Khan, H. Murad, M. Ramzan, I. Khadim, A. Fatima y S. Shakoore, «Correlation analysis for yield and yield contributing traits in tomato (*Solanum lycopersicon* L.),» *Life Science Journal*, vol. 18, n° 6, pp. 65-70, 2021.
- [11] J. E. Monge-Pérez y M. Loría-Coto, «Tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cultivado bajo invernadero: correlaciones entre variables,» *Tecnología en Marcha*, vol. 32, n° 3, pp. 37-54, 2019.
- [12] T. Khomphet, W. Intana, A. Promwee y S. S. Islam, «Genetic variability, correlation, and path analysis of Thai commercial melon varieties,» *International Journal of Agronomy*, vol. 2022, n° 7877239, pp. 1-6, 2022.

- [13] J. E. Monge-Pérez y M. Loría-Coto, «Melón (*Cucumis melo* L.) cultivado bajo invernadero: correlaciones entre variables,» *Tecnología en Marcha*, vol. 32, n° 1, pp. 134-150, 2019.
- [14] I. Musa, U. Magaji, S. C. Chukwu, S. Swaray y A. S. Kiri, «Phenotypic and genotypic association of yield and yield-related traits in eggplant (*Solanum melongena* L.) evaluated for two seasons,» *Innovations in Agriculture*, vol. 6, pp. 1-7, 2023.
- [15] J. E. Monge-Pérez, C. Arguedas-García y M. Loría-Coto, «Relaciones entre variables en berenjena (*Solanum melongena*),» *Tecnología en Marcha*, vol. 37, n° 1, pp. 40-50, 2024.
- [16] G. Chetan, M. M. Pandya, N. A. Patel, R. J. Joshi y B. Desai, «Correlation and path analysis in brinjal (*Solanum melongena* L.) for yield and yield related traits,» *Electronic Journal of Plant Breeding*, vol. 14, n° 4, pp. 1549-1552, 2023.
- [17] D. L. Chavan, D. P. Waskar, V. S. Khandare y S. P. Mehtre, «Correlation and coefficient analysis in chilli (*Capsicum annuum* L.),» *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, vol. 10, n° 2, pp. 1848-1851, 2021.
- [18] J. Srinivas, K. R. Reddy, P. Saidaiah, K. Anitha, S. R. Pandravada y M. Balram, «Correlation and path analysis study in chilli (*Capsicum annuum* L.) genotypes,» *International Research Journal of Pure & Applied Chemistry*, vol. 21, n° 21, pp. 1-11, 2020.
- [19] E. Elizondo-Cabalceta y J. E. Monge-Pérez, «Pimiento (*Capsicum annuum*) cultivado bajo invernadero: correlaciones entre variables,» *Revista Posgrado y Sociedad*, vol. 17, n° 2, pp. 33-60, 2019.
- [20] P. Dahiya, K. Kour, P. Bakshi, S. Kour, D. B. Singh y B. Bhushan, «Correlation and path analysis using growth, flowering, fruiting and biochemical parameters in cape gooseberry,» *Indian Journal of Horticulture*, vol. 79, n° 2, pp. 145-150, 2022.
- [21] P. Verma, N. Chauhan y S. Bodh, «Correlation and path coefficient analyses for some yield-related traits in apple (*Malus domestica* Borkh) under mid-hill conditions of Himachal Pradesh, India,» *Electronic Journal of Plant Breeding*, vol. 15, n° 1, pp. 263-269, 2024.
- [22] S. Jan, J. A. Baba, Z. A. Dar, G. Ali, S. A. Mir, S. Qurat y T. Angmo, «Studies on correlation and path coefficient analysis for various traits in different strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.) cultivars under temperate climatic conditions of Kashmir,» *The Pharma Innovation Journal*, vol. 11, n° 7, pp. 3564-3567, 2022.
- [23] S. Awasthi, D. P. Singh, P. Singh, A. Upadhyay y B. Lal, «Estimation of correlation and path coefficient for morphological and quantitative traits in okra (*Abelmoschus esculentus* L. Moench),» *Vegetable Science*, vol. 49, n° 2, pp. 176-182, 2022.
- [24] M. B. Aguilar-Jiménez, L. Serrano-Cervantes, F. Lara-Ascencio y M. Pérez-Ascencio, «Caracterización morfoagronómica de seis cultivares de ayote (*Cucurbita moschata* Duch.) e incidencia de artrópodos y enfermedades,» *Revista Agrociencia*, vol. 1, n° 1, pp. 45-55, 2017.
- [25] M. M. Espitia-Camacho, H. Araméndiz-Tatis y C. E. Cardona-Ayala, «Correlaciones y análisis de sendero entre características del fruto y la semilla de *Benincasa hispida* [(Thunb.) Cogn.],» *Temas Agrarios*, vol. 26, n° 1, pp. 36-45, 2021.
- [26] R. D. Blanco-Fuentes, L. J. Castro-Torres, M. M. Espitia-Camacho, H. Araméndiz-Tatis y C. Cardona-Ayala, «Análisis de sendero entre características biométricas del fruto de *Caesalpinia ebano* H. Karst,» *Revista de Ciencias Agrícolas*, vol. 39, n° 2, pp. 186-197, 2022.
- [27] J. A. Di Rienzo, F. Casanoves, M. G. Balzarini, L. González, M. Tablada y C. W. Robledo, «Infostat, versión 2008,» Grupo Infostat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina, 2008.
- [28] M. A. Mondragón, «Uso de la correlación de Spearman en un estudio de intervención en fisioterapia,» *Movimiento Científico*, vol. 8, n° 1, pp. 98-104, 2014.
- [29] J. Rubí, O. Varela, L. Granados, A. Vargas y K. Villalobos, «Efecto de la altitud sobre las características morfológicas y sensoriales vinculadas a la calidad del fruto de chayote (*Sechium edule*) tipo "quelite" producido en el Valle de Ujarrás, Costa Rica,» *Perspectivas Rurales*, vol. 17, n° 33, pp. 177-195, 2019.
- [30] J. E. Monge-Pérez y M. Loría-Coto, «Parámetros de selección para el rendimiento en melón (*Cucumis melo*) cultivado bajo invernadero,» *Cuadernos de Investigación UNED*, vol. 12, n° 2, pp. 1-11, 2020.
- [31] J. E. Monge-Pérez, K. Chacón-Padilla y M. Loría-Coto, «Criterios de selección para el rendimiento en pepino (*Cucumis sativus*) cultivado en invernadero en época seca,» *Cuadernos de Investigación UNED*, vol. 13, n° 1, pp. 1-11, 2021.
- [32] L. F. Nascimento, P. R. Guimarães, R. E. Onstein, W. D. Kissling y M. M. Pires, «Associated evolution of fruit size, fruit colour and spines in Neotropical palms,» *Journal of Evolutionary Biology*, vol. 33, pp. 858-868, 2020.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Gestión de residuos de coco verde (pipa, *Cocos nucifera* L.) para una industria alimenticia¹

Green coconut (*Cocos nucifera* L.) waste management for a food processing company

Verónica Fiorella Juárez-Piedra², Lilliana Abarca-Guerrero³

Fecha de recepción: 19 de octubre, 2024

Fecha de aprobación: 8 de enero, 2025

Juárez-Piedra, V.F; Abarca-Guerrero, L. Gestión de residuos de coco verde (pipa, *Cocos nucifera* L.) Para una industria alimenticia. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 3. Julio-Setiembre, 2025. Pág. 137-150.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i3.7561>


1 Artículo basado en tesis de licenciatura de la primera autora. Disponible en: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/14599>

2 Escuela de Química, Ingeniería Ambiental, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 veronicapiedra40@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0002-3313-0226>

3 Escuela de Química, Centro de Investigación en Protección Ambiental (CIPA), Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 labarca@itcr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0001-5129-3104>

Palabras clave

Pipa; coco verde; gestión de residuos; residuos; estrategias; usos; fibra.

Resumen

En Costa Rica se cosechan alrededor de 15 000 toneladas anuales de coco, que puede consumirse en una etapa de madurez joven o verde, siendo denominada en varios países de América Latina como pipa. Su disposición inadecuada puede tener efectos ambientales negativos como cambios impuestos al paisaje y proliferación de insectos y roedores. La presente investigación está enfocada en la aplicación del coco verde como sustrato agrícola, análisis de parámetros físicos y químicos básicos; y estrategias para su gestión y valorización. Los usos para los residuos de coco verde son variados, pero su principal aplicación para los residuos de pipa en Costa Rica es el agrícola, pudiendo aprovecharse como sustrato, en forma de fibras y polvo, así como parte de la matriz de compostaje. En su estado íntegro, se pueden almacenar 392 unidades/m³, mientras que trituradas 832 unidades/m³. Las pipas poseen una conductividad eléctrica alta (1389 μ S/cm), por lo que se debe realizar el lavado y/o prensado del fruto. Para la obtención de fibra y polvo de coco verde se necesita maquinaria como trituradoras, molinos y tamices, espacio para secado y maduración y una pila o centrífuga para el lavado.

Keywords

Green coconut; waste management; waste; strategies; uses; peat; fiber.

Abstract

Costa Rica harvests 15 000 annual tons of coconut, that can be consumed in an early or green development stage, which is denominated in various Latin American countries as "pipa". Its inadequate disposal can have negative environmental impacts like landscape changes, insect proliferation and rodents. This paper presents a literature review focused on the application of green coconut as an agricultural substrate, an analysis of basic physical and chemical properties, and strategies for its management and valorization. It was found that the applications for green coconut are varied and that the main use for the waste in Costa Rica is in agriculture, having the opportunity of being used as fibers and dust or peat, as well as part of a compost matrix. 392 units of whole coconut can be stored per m³, while 832 units/m³ can be stored crushed. Green coconut has a high electrical conductivity (1389 μ S/cm), which is why washing and/or pressing of the fruits is necessary. To obtain dust and fibers, machinery like crushers and mills, space for drying and maturation, and a centrifuge or washing area; are required.

Introducción

Se prevé que el consumo mundial de alimentos, aumente un 1,4% anual durante la próxima década (2022-2031), principalmente por el crecimiento de la población, así como que la producción agrícola mundial se intensifique en un 1,1% anual [1]. Lo anterior provocará una mayor generación de residuos a lo largo de la cadena agroalimentaria [2]. GRID-Arendal [3] han indicado que del 25% al 50% de todos los alimentos producidos se desechan a lo largo de la cadena de valor ya sea generándose en el campo de cultivo, después de cosecharlos consistiendo en hojas, tallos y vainas de semillas; los producidos por el procesamiento de los alimentos cuya composición es básicamente melaza, fibras, bagazo, cáscaras, pulpas, entre otros; los cuales son subutilizados y generados en enormes cantidades [4].

Los residuos producidos tienen una disposición inadecuada, en muchas ocasiones se queman en espacios públicos, contaminando el aire y suelo. Asimismo, sus lixiviados pueden canalizarse hacia una fuente de agua, contaminando así el ambiente acuático [2].

Dentro de los alimentos de gran consumo a nivel mundial se encuentra el Cocos nucifera L., de aquí en adelante denominado "coco". Según la Organización de las Naciones Unidas la Alimentación y Agricultura (FAO), para el 2020, la producción mundial de coco fue de 61 520 382 toneladas, ocupando, Costa Rica, el puesto número 46 del mundo con 15 000 toneladas de producción anuales [5]. Esta industria alimenticia manufacturera produce grandes cantidades de residuos orgánicos como parte de sus procesos de producción.

Una empresa procesadora de alimentos, ubicada en la Gran Área Metropolitana de Costa Rica (GAM), procesa y comercializa agua del coco verde conocido como pipa, produciendo toneladas diarias de fruta residual. Estos residuos, gestionados inadecuadamente provocan una variedad de impactos ambientales [6].

La literatura informa una variedad de aplicaciones para los residuos de pipa, la mayoría reportadas por personas investigadoras en Brasil, donde se indica que han desarrollado una industria de productos derivados del coco muy diferente a la situación de Costa Rica. Se menciona la producción de etanol lignocelulósico, briquetas, carbón activado, manufactura de zapatos, macetas, rellenos de asientos de vehículos, sustrato agrícola, entre otros. En Costa Rica, una de las principales aplicaciones es la agrícola que aprovecha las fibras y el polvo.

La presente investigación está enfocada en la gestión y valorización de las pipas como sustrato agrícola, específicamente en su presentación de fibra (mecha) y polvo. En Costa Rica, el aprovechamiento de los residuos de coco como sustrato agrícola se realiza cuando el fruto se encuentra en un estado de madurez avanzado. Por lo tanto, se pretende plantear la posibilidad de uso del coco inmaduro como medio de cultivo. Para abordar el problema, se realiza una revisión bibliográfica extensiva para la aplicación específica, el análisis de algunos parámetros físicos y químicos del material y aspectos propios de la gestión integral del residuo.

Materiales y métodos

Lugar de estudio

La presente investigación se realizó en una empresa procesadora y comercializadora de productos alimenticios ubicada en la GAM. La misma ofrece una gran variedad de alimentos siendo uno de ellos el coco verde o pipa, como producto de la extracción de su agua. Durante la investigación se realizaron múltiples visitas a la empresa con el objetivo de analizar la situación ambiental, organizacional y económica de la gestión de residuos de pipa.

Estrategias de gestión

Almacenamiento de las pipas enteras

Para determinar el espacio de almacenamiento necesario para las pipas enteras se utilizó una tarima de 120cm x 80cm. En ella se posicionaron las frutas suficientes para que la superficie quedase completamente cubierta. Seguidamente, se colocó una superficie plana encima de las pipas, para poder medir y estimar la altura promedio de estas. Todos los cocos fueron seleccionados al azar y la prueba fue realizada en una única ocasión.

Almacenamiento de las pipas trituradas

Se trituró una pipa utilizando una trituradora de grado semi-industrial y en su estado húmedo se colocó en un beaker de 2000 ml, presionando el material sin llegar a extraer el líquido. Se midió la altura que ocupó el material en el beaker, así como el diámetro del recipiente; para obtener el volumen de llenado en cm^3 . Mediante este procedimiento se obtuvo una aproximación del espacio requerido, por lo que el resultado es dependiente del tamaño de los frutos. Esta estimación permitió comparar el espacio que requieren los frutos enteros con los triturados. El mismo procedimiento fue aplicado para la fibra y polvo seco, después de secar por una semana y separar las fracciones manualmente. A la fibra sí se le aplicó presión en el beaker, mientras que al polvo no.

Propuesta de valorización

Análisis de humedad, pH y conductividad eléctrica

Se analizaron dos muestras en el Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos (CEQIATEC), en la sede central del Tecnológico de Costa Rica (TEC), una de las pipas solamente fue triturada y otra triturada y lavada. El coco verde posee cantidades importantes de taninos, cloruro de potasio (KCl) y cloruro de sodio (NaCl) [7], que pueden afectar el crecimiento y desarrollo de los almácigos y plantas, en caso de que los residuos se quieran utilizar como sustrato para la producción de estos. Por ello, se analizó el cambio de pH y conductividad eléctrica de las fibras y polvo de coco después de un lavado.

El procedimiento de lavado se realizó como lo indica Mattos *et al.* [8], a escala de laboratorio. Se tomaron 500 gramos de pipa triturada, a los cuales se les agregó 1 litro de agua potable directa del tubo, en una relación 1:2. Se dejó reposar durante 15 minutos, mezclando y presionando las fibras cada 5 minutos. Al finalizar el tiempo establecido, se drenó el agua con ayuda de un textil como filtro, teniendo especial cuidado de no desechar el material más fino.

A las dos muestras se les realizaron análisis de humedad, pH y conductividad eléctrica. La humedad se midió con una balanza de humedad marca OHAUS modelo MB90. Para el pH y la conductividad eléctrica se empleó el método de extracción del sustrato saturado, utilizando relaciones sustrato/agua 1:2 y 1:5, respectivamente. El pHmetro utilizado fue el Orion Star A221 de la marca Thermo Scientific, mientras que el modelo del conductímetro fue EC300A de EcoSense.

Producción de fibra y polvo de coco verde

La selección de las pipas para el análisis se hizo de manera aleatoria en la empresa de interés. Los cocos fueron triturados con la máquina trituradora TR 200 de Trapp y puestas a secar en un patio bajo techo durante una semana. A continuación, fueron llevadas al CIPA, donde se realizó una separación manual de las fibras y polvo, debido a que los tamices vibratorios disponibles no permitieron su clasificación.

Análisis granulométrico del polvo de coco verde

Con el objetivo de definir los tamaños de abertura necesarios para el tamizado del polvo de coco verde, se realizó una prueba granulométrica. Se usó un agitador de tamices Tyler modelo RX-29 con tamices de aberturas de 1,18 mm, 1,70 mm, 2,00 mm, 2,36 mm y 2,80 mm. El tiempo total de vibración aplicado fue de 4 minutos.

Resultados

Situación ambiental actual de la gestión de residuos de pipa

Grandes cantidades de residuos de pipa son generadas como producto de la extracción del agua. Dependiendo de la producción, el número de frutas de desecho generadas al día varía de 10 560 a 13 200 unidades. No todos los cocos verdes tienen la misma masa, por lo que para efectos de la presente investigación se considerarán aquellos de 1,12 kg cada uno. Además, para efectos de dimensionamiento, se tomará la máxima producción diaria. Lo anterior significa que, en promedio, se generan 14 784 kg (14,8 t) de residuos de pipa al día, 52 que corresponden a 73 920 kg a la semana (73,9 t) y 3 843 840 kg anuales (3843,8 t), considerando una semana laboral de 5 días.

El volumen de pipas generado hace que uno de los principales efectos sean los cambios impuestos al paisaje. Además, si los cocos son acumulados durante un tiempo, la probabilidad de creación de refugio para animales venenosos y roedores es mucho mayor [9].

El tratamiento de los residuos se puede realizar por medio de procesos de triturado y/o prensado. En ellos se genera un líquido, llamado por distintos autores como LCCV (líquido de la cáscara del coco verde), el cual posee una elevada carga orgánica (60 a 70 g $DQO\ L^{-1}$), taninos (6 g L^{-1}) y conductividad eléctrica (8,8 $mS\ cm^{-1}$), además de macronutrientes como P, S, Na, K, Ca y Mg, y micronutrientes como Cu, Fe, Mn y Zn. Su disposición incorrecta puede llegar a afectar los cuerpos de agua receptores debido principalmente por el alto contenido de taninos condensados, que son resistentes a ataques microbianos y son tóxicos para muchos tipos de organismos. No obstante, el LCCV tiene el potencial como fuente de nutrientes para el crecimiento vegetal, así como para la producción de etanol. También se puede realizar un tratamiento biológico del LCCV, para el cual se ha planteado el diseño de sistemas como un reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB) con un lecho de lodos, un sistema de lodos activados y un reactor biológico con hongos. La producción teórica de LCCV, para 13 200 pipas diarias, es de 11 038 $L\ día^{-1}$ [10]- [11].

Otro de los productos del tratamiento de los residuos de coco, es el polvo. El polvo es obtenido producto de una serie de operaciones como triturado, clasificación y molienda. El material presenta una conductividad eléctrica elevada que, mediante un lavado, permite disminuir la cantidad de sales solubles. El efluente del agua de lavado es tratado en conjunto con el LCCV proveniente de la etapa de prensado [8]. No obstante, aún en caso de no realizarse un prensado, se debe analizar si el sistema de aguas residuales en el sitio de producción resulta eficiente para el tratamiento del agua. O bien, si el alcantarillado sanitario local es adecuado para la disposición de las aguas.

Almacenamiento de los residuos de pipa

Para la producción de sustrato de coco verde se requiere un terreno para realizar procesos como secado y almacenamiento. La empresa de interés, dependiendo de la producción, genera al día de 10 560 a 13 200 unidades de pipa. Para efectos de dimensionamiento, se tomará la máxima producción diaria.

Almacenamiento de las pipas enteras

El volumen que requieren las pipas enteras debe considerarse en el proceso de recepción y almacenamiento de estas [8]. Silveira [12] presenta que en 1 m^3 se pueden almacenar hasta 300 unidades de coco verde. La autora también indica que la masa promedio de los frutos,

post-extracción de agua es de 1,5 kg, la cual es mayor al promedio considerado en este estudio (1,12 kg). Debido las diferencias en masa y el hecho de que el artículo fue realizado en Brasil y no en Costa Rica, se analizó la capacidad de almacenamiento en 1 m³.

En una tarima rectangular con área de 0,96 m², se lograron posicionar 54 pipas en un solo nivel, determinando que en 1 m², se pueden colocar 56 de ellas. Además, se obtuvo una altura promedio de 15 cm para las frutas, lo que significa que se pueden apilar cerca de 7 pipas en 1 m. Con ello, se determinó que en 1 m³ se pueden disponer alrededor de 392 cocos verdes, un número considerablemente mayor al presentado por Silveira [12]. Con una producción diaria de 13 200 unidades, se estima que en un día se ocuparían 34 m³, lo que corresponde a 170 m³ semanales (considerando 5 días de trabajo). Se estima el volumen hasta una semana laboral, debido a que Carrijo *et al.* [7] mencionan que las pipas deben ser almacenadas por el menor tiempo posible, porque su maduración puede dificultar su corte. Además, en su acumulación por una semana, se puede llegar a observar la presencia de moho en el interior del coco- El moho elimina la posibilidad de transformar los residuos de coco en aplicaciones como sustrato agrícola.

En términos de terreno, si las pipas se apilan 2 m, el espacio necesario diario sería de 20,2 m², lo que se puede traducir a aproximadamente 120 m² para la acumulación durante una semana. Se sobredimensiona ligeramente por posibles variaciones en la generación de los residuos y otros imprevistos. El apilado a mayores alturas puede involucrar el uso de maquinaria como cargadores o tractores con pala cargadora, cuya compra puede representar gastos económicos adicionales.

Almacenamiento de las pipas trituradas

Con el triturado de los cocos como primera acción, el terreno por ocupar es menor. Se determinó que en 1 m³ se pueden disponer 832 pipas trituradas. Esta es una reducción en necesidad de espacio cercana al 53% cuando se compara con el volumen de los frutos enteros. No obstante, la cantidad acumulable varía con respecto al tamaño de los frutos. Si las pipas se apilan en 1 m, para una semana de secado, serían necesarios cerca de 81 m². Mientras que para 90 días serían 1521 m², aproximadamente. La acumulación de los frutos a esta altura involucra su mezclado de 1 o 2 veces al día, como mínimo, para asegurar que el material se seque.

En la literatura también se discute el espacio necesario que necesitan los cocos. Mattos *et al.* [8] indican que, por cada 10 000 cocos procesados diariamente, serán necesarios 100 m² para el secado y/o maduración de las fibras y el polvo, siendo esparcidas en capas de 5 a 10 cm sobre un piso de concreto. Lo que significa que, para 13 200 unidades de coco verde procesadas a diario, serían ocupados cerca 132 m² en un día y 1,2 ha en 90 días, que es el tiempo mínimo de maduración del polvo considerado en esta investigación. El apilado a dichas alturas aumenta el terreno necesario, pero disminuye el número de tiempos de volteo.

Almacenamiento de la fibra y polvo seco

El secado de los cocos triturados durante una semana permitió observar una reducción de masa cercana del 80% con respecto a la masa del fruto en su estado íntegro. Al realizar la separación de la fibra seca y del polvo, se determinó que el espacio necesario diario es de 40 m³ día⁻¹ y 11 m³ día⁻¹, respectivamente, mientras que la pipa triturada húmeda requiere de 16 m³ día⁻¹. Esto puede deberse a que el proceso de secado hace que se expanda el material, llegando a ocupar un volumen superior a pesar de una masa inferior. Para disminuir el volumen requerido de la fibra seca, se requiere de una máquina compresora.

Análisis de humedad, pH y conductividad eléctrica

Los resultados del análisis de humedad, pH y conductividad eléctrica de los residuos de pipa se muestran en el Cuadro 1. En el reporte de los datos, se presenta una incertidumbre expandida, calculada usando un factor de cobertura (k) de 2, con el cual se obtiene un nivel de confianza de aproximadamente 95%.

Cuadro 1. Valores de pH, humedad (%) y conductividad eléctrica ($\mu S\ cm^{-1}$) de los residuos de coco verde.

Número de lavados	0	1
pH	3,46 \pm 0,06	3,60 \pm 0,06
Humedad (%)	85,7 \pm 0,6	88,0 \pm 0,6
Conductividad eléctrica ($\mu S/cm$)	1389 \pm 40	423 \pm 12

Autores como Lomelí-Ramírez *et al.* [13] y Kampf y Fermino [14] indican que existe una serie de variables que afectan la caracterización física y química de los residuos de coco verde, por ejemplo, la temporada, localización geográfica y edad exacta en la que se cosecharon las frutas; variedad frutal y periodos lluviosos variables. En la presente investigación no fue posible estudiar las variabilidades producto de la temporada, edad exacta, variedad frutal y lluvias, por lo que los valores reportados en el Cuadro 1 están sesgados. No obstante, la localización geográfica de cosecha de las pipas sí es conocida (Guápiles y Sarapiquí, en la provincia de Limón).

Mattos *et al.* [7] proponen una serie de metodologías aplicables para la caracterización de materiales fibrosos, que también pueden ser determinantes en los resultados obtenidos. Sin embargo, se eligió el método de extracción del sustrato saturado propuesto por Liz y Carrijo [9]. Para realizar los análisis, las pipas fueron sometidas a un proceso de trituración, del cual se obtiene una parte fibrosa y otra polvorienta. Para los estudios de laboratorio, se trabajó con ambos componentes. Ambas muestras, con 0 y 1 lavados, presentan un porcentaje de humedad semejante al reportado por la literatura, de un 85% [15]. Para la muestra con las fibras lavadas es importante mencionar que la humedad no va a ser un factor determinante. Por la naturaleza del proceso de lavado, es imposible que se logre drenar la totalidad del agua. Es decir, debido al agua de lavado, los valores de humedad siempre van a ser ligeramente superiores a cuando no se laven.

Las cáscaras de coco verde tienen la desventaja de tener valores muy variables en términos del pH y conductividad eléctrica, tal y como se mencionó anteriormente [9]. En esta investigación, se obtuvieron valores de pH bajos para las dos muestras de pipa analizadas (con 0 y 1 lavados). La literatura reporta valores de pH para el sustrato de coco verde lavado de 4,8; 5 y 6,4 [6], [7], [9]. Mattos *et al.* [8], reportan que el pH debería aumentar significativamente cuando se realiza un lavado, situación contraria a lo obtenido con las dos muestras analizadas en la presente investigación.

Los rangos de pH reportados en la literatura como los más adecuados para la mayor parte de las plantas, son variados. Avenza Álvarez [16] indican que la mejor disponibilidad de nutrientes se produce en sustratos con un pH comprendido entre 5,5 y 6,5, mientras que Liz y Carrijo [9] mencionan que en un rango de 5,0 a 6,0, la mayor parte de los nutrientes son fácilmente asimilables por las plantas.

Analizando la conductividad eléctrica para las fibras no lavadas, se encontraron valores menores que los reportados en la literatura bajo las mismas condiciones. Carrijo *et al.* [7], presentan un valor de $2400\ S\ cm^{-1}$, mientras que Rosa *et al.* [6] de $4740\ S\ cm^{-1}$. Para las fibras lavadas, de igual manera se obtuvieron valores menores en comparación a los $1500\ S\ cm^{-1}$ reportados [6].

Mattos *et al.* [17] comentan que un sustrato agrícola debe tener una conductividad eléctrica cercana a 1000 S cm^{-1} . condición que cumple el sustrato lavado. Indican los mismos autores que es probable que al añadir otros nutrientes, se aumente la salinidad del sustrato, por lo que la conductividad eléctrica debe ser menor a 500 S cm^{-1} .

En la literatura no existe un consenso con respecto a los valores de conductividad eléctrica adecuados para el crecimiento de plantas. Torres *et al.* [18], comentan que cuando se utiliza el método de extracción del sustrato saturado, una conductividad eléctrica de $0\text{-}750 \text{ }\mu\text{S cm}^{-1}$ es muy baja y que los niveles de nutrientes pueden no ser suficientes para sostener un rápido crecimiento; que $2100\text{-}3500 \text{ }\mu\text{S cm}^{-1}$ es un rango estándar para zonas radicales de la mayoría de las plantas, pero es un rango superior para plantas sensibles a sales; y que más de $6000 \text{ }\mu\text{S cm}^{-1}$ son valores extremos, donde la mayoría de cultivos tiene problemas y se requiere inmediata lixiviación de sales. En tal caso, considerando que la conductividad eléctrica de las fibras analizadas va a aumentar con el agregado de otros nutrientes, el valor obtenido se encuentra dentro del rango adecuado para el crecimiento de plantas.

Producción de fibra y polvo

El sustrato de coco está compuesto por una fracción fibrosa y otra polvorosa. Nunes *et al.* [19] presentan una ecuación y un factor de equivalencia que permiten calcular la masa de fibras equivalentes a la cantidad de residuos generados, es decir, la posible producción de fibras de coco verde basadas en la cantidad de desechos. El factor de equivalencia fue establecido con la información de Bitencourt y Pedrotti [20], que mencionan que, por unidad de coco, se puede producir un 25% de fibra. Nunes *et al.* [19] consideraron que una unidad de coco verde sin agua es de 1,5 kg, el cual es un valor mayor al del presente trabajo, que corresponde a 1,12 kg. Multiplicando la masa de la fruta por el 25% se obtiene un factor de equivalencia de 0,28 kg/fruta. Una vez corregido el factor de equivalencia z , se procede a aplicar la ecuación:

$$T_f = z * Qc$$

donde: T_f : Masa de fibras equivalente en kg z : Factor de equivalencia para la masa de fibra de un coco = 0,28 kg/fruta Qc : Número de cáscaras de coco verde

Al aplicar la ecuación, se obtuvo que la posible producción diaria de fibras de coco verde sería de 3,7 t/día, que son 73,9 t/mes y 887,0 t/año. El modelo presentado por Nunes *et al.* [42] tiene la desventaja de no considerar la producción de polvo. No obstante, Rosa *et al.* [6] declaran que después de los procesos de molienda y secado, el rendimiento de polvo con relación a la masa inicial del fruto es del 11% al 13%, teniendo una humedad del 17% al 20%. Bajo este principio, la producción diaria de polvo de coco sería de 1,6 t/día, que son 32,5 t/mes y 390,3 t/año.

Posterior al triturado y secado de los frutos durante una semana, se observó que se perdía del 60% al 80% de la masa original del fruto. También se logró determinar que, del material seco y solamente triturado, cerca del 70% correspondía a fibras y 30% a polvo. Este proceso de clasificación se realizó manualmente, debido a que los tamices vibratorios disponibles no permitieron la separación de los materiales, además, que los mismos no disponían de una gran variedad de aberturas. Por ello, es recomendable el uso de tamices rotatorios para su clasificación, considerando que no se poseía máquina clasificadora.

Con respecto a la proporción de fibras y polvo obtenidas en este estudio, se observa que es coherente con los resultados de Marafon *et al.* [21], e inversos a los reportados por Mattos *et al.* [17]. Es importante recalcar que ambos autores aplican triturado, prensado y clasificación de pipas, mientras que, en esta investigación, solo triturado y clasificación.

Si se considera la pérdida del 80% de la masa original, así como una proporción de 70% de fibra y 30% de polvo, la producción diaria para 13 200 unidades de coco verde sería de 2,1 t/día de fibra y 0,9 t/día de polvo. Las cantidades son obtenidas cuando solo se han realizado los procesos de triturado, secado y clasificación.

En comparación con lo estipulado por Nunes *et al.* [19] y Rosa *et al.* [6], se observa que los porcentajes con respecto a la masa original del fruto varían. Para lo analizado, el polvo representa el 6% de la masa original (en comparación con 11%), mientras que la fibra un 14% (en comparación con 25%). La divergencia en los datos podría ser producto de la naturaleza de los frutos, así como el proceso aplicado para la obtención de los materiales.

Proceso sugerido para la producción de fibra y polvo de coco verde

En la literatura se presenta el problema de que algunos investigadores buscan valorizar solamente el polvo y no la fibra del coco [6],[15]. De la revisión realizada, Mattos *et al.* [8] son los únicos autores en proponer un proceso para el aprovechamiento de ambas partes. Durante la investigación se encontró la dificultad de reproducir el proceso tal y como fue reportado por los autores analizados, situación debido a la imposibilidad de conseguir la maquinaria utilizada por ellos, o bien, prensar los cocos ya que no estuvo al alcance del presente proyecto. Debido a lo anterior se propone un proceso que se adecuó a las condiciones de la investigación.

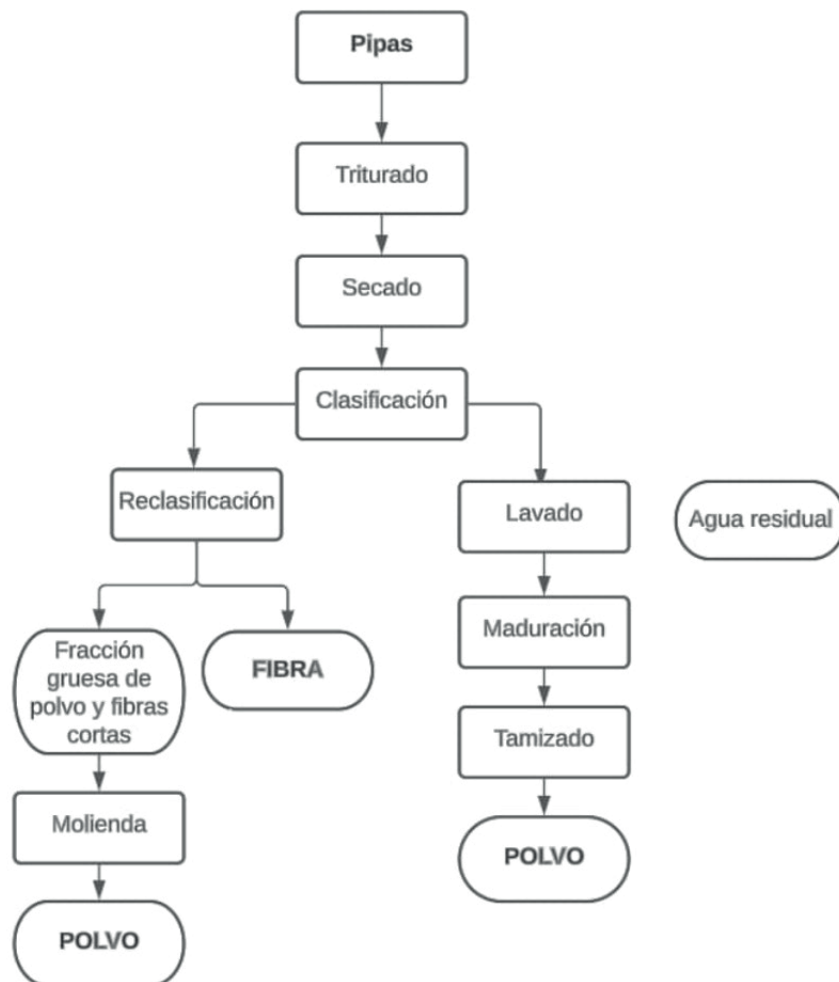


Figura 1. Procedimiento para la obtención de fibra y polvo de coco verde.

Triturado

El triturado de los cocos verdes se debe realizar a diario, debido a la cantidad de residuos que se generan al final del día laboral. Además, su acumulación por varios días puede requerir mucho espacio. La maquinaria debe permitir que los cocos se puedan triturar enteros, en virtud de que a los frutos solo se les hace un pequeño corte para extraer el agua.

Secado

El tiempo de secado de los cocos triturados al aire libre va a depender de la cantidad de sol, así como la presencia de lluvias. Se observó que un periodo de 4 a 7 días resulta adecuado para obtener el material con una humedad considerablemente menor a la inicial. Si el coco va a ser acumulado en pilas, se debe hacer un volteo diario, para asegurar un secado relativamente uniforme. Es de gran importancia que el secado “natural” se realice sobre piso de concreto o piedras. Esto es debido a que el contacto con césped o tierra puede humedecer o contaminar el producto.

En el caso de presencia de lluvias o falta de espacio, se puede hacer uso de un secador. El tiempo de secado variará con respecto a las especificaciones de cada equipo.

Clasificación

Los cocos verdes presentan una humedad cercana al 85%, lo que puede llegar a dañar la maquinaria clasificadora no especializada para los frutos en esta etapa de madurez. Las clasificadoras con mayor disponibilidad en el mercado se basan en el principio de introducir el coco maduro entero. Seguidamente, la máquina separa las fracciones de fibra y polvo, mediante una serie de mecanismos específicos para cada instrumento.

Por ello, se plantea la clasificación del polvo y la fibra posterior al triturado y secado de los cocos. Como producto del triturado y secado, las fibras tienden a aglomerarse, acumulando polvo que se puede utilizar como sustrato agrícola. Además, la presencia de un alto contenido de polvo en las fibras empobrece la calidad del producto. Para desaglomerar, se pueden emplear rastrillos antes de que el material ingrese al tamiz. En este paso se genera material particulado muy fino, por lo que el uso de material de protección como mascarillas y lentes, es esencial para las personas trabajadoras.

Lavado

Para la presente investigación se plantean dos métodos para el lavado del polvo de coco verde. Uno de ellos es una pileta, mientras que el otro es una máquina centrífuga. El método del tanque o pileta es ampliamente utilizado en la industria del sustrato de coco [8],[15]. La centrifugadora ha sido utilizada, en el Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO) del TEC, para el lavado de fibras vegetales.

Dimensionamiento del tanque de lavado

El tanque de lavado de las fibras y polvo de pipa fue dimensionado de acuerdo con las especificaciones planteadas por Mattos *et al.* [8]. Para 10 000 cocos al día son necesarios 8 m² de tanque, por lo que, para 13 200 pipas diarias, las dimensiones de la pileta de lavado son de 10,6 m², con una profundidad de 1,2 m. De esa profundidad, 0,2 m son destinados como borde de la pileta, mientras que el resto es para su llenado. Además, se plantean 4 lavados diarios.

Si la mitad del tanque se llena con agua, significa que el volumen de agua necesario por lavado es aproximadamente de 5,3 m³. Al mes, considerando 5 días de trabajo semanales, el consumo de agua sería de 422,4 m³.

Dimensionamiento de la centrífuga

Las dimensiones de la centrífuga estuvieron basadas en la masa de polvo sin comprimir que puede ser almacenada en 1 m³ (0,15 t*m³), así como la aplicación de 8 lavados diarios al polvo generado en un día. De igual manera se consideró lo estipulado por Mattos *et al.* [8], que indican que se necesitan partes iguales de polvo y agua. La máquina consta de un tambor interno y un tambor externo. El interno se llena hasta un 75% de su capacidad total, para evitar daños al equipo y pérdida de material. Considerando una producción diaria de 0,9 t de polvo, el tambor interno de la centrífuga debe tener un volumen de 1,9 m³, mientras que el externo de 3,2 m³.

Maduración o compostaje

El polvo de coco puede compostarse, mientras que las fibras son solamente sometidas a un periodo de secado. Por ello, se propone el proceso después de la separación de los materiales. Para el presente caso, se va a plantear la obligatoriedad de la maduración del sustrato por un periodo mínimo de 90 días permitiendo mejorar las características químicas del producto [22]. Para el caso del coco maduro, se han observado periodos de compostaje hasta por años, por lo que se supone que también es aplicable para el coco verde [23].

También se puede considerar el uso de urea para acelerar el proceso de maduración. A pesar de que no es una técnica ampliamente utilizada para el sustrato de coco, permite reducir el tiempo de maduración a 60 días [8]. Esto también trae el beneficio de la disminución del tamaño del terreno donde se realiza el proceso, tal y como se mencionó anteriormente. De acuerdo con las indicaciones de Mattos *et al.* [48], si el polvo posee una humedad del 50%, se necesitarían 2 g de urea por kg de polvo. Por lo tanto, para 18 000 kg mensuales de polvo de coco verde, se requerirían 36 kg de urea. En el mercado se encuentra urea en una presentación de 45 kg, por lo que se utilizaría el 80% del saco mensualmente. El saco de 45 kg tiene un costo de \$ 21 475 (\$39,88 al 25 de agosto del 2023) [66].

Tamizado

Para la elección del tamaño de abertura de malla necesaria para la clasificación del polvo de coco, se realizó una prueba granulométrica (Cuadro 2). El polvo analizado no fue sometido a una molienda, solamente se separó del material fibroso seco.

Cuadro 2. Determinación de la granulometría del polvo de coco verde.

Tamiz N°	Abertura (mm)	% Retenido
7	2,80 mm	48,9
8	2,36 mm	3,3
10	2,00 mm	5,3
12	1,70 mm	3,1
16	1,18 mm	9,7
Fondo	-	29,7
Total		100

Como se puede notar, cerca del 50% del material retenido presenta una granulometría mayor a los 2,80 mm, los cuales son pedazos de endocarpio del coco. Esta fracción puede ser aprovechada tal y como está, o bien puede someterse a un proceso de molienda que permita disminuir su tamaño.

La fracción con tamaños de gránulos menores a 1,18 mm también presentó un porcentaje de retención de polvo importante. En esta casi no se observan fibrillas, a diferencia de lo obtenido en la malla de abertura de 1,70 mm. Los demás tamices acumularon menos del 10% del total del material analizado, no obstante, representan una fracción intermedia que no se puede obviar. Por lo tanto, considerando los resultados del análisis granulométrico y la capacidad de encontrar en el mercado aberturas de malla de números no exactos para coladores rotatorios, se define que tamices con abertura de 3, 2 y 1 mm resultan adecuados para el polvo de coco verde.

Molienda

Aún después de la clasificación, el polvo puede presentar fibras de varias longitudes. Estas aumentan la densidad y reducen la capacidad de aireación del sustrato, que puede generar problemas para el desarrollo de las raíces de las plantas. Mediante el uso de un molino que disminuya el tamaño de las fibras a menos de 2 cm, se puede mejorar la estabilidad de la mezcla de polvo con fibras [8].

Reclasificación

Se plantea la reclasificación de los materiales para separar fibras cortas y trozos de coco de las fibras más largas. En este proceso, un tamiz con abertura de malla de 2 cm resultaría adecuado para su separación. Las fracciones de fibras cortas y trozos de coco pueden someterse a una molienda, con el objetivo de disminuir su granulometría y poder incorporarse al polvo. Mediante este procedimiento también se obtendrían las fibras largas sin una cantidad importante de polvo.

Los procedimientos planteados para la obtención de polvo y fibra de coco verde son la trituración, secado, clasificación, lavado, maduración, tamizado, reclasificación y molienda. Estos corresponden a lo discutido en la literatura, así como adaptado a las condiciones específicas de la empresa, maquinaria fácilmente disponible y condiciones meteorológicas regionales.

Conclusiones

- El principal impacto ambiental detectado, producto de la generación de los residuos de pipa de la empresa en estudio, es el cambio impuesto al paisaje.
- Los impactos ambientales de la gestión inadecuada de los residuos de pipa en Costa Rica se deben principalmente a la baja degradabilidad del fruto y su gran volumen. La primera hace que se contaminen espacios como vías públicas y cuerpos de agua. Además, como producto del espacio que requieren, los cocos pueden llegar a disminuir la vida útil de rellenos sanitarios o vertederos, en caso de ser dispuestos en esos lugares.
- La mayor parte de la literatura existente con respecto al tema estudiado proviene de Brasil. Para Costa Rica, esta es la primera investigación de dominio público relacionada con la gestión de los residuos de coco en un estado inmaduro.
- El análisis detallado de parámetros como lavado, maduración y procesos aplicados para la obtención del polvo de coco verde, es esencial para alcanzar un buen rendimiento y calidad del producto.

La mayor parte de la maquinaria disponible para la transformación de los residuos de coco está diseñada para cuando el fruto se encuentra maduro, por lo que, si no se desea importar el equipo, se debe construir con las especificaciones necesarias.

Agradecimientos

A la Sra. Karla Bolaños por su gran colaboración desde el primer día del proyecto. Así como a don Hugo por su ayuda constante en la empresa. A Sofía del CIPA y Yohanna del CEQIATEC, ambas del TEC por su ayuda en los laboratorios.

Referencias

- [1] Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos y Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, "OECD-FAO Agricultural Outlook 2022-2031", OECD iLibrary, https://www.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/oecd-fao-agricultural-outlook-2022-2031_f1b0b29c-en (Consultado 21 ago., 2022).
- [2] I. O. Adejumo y O. A. Adebisi, "Agricultural Solid Wastes: Causes, Effects, and Effective Management", *Strategies of Sustainable Solid Waste Management*. Londres, Reino Unido: IntechOpen, 2020 [En línea]. Disponible: <https://www.intechopen.com/chapters/73517> doi: 10.5772/intechopen.93601.
- [3] GRID-Arendal, "The Environmental Food Crisis: The Environment's Role in Averting Future Food Crises" GRID Arendal A UNEP Partner, <https://www.grida.no/publications/154> (Consultado 22 ago., 2023).
- [4] P.K. Sath, S. Duhan y J.S. Duhan, "Agro-industrial wastes and their utilization using solid state fermentation: a review", *Bioresour. Bioprocess.*, vol. 5, no. 1, pp. 1-15, ene., 2018. Consultado: 19 ago. 2022. doi: 10.1186/s40643-017-0187-z.
- [5] Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, "FAOSTAT", FAO, <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL> (Consultado 27 ago., 2022).
- [6] M.F. Rosa, F.J. Santos, A.A. Montenegro, F.A. de Abreu, D. Correia, F.B. de Araújo, E.R. Norões, "Caracterização do pó da casca de coco verde usado como substrato agrícola", *Emb. Trop. Agro.*, no. 56, pp.1-6, may., 2001. Consultado: 29 ago. 2022. [En línea]. Disponible: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPAT-2010/5862/1/Ct-054.pdf>.
- [7] O.A. Carrijo, N. Makishima, R.S de Liz, V.R. Oliveira, *Uso da Fibra da Casca de Coco Verde para o Preparo de Substrato Agrícola*. Brasília, Brasil: Embrapa, 2003. [En línea]. Disponible: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/214389/1/digitalizar0371.pdf>
- [8] A.L.A. Mattos, M.F. Rosa, L.A. Crisostomo, F.C. Bezerra, D. Correia, L.G.C. Veras, "Beneficiamento da casca de coco verde", Embrapa, <https://www.embrapa.br/en/agroindustria-tropical> (Consultado: 5 set. 2022).
- [9] R.S. de Liz y O.A. Carrijo, "Substratos para Produção de Mudas e Cultivo de Hortaliças". Brasília, Brasil: Emb. Horta., 2008. [En línea]. Disponible: <https://www.embrapa.br/buscade-publicacoes/-/publicacao/781301/substratos-para-producao-de-mudas-e-cultivo-dehortalicas>.
- [10] R.C. Leitão, A.M. de Araujo, O.L. de Sousa, M.A. Freitas-Neto, M.B. Viana, C.R.F. Brito, A.B. Sousa, M.F. Rosa, G.A.S. Pinto, S.T. Santaella, "Tratamento biológico do líquido da casca do coco-verde", Embrapa, <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/884014/tratamentobiologico-do-liquido-da-casca-do-coco-verde> (Consultado 29 mar. 2023).
- [11] A.S. Pereira y M.U.C. Nunes, "Líquido da casca de coco verde: caracterização química e possíveis alternativas de uso na agricultura", Embrapa, <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/186015/1/Liquido.pdf> (Consultado 17 mar. 2023).
- [12] M.S. Silveira, "Aproveitamento das cascas de coco verde para produção de briquette em Salvador -BA", Tesis de maestría, Gerenc. e Tecn. Amb. no Proc. Produ., Univ. Fed. da Bahia, Salvador, Brasil, 2008.
- [13] M.G. Lomelí-Ramírez, R. Anda, K.G. Satyabarayana, G.I. de Muniz, "Comparative Study of the Characteristics of Green and Brown Coconut Fibers for the Development of Green Composites", *Bio Re.*, vol. 13, no.1, pp.1637-1660, ene., 2018. Consultado: 28 ago. 2022. doi:10.15376/biores.13.1.1637-1660.
- [14] A.N. Kampf y M.H. Fermio, "Substrato para plantas: a base da producao vegetal em recipiente", presentado en Encontro Nacional sobre Substrato para Plantas, Porto Alegre, Brasil, 11 dic., 2000, 312p.
- [15] M.F. Rosa, F.A.P. Abreu, A.A.L. Furtado, A.K.L. Brigido, E.R. Noroes, "Processo agroindustrial: Obtenção de pó de casca de coco verde", Embrapa Agroindústria Tropical, https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPAT/7874/1/ct_61.pdf, (Consultado 28 ago., 2022).
- [16] A. Avenza Álvarez, *Preparación del medio de cultivo*, 2 ed. Málaga, España: IC Editorial, 2018. [En línea]. Disponible: https://www.google.co.cr/books/edition/Preparaci%C3%B3n_del_medio_de_cultivo_AGA_O02/b1EPEAAQBAJ?hl=es&gbpv=1&dq=conductividad+el%C3%A9ctrica+sustrato&pg=PT46&printsec=frontcover.

- [17] M. Rosa, A.L.A. Mattos, L.A. Crisostomo, M.C. Figueiredo, F.C. Bezerra, L.G. Veras, D. Correia, "Processamento da casca de coco verde para a produção de pó e fibra", J. Interamer. Soc. Trop. Hort, vol. 53, pp. 85-88, ene., 2011. Consultado: 15 mar. 2023.
- [18] A.P. Torres, D. Camberato, R. Lopez, M. Mickelbartl., "Producción Comercial de Cultivos Bajo Invernadero y Vivero, Medición de pH y Conductividad Eléctrica en Sustratos", Purdue Extension, 2001. <https://mdc.itap.purdue.edu/item.asp?itemID=19590>, (Consultado 15 mar., 2023).
- [19] L.A. Nunes, J.Z. Gerber, M.L.S. Silva, R. Kalid, "Waste green coconut shells: Diagnosis of the disposal and applications for use in other products", Jour. of Clean. Prod., vol. 255, may., 2020. Consultado: 11 ago. 2022. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120169.
- [20] D. Bitencourt y A. Pedrotti, "Usos da Casca de Coco: Estudo das Viabilidades de Implantação de Usina de Beneficiamento de Fibra de Coco em Sergipe", Rev. da Fap., vol. 4, no. 2, pp. 113-122, jul.-dic. 2008.
- [21] A.C. Marafon, M.U.C. Nunes, A.F.C. Amaral, J.P. dos Santos, "Aproveitamento de cascas de coco para geração de energia térmica: potencialidades e desafios". Aracaju, Brasil: Embrapa, 2019. [En línea]. Disponible: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1119514/1/DOC234.pdf>.
- [22] R.S. de Liz, "Análises físicas e químicas de substrato a base de coco verde para produção de mudas de hortaliças", Tesis de maestría, Fac. de Agro. e Med. Vet., Uni. de Brasília., Brasília, Brasil, 2006.
- [23] R. Duran, "Estudio de prefactibilidad para la producción y comercialización de sustratos a base de fibra de coco en Costa Rica", Tesis de maestría, Ger. Agro., Tec. de Costa Rica, San José, Costa Rica, 2021. [En línea]. Disponible: <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/84445>.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo

Antenas de ranura con tecnología GGW para aplicaciones 6G en 94GHz

Slot Antennas with GGW technology for 6G applications at 94GHz

Jorge Luis Blanco-Orta¹, María del Carmen Guerra-Martínez², Kenneth
Marichal-Leyva³, Ariel Calzadilla-Ayuso⁴, Alexander Sánchez-Pompa⁵


Fecha de recepción: 21 de octubre, 2024

Fecha de aprobación: 7 de febrero, 2025

Blanco-Orta, J.L.; Guerra-Martínez, M.C; Marichal-Leyva, K;
Calzadilla-Ayuso, A; Sánchez-Pompa, A. Antenas de ranura
con tecnología GGW para aplicaciones 6G en 94GHz . *Tec-
nología en Marcha*. Vol. 38, N° 3. Julio-Setiembre, 2025. Pág.
151-161.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i3.7563>

1 Emisora Municipal de Radio Mariel. Cuba.

 jorgeluisblancoorta@gmail.com


 <https://orcid.org/0000-0001-9592-7818>


2 Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría". Cuba.

 mariagm@tele.cujae.edu.cu


 <https://orcid.org/0000-0003-1989-4414>


3 Centro de investigación, Desarrollo y Producción "Grito de Baire". Cuba

 kennethmarichal@gmail.com


 <https://orcid.org/0009-0003-4518-267X>


4 Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría". Cuba.

 calza96ayuso@huawei.com

 <https://orcid.org/0009-0002-8641-4951>

5 Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría". Cuba.

 alexander.sanchez@huawei.com

 <https://orcid.org/0009-0005-0558-955X>

Palabras clave

GGW; 6G; mmWave.

Resumen

Este artículo explora la tecnología Groove Gap Waveguide (GGW) y su aplicación en la banda de 94GHz a través de un arreglo de antena. Se realiza una revisión general de la tecnología Gap Waveguide y sus variantes, estableciendo un marco teórico para el diseño y simulación de una antena de ranura de 2x2 elementos mediante el software CST. Los resultados de la simulación muestran una ganancia máxima de 12.2dBi y un ancho de banda de operación del 17.2% en la banda de interés. Estos resultados sugieren que la tecnología GGW tiene un potencial significativo para aplicaciones en escenarios de la próxima generación de sistemas de comunicaciones inalámbricas de sexta generación (6G), donde se requieren altas velocidades de transmisión de datos y confiabilidad en redes que operan en la banda de ondas milimétricas (mmWave).

Keywords

GGW; 6G; mmWave.

Abstract

This article explores the Groove Gap Waveguide (GGW) technology and its application in the 94GHz band through an antenna array. An overview of the Gap Waveguide technology and its variants is given, establishing a theoretical framework for the design and simulation of a 2x2 element slot antenna using CST software. Simulation results show a maximum gain of 12.2dBi and an operating bandwidth of 17.2% in the band of interest. These results suggest that GGW technology has significant potential for applications in next generation sixth generation (6G) wireless communication system scenarios, where high data rates and reliability are required in networks operating in the millimetre wave (mmWave) band.

Introducción

La industria de las telecomunicaciones ha experimentado una evolución constante durante las últimas décadas del siglo XXI, impulsada en gran medida por el creciente interés de los usuarios en las comunicaciones inalámbricas. En este contexto, el desarrollo de una nueva generación de telefonía móvil se presenta como una estrategia esencial para satisfacer las necesidades de una sociedad cada vez más conectada.

En este sentido, la 6G de redes móviles se encuentra en desarrollo como respuesta a las limitaciones de la quinta generación (5G). Si bien la 5G ha logrado avances significativos con escenarios como la banda ancha móvil mejorada (eMBB), las comunicaciones ultra fiables de baja latencia (URLLC) y las comunicaciones masivas de tipo de máquina (mMTC), las demandas crecientes de estos escenarios, en contraste con el limitado espectro radioeléctrico disponible, exigen un salto tecnológico. Para satisfacer las demandas de estos escenarios, es necesario incrementar las capacidades de transmisión e incursionar en las bandas milimétricas (30-300 GHz). Esto permitirá operar en entornos con múltiples usuarios, ofreciendo mayor velocidad, calidad de señal y capacidad de análisis de la información [1,2].

La utilización de las bandas milimétricas presenta desafíos significativos debido a las altas atenuaciones en la propagación de las ondas electromagnéticas. Para superar estas limitaciones, se requiere el diseño de antenas con elevada ganancia. La naturaleza de las ondas electromagnéticas en esta banda, con longitudes de onda más cortas, permite la construcción de antenas más pequeñas. Este enfoque abre nuevas posibilidades para la innovación en el diseño de arreglos de antenas, respondiendo a la creciente demanda por sistemas de comunicaciones inalámbricas compactos y fácilmente integrables [3,4].

En este contexto, una tecnología es apropiada cuando se presenta como una alternativa viable a un fin específico, se adapta a un objetivo determinado y se acomoda a una solución particular. Sin embargo, no cualquier solución técnica es adecuada; se busca aquella que ofrezca la mejor respuesta a la problemática en cuestión. Este análisis permite realizar la investigación de la tecnología Grove Gap Waveguide, que se basa en la posibilidad de guiar el campo electromagnético a lo largo de direcciones deseadas en el espacio entre las placas metálicas. De este modo, las ondas electromagnéticas se pueden propagar a lo largo de estructuras directivas sin presentar pérdidas en otras direcciones [3]-[5].

La tecnología GGW permite la transmisión de ondas sin contacto físico entre los materiales conductores, superando la limitación de las guías de ondas tradicionales. Esto se logra mediante una estructura de pines metálicos con separación entre sí, que emulan el comportamiento de un material conductor magnético perfecto (PMC). Este estudio, que se centra en la mejora de los sistemas de comunicación, destaca la importancia de la tecnología GGW, ya que su capacidad para lograr bajas pérdidas y un alto manejo de potencia a altas frecuencias [1,6,7] la convierte en una solución clave para futuros diseños de antenas en el desarrollo de aplicaciones 6G.

La tecnología GGW se presenta como una propuesta de solución viable para mitigar los desafíos asociados al uso de las bandas milimétricas en el diseño de prototipos de antenas. La GGW tiene el potencial de satisfacer los requisitos de las redes futuras, asegurando la sostenibilidad de los servicios móviles y favoreciendo una mayor eficiencia en el desarrollo de aplicaciones para 6G.

Metodología

La creciente demanda por servicios de comunicación inalámbrica de alta velocidad y alta capacidad ha impulsado la investigación en nuevas tecnologías que permitan aprovechar las bandas de frecuencia milimétricas. Sin embargo, la propagación de las ondas electromagnéticas en estas bandas presenta desafíos significativos, como la alta atenuación y la limitada capacidad de penetración. La tecnología GGW emerge como una solución prometedora para superar estas dificultades, ofreciendo la posibilidad de guiar las ondas electromagnéticas de manera eficiente y con bajas pérdidas.

Este artículo presenta el diseño de un arreglo de antena basado en GGW. La investigación abarca un análisis exhaustivo de los conceptos, la evolución y la simulación de la antena, siguiendo un proceso estructurado que comprende las siguientes etapas: análisis de la tecnología GGW, diseño del arreglo de antena y simulación. El objetivo principal de este trabajo es desarrollar una investigación y posible implementación de esta estructura, aprovechando sus numerosos beneficios para afrontar los desafíos que presentan las nuevas generaciones de telefonía móvil. Para ello, dentro de las bandas milimétricas, el estudio se centrará en la banda W (75-110 GHz) y más en concreto la banda de 94 GHz, por ser una banda perfecta en términos de compensación con absorción. Para profundizar en cada etapa de la investigación, se llevó a cabo una revisión exhaustiva en la base de datos de la IEEE.

Resultados

Las estructuras periódicas de pines constituyen un enfoque ampliamente utilizado en la actualidad para emular el comportamiento de una superficie de impedancia magnética perfecta (PMC). Estas estructuras pueden adoptar diversas formas geométricas, incluyendo cuadradas, rectangulares y cilíndricas. La altura de los pines, inferior a la del techo metálico, genera un espacio de aire que, a su vez, produce una banda de bloqueo [3,8]. Esta banda de bloqueo se define como el rango de frecuencias donde no se propaga ningún modo a través de la estructura de pines, imitando así el comportamiento de una pared metálica en una guía rectangular convencional, como se ilustra en la (figura 1).

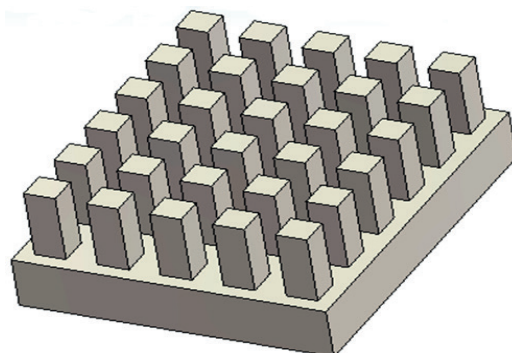


Figura 1. Estructura de pines.

La tecnología GGW presenta un comportamiento similar a una guía rectangular clásica, con la capacidad de propagar en los modos transversal eléctrico y magnético (TE/TM) según su ancho y altura. Por debajo de la frecuencia de corte, la propagación se limita a modos evanescentes no deseados, con una alta atenuación axial que imposibilita la transmisión [8,9]. Sin embargo, por encima de la frecuencia de corte, el modo fundamental se propaga, y al diseñar los pines para bloquear la propagación lateral dentro de la banda de bloqueo (stopband), se obtiene una estructura con una guía de onda adecuada para aplicaciones en mmWave, como se observa en la (figura 2). En la (figura 2a), se muestra un diseño de GGW para el plano E (polarización horizontal) que, aunque es más compacto, presenta un giro de fase de 180° en las salidas de los divisores de potencia. Por otro lado, las guías en el plano H (polarización vertical), ilustradas en la (figura 2b), no experimentan cambios de fase, pero su tamaño mayor las limita a diseños donde el espacio disponible no es un factor crucial [6,8,9,10].

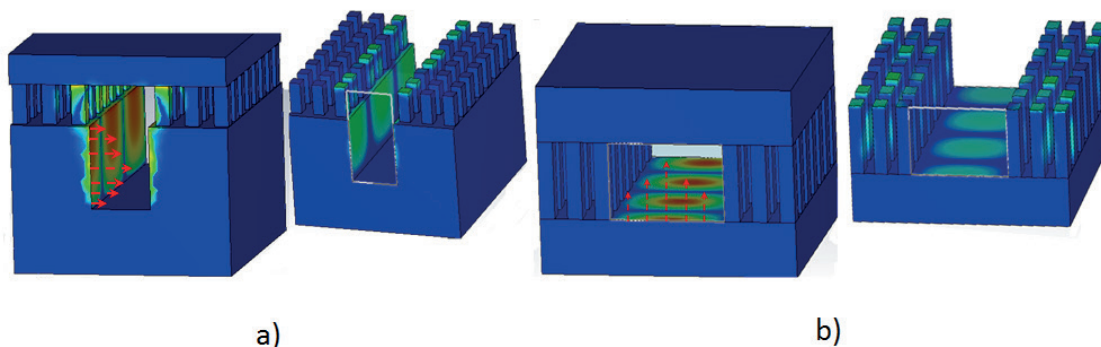


Figura 2. Diferentes tipos de guía GGW dependiendo de la polarización.

La estructura periódica de pines mostrada en la (figura 2), en combinación con el plato metálico superior, evita la propagación de los modos al generar una banda de bloqueo. Este efecto se produce debido a la capacidad de los pines para crear una banda de bloqueo con bajas pérdidas y dimensiones compactas, gracias a su diseño específico. Los parámetros clave que determinan el comportamiento de esta banda de bloqueo son el diámetro (o lado para pines cuadrados) de los pines, la separación entre ellos, la altura y el gap de aire entre el plato superior y los pines. Un gap menor incrementa el ancho de banda de bloqueo debido al efecto capacitivo que se produce entre las dos estructuras.

Para la banda de transmisión y recepción, se definen los parámetros de la guía rectangular, seleccionando el modo TE_{10} como modo fundamental debido a su baja atenuación en comparación con otros modos. El objetivo es garantizar la propagación monomodo dentro del ancho de banda de trabajo, asegurando que sólo el modo TE_{10} se propague en la banda de operación.

Diseño de la estructura periódica

El diseño del pin es crucial en la fabricación de estructuras de tipo Gap Waveguide, ya que determina la banda de frecuencias en la que se bloquea la propagación de ondas electromagnéticas. La elección precisa de sus dimensiones y su distribución periódica son claves para este proceso. La repetición periódica de un pin único constituye la base de las diferentes variantes de la tecnología GGW. Este diseño genera una superficie conocida como Conductor Magnético Artificial (AMC).

Las características del pin se evidencian en su diagrama de dispersión que aparece en la (figura 3), que representa la propagación de distintos modos en la retícula de pines. En este diagrama, la celda unidad, que corresponde a la sección periódica de la estructura, se utiliza para calcular la banda prohibida [8,11,12,13].

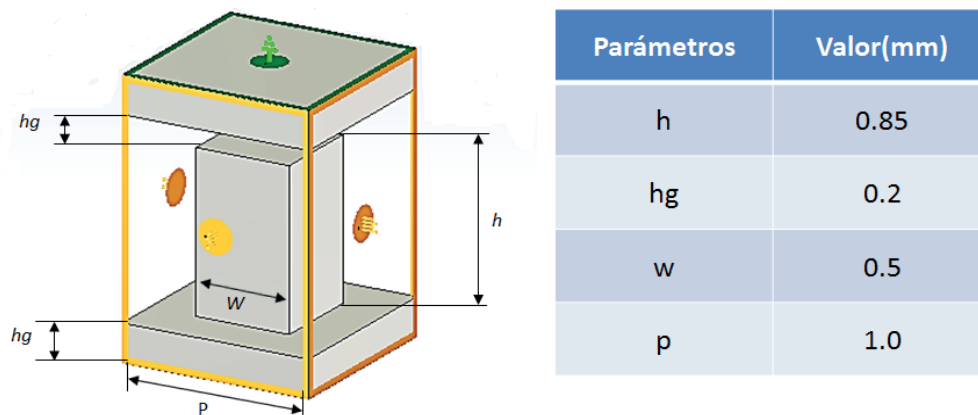


Figura 3. Parámetros de la celda unitaria.

Para caracterizar la estructura periódica de pines, se utilizó el módulo Eigen Mode Solver del software CST, estableciendo condiciones de contorno apropiadas para simular una estructura periódica en el plano horizontal. El análisis de modos reveló un diagrama de dispersión, mostrado en la (figura 4). Este diagrama revela que la estructura solo permite la propagación de tres modos distintos. El primer modo se propaga a frecuencias inferiores a 60 GHz, mientras

que los otros dos modos lo hacen a frecuencias superiores a 125 GHz. Esto define un rango de frecuencias entre 60 GHz y 125 GHz donde no se propaga ninguna onda, conocido como banda prohibida.

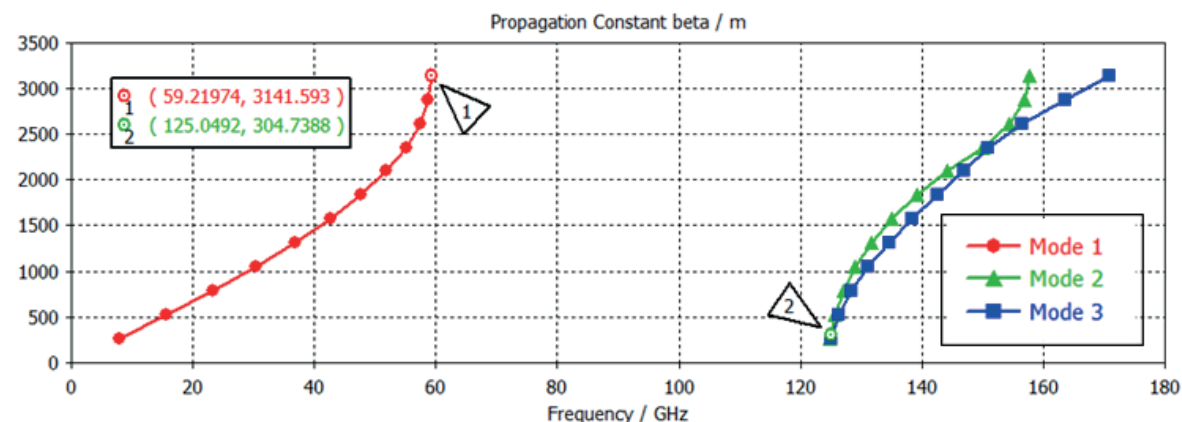


Figura 4. Diagrama de dispersión.

Diseño de la superficie AMC

Esta configuración de alta impedancia induce un modo de propagación TE_{10} , similar al de una guía de onda rectangular estándar. Idealmente, las estructuras periódicas deberían tener una extensión infinita para evitar por completo la fuga de energía. La (figura 5) ilustra la sección transversal de la estructura GGW, donde se observa que se pueden lograr valores de pérdidas muy bajos con la implementación de tres filas de pines. Este diseño limita la propagación de potencia en las regiones laterales, logrando el efecto deseado de imponer una prohibición de propagación [14,15]. El diagrama de dispersión resultante, mostrado en la figura 6, evidencia la propagación del modo cuasi-TEM en el rango de frecuencias prohibido por la estructura AMC.

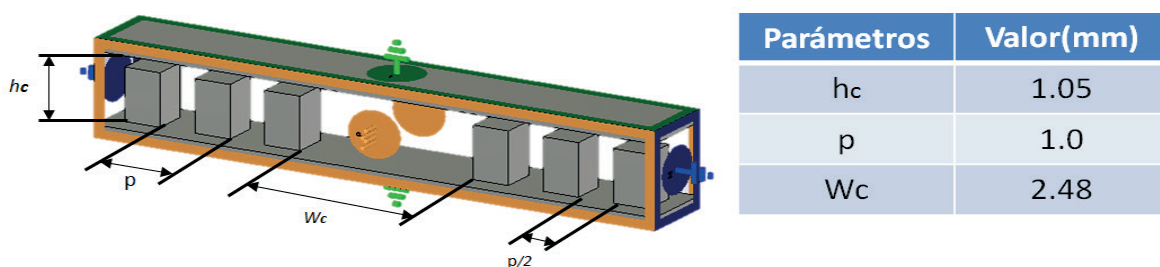


Figura 5. Sección transversal de la estructura GGW.

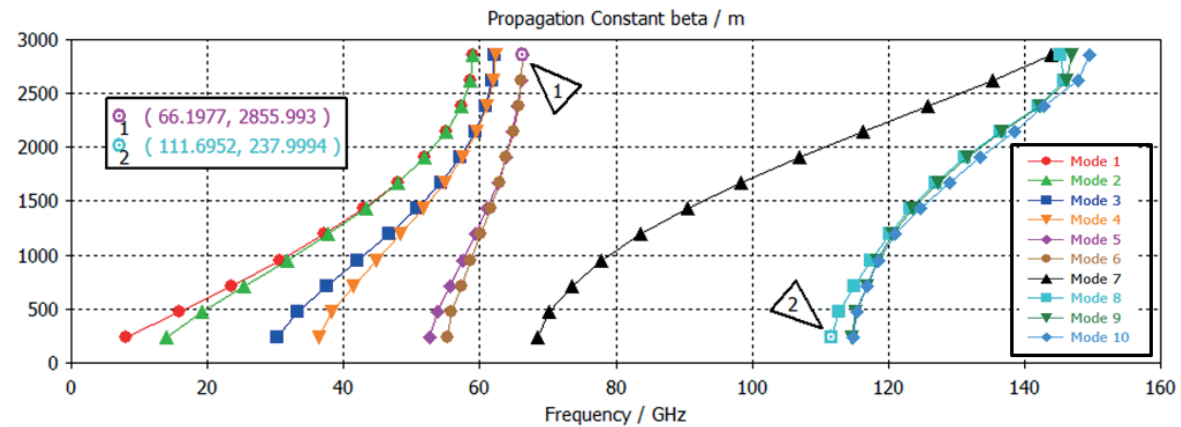


Figura 6. Diagrama de dispersión de la superficie AMC.

Diseño del arreglo del 2x2 con tecnología Groove Gap Waveguide

Este apartado se centra en presentar el diseño de un arreglo de antena basado en tecnología GGW. El objetivo es establecer principios que guíen un desarrollo más profundo que permitan alcanzar una mayor eficiencia en la banda W, con una frecuencia central de 94GHz. Los parámetros del arreglo de antena, que se utilizarán para su diseño, se resumen en la (cuadro 1).

Cuadro 1. Parámetros del diseño de arreglo de antena.

Parámetro	Valor (mm)	Parámetro	Valor (mm)
a	1.20	S_3	1.37
b	0.56	S_4	1.29
S_1	0.17	Wa	11.90
S_2	0.63	La	11.60

Para un arreglo de antenas de 2x2, que consta de 4 elementos radiantes, se requiere una red de alimentación que distribuya la potencia hacia cada uno de ellos. En este caso, se optó por una red de alimentación corporativa mediante uniones en T, debido a su capacidad para distribuir la potencia con una distribución específica. La geometría de la red de alimentación propuesta se muestra en la (figura 7).

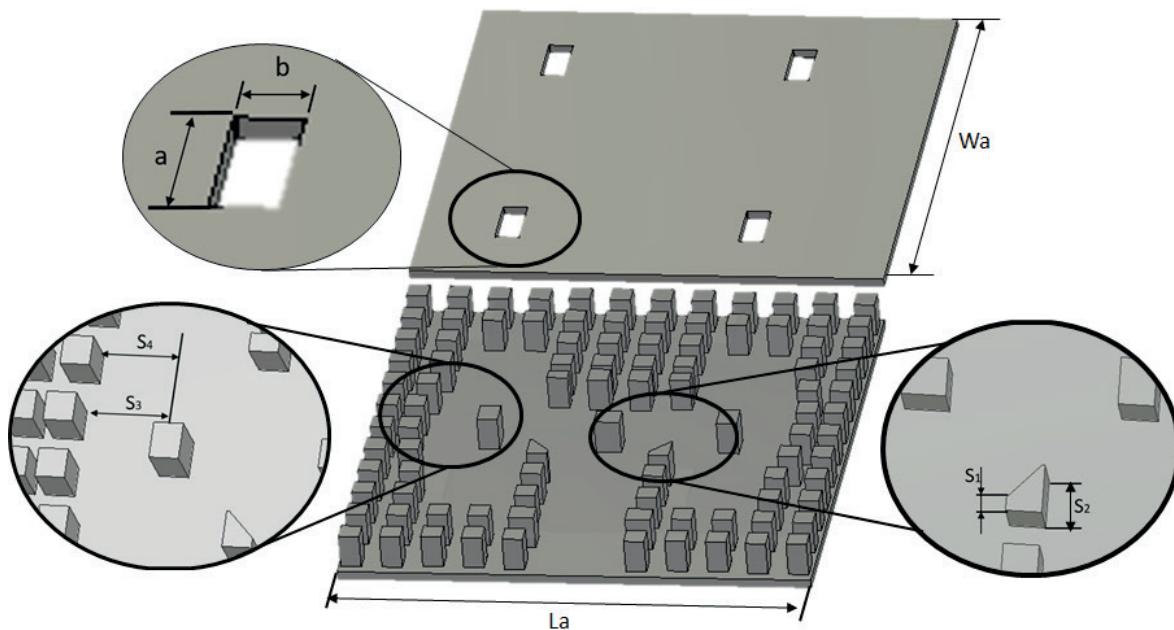


Figura 7. Divisor de potencia en T.

La (Figura 7) ilustra el diseño final del arreglo de antenas, incluyendo el ajuste de las dimensiones de los pines. Con el objetivo de optimizar la adaptación en el diseño de antenas GGW, se redujo el tamaño de la estructura. Esta modificación facilita una distribución más eficiente de la señal, debido a las dimensiones de los pines seleccionados.

La (Figura 8) muestra el parámetro S_{11} , evidenciando que la configuración de la antenna logra un coeficiente de reflexión inferior a -10 dB, con un pico de resonancia a 94 GHz. Este resultado indica una excelente adaptación, con un coeficiente de reflexión de aproximadamente -26 dB. La respuesta se encuentra bien centrada en la frecuencia esperada y presenta un ancho de banda del 17.2%.

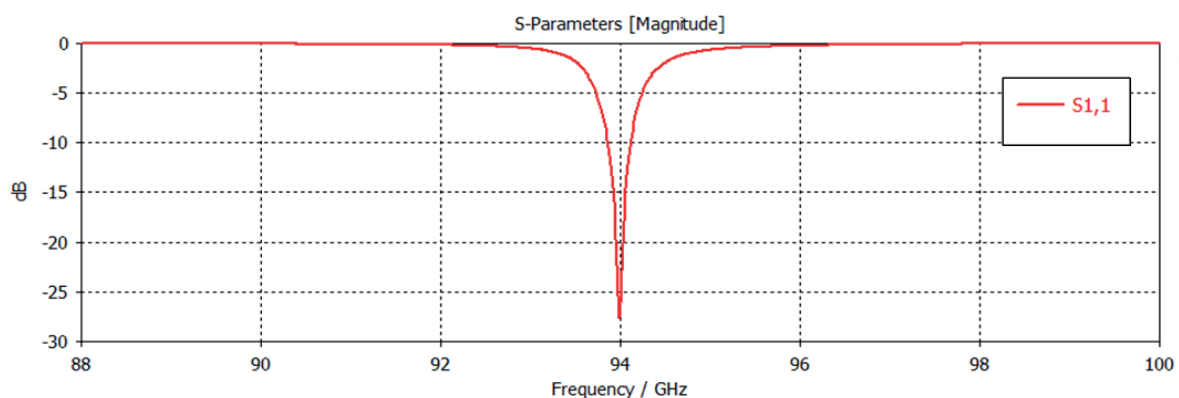


Figura 8. Parámetros S_{11} .

Esta configuración genera una estructura más compacta, con redes de distribución diseñadas para tolerar imprecisiones de fabricación que podrían afectar negativamente el rendimiento de la antenna. La tecnología GW se aprovecha en este diseño, y como se observa en la (figura 9), la distribución de potencia y la diferencia de fase se mantienen óptimas en la simulación, asegurando un desempeño eficiente de la antenna.

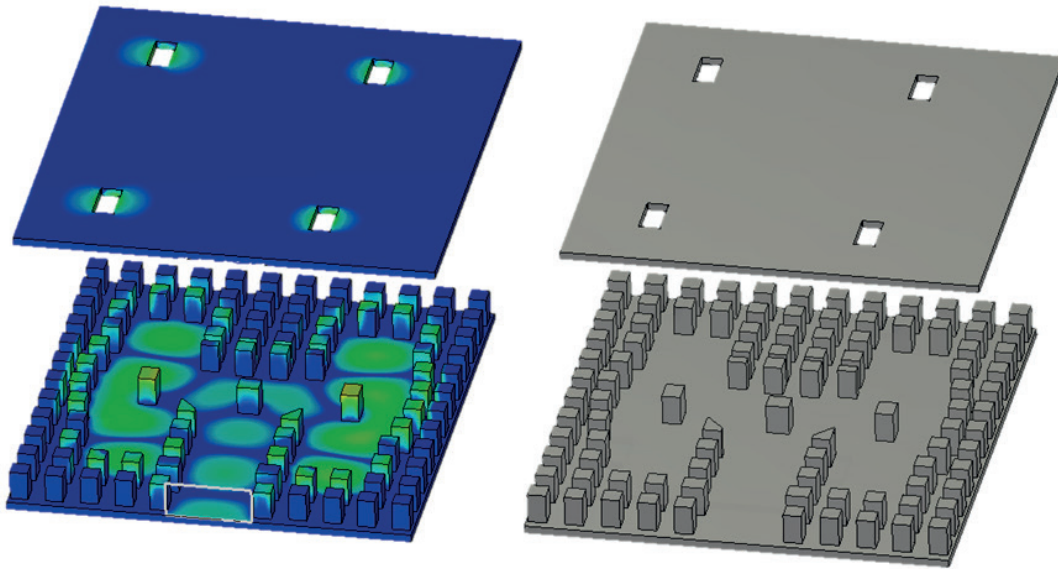


Figura 9. Comportamiento del campo eléctrico dentro de la estructura.

La (Figura 10) muestra la estructura completa del arreglo de antena, la cual presenta una ganancia de 12.2 dBi. Esta configuración exhibe un patrón de radiación multilobular, lo que la hace ideal para aplicaciones específicas. En consecuencia, esta tecnología se posiciona como una alternativa viable para superar las limitaciones de fabricación en el diseño de antenas para la banda de ondas milimétricas (mmWave).

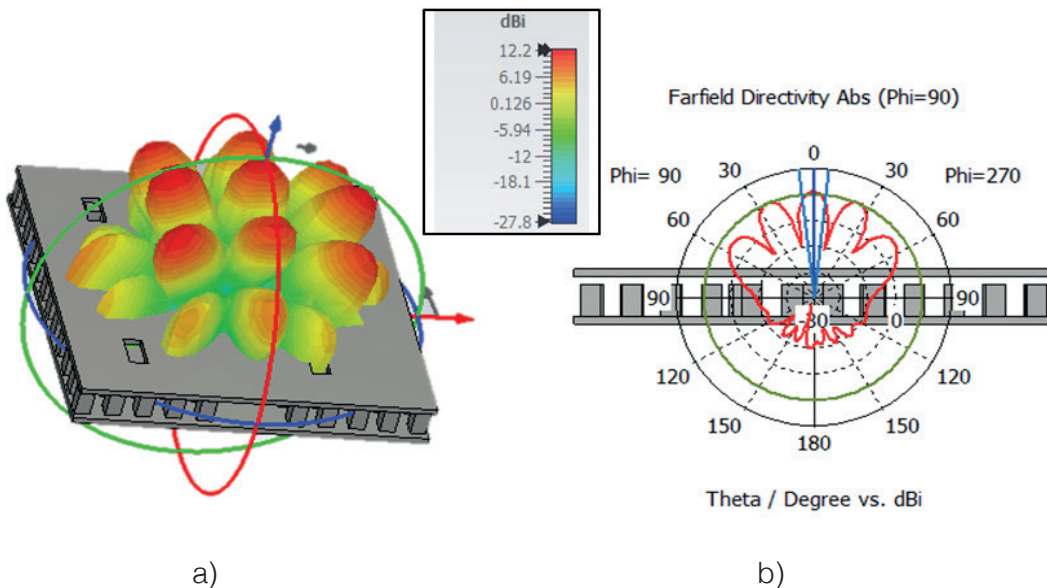


Figura 10. a) Ganancia, b) Patrón de radiación en coordenadas polares.

Conclusiones

Este trabajo presenta un arreglo de antena de 2x2 con tecnología GGW que cumple con los requisitos para operar en la banda de 94 GHz. La configuración muestra un patrón de radiación multilobular, lo que la hace ideal para aplicaciones específicas. Se logró una ganancia de 12.2 dBi y un ancho de banda de trabajo del 17.2%, valores aceptables para un funcionamiento óptimo en la banda de interés.

La tecnología GGW permite la creación de estructuras más compactas y ligeras en comparación con las guías de ondas tradicionales, lo cual es crucial para la miniaturización de los dispositivos de comunicación en la mmWave. Esta tecnología se presenta como una solución viable para superar las limitaciones de fabricación en el diseño de antenas hacia las nuevas generaciones de telefonía móvil, como la 6G, y para la integración de sistemas de transmisión y recepción con escenarios multienlace.

Referencias

- [1] Z. Liwen, F. Qamar, M. Liaqat, M. Nour Hindia and K. Akram Zainol Ariffin, "Toward Efficient 6G IoT Networks: A Perspective on Resource Optimization Strategies, Challenges, and Future Directions," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 76606-76633, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3405487.
- [2] A. Blika et al., "Federated Learning For Enhanced Cybersecurity And Trustworthiness In 5G and 6G Networks: A Comprehensive Survey," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, doi: 10.1109/OJCOMS.2024.3449563.
- [3] M. Rabbanifard, D. Zarifi, A. Farahbakhsh and M. Mrozowski, "Design of Compact and Wideband Groove Gap Waveguide-Based Directional Couplers," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 86346-86354, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3416290.
- [4] A. Kalantari Khandani, A. Farahbakhsh, D. Zarifi and A. Uz Zaman, "Millimeter Wave Wideband and Low-Loss Compact Power Divider Based on Gap Waveguide: For Use in Wideband Antenna Array System," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 116478-116488, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3441316.
- [5] Z. A. Masri, A. Jabri, Y. Tawk and J. Costantine, "A Groove Gap Waveguide Feeding Network for Dual-Circularly Polarized Antenna Arrays," in *IEEE Journal of Microwaves*, vol. 4, no. 3, pp. 512-520, July 2024, doi: 10.1109/JMW.2024.3404832.
- [6] D. Santiago, M. Fang, A. U. Zaman, M. A. G. Laso, T. Lopetegi and I. Arregui, "W-Band Filtering Antenna Based on a Slot Array and Stacked Coupled Resonators Using Gap Waveguide Technology," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 23, no. 8, pp. 2546-2550, Aug. 2024, doi: 10.1109/LAWP.2024.3399269.
- [7] P. Petroustos and S. Koulouridis, "A Metallo-Dielectric Groove Gap Waveguide Slotted Array Antenna With Hybrid Glide-Symmetric Holes & "Mushroom"-Type Metasurfaces," in *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, doi: 10.1109/OJAP.2024.3466472.
- [8] A. Morales-Hernández, M. Á. Sánchez-Soriano, M. Ferrando-Rocher, S. Marini and V. E. Boria, "In-Depth Study of the Corona Discharge Breakdown Thresholds in Groove Gap Waveguides and Enhancement Strategies for Inductive Bandpass Filters," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 129149-129162, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3228111.
- [9] A. Karami Horestani, Z. Shaterian and M. Mrozowski, "Low-Loss Mechanically Tunable Resonator and Phase Shifters in Groove Gap Waveguide Technology," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 70964-70970, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3186988.
- [10] D. Santiago, M. A. G. Laso, T. Lopetegi and I. Arregui, "Novel Design Method for Millimeter-Wave Gap Waveguide Low-Pass Filters Using Advanced Manufacturing Techniques," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 89711-89719, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3305956.
- [11] A. Morales-Hernández, M. Á. Sánchez-Soriano, M. Ferrando-Rocher, S. Marini and V. E. Boria, "In-Depth Study of the Corona Discharge Breakdown Thresholds in Groove Gap Waveguides and Enhancement Strategies for Inductive Bandpass Filters," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 129149-129162, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3228111.
- [12] M. Ferrando-Rocher, J. I. Herranz-Herruzo, A. Valero-Nogueira and B. Bernardo-Clemente, "Single-Layer Sequential Rotation Network in Gap Waveguide for a Wideband Low-Profile Circularly Polarized Array Antenna," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 62157-62163, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3182336.

- [13] A. H. Haghparast and P. Rezaei, "Miniaturized, broadband, circular polarized horn antenna with Groove gap waveguide technology," in *Radio Science*, vol. 59, no. 8, pp. 1-10, Aug. 2024, doi: 10.1029/2024RS007965.
- [14] X. Cheng *et al.*, "W-Band Binary Phase-Controlled Multibeam Antenna Array Based on Gap Waveguide Magic-Tee," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 70, no. 9, pp. 7565-7577, Sept. 2022, doi: 10.1109/TAP.2022.3162031.
- [15] J. Yue, C. Zhou, K. Xiao, L. Ding and S. Chai, "W-Band Low-Sidelobe Series-Fed Slot Array Antenna Based on Groove Gap Waveguide," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 22, no. 4, pp. 908-912, April 2023, doi: 10.1109/LAWP.2022.3228115.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Modificación de un potencióstato de bajo costo para su uso en la síntesis y verificación de la pseudocapacitancia del MnO_2

Modification of a low-cost potentiostat for its use in the synthesis and verification of the pseudocapacitance of the MnO_2

Omar Rojas-Bolaños¹, Alejandro Delgado-Castro²

Fecha de recepción: 16 de setiembre, 2024


Fecha de aprobación: 8 de enero, 2025

Rojas-Bolaños, O; Delgado-Castro, A. Modificación de un potencióstato de bajo costo para su uso en la síntesis y verificación de la pseudocapacitancia del MnO_2 . *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 3. Julio-Setiembre, 2025. Pág. 162-175.


 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i3.7239>

1 Universidad de Costa Rica, Sede Guanacaste. Costa Rica.

 omar.rojas@ucr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0001-8876-3181>

2 Universidad de Costa Rica, Sede Guanacaste. Costa Rica.

 alejandro.delgadocastro@ucr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0002-5475-7813>

Palabras clave

Potenciostato de bajo costo; Arduino; óxido de manganeso (IV); electrodeposición; voltametría cíclica; Ley de Ohm.

Resumen

En este trabajo, se proponen modificaciones al circuito de un potenciostato de bajo costo previamente publicado, y se crean programas para su operación desde el Entorno Integrado de Desarrollo (IDE) de Arduino. Con estos cambios se busca eliminar la dependencia del software propietario, y mejorar la calidad de las mediciones en pruebas que requieren corrientes mayores que las presentadas en el artículo original. Durante la evaluación de las modificaciones propuestas, el potenciostato modificado muestra un mejor rendimiento que su versión original y sus resultados concuerdan con los obtenidos con un equipo profesional. En la prueba de comprobación de la Ley de Ohm, el equipo propuesto logra estimar el valor de los resistores utilizados con un error menor al 1%. En la electrodeposición del MnO_2 , el equipo alcanza corrientes cercanas a 5mA, y en la voltametría cíclica de los depósitos generados, se logra obtener voltamogramas de forma rectangular que concuerdan con las propiedades pseudo capacitivas reportadas para el MnO_2 . Estos resultados apoyan el uso de instrumentos basados en plataformas de hardware libre en procesos de enseñanza e investigación.

Keywords

Low-cost potentiostat; Arduino; manganese dioxide; electrodeposition; cyclic voltammetry; Ohm's law.

Abstract

In this work, several modifications to the circuit of a previously-presented low-cost potentiostat are proposed, and new software is created using the Arduino Integrated Development Environment (IDE). These changes are introduced to reduce the dependency of licensed software and to improve the accuracy of the measurements in tests that require higher currents than those reported in the original paper. During evaluation, the modified potentiostat shows better performance than the original version and its results are similar to those obtained with a professional equipment. In the verification of Ohm's Law, the modified equipment can estimate the values of the underlying resistors with an error lower than 1%. During the MnO_2 electrodeposition, the equipment reaches current values close to 5mA and the rectangular shape of the cyclic voltammograms of the produced MnO_2 films are consistent with the previously reported pseudocapacitive properties of MnO_2 . These results support the use of instruments based on open-source platforms in teaching and research activities.

Introducción

El estudio de los sistemas de almacenamiento de energía como baterías o capacitores electroquímicos ha cobrado fuerza en los últimos años por su estrecha relación con el desarrollo y uso de energías limpias, la disminución del calentamiento global y la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles [1-2]. Aunado a este campo de investigación, se encuentra la necesidad de contar con instrumentos de medición especializados como voltímetros, amperímetros, osciloscopios, y potenciostatos.

El potencióstato es un instrumento de laboratorio que permite a la persona usuaria aplicar un voltaje de celda constante o variable con el tiempo, entre un electrodo de Trabajo y un electrodo de Referencia. Durante su funcionamiento, el potencióstato registra el tiempo transcurrido durante la prueba, el voltaje de celda aplicado, y la corriente de celda que fluye del electrodo de Trabajo a un tercer electrodo llamado Auxiliar [3].

A pesar de que los potencióstatos son instrumentos de uso cotidiano en un laboratorio de electroquímica, su precio puede resultar restrictivo para algunas instituciones [4]. En respuesta a esta situación, se han publicado trabajos académicos que describen la construcción de potencióstatos de bajo costo. Por ejemplo, Dobbelaere, Vereecken y Detavernier [5] reportaron la construcción de un potencióstato utilizado para la caracterización de electrodos para baterías de iones de litio. A su vez, Irving, Cecil y Yates [6] presentaron una versión mejorada del diseño original de Dobbelaere. Anshori et al. [7] propusieron la construcción de un potencióstato de bajo costo multicanal y capaz de llevar a cabo seis métodos electroquímicos diferentes. Por su parte Matsubara [8] mostró la construcción de un sistema electroquímico triple: potencióstato, galvanostato y espectrómetro de impedancia electroquímica. En estas propuestas, la complejidad de los circuitos es un obstáculo importante que podría dificultar su construcción y comprensión. Meloni [9] propuso un potencióstato basado en la placa Arduino y en un circuito de control que utiliza varias fuentes de alimentación, que luego utilizó para realizar una voltametría cíclica a una disolución de Ferricianuro de Potasio. Steijlen et al. [10] reportaron la construcción de un potencióstato controlado por una unidad Raspberry Pi Pico, y lo utilizaron en el análisis de tabletas de paracetamol por voltametría cíclica y voltametría de onda cuadrada. Por su parte, Li et al. [11] publicaron la construcción del potencióstato denominado JUAMI (Joint Undertaking for an African Materials Institute), también basado en la plataforma Arduino, y que presenta varias ventajas que influyeron en la decisión de utilizarlo como base en la presente investigación, entre ellas:

1. Las instrucciones para su construcción son claras y sencillas.
2. Utiliza una sola fuente de alimentación externa, que se toma a partir de los 5V que suministra el puerto USB del computador.
3. Los autores reportan un rango de corrientes de celda de aproximadamente ± 10 mA, por lo que el equipo podría ser utilizado en la síntesis y evaluación de materiales pseudo capacitivos como el MnO_2 , utilizado en la fabricación de capacitores electroquímicos [1].

No obstante, durante las pruebas electroquímicas presentadas en el artículo original, se utilizaron microelectrodos de trabajo que limitaron las corrientes máximas de celda a valores cercanos a 2 mA [11]. Por lo tanto, se vuelve importante someter al equipo a pruebas que le exijan entregar corrientes más cercanas a los límites máximos reportados y así evaluar su idoneidad para ser utilizado en otro tipo de ensayos. Además, el diseño original del potencióstato JUAMI no permite acceder al código fuente del software de control, por lo que la persona usuaria no puede llevar a cabo modificaciones o ajustes del potencióstato. Otras limitantes del equipo JUAMI fueron señaladas por Elias [12].

En este trabajo se realizan modificaciones al circuito del potencióstato JUAMI original y se presentan nuevos programas para su operación desde el Entorno Integrado de Desarrollo (IDE) de Arduino. Con estos cambios se busca eliminar la dependencia del software propietario, y mejorar el desempeño del equipo en pruebas electroquímicas que le exigen al potencióstato entregar corrientes de celda superiores a las presentadas en el artículo original [11]. La evaluación de los cambios propuestos se realiza comparando los resultados obtenidos con el potencióstato JUAMI original y su versión modificada, con los resultados producidos por un potencióstato profesional.

El buen desempeño del potencióstato modificado refuerza las posibles ventajas de utilizar equipos basados en plataformas de hardware libre y de código abierto como herramientas de bajo costo en los procesos de enseñanza e investigación.

Materiales y métodos

Se construyen dos versiones del potencióstato JUAMI. La primera, denominada JUAMI Original y una segunda versión, denominada JUAMI Modificado. Se realizan tres pruebas distintas para evaluar el desempeño de ambos potencióstatos. Primero, se realiza la comprobación de la Ley de Ohm. La segunda prueba consiste en la electrodeposición del MnO_2 sobre placas de acero inoxidable. La tercera prueba es la voltametría cíclica del mismo compuesto. En estas tres pruebas se utiliza como equipo de referencia el potencióstato profesional PalmSens 4, con el software PSTrace 5. Todas las disoluciones se preparan a partir de reactivos calidad analítica y agua desionizada.

Construcción del potencióstato JUAMI.

El potencióstato JUAMI Original, se construye siguiendo los lineamientos descritos por Li et al. [11]. La versión denominada JUAMI Modificado se construye de manera muy similar, pero eliminando cuatro resistores de $68\ \Omega$ que se encuentran en el diseño original, dos de ellos en serie con los electrodos Auxiliar y Trabajo, respectivamente, y dos más que se encuentran en serie con las terminales A0 y A2 del circuito, respectivamente. Eliminar los dos primeros resistores permite evitar que aparezcan voltajes significativos en ellos que puedan afectar la medición del voltaje de celda, cuando la corriente de celda es alta. Las otras dos resistencias se eliminan debido a que, en pruebas de laboratorio realizadas previamente, no se logró observar que estos elementos cumplieran una función real de filtrado que pudiera contribuir a reducir el ruido en las mediciones de voltaje y corriente de celda. En ambas versiones del equipo JUAMI, se utiliza una resistencia de realimentación de $220\ \Omega$ en el amplificador operacional que actúa como seguidor de corriente, tal y como se indica en el diseño original [11].

Software de Control

El potencióstato JUAMI requiere de un software de control que permite la comunicación entre el circuito electrónico y el computador. Para la versión JUAMI Original se utiliza el software propuesto por Li et al. [11], el cual requiere de la plataforma LabView. Para el JUAMI Modificado se crean nuevos programas de control en el Entorno Integrado de Desarrollo (IDE) de Arduino, uno para cada prueba. Además, se crea un programa de ajuste del potencióstato el cual permite obtener las curvas de calibración requeridas para estimar los valores de PWM necesarios para una determinada prueba, así como el voltaje de celda y la corriente de celda. Estos programas, y el proceso de ajuste, se detallan en el anexo.

Comprobación de la Ley de Ohm

En esta prueba se realizan mediciones de corriente y voltaje en una celda ficticia [13], que consiste en conectar una resistencia de carbón entre los electrodos Auxiliar y Trabajo del potencióstato que se está evaluando, mientras que el electrodo de Referencia se conecta en corto circuito con el electrodo Auxiliar, como se muestra en el diagrama de la Figura 1. El objetivo de la prueba es estimar el valor real de la resistencia de carbón a partir de las mediciones de corriente y voltaje realizadas con el equipo, usando la Ley de Ohm [14].

En este experimento se utilizan tres resistores para electrónica, con potencias máximas de $0,5\ \Omega$ y valores teóricos de $100\ \Omega$, $1\ \text{k}\Omega$ y $10\ \text{k}\Omega$, con el fin de evaluar el equipo ante diferentes niveles de corriente de celda. Los valores reales de estos elementos se miden por medio de un multímetro digital de la marca Tektronix, modelo DMM 4040, número de serie 2129102, y certificado de calibración F5900065.

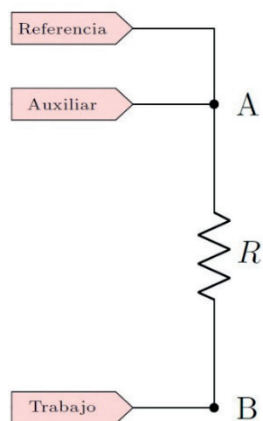


Figura 1. Diagrama de conexión de los electrodos a las terminales de la resistencia.

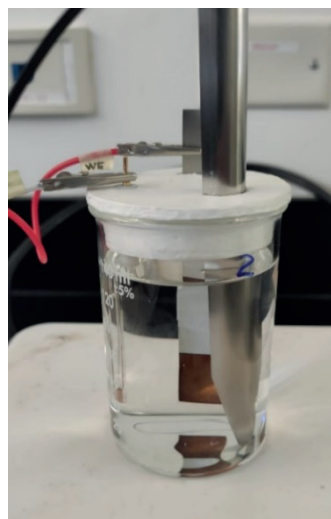


Figura 2. Fotografía de la celda electroquímica utilizada.

Electrodeposición de Óxido de Manganeso (IV)

Para esta prueba electroquímica se siguieron los lineamientos definidos por Licht et al. [1]. Se construye una celda electroquímica formada por un vaso de precipitados de 150 mL, previsto de una tapa con agujeros para sostener los tres electrodos. Como electrodo de trabajo se utiliza una lámina de acero inoxidable ($4,0\ \text{cm}^2$ de área de exposición), como electrodo de Referencia se utiliza un electrodo comercial de Ag/AgCl ($\text{KCl}\ 1\ \text{molL}^{-1}$), y una espátula de laboratorio acanalada como electrodo Auxiliar. Dentro del vaso de precipitados se colocan 140 mL de una disolución de $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ $0,2\ \text{molL}^{-1}$, y se aplica agitación con pastilla magnética a 350 rpm. Se aplica un voltaje de celda de $+1,0\ \text{V}$ durante 60 s, y se registra con el equipo la corriente de celda durante ese tiempo. La Figura 2 muestra una vista general de la celda usada.

Este experimento se realiza de igual manera con cada potenciostato en estudio: PalmSens 4, JUAMI Original, y JUAMI Modificado. Ahora bien, por cada uno de estos equipos se utilizan 140 mL de disolución de $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ $0,2\ \text{molL}^{-1}$, y con ella se generan cuatro depósitos de Óxido de Manganeso (IV), en cuatro electrodos de acero diferentes, con el objetivo de evaluar la reproducibilidad del experimento y el posible impacto de la disminución en la concentración del reactivo en la calidad de los depósitos.

Voltametría Cíclica de los Depósitos de Óxido de Manganeso (IV)

En esta prueba se siguen los lineamientos definidos por Licht et al. [1]. A cada uno de los electrodos generados en la prueba de electrodeposición, se le aplica una voltametría cíclica utilizando el mismo equipo con el que se generó el depósito, y una celda electroquímica similar a la mostrada en la Figura 2, utilizando como electrolito 140 mL de Na_2SO_4 $0,5\ \text{molL}^{-1}$ sin agitación. En todos los casos, como voltaje de celda se aplica un barrido con los siguientes

parámetros: voltaje mínimo de +0,4 V; voltaje máximo de +0,8 V; velocidad de barrido de 10 mVs⁻¹, y número de ciclos igual a 15. En cada prueba el equipo correspondiente registra el voltaje y la corriente de celda.

Resultados

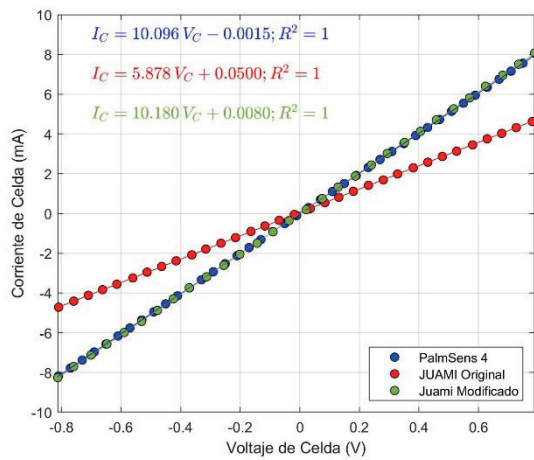
En la primera prueba, cuya finalidad era comprobar la Ley de Ohm para tres valores de resistencia de celda, se obtuvieron las gráficas de corriente de celda contra voltaje de celda presentadas en la Figura 3, mientras que el Cuadro 1, muestra los porcentajes de error registrados por cada equipo en la estimación de la resistencia de celda a partir de la pendiente de la recta de mejor ajuste correspondiente.

Cuadro 1. Porcentajes de error obtenidos en la estimación de las resistencias de celda a partir de las pendientes de las gráficas de corriente de celda contra voltaje de celda, para cada uno de los potencióstatos en estudio.

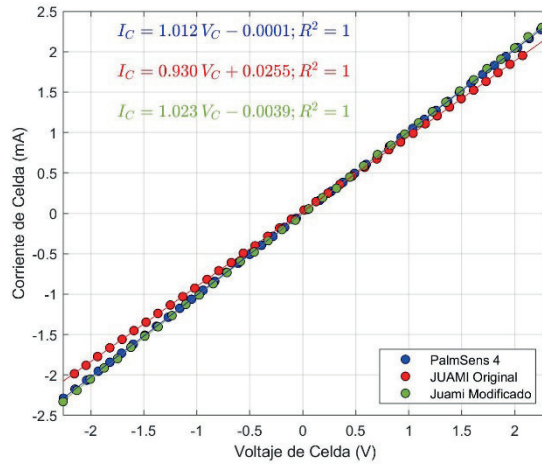
Potenciostato	Error (%)		
	100 Ω	1 k Ω	10 k Ω
PalmSens 4	0,1	0,2	0,2
JUAMI Original	72,0	9,0	2,4
JUAMI Modificado	0,8	0,9	0,3

Las gráficas de la Figura 3 muestran que los tres equipos proporcionan resultados lineales. No obstante, las rectas generadas por el potencióstato JUAMI Original se desvían de las generadas por el potencióstato profesional PalmSens 4, principalmente para la resistencia de celda de 100 Ω . Por el contrario, las rectas generadas con el potencióstato JUAMI Modificado, resultan ser muy similares a las generadas por el equipo profesional, para las tres resistencias de celda analizadas. Esto se debe a que el potencióstato JUAMI Modificado no contiene la resistencia de 68 Ω en serie con el electrodo de Trabajo, la cual incrementa el valor de la resistencia de celda. Este efecto se vuelve más notorio conforme el valor de la resistencia de celda se acerca a los 68 Ω , como se observa en las gráficas de la Figura 3.

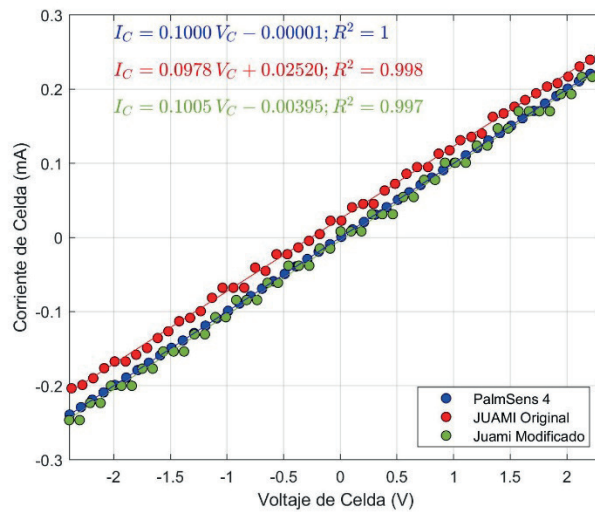
En los resultados del Cuadro 1 se observa que el potencióstato PalmSens 4 obtuvo los porcentajes de error más bajos a la hora de estimar el valor real de cada resistencia de celda, en promedio 0,17 %. En segundo lugar, se ubicó el potencióstato JUAMI Modificado, que arrojó un error promedio de 0,67 %. Finalmente, el potencióstato con el mayor error en las mediciones fue el JUAMI Original, que arrojó en promedio 27,80 %, donde la estimación de la resistencia de celda de 100 Ω fue la más problemática. Estos resultados evidencian que los cambios introducidos en el circuito y en el programa de control tienen un impacto positivo en su desempeño, en esta prueba en particular. Ahora, considerando los buenos resultados arrojados por el equipo PalmSens 4, se refuerza la decisión de utilizar este equipo como referencia para las siguientes pruebas.



(a)



(b)



(c)

Figura 3. Gráficas de corriente de celda contra voltaje de celda obtenidas con los tres potenciostatos en estudio, para tres valores distintos de resistencia de celda: (a) 100 Ω. (b) 1 kΩ. (c) 10 kΩ.

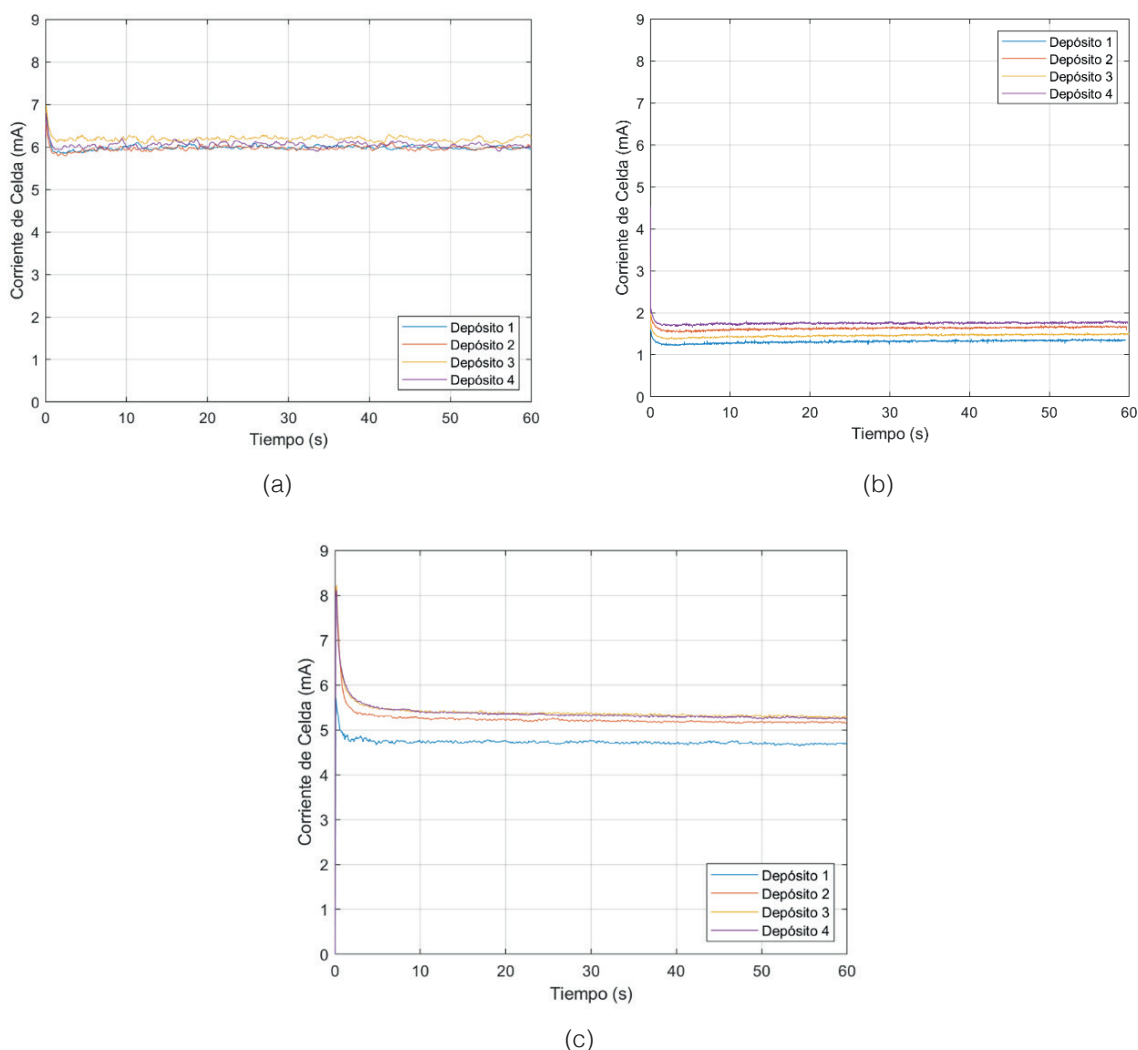


Figura 4. Gráficas de corriente contra tiempo para cuatro electrodeposiciones de Óxido de Manganeso (IV) generados con los tres equipos en estudio. a) PalmSens 4. b) JUAMI Original. c) JUAMI Modificado.

Para la prueba de electrodeposición, las curvas de corriente contra tiempo obtenidas para cada uno de los equipos en estudio se presentan en la Figura 4. En esta prueba, el potenciostato profesional PalmSens 4 mantiene una corriente de aproximadamente 6 mA durante la generación de los 4 electrodepósitos, como se observa en la Figura 4a. Por su parte, el equipo JUAMI Original no logra alcanzar este nivel de corriente en ninguno de los electrodepósitos realizados, como se ve en la Figura 4b. Esto podría deberse a problemas a la hora de establecer el voltaje de celda requerido, mismo que debe mantenerse constante durante toda la prueba, y a problemas a la hora de medir la corriente de celda.

El JUAMI Modificado en cambio, parece tener un mejor control del voltaje de celda deseado, como se observa en la Figura 4c, así como una mayor exactitud a la hora de medir la corriente de celda, por lo que sus gráficas se asemejan más a las producidas con el PalmSens 4.

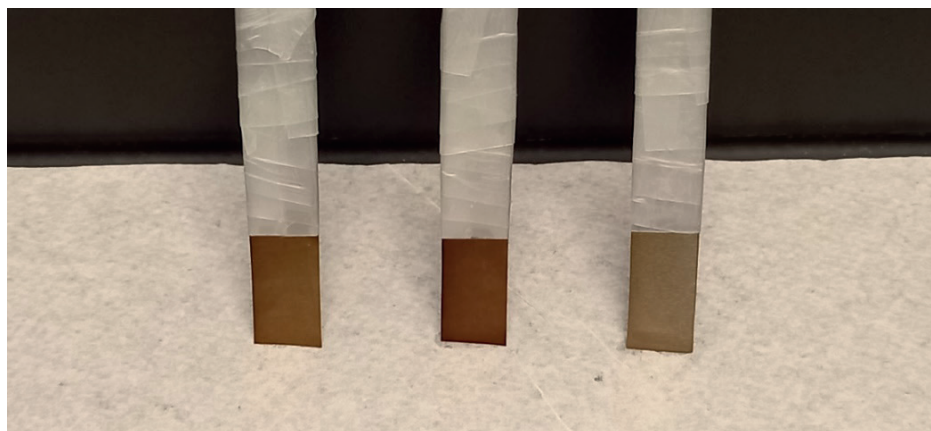


Figura 5. Depósitos de Óxido de Manganeso (IV) realizados con cada potenciostato en estudio. De izquierda a derecha: JUAMI Modificado, PalmSens 4, y JUAMI Original.

La Figura 5 muestra tres de los depósitos realizados, uno por cada potenciostato en estudio. En ella llama la atención el color más claro del depósito generado por el equipo JUAMI Original, el cual está asociado con una menor cantidad de Óxido de Manganeso (IV) depositado, debido a la baja corriente entregada por el equipo durante la prueba. El color del depósito generado con el JUAMI Modificado es más oscuro, por lo que hay una mayor cantidad del producto en él, y es más semejante al color oscuro del depósito producido por el potenciostato PalmSens 4.

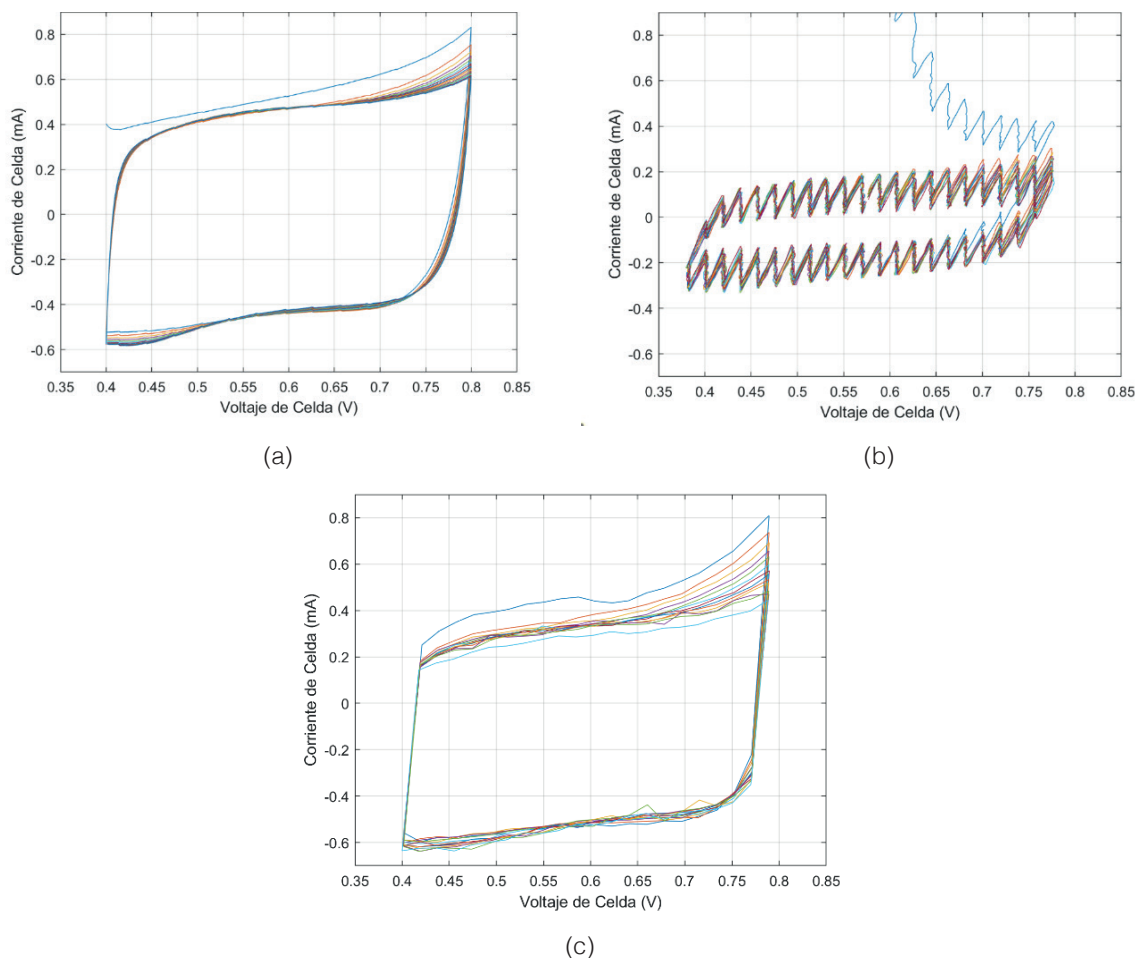


Figura 6. Voltamogramas cíclicos para un electrodepósito de Óxido de Manganeso (IV) utilizando los tres equipos en estudio. a) PalmSens 4. b) JUAMI Original. c) JUAMI Modificado.

Los resultados obtenidos durante las voltametrías cíclicas se presentan en la Figura 6. Para facilitar la lectura de las gráficas, se considera únicamente uno de los cuatro depósitos obtenidos con cada uno de los equipos estudiados. La forma general del voltamograma obtenido con el potenciostato PalmSens 4 es muy similar a la reportada por otros grupos de investigación [15], y su forma cuasi rectangular se asocia con las propiedades pseudo capacitivas del Dióxido de Manganeso (IV) [1]. El voltamograma generado por el equipo JUAMI Original presenta la forma básica esperada, pero contiene una gran cantidad de ruido en las mediciones. Además, este voltamograma no logra las mismas corrientes máximas y mínimas alcanzadas por el PalmSens 4. El JUAMI Modificado, por su parte, produjo un voltamograma mucho más cercano al del PalmSens 4, con una cierta cantidad de ruido de medición, pero se alcanzan las corrientes máximas y mínimas esperadas.

Conclusiones

En este estudio se plantearon modificaciones a un potenciostato de bajo costo, presentado en un estudio anterior, y se comparó su desempeño contra el de un equipo profesional en tres pruebas electroquímicas diferentes, con el fin de evaluar el nivel de mejoría en la exactitud de los resultados generados, y así explorar la posibilidad de incorporar esta alternativa en actividades asociadas con la enseñanza de la química, y de ser posible, en trabajo de investigación.

Los resultados obtenidos mostraron una mejoría en la exactitud de las mediciones realizadas con el potenciostato de bajo costo modificado. En la comprobación de la Ley de Ohm, el equipo propuesto presentó un comportamiento lineal y un error de estimación similar al mostrado por el potenciostato profesional. Durante la electrodeposición del MnO_2 , se alcanzaron corrientes de celda más cercanas a las esperadas con el potenciostato modificado, lo que mejoró la calidad de los depósitos. Los voltamogramas realizados con el equipo propuesto presentaron la forma esperada y mayor simetría, permitiendo identificar de forma más clara las propiedades pseudocapacitivas del MnO_2 .

En futuras investigaciones se evaluará la posibilidad de crear una interfaz gráfica de usuario que permita manipular el potenciostato de una manera más intuitiva, para así facilitar su uso en prácticas de laboratorio donde se trabaje con personas estudiantes. Así mismo, se estudiarán otras posibles modificaciones en el circuito de control, que permitan mejorar aún más el desempeño de este potenciostato.

Agradecimientos

Se agradece a la Sede Regional de Guanacaste de la Universidad de Costa Rica por el apoyo brindado a esta iniciativa de investigación, en particular, por el espacio físico, el equipo, y los materiales utilizados para la realización de las pruebas de laboratorio.

Referencias

- [1] Licht, F., Aleman Milan, G. y Andreas, H. (2018). *Bringing Real-World Energy-Storage Research into a Second-Year Physical-Chemistry Lab Using a MnO_2 -Based Supercapacitor*. J. Chem. Educ., 95(11), 2028-2033. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.8b00454>
- [2] Liu, J., Bao, J., Zhang, X., Gao, Y., Zhang, Y., Liu, L. y Cao, Z. (2022). *MnO_2 -based materials for supercapacitor electrodes: challenges, strategies and prospects*. RSC Adv., 12, 35556-35578. <https://doi.org/10.1039/D2RA06664E>
- [3] Colburn, A. W., Levey, K. J., O'Hare, D. y Macpherson, J. V. (2021). *Lifting the lid on the potentiostat: a beginner's guide to understanding electrochemical circuitry and practical operation*. Phys. Chem. Chem. Phys., 23(14), 8100-8117. <https://doi.org/10.1039/D1CP00661D>

- [4] Zuben, T. W., Salles, A. G. y Bonacin, J. A. (2024). *Low-cost open-source potentiostats: A comprehensive review of DIY solutions and fundamental concepts of electronics and its integration with electrochemistry*. *Electrochimica Acta*, 498, 144619. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2024.144619>
- [5] Dobbelaere, T., Vereecken, P. M. y Detavernier, C. (2017). *A USB-controlled potentiostat/galvanostat for thin-film battery characterization*. *HardwareX*, 2(1), 34-49. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ohx.2017.08.001>
- [6] Irving, P., Cecil, R. y Yates, M. Z. (2021). *MYSTAT: A compact potentiostat/galvanostat for general electrochemistry measurements*. *HardwareX*, 9, e00163. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2020.e00163>
- [7] Anshori, I., Ramadhan, I. F., Ariasena, E., Siburian, R., Affi, J., Handayani, M., Yunkins, H., Kuji, T., Mengko, T. L. E. R. y Harimurti, S. (2022). *ESPotensio: A Low-Cost and Portable Potentiostat With Multi-Channel and Multi-Analysis Electrochemical Measurements*. *IEEE Access*, 10, 112578-112593. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3213725>
- [8] Matsubara, Y. (2021). *A small yet Complete Framework for a Potentiostat, Galvanostat, and Electrochemical Impedance Spectrometer*. *J. Chem. Edu.*, 98(10), 3362-3370. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.1c00228>
- [9] Meloni, G. N. (2016). *Building a Microcontroller Based Potentiostat: A Inexpensive and Versatile Platform for Teaching Electrochemistry and Instrumentation*. *J. Chem. Educ.*, 93(7), 1320-1322. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.5b00961>
- [10] Steijlen, A., Docter, M., Bastemeijer, J., Topyla, M., Moraczewska, M., Hoekstra, T., Parrilla, M. y De Wael, K. (2024). *A Practical Guide to Build a Raspberry Pi Pico Based Potentiostat for Educational Electrochemistry and Electronic Instrumentation*. *J. Chem. Educ.*, 101(9), 3998-4004. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.4c00624>
- [11] Li, Y. C., Melenbrink, E. L., Cordonier, G. J., Boggs, C., Khan, A., Isaac, M. K., Nkhonjera, L. K., Bahati, D., Billinge, S. J., Haile, S. M., Kreuter, R. A., Crable, R. M. y Mallouk, T. E. (2018). *An Easily Fabricated Low-Cost Potentiostat Coupled with User-Friendly Software for Introducing Students to Electrochemical Reactions and Electroanalytical Techniques*. *J. Chem. Educ.*, 95(9), 1658-1661. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.8b00340>
- [12] Elias, J. S. (2024). *An Improved Potentiostat / Galvanostat for Undergraduate-Designed Electrochemical Laboratories*. *J. Chem. Educ.*, 101(4), 1703-1710. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.3c01044>
- [13] Ibrahim, N. F. A., Noor, A. M., Sabani, N., Zakaria, Z., Wahab, A. A., Manaf, A. A. y Johari, S. (2023). *We-VoltamoStat: A wearable potentiostat for voltammetry analysis with a smartphone interface*. *HardwareX*, 15, e00441. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2023.e00441>
- [14] Farhan, I. M., Aldy, M. N., Nabillah, J. y Adriyanto, F. (2021). *Design of Microcontroller-Based Potentiostat for Determination of Ethanol Integrated with Smartphone through Internet of Things*. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 1096 012073. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1096/1/012073>
- [15] Wu, M. y Hong, L. (2024). *Cyclic voltametric formation of hollow porous g-MnO₂ microspheres as stable electrodes for high-performance supercapacitors*. *Journal of Energy Storage*, 75, 109721. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109721>

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Anexos

Ajuste del potenciostato JUAMI Modificado

Se conecta una resistencia de carbón de 5.1 k Ω (R_L) entre los electrodos Auxiliar y Trabajo del potenciostato, mientras que los electrodos de Referencia y Auxiliar se conectan al mismo nodo. Se mide el valor real de R_L con un ohmímetro y se registra dicho valor. El voltaje en R_L se mide con un voltímetro, con su terminal positiva conectada al electrodo de Trabajo, y se ejecuta el programa de ajuste. Por medio de la terminal D9, el programa aplica durante algunos segundos una señal PWM con anchos de pulso entre 0 y 255 (valor de PWM), en intervalos de 17 unidades. El voltímetro registrará un valor de voltaje de celda (V_c) distinto para cada valor de PWM asignado. Se debe registrar manualmente cada uno de estos valores hasta que finalice la ejecución del programa. Posteriormente, se desconecta el voltímetro del sistema y se ejecuta

una vez más el programa de ajuste. Los valores registrados en los pines A0 y A2 durante la segunda ejecución del programa, se transfieren a una hoja electrónica y se calculan los valores promedio para cada valor de PWM utilizado. Para cada valor de PWM, se calcula la Corriente de Celda (I_c) utilizando la Ley de Ohm y los valores V_c y R_L . Luego, se construyen gráficas de V_c contra el valor de PWM; V_c contra el valor de A0; y el valor de A2 contra I_c . Se calculan las rectas de mejor ajuste en cada caso. De esta forma es posible obtener tres ecuaciones: V_c en función del valor de PWM; V_c en función del valor de A0; y valor de A2 en función de I_c . La primera ecuación permite calcular el valor de PWM necesario para aplicar un determinado voltaje de celda. La segunda y la tercera ecuación permiten calcular voltajes de celda y corrientes de celda a partir de los valores de A0 y A2 registrados durante los experimentos electroquímicos.

Código del programa de ajuste del potencióstato JUAMI:

```
void setup() {
  pinMode(9,OUTPUT);
  TCCR1B = TCCR1B & B11111000 | B00000001;
  Serial.begin(9600);
  Serial.print("PWM");
  Serial.print(",");
  Serial.print("A0");
  Serial.print(",");
  Serial.println("A2");
}

void loop() {
  int AT0;
  int AT2;
  for(int i=0;i<=255;i=i+17){
    analogWrite(9,i);
    for(int j=1;j<=60;j++){
      AT0=analogRead(A0);
      AT2=analogRead(A2);
      Serial.print(i);
      Serial.print(",");
      Serial.print(AT0);
      Serial.print(",");
      Serial.println(AT2);
      delay(100);
    }
  }
  analogWrite(9,LOW);
  Serial.flush();
  while(1);
}
```

Código del programa para la comprobación de la Ley de Ohm:

```
void setup() {
  pinMode(9,OUTPUT);
  TCCR1B = TCCR1B & B11111000 | B00000001;
  Serial.begin(9600);
  Serial.print("PWM");
  Serial.print(",");
  Serial.print("A0");
  Serial.print(",");
  Serial.println("A2");
}

void loop() {
  delay(2000);
  for(int i=0;i<=255;i++){
    analogWrite(9,i);
```

```
        Serial.print(i);  
        findAverage();  
    }  
    delay(2000);  
    analogWrite(9,LOW);  
    Serial.flush();  
    while(1);  
}  
void findAverage(){  
    int voltage_ave=0;  
    int current_ave=0;  
    int steptime=13; //tiempo que tarda en adicionar un dato al promedio ms  
    int average=15; //número de datos de A0 y A2 que serán promediados  
    int y=0;  
    for(y=0;y<average;y++){  
        delay(steptime);  
        int voltage=analogRead(0);  
        int current=analogRead(2);  
        voltage_ave=(voltage_ave+voltage);  
        current_ave=(current_ave+current);  
    }  
    voltage_ave=voltage_ave/average;  
    current_ave=current_ave/average;  
    Serial.print(",");  
    Serial.print(voltage_ave);  
    Serial.print(",");  
    Serial.println(current_ave);  
}
```

Código del programa para la electrodeposición de Oxido de Manganeso (IV):

```
void setup() {  
    pinMode(9,OUTPUT);  
    TCCR1B = TCCR1B & B11111000 | B00000001;  
    Serial.begin(9600);  
    Serial.print("PWM");  
    Serial.print(",");  
    Serial.print("time(s)");  
    Serial.print(",");  
    Serial.print("Pin A0");  
    Serial.print(",");  
    Serial.println("Pin A2");  
}  
void loop() {  
    int pwm=186;  
    int AT0;  
    int AT2;  
    analogWrite(9,pwm);  
    for(int j=1;j<=625;j++){  
        AT0=analogRead(A0);  
        AT2=analogRead(A2);  
        Serial.print(pwm);  
        Serial.print(",");  
        Serial.print(millis()/1000.00,2);  
        Serial.print(",");  
        Serial.print(AT0);  
        Serial.print(",");  
        Serial.println(AT2);  
        delay(96);  
    }  
    analogWrite(9,LOW);  
    Serial.flush();  
}
```

```
while(1);
}
```

Código del programa para la voltametría cíclica:

```
void setup() {
  pinMode(9,OUTPUT);
  TCCR1B = TCCR1B & B11111000 | B00000001;
  Serial.begin(9600);
  Serial.print("PWM");
  Serial.print(",");
  Serial.print("time(s)");
  Serial.print(",");
  Serial.print("Pin A0");
  Serial.print(",");
  Serial.println("Pin A2");
}
void loop() {
  int n=1;
  int ciclos=15; //ciclos que realizará el potencióstato
  int AT0;
  int AT2;
  while(n<=ciclos){
    Serial.print("ciclo");
    Serial.print(" ");
    Serial.println(n);
    for(int i=153;i<174;i++){
      analogWrite(9,i);
      for(int j=1;j<=60;j++){
        AT0=analogRead(A0);
        AT2=analogRead(A2);
        Serial.print(i);
        Serial.print(",");
        Serial.print(millis()/1000.00,2);
        Serial.print(",");
        Serial.print(AT0);
        Serial.print(",");
        Serial.println(AT2);
        delay(30);
      }
    }
    for(int i=174;i>153;i--){
      analogWrite(9,i);
      for(int j=1;j<=60;j++){
        AT0=analogRead(A0);
        AT2=analogRead(A2);
        Serial.print(i);
        Serial.print(",");
        Serial.print(millis()/1000.00,2);
        Serial.print(",");
        Serial.print(AT0);
        Serial.print(",");
        Serial.println(AT2);
        delay(30);
      }
    }
    n=n+1;
  }
  analogWrite(9,LOW);
  Serial.flush();
  while(1);
}
```