



Biología-Química-Física
Matemática-Estadística



TECNOCIENCIA

Volumen 28, N.1

ISSN L 2415-0904



Revista de la Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología
Universidad de Panamá
Enero - Diciembre, 2026

TECNOCIENCIA

Volumen 28, N. 1

**Publicación semestral
Enero - Diciembre, 2026**

**Universidad de Panamá
Facultad de Ciencias Naturales,
Exactas y Tecnología**



Autoridades de la Universidad de Panamá

Eduardo Flores Castro
Rector

José Emilio Moreno
Vicerrector Académico

Jaime Javier Gutiérrez
Vicerrector de Asuntos Estudiantiles

Mayanín Rodríguez
Vicerrector de Asuntos Estudiantiles

Ricardo Him Chi
Vicerrector Administrativo

José Luis Solís
Director de Centros Regionales

Ricardo A. Parker D.
Secretaría General

José Álvaro
Presidente de la Asociación de Profesores

Consejo Editorial

Directora

Dra. Magaly de Chial

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Panamá
mdechial@yahoo.com.mx <https://orcid.org/0000-0002-6393-9299>

Editor Jefe

Dr. Eduardo Camacho Astigarrabia

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Panamá
eduardo.camachoa@up.ac.pa <https://orcid.org/0000-0001-7415-6786>

Consejo

Mgter. Roberto Cambra

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Museo de Invertebrados, Panamá roberto.cambra@up.ac.pa <https://orcid.org/0000-0002-3799-4710>

Dr. Enrique Medianero.

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Panamá
enrique.medianero@up.ac.pa <https://orcid.org/0000-0002-8430-9034>

Dr. Armando Durant.

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Panamá
armando.durant@up.ac.pa <https://orcid.org/0000-0002-6516-9427>

Mgter. Aurora Mejía

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Escuela de Estadística, Panamá
aurora.mejia@up.ac.pa

Dr. Janzel Villalaz

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Panamá
janzel.villalaz@up.ac.pa <https://orcid.org/0000-0001-8914-3216>

Mgter. Jacobo Araúz

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Panamá jarauzg@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-4143-8300>

Dr. Jaime Gutiérrez

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Panamá
jaime.gutierrez@up.ac.pa <https://orcid.org/0000-0002-5941-3892>

Dra. María de Stapp

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Panamá <https://orcid.org/0000-0002-8095-5899>

Dr. Josep Batlló i Ortiz

Institut Cartografic I Geologic, Barcelona Cataluña, España
josep.batlo@icgc.cat <https://orcid.org/0000-0002-2493-3070>

Dr. Bruno Zachrisson

Instituto de Investigaciones Agropecuarias de Panamá (IDIAP). Panamá.
bruno.zachrissons@idiap.gob.pa <https://orcid.org/0000-0002-8219-7438>

Dr. Luis Wong Vega

Vicerrectoría de Investigación y Postgrado, Panamá luis.wongv@up.ac.pa /luis.wong.vega@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-0139-6134>

Dr. Fernando Gómez Merino

Colegio de Postgraduados, México
fernandg@colpos.mx

Dr. Edgardo Castro

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Depto. de Genética y Biología Molecular, Panamá edgardo.castro@up.ac.pa <https://orcid.org/0000-0003-4884-9479>

Dra. Yaxelis Mendoza

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Depto. de Genética y Biología Molecular yaxelis.mendoza@up.ac.pa <https://orcid.org/0000-0002-7113-0430>

Comité de diagramación, estilo y producción

Dr. Eduardo Camacho Astigarrabia

Universidad de Panamá - Editor Jefe

Michelle Ferrín

Universidad de Panamá - Secretaría Técnica

EDITORIAL

A cien años del nacimiento formal de la mecánica cuántica

En 2025 se conmemoraron los 100 años del establecimiento de los fundamentos de la mecánica cuántica matricial por parte de Werner Heisenberg, Max Born y Pascual Jordan y este 2026 celebraremos el centenario de la creación, por parte de Erwin Schrödinger, de la mecánica cuántica ondulatoria. Ambas constituyen una de las creaciones más importantes en la historia del pensamiento humano: La mecánica cuántica ofreció una nueva forma de entender la realidad. En un entorno donde predominaban la continuidad, la certeza y el determinismo, la mecánica cuántica introdujo la discontinuidad, la probabilidad y la dualidad onda-partícula como conceptos esenciales.

Cuando en 1925, se dio a conocer la formulación matricial de la mecánica cuántica, se transformó la percepción de la materia y la energía. Al año siguiente, Erwin Schrödinger presentó su ecuación de la mecánica cuántica ondulatoria. Ambas teorías, aunque parecían diferentes, resultaron ser equivalentes, revelando la misma realidad desde distintas perspectivas matemáticas. La mecánica cuántica ha impactado no solo a la ciencia, sino también a la tecnología, la filosofía y nuestra comprensión del cosmos. Su relevancia es especialmente notable en la industria de los semiconductores. El funcionamiento de los chips y su creciente miniaturización no hubiese sido posible sin un conocimiento profundo del comportamiento cuántico de los electrones en materiales semiconductores y las propiedades electrónicas a nivel nanométrico. Sin esto el gran desarrollo en la computación moderna no hubiera sido posible.

Sin embargo, la importancia de la mecánica cuántica no se limita a sus usos tecnológicos. Su legado más significativo puede ser el desafío radical a nuestras ideas sobre la realidad. El principio de incertidumbre de Heisenberg, la superposición de estados y el entrelazamiento cuántico nos muestran que la naturaleza no actúa según nuestra intuición habitual.

Conmemorar el desarrollo de la mecánica cuántica es, en esencia, rendir homenaje a la capacidad humana de cuestionar lo evidente, de observar más allá de lo obvio y de reconsiderar las bases de su conocimiento.



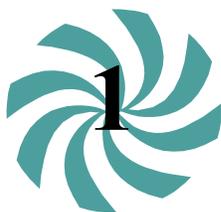
Dr. Eduardo Camacho Astigarrabía

ÍNDICE

TÍTULO	PÁGINAS
Uso de la espectroscopia Mössbauer en el control de calidad de suplementos terapéuticos antianémicos que contienen hierro.....	8-18
Macrohongos en un fragmento de bosque secundario de la comunidad de río Guanche, Portobelo, provincia de Colón	19-37
Análisis espectroscópico y modelado del cuásar 3C-279.....	38-71
Contaminación lumínica en Panamá: diagnóstico, desafíos y estrategias para un desarrollo sostenible.....	72-95
Caracterización eléctrica y determinación de la eficiencia de un módulo de celdas solares policristalinas bajo condiciones no estándares: caso de estudio Radioshack 277-1205.....	96-127
Caracterización Físicoquímica y Biológica de los principales ríos adyacentes al golfo de Montijo, Veraguas, Panamá.....	128-156
Estructura poblacional del gato doméstico <i>Felis catus</i> (Carnivora: Felidae) en el Campus Central de la Universidad de Panamá, ciudad de Panamá, Panamá.....	157-166
Caracterización morfodinámica y mecanismos de estructuración de la playa Monagre, Los Santos, Panamá.....	167-184
Primer reporte del nematodo <i>Eustrongylides</i> sp. (Nematoda: Dioctophymatidae) en la sardina <i>astyanax panamensis</i> en Darién, Panamá... ..	185-194
Sísmica de microtemores aplicada a la caracterización del subsuelo en el Campus Harmodio Arias Madrid.....	195-224
Impacto de simuladores educativos basados en inteligencia artificial en el aprendizaje de ciencias computacionales.....	225-236
Caracterización de los parámetros del exoplaneta WASP-10b mediante dos sondeos de tránsito.....	237-262

INDEX

QUALIFICATION	PAGES
Use of Mössbauer spectroscopy in quality control of iron-containing antianaemic therapeutic supplements	8-18
Macrofungus in a fragment of secondary forest in the community of rio Guanche, Portobelo, province of Colon.....	19-37
Spectroscopic analysis and modeling of quasar 3C-279.....	38-71
Light pollution in Panama: diagnosis, challenges and strategies for sustainable development.....	72-95
Electrical characterization and determination of the efficiency of a polycrystalline solar cell module under non-standard conditions: case study Radioshack 277-1205.....	96-127
Physical-Chemical and Biological characterization of the main rivers adjacent to the gulf of Montijo, Veraguas, Panama.....	128-156
Population structure of the domestic cat <i>Felis catus</i> (Carnivora: Felidae) at the Central Campus of the University of Panama, Panama City, Panama.....	157-166
Morphodynamic characterization and morphological structuring of Monagre beach, Los Santos, Panama.....	167-184
First report of the nematode <i>Eustrongylides</i> sp. (Nematoda: Dioctophymatidae) in the sardine <i>astyanax panamensis</i> in Darién, Panama.....	185-194
Ambient Noise Seismology for Subsurface Characterization at the Harmodio Arias Madrid Campus	195-224
Impact of educational simulators based on artificial intelligence on computational science learning.....	225-236
Parameters Characterization of Exoplanet WASP-10b Using Two Transit Surveys.....	237-262



Uso de la espectroscopia Mössbauer en el control de calidad de suplementos terapéuticos antianémicos que contienen hierro

Use of Mössbauer spectroscopy in quality control of iron-containing antianaemic therapeutic supplements

Juan Antonio Jaén

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Química Física, Panamá.

juan.jaen@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0001-7069-216X>

Eduardo Chung

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Física, Panamá.

eduardo.chungng@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0003-2834-9450>

Fecha de recepción: 23 de mayo de 2025

Fecha de aceptación: 21 de octubre de 2025

DOI: <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v28n1.a8943>

RESUMEN

En el presente trabajo se recurrió al uso de la espectroscopia Mössbauer de ^{57}Fe para estudiar diversos productos farmacéuticos fármacos antinómicos que contienen hierro, con el objetivo de analizar el estado de oxidación y el tipo de hierro en estos productos. Se estudiaron los productos comerciales (principio activo según lo declarado por el fabricante): Fermarato Tabletas (Fumarato Ferroso), Fermafolic 60 (Fumarato Ferroso), Nature's Blend (Sulfato Ferroso), Gentle Iron® (Bis-glicinato Ferroso), y Ferrum Hausmann® (Complejo de hidróxido de hierro (III) - polimaltosa). Los espectros a temperatura ambiente de Fermarato Tabletas y Fermafolic 60 dieron evidencia clara de la presencia de dos fases: una ferrosa (Fe^{2+}) como principal, con una contribución igual o superior al 96%, y la otra férrica (Fe^{3+}) (~4%). La primera corresponde al fumarato ferroso $\text{FeC}_4\text{H}_2\text{O}_4$, mientras que la segunda estaría relacionada con un compuesto férrico de alto espín procedente de la oxidación del fumarato ferroso o podría pertenecer a otra sal férrica incluida durante la producción. Por su parte, en Nature's Blend, además de sulfato ferroso parcialmente hidratado, $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, como componente principal (80%), se observó un segundo componente (16%) que podría estar relacionado con un complejo de Fe^{2+} -citrato y otro adicional (4%) identificado como sulfato férrico. El espectro Mössbauer de la Gentle Iron® se ajustó con varios componentes paramagnéticos que pueden asignarse a quelato de bisglicinato ferroso, sulfato ferroso y los productos de sus modificaciones y/o transformaciones u oxidación debido a la inestabilidad del quelato de

biglicinato ferroso. La fracción total de hierro férrico en el complejo fue de aproximadamente 4%. Para finalizar, el espectro correspondiente al suplemento Ferrum Hausmann® se ajustó con dos dobletes cuadrupolares típicos de hierro férrico de alto espín asociados al complejo de hidróxido de hierro (III) polimaltosa. Este compuesto combinaría akaganeita β -FeOOH envuelta en polimaltosa. Se puede concluir que se observó una buena correspondencia entre lo declarado por los fabricantes y los resultados del análisis Mössbauer.

PALABRAS CLAVE

Espectroscopia Mössbauer, suplementos terapéuticos de hierro, estado de oxidación del hierro, Fumarato ferroso; Quelato de biglicinato ferroso; Sulfato ferroso; Akaganeita

ABSTRACT

In this work, ^{57}Fe Mössbauer spectroscopy was used to investigate various iron-containing anti-anemic pharmaceutical products, with the aim of characterizing the oxidation state and type of iron in these products. The commercial products studied (active ingredient as declared by the manufacturer): Fermarato Tablets (Ferrous Fumarate), Fermafolic 60 (Ferrous Fumarate), Nature's Blend (Ferrous Sulfate), Gentle Iron® (Ferrous Bis-glycinate), and Ferrum Hausmann® (Iron (III) hydroxide - polymaltose complex). The room temperature spectra of Fermarato Tablets and Fermafolic 60 gave clear evidence of the presence of two phases: one ferrous (Fe^{2+}) as the main one, with a contribution equal to or greater than 96%, and the other ferric (Fe^{3+}) (~4%). The first corresponds to ferrous fumarate $\text{FeC}_4\text{H}_2\text{O}_4$, while the second would be related to a high-spin ferric compound derived from the oxidation of ferrous fumarate or could belong to another ferric salt included during production. Meanwhile, in Nature's Blend, in addition to partially hydrated ferrous sulfate, $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, as the main component (80%), a second component (16%) was observed that could be related to an Fe^{2+} -citrate complex, and an additional component (4%) was identified as ferric sulfate. The Mössbauer spectrum of Gentle Iron® was fitted with several paramagnetic components that can be assigned to ferrous bisglycinate chelate, ferrous sulfate, and the products of their modifications and/or transformations or oxidation due to the instability of the ferrous bisglycinate chelate. The total fraction of ferric iron in the complex was approximately 4%. Finally, the spectrum corresponding to the Ferrum Hausmann® supplement was fitted with two typical high-spin ferric iron quadrupolar doublets associated with the iron (III) hydroxide complex polymaltose. This compound would combine akaganeite β -FeOOH wrapped in polymaltose. It can be concluded that there was a good correspondence between the manufacturers' statements and the results of the Mössbauer analysis.

KEYWORDS

Mössbauer spectroscopy, therapeutic iron supplements, iron oxidation state, Ferrous fumarate; Ferrous bisglycinate chelate; Ferrous sulphate; Akaganeite

INTRODUCCIÓN

Una de las causas de la anemia —afección en la que los glóbulos rojos no poseen la capacidad suficiente para transportar oxígeno a los tejidos corporales— es la deficiencia de hierro. Este mineral forma parte integral de numerosas proteínas y enzimas, y resulta esencial para la regulación del crecimiento y la diferenciación celular. Con niveles bajos de hierro, el cuerpo

no puede producir cantidades normales de hemoglobina y, a su vez, transporta menos oxígeno a las células del cuerpo, por lo que hay menos energía disponible para el crecimiento y la realización de funciones corporales.

Los suplementos terapéuticos de hierro son, en algunos casos, una alternativa eficaz para tratar y prevenir la anemia; por lo tanto, se preparan teniendo en cuenta su biodisponibilidad, la cual está afectada por el estado de oxidación, la forma, la solubilidad, el tamaño de partícula y el acomplejamiento (Finch & Cook, 1984).

El hierro ferroso (Fe^{2+}) se absorbe de manera más eficiente en el cuerpo que el hierro férrico (Fe^{3+}). Los efectos secundarios tóxicos son entonces más graves con las sales férricas, porque la absorción del hierro férrico es relativamente más lenta que la del estado ferroso. El Fe puede combinarse con un agente quelante orgánico, como el citrato, el ftalato o el hemo, (Kaur et al., 2014) para formar un complejo estable; por ejemplo, el quelato de bisglicinato de hierro es una forma de suplementación en la cual el hierro se une a los aminoácidos de glicina. Esta quelación puede mejorar la absorción del hierro y reducir los efectos secundarios gastrointestinales. Los complejos de hierro-polimaltosa son más eficaces que las sales ferrosas, probablemente porque estos complejos son análogos farmacéuticos de la ferritina. La absorción de hierro (en alimentos o en suplementos terapéuticos) requiere que los receptores intestinales reconozcan la forma química del hierro. Por tanto, el conocer el estado del hierro que se va a consumir en los suplementos es muy importante para el análisis de la calidad de los productos y su posible eficacia.

La espectroscopia Mössbauer de ^{57}Fe es un excelente método para determinar el estado de oxidación del hierro en un sólido y distinguir entre diferentes compuestos de hierro y sus fracciones relativas en una muestra determinada. Esta técnica se ha aplicado en la investigación biomédica, en particular para el análisis de compuestos farmacéuticos (Uhm et al., 2017; Alenkina et al., 2024).. En este trabajo se estudiaron diversos fármacos antianémicos, con el objetivo de identificar y cuantificar los compuestos de hierro, ferrosos (Fe^{2+}) y férricos (Fe^{3+}), y compararlos con los valores declarados por el fabricante.

PARTE EXPERIMENTAL

Todos los suplementos de hierro fueron analizados tal como se presentan comercialmente, para disminuir la probabilidad de cambios significativos en los estados de oxidación, así como para evitar alteraciones en su naturaleza química.

Se estudiaron productos con diferentes principios activos, según lo declarado por el fabricante: Ferrarato Tabletas (Fumarato Ferroso), Fermafolic 60 (Fumarato Ferroso), Nature's Blend (Sulfato Ferroso), Gentle Iron® (Bis-glicinato Ferroso), y Ferrum Hausmann® (Complejo de hidróxido de hierro (III) - polimaltosa).

Se prepararon pastillas de 1-2 mm de espesor, mezclando homogéneamente en un mortero el contenido de las tabletas o grageas, con una proporción adecuada de sacarosa como aglutinante. La mezcla se colocó en un dado de acero inoxidable y se aplicó presión mediante una prensa hidráulica. La pastilla resultante se insertó en el portamuestra del espectrómetro Mössbauer CTS4 de Iron Analytics, operando en el modo de aceleración constante en 1024 canales con una fuente de $^{57}\text{Co/Rh}$ de 15 mCi (955 MBq) de actividad nominal. La escala de velocidad se calibró con respecto a una lámina de $\alpha\text{-Fe}$. El ajuste de los espectros tomados a temperatura ambiente (TA) se llevó a cabo utilizando líneas Lorentzianas mediante el software Recoil (1968).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dependiendo de los entornos locales de los átomos de Fe y de sus propiedades magnéticas, los espectros Mössbauer pueden consistir en un singlete, un doblete o un sexteto (Greenwood & Gibb, 1971). Los espectros Mössbauer a TA para todas las muestras estudiadas se ajustaron con dobletes, cuyos parámetros hiperfinos (desdoblamiento cuadrupolar (QS), desplazamiento isomérico (IS) y área de absorción (A)) se enumeran en la Tabla 1.

Tabla 1.

Parámetros Mössbauer de los suplementos terapéuticos estudiados medidos a 295 K

Muestra	IS (mm/s)	QS (mm/s)	$\Gamma/2$ (mm/s)	A (%)	Componente identificado
Feramarato	1.222(5)	2.231(9)	0.212(8)	96	$\text{FeC}_4\text{H}_2\text{O}_4$
Tabletas	0.27(7)	0.95(13)	0.16(9)	4	Fe^{3+} alto espín
Fermafolic 60	1.225(3)	2.229(6)	0.192(4)	96	$\text{FeC}_4\text{H}_2\text{O}_4$
	0.40(4)	0.99(8)	0.14(5)	4	Fe^{3+} alto espín
Nature's Blend	1.267(2)	2.71()	0.167(5)	80	$\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
	1.27(2)	1.88(10)	0.28(5)	16	Complejo de Fe^{2+} -citrato
	0.39(3)	0.52(6)	0.12(4)	4	$\text{HFe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4(\text{H}_2\text{O})$
Gentle Iron [®]	1.278(5)	3.045(16)	0.127(10)	44	$\text{C}_4\text{H}_8\text{FeN}_2\text{O}_4$
	1.243(4)	2.717(17)	0.137(10)	51	$\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
	0.49(5)	0.70(9)	0.15(6)	5	Fe^{3+} alto espín
Ferrum	0.369(5)	0.52(3)	0.16(2)	37	Complejo de hidróxido de
Hausmann [®]	0.368(6)	0.97(5)	0.24(2)	63	hierro (III) polimaltosa

IS = desplazamiento isomérico respecto de $\square\text{-Fe}$

QS = desdoblamiento cuadrupolar

Γ = ancho de línea

A = área espectral

Los espectros correspondientes a Fermarato Tabletas y Fermafolic 60 (Figs. 1 y 2, respectivamente), dieron evidencia clara de la presencia de dos fases de hierro: una ferrosa (Fe^{2+}), como principal, con una contribución igual o superior al 96% y una férrica (Fe^{3+}), con un aporte de aproximadamente 4%. La fase ferrosa se asocia a fumarato ferroso $\text{FeC}_4\text{H}_2\text{O}_4$, mientras que la férrica podría asignarse a un compuesto férrico de alto espín procedente de la oxidación del fumarato ferroso o a cualquier otra sal férrica incorporada durante la producción (Oshtrakh 2004; Oshtrakh 2010; Uhrn, 2017; Alenkina & Oshtrakh, 2024). Suponiendo las mismas probabilidades de que se produzca el efecto Mössbauer (factor f , que denota la fracción libre de retroceso) para todos los compuestos de hierro en una muestra, los valores de A pueden vincularse con el contenido relativo de ese compuesto en la muestra.

La Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos (FDA) permite un máximo de 2% de impurezas de hierro férrico (Fe^{3+}) en formulaciones de fumarato ferroso de grado farmacéutico. Esta especificación asegura la estabilidad y eficacia de los suplementos de hierro, limitando la presencia de formas de hierro oxidado que pueden afectar la biodisponibilidad y el resultado terapéutico. Nuestros resultados parecen indicar (más allá de los errores experimentales) que ambos, Fermarato Tabletas y Fermafolic 60, exceden el límite de 2% de hierro férrico en fumarato ferroso, como también lo observaron otros autores (Oshtrakh 2004; Oshtrakh 2010; Alenkina & Oshtrakh, 2024). Sin embargo, para estimar el contenido de Fe^{2+} y Fe^{3+} en la muestra, se llevó a cabo una pequeña corrección teniendo en cuenta valores típicos de la fracción libre de retroceso (factor f) de los compuestos de hierro a TA. Para Fe^{2+} , el valor de f suele ser de aproximadamente 0.7 a temperatura ambiente (Arredondo et al., 2016). En el caso del Fe^{3+} , los valores de f son, en su mayoría, mayores que los de Fe^{2+} , situándose entre 0.8 y 0.9 (Zhang, 2022). En consecuencia, los análisis Mössbauer realizados a temperatura ambiente en materiales que contienen simultáneamente Fe^{3+} y Fe^{2+} tenderán a sobreestimar la fracción de Fe^{3+} , a menos que se cuantifiquen los efectos de la fracción sin retroceso. El valor obtenido con esta corrección para Fe^{3+} sería de $\sim 2\%$, justo dentro de los límites aceptados por la FDA. Para precisar aún más, el factor f correspondiente a cada uno de los compuestos de hierro, se deberían medir los espectros Mössbauer a baja temperatura (i.e., 4.2 K o 80 K), y/o determinar mediante alguna técnica complementaria las temperaturas de Debye de dichos compuestos.

Figura 1.
Espectro Mössbauer a temperatura ambiente de Fermarato Tabletas.

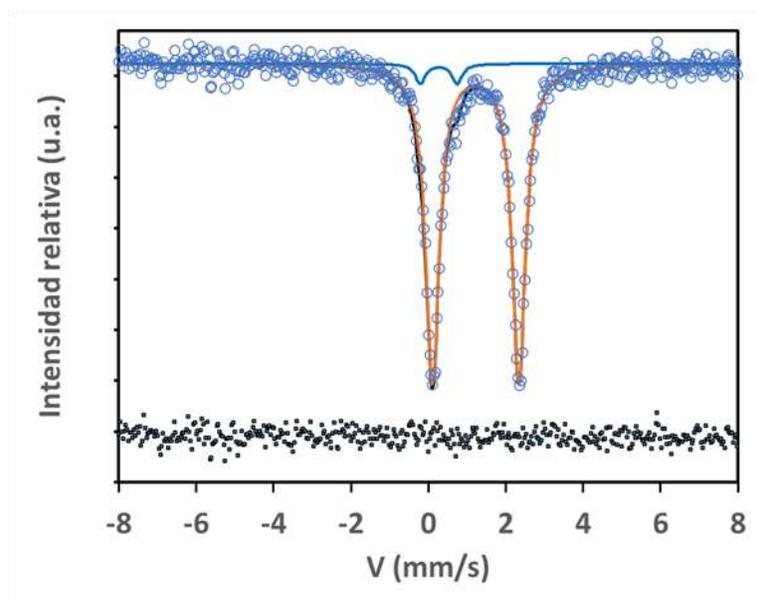
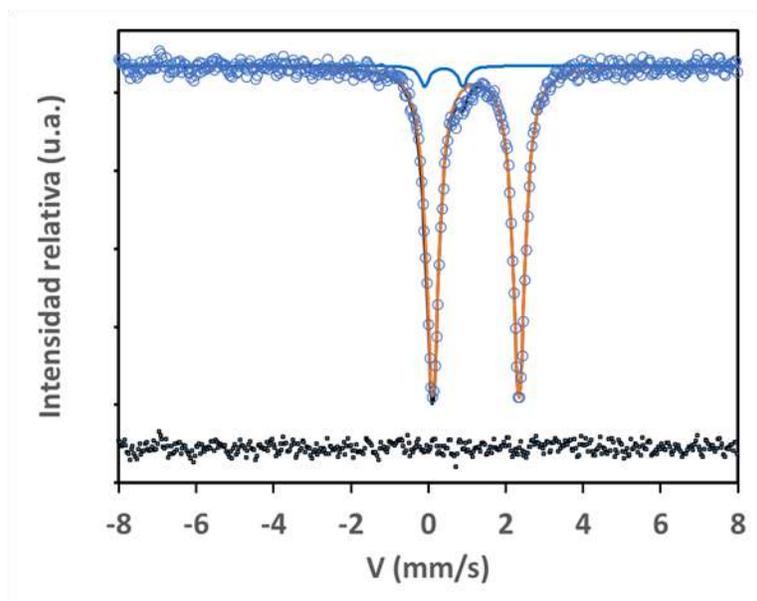


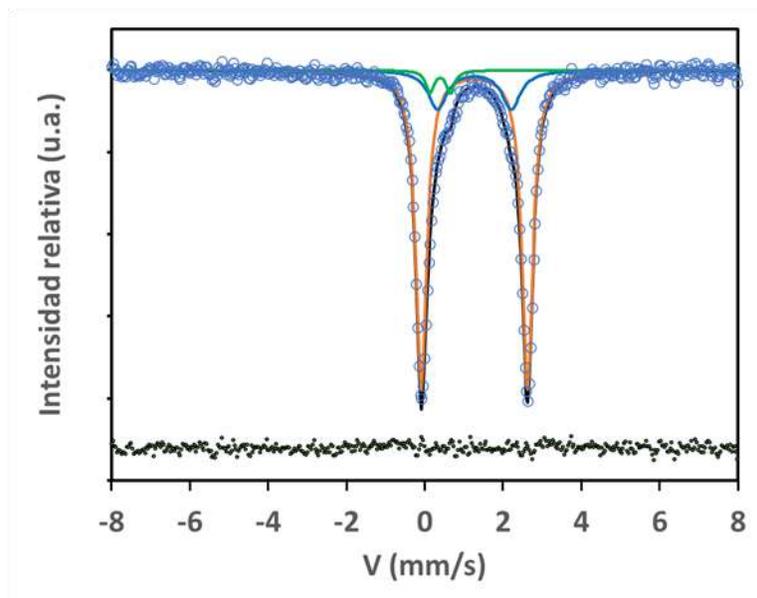
Figura 2.
Espectro Mössbauer a temperatura ambiente de Fermafolic 60



Por su parte, Nature's Blend contiene sulfato ferroso, según lo declarado por los fabricantes. La descomposición de su espectro Mössbauer muestra la presencia de dos componentes ferrosos y uno férrico. El sulfato ferroso puede presentarse en estado anhidro (FeSO_4) y con diferentes grados de hidratación; por ejemplo, $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{FeSO}_4 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$, $\text{FeSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$, etc., con parámetros hiperfinos ligeramente diferentes entre sí (Vértes et al., 1970; Alenkina & Oshtrakh, 2024). Los valores de los parámetros hiperfinos (ver Tabla 1) para el componente con QS de aproximadamente 80% (Fig. 3) sugieren la presencia de sulfato ferroso monohidratado $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$. El componente con un QS de alrededor del 16% tiene parámetros hiperfinos sin análogos entre los sulfatos de hierro. Dado que este suplemento contiene ácido cítrico, este componente podría estar asociado a un complejo de citrato ferroso (Alenkina, 2024). El componente minoritario ($\sim 4\%$), cuyo valor de QS es el más pequeño, tiene parámetros Mössbauer (Tabla 1) que concuerdan con los de la romboclasa (Dyar et al., 2013), mineral sulfatado de hierro ácido (Fe^{3+}) con una fórmula reportada como $\text{H}_5\text{FeO}_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ o $\text{HFe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Este compuesto puede formarse durante el proceso de preparación como resultado de la oxidación parcial del sulfato ferroso. Se ha reportado (Alenkina & Oshtrakh, 2024) su presencia en productos farmacéuticos que contienen hierro en forma de sulfatos.

Figura 3.

Espectro Mössbauer a temperatura ambiente de Nature's Blend.

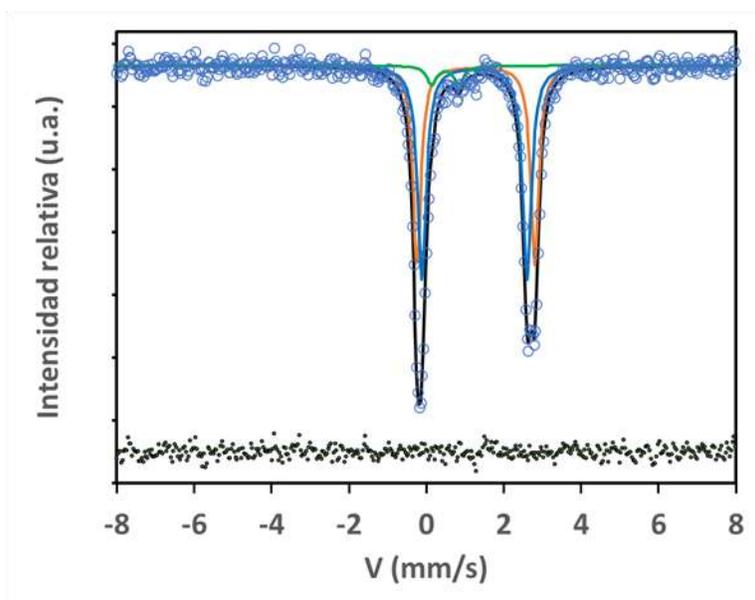


Por otro lado, el espectro Mössbauer del producto Gentle Iron® (Fig. 4) presentó tres componentes, cuyos parámetros correspondientes se presentan en la Tabla 1. Los dos componentes principales corresponden a uno o dos compuestos ferrosos de alto

espín. El componente minoritario corresponde a un compuesto férrico de alto espín. Para asignar estos componentes a los compuestos declarados por el fabricante, se llevó a cabo una búsqueda bibliográfica sobre los parámetros Mössbauer del bisglicinato ferroso. Fitzsimmons et al. reportaron valores de 1.225 mm/s y 2.82 mm/s para el desplazamiento isomérico y el desdoblamiento cuadrupolar, respectivamente. En cambio, Alenkina y Oshtrakh (2024) ajustaron el espectro Mössbauer del quelato de bisglicinato ferroso con múltiples dobletes. En la Tabla 1, los parámetros del segundo doblete ferroso podrían asociarse a $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Cabe destacar que la producción del quelato ferroso bisglicinato para suplementos terapéuticos suele realizarse con sulfato ferroso ($\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) como materia prima. La presencia de un componente férrico minoritario reveló que el bisglicinato de hierro de Gentle Iron® contiene pequeñas cantidades de hierro férrico (Fe^{3+}). Por lo tanto, se sugiere que este suplemento terapéutico contiene quelato de bisglicinato ferroso, sulfato ferroso, y un compuesto férrico que se forma debido a la oxidación del hierro ferroso (Fe^{2+}) durante la producción o el almacenamiento.

Figura 4.

Espectro Mössbauer a temperatura ambiente de Gentle Iron®.

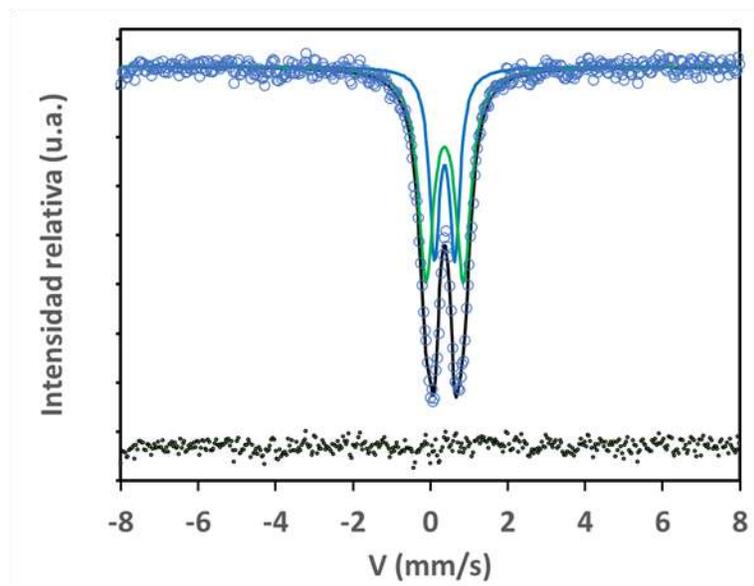


Para finalizar, en el suplemento Ferrum Hausmann®, considerado un análogo de la ferritina, el hierro (Fe^3) se une a una matriz de polimaltosa mediante enlaces de coordinación, formando un complejo estable y no iónico. Está diseñado para proporcionar una fuente de hierro con alta biodisponibilidad y con menores efectos secundarios gastrointestinales en comparación con las sales de hierro tradicionales (como el sulfato ferroso). El espectro Mössbauer de este suplemento (Fig. 5), se ajusta muy bien con dos dobletes cuadrupolares típicos de hierro férrico de alto espín,

con parámetros que concuerdan con los del oxihidróxido férrico akaganeita (β -FeOOH) (Murad, 1979). Coey et al. (1995) estudiaron un hematínico oral comercializado como Niferex, cuyo componente activo también es un complejo de polisacárido-hierro. Estos autores, mediante espectroscopía Mössbauer, difracción de rayos X en polvo y EXAFS, sugirieron una estructura con un orden de largo alcance similar al mineral akaganeita. Los parámetros Mössbauer a 295 K para las muestras de Niferex podrían compararse con los de ferritina, ferrihidrita y akaganeita. Según Dubiel et al. (2014), el espectro Mössbauer de Ferrum Lek, otro complejo de hierro-polimaltosa, consta de un doblete paramagnético, como los observados en el presente trabajo para Ferrum Hausmann®. Podría decirse que el hierro contenido en este suplemento es un oxihidróxido de hierro (III) similar a la akaganeita, envuelto en polimaltosa, un polisacárido derivado del almidón.

Figura 5.

Espectro Mössbauer a temperatura ambiente de Ferrum Hausmann®.



Es importante destacar que la espectroscopía Mössbauer también puede ser usada para el estudio de muestras en presentación líquida, siempre que se realicen las mediciones a bajas temperaturas, ya que la técnica requiere que los núcleos sonda estén inmersos en una matriz sólida. En un trabajo anterior (Jaén y Martínez, 1988) se han reportado mediciones en suplementos terapéuticos de hierro líquidos medidos a la temperatura del nitrógeno líquido, identificándose sulfato ferroso en una de las muestras y citrato de hierro y amonio ($(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_7)_2$), con una cantidad importante (37%) de hierro en forma de Fe^{3+} de alto espín, en otra.

CONCLUSIONES

La espectroscopía Mössbauer de ^{57}Fe demuestra amplias posibilidades para el análisis de compuestos que contienen hierro. Permite obtener información sobre la naturaleza y las proporciones relativas de Fe^{2+} y Fe^{3+} en los suplementos terapéuticos antiánémicos; de allí que pueda ser utilizada en pruebas de rutina y en el control de calidad de estos productos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alenkina I.V., A.V. Chukin, G. Leitus, O.V. Denisova, M. Gracheva, I. FelnerI, E. Kuzmann, Z. Homonnay & M. Oshtrakh . 2024. Analysis of the iron states in iron-containing pharmaceutical products using Mössbauer spectroscopy *J. Pharm. Biomed. Anal.* 237: 115745.
- Alenkina, I.V. & Oshtrakh M. 2024. Control of the Iron State in Pharmaceuticals Used for Treatment and Prevention of Iron Deficiency Using Mössbauer Spectroscopy, *J. Pharm. Sc.*, 113, (6): 1426-1454,
- Coe, E M. L H Bowen, J A. Speer, Z. Wang & D. E. Sayer. ,1995. The Recharacterization of a Polysaccharid.Iron Complex (Niferex). *J. Inorg. Biochem.* 58: 269-278.
- Dubiel, S.M, J. Cieślak, I. V. Alenkina, M. I. Oshtrakh & V.A.Semionkin. 2014, Evaluation of the Debye temperature for iron cores in human liver ferritin and its pharmaceutical analogue, Ferrum Lek, using Mössbauer spectroscopy. *J. Inorg. Biochem.* 140: 89-93.
- Dyar, M.D., E. Breves, E. Jawin, G. Marchand, M. Nelms, V. O'Connor, S. Peel, Y. Rothstein, E.C. Sklute, M.D. Lane, J.L. Bishop & S.A. Mertzman, 2014. What lurks in the Martian rocks and soil? Investigations of sulfates, phosphates, and perchlorates. Mössbauer parameters of iron in sulfate minerals. *Am. Mineral.* 98: 1943–1965.
- Finch, C.A. & J.D. Cook. 1984. Iron Deficiency, *Am. J. Clin. Nutr.* 39(3): 471-477.
- Lagarec, K & DG Rancourt. 1998. Recoil – Mössbauer spectral analysis software for Windows, Department of Physics, University of Ottawa, Ottawa, ON, Canada.
- Fitzsimmons, B.W., Hume, A., Larkworthy, L.F., Turnbull, M.H. & Yavari A. 1988. The preparation and characterisation of some complexes of iron (II) with amino acids. *Inorg. Chim. Acta.* 106(2): 109-114.

- Greenwood, N. N., & Gibb, T. C. (1971). Mössbauer Spectroscopy. Chapman and Hall.
- Jaén, J.A. & M:M: Martínez, 1988. Análisis de Suplementos Terapéuticos de Hierro con Espectroscopía Mössbauer, Rev. COPAQUI 8: 3 -8.
- Kaur, M., S. Sharma & J. P. Sharma. (2014). Mössbauer spectroscopic analysis of iron containing allopathic, homeopathic and ayurvedic pharmaceutical compounds, Indian j. pharm. biol. res. 2(3): 96–104.
- Murad, E. .1971. Mössbauer and X-ray data on β -FeOOH (akaganéite). Clay Minerals 14, 273-283.
- Oshtrakh, M.I., Novikov, E.G., Dubiel, S.M. et al. (2010). Variations of ^{57}Fe hyperfine parameters in medicaments containing ferrous fumarate and ferrous sulfate. Hyperfine Interact 197: 287–294.
- Oshtrakh, M.I., Milder, O.B., Semionkin, V.A. (2004). Mössbauer Spectroscopy of Iron Containing Vitamins and Dietary Supplements. In: Elzain, M.E., Yousif, A.A., al Rawas, A.D., Gismelseed, A.M. (eds) ICAME 2003. Springer, Dordrecht.
- Uhm YR, J.C. Lim & S.M. Choi. 2017. Analyses of Ferrous and Ferric State in DynabiTab Using Mössbauer Spectroscopy. Int. J. Anal. Chem. 2017: 9321896.
- Vértés A., T. Székely & T. Tarnóczy. 1970. Mössbauer Parameters of Iron(Ii)-Salt Hydrates. Acat Chim. Acad. Sci. Hung. 63: 1-8



Macrohongos en un fragmento de bosque secundario de la comunidad de río Guanche, Portobelo, provincia de Colón

Macrofungus in a fragment of secondary forest in the community of rio Guanche, Portobelo, province of Colon

Jerico Clement

Asociación Biológica de Panamá -ABIOPA BC, Panamá
jerico.clement@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0002-3698-7367>

Mahely Rodríguez

Universidad de Panamá, Centro Regional Universitario de Colón, Panamá
mahely.rodriguez@up.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0002-3360-6175>

Vielka Murillo Godoy

Universidad de Panamá, Centro Regional Universitario de Colón, Panamá
vielka.murillo@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0002-6284-4466>

Fecha de recepción: 9 de abril de 2025

Fecha de aceptación: 21 de octubre de 2025

DOI: <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v28n1.a8944>

RESUMEN

Los macrohongos son organismos encargados de la descomposición de todos los elementos muertos de un bosque, reciclan la materia y sin ellos el ecosistema mantendría muchos restos orgánicos sin aprovechamiento óptimo del mismo. En Panamá, los macrohongos son organismos muy poco estudiados, para la provincia de Colón los estudios son escasos. Es por eso que el objetivo de esta investigación consistió en caracterizar los macrohongos en un fragmento de bosque secundario de la comunidad de Guanche. La metodología desarrollada permitió la realización de muestreos (colectas) en un transecto con una longitud de 1000 m y 10 m de borde de camino. Los macrohongos fueron identificados con literatura especializada y los mismos fueron depositados en el Herbario de la Universidad de Panamá (PMA). Se obtuvo como resultado 53 especímenes (6 especies de la División Ascomycota y 47 especies de la División Basidiomycota). La División Basidiomycota representó un 88.2%, siendo el grupo con mayor presencia en el bosque mientras que la División Ascomycota representó un 9.8% de las especies. La preferencia de sustrato fue diversa, incluyendo madera (69,2%), hojarasca (25%),

estiércol (4%) e insectos (1%). Este estudio proporciona una valiosa contribución al entendimiento taxonómico y ecológico de los hongos en Panamá, arrojando luz sobre su papel en los ecosistemas forestales y proporcionando información relevante para estrategias de conservación y manejo dentro de la provincia de Colón.

PALABRAS CLAVE

Bosque secundario, descomponedores, diversidad de especies, ecosistemas, macrohongos

ABSTRACT

Macrofungi are organisms responsible for the decomposition of all the dead elements in a forest, they recycle the matter and without them the ecosystem would maintain many organic remains without optimal use of it. In Panama, macrofungi are very little studied organisms, for the province of Colón the studies are scarce. That is why the objective of this research was to characterize the macrofungi in a fragment of secondary forest in the Guanche community. The developed methodology allowed sampling (collections) to be carried out in a transect with a length of 1000 m and 10 m of road edge. The macrofungi were identified with specialized literature and were deposited in the Herbarium of the University of Panama (PMA). As a result, 53 specimens were obtained (6 species from the Ascomycota Division and 47 species from the Basidiomycota Division). The Basidiomycota Division represented 88.2%, being the group with the greatest presence in the forest while the Ascomycota Division represented 9.8% of the species. Substrate preference was diverse, including wood (69.2%), leaf litter (25%), manure (4%), and insects (1%). This study provides a valuable contribution to the taxonomic and ecological understanding of fungi in Panama, shedding light on their role in forest ecosystems and providing relevant information for conservation and management strategies within the province of Colón.

KEYWORDS

Secondary forest, decomposers, species diversity, ecosystems, macrofungi

INTRODUCCIÓN

Aunque históricamente a los hongos se les clasificaron como "plantas inferiores", investigaciones como las de Whittaker (1969), los designaron como un quinto reino, el Reino Fungi o Fungae. Los hongos, tienen diferencias muy marcadas de las plantas y animales, sin embargo, como todos los organismos eucariotas, comparten características celulares similares y a su vez distintivas, como un núcleo bien definido, membrana nuclear, retículo endoplasmático, mitocondrias, paredes celulares (como las plantas) pero rígidas y compuestas de quitina (polisacárido que se encuentra también en el exoesqueleto de los artrópodos). Las hifas, son la unidad celular de estos organismos, su unión forma el micelio, que es el cuerpo verdadero del hongo, donde se desarrollan estructuras tanto somáticas como reproductoras, asexual o sexualmente (Arenas, 2008; Guzmán y Piepenbring, 2011). El micelio es omnipresente en los bosques y su estructura permite la diversificación de especies.

Las fructificaciones de los hongos pueden ser microscópicas (no perceptibles a la vista humana) o macroscópicas (estructuras visibles a simple vista), la diversidad de estos organismos suele ser muy alta en los ecosistemas tropicales y se observan principalmente durante la época lluviosa, donde las condiciones ambientales como la alta humedad permite que casi durante todo el año se puedan encontrar macrohongos (Talley *et al.*, 2002). Algunas de las fructificaciones de macrohongos dependen de factores ambientales y ecológicos específicos para su desarrollo, por lo que su ocurrencia en determinado lugar puede permitir entender la dinámica de los ecosistemas en los que se desarrollan.

Los macrohongos juegan un papel crucial en los ciclos biogeoquímicos al actuar como degradadores eficientes de la materia orgánica en descomposición. Su actividad contribuye a la aceleración de la descomposición de la materia orgánica y la liberación de nutrientes en el suelo, lo que favorece el crecimiento de especies vegetales y sustenta la cadena trófica. Al descomponer la materia muerta, evitan la acumulación excesiva de restos orgánicos y promueven el uso óptimo de los recursos del bosque (Cassman *et al.*, 2016).

En el mundo se estima que existen entre 2.2 a 3.8 millones de especies de hongos, pero se considera que entre el 3% y 8% se describen actualmente, los datos indican que hasta el momento solo se han descrito unas 120,000 especies (Hawksworth y Lücking, 2017). En el caso de las investigaciones micológicas en Panamá y específicamente en la Provincia de Colón, las mismas han sido muy escasas, por ejemplo, en las áreas protegidas de la provincia de Colón entre los años 2014 y 2018, las investigaciones científicas han sido de un 5% en este grupo en particular (Ortiz *et al.*, 2020).

Conocer la diversidad y ecología de las especies de macrohongos representan una herramienta imprescindible para conocer la dinámica de los ecosistemas y por ende su manejo y conservación, y aunque la valoración que se le da a estos organismos en las estrategias de conservación de ecosistemas forestales no es muy notoria, el rol de los hongos es imprescindible para el funcionamiento y supervivencia de las masas vegetales y todos los organismos que dependen de ella (Botrill *et al.*, 2011; Maron *et al.*, 2015). Este trabajo es una contribución al conocimiento de los macrohongos existentes en los bosques del Parque Nacional Portobelo, Provincia de Colón, República de Panamá.

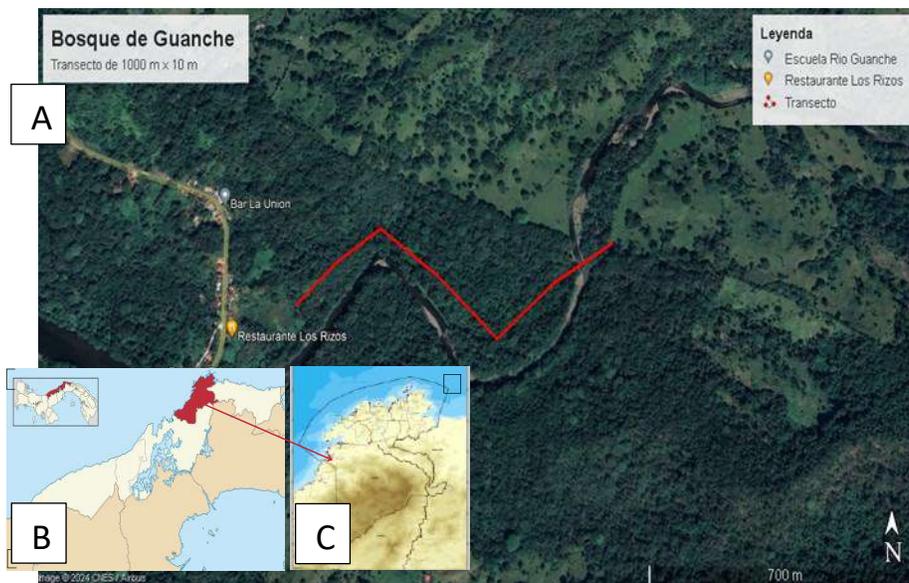
MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. Este estudio se realizó en un fragmento de bosque intervenido (secundario) de tierras bajas en la Comunidad de Río Guanche, el mismo está ubicado dentro de la zona de amortiguamiento del Parque Nacional Portobelo (PNP), distrito de Portobelo localizado hacia la sección Noreste Caribe de la República de Panamá, en la región conocida regionalmente en el país como la Costa Arriba de Colón y cuyas coordenadas geográficas

corresponden a 9°33' N y 79°39' O. El PNP se ubica en la vertiente Caribe, Provincia de Colón, Distrito de Portobelo y parte de Distrito de Colón, al Este de la entrada Norte del Canal de Panamá. El mismo ocupa cerca del 60% del Distrito de Portobelo (Figura 1). El distrito de Portobelo tiene una extensión territorial de 394.2 Km², que representa el 8.1 % del total de la provincia de Colón. La topografía del área es irregular con predominancia de lomas y cerros con pendientes mayores de 45°. Abarca una superficie de 35,929 ha, de hábitat terrestre y marino. La precipitación anual es de 3553 mm. La menor cantidad de lluvia ocurre en marzo, el promedio de este mes es 52 mm. Mientras que las mayores precipitaciones del año ocurren en noviembre con 568 mm. La temperatura promedio de la zona es de 26.7°C. La zona presenta bosques pluviales premontanos, muy húmedos tropicales, muy húmedos premontanos y bosques húmedos tropicales.

Figura 1.

Localización general del Parque Nacional Portobelo. A. Zona de muestreo en el fragmento de bosque secundario de la comunidad Rio Guanche. B. Distrito de Portobelo, Provincia de Colón. C. Extensión del Parque Nacional Portobelo



Muestreo. El método de muestreo se basó en el estudio de un transecto. Una vez que se escogió el sitio, se delimitó con una cinta métrica el transecto de 1000 m de longitud y 10 m de ancho al borde con el camino. Los muestreos se llevaron a cabo de forma oportunista según la metodología de Huhndorf *et al.*, 2004.

Colectas. Las colectas de campo se realizaron de forma estacional de agosto de 2021 a julio de 2022. Para cada espécimen se colectaron ejemplares completos, de los mismos se anotaron las características generales de cada espécimen en fichas micológicas. Adicionalmente, se tomaron fotografías in situ a cada espécimen con una cámara fotográfica de 40X de zoom óptico. Posteriormente cada muestra con su etiqueta fue colocada en una bolsa plástica sellada herméticamente. Los macrohongos de consistencia corchosa se guardaron en papel encerado para preservar su humedad y los de consistencia carnosa o suave se trasladaron en bolsas de papel en un contenedor plástico. Posteriormente fueron transportados al laboratorio, en donde se llevó a cabo su procesamiento.

Las muestras colectadas de cada individuo fueron deshidratadas a temperaturas oscilantes de 45°C - 60°C por 48 horas, dependiendo del grosor del contexto del hongo, se utilizó un horno casero para deshidratar las muestras de esta manera evitar su pudrición.

En algunos casos fue necesaria la revisión microscópica de los individuos, por lo que se realizaron cortes transversales y longitudinales de las diferentes partes del esporocarpo, se observaron las estructuras himeniales bajo el microscopio óptico, para hidratar las muestras se realizaron preparaciones temporales en portaobjetos con KOH al 3% o 10% y agua destilada por un minuto. Para la observación de las estructuras microscópicas se usaron reactivos de tinción con el fin de resaltar las estructuras que caracterizan a las especies del ejemplar a determinar (esporas, basidios, cistidios, setas e hifas, o presencia de fibulas) según los protocolos presentes en Singer (1986) y Wright y Alberto (2002).

Identificación de Macrohongos. La identificación de los macrohongos se realizó con la ayuda de las claves taxonómicas del libro “Hongos de Panamá” de Guzmán y Piepenbring, (2011), adicionalmente, se empleó el “Checklist of Fungi in Panama” de Piepenbring (2020) para verificar los nombres científicos y el portal web Index Fungorum para la actualización de la nomenclatura de las especies. Una vez identificados los macrohongos, los mismos fueron depositados en el Herbario de la Universidad de Panamá (PMA).

En cuanto a la ecología de las especies, fue necesario evaluar la información obtenida con ayuda de especialistas, bibliografía en el área de micología, tipo de vegetación predominante en las áreas de muestreos, hospederos de los macrohongos, asociaciones simbióticas, entre otros factores ambientales según el hábitat en el que se colectaron.

RESULTADOS

Para este estudio se registró un total de 53 especímenes, los mismos se identificaron hasta nivel de especie y se distribuyeron en las Divisiones Amoebozoa del Reino Protista (hongos inferiores), Ascomycota y Basidiomycota (macrohongos) del Reino Fungi.

Dentro de la División Amoebozoa se reportó un (1) espécimen perteneciente a la Familia Ceratiomyxidae del Orden Protostelida. Por otro lado, de la División Ascomycota se registraron 5 especímenes de los cuales se identificaron 3 especies que corresponden a 4 géneros (*Akanthomyces*, *Cookeina*, *Ascobolus*, *Xylosphaera*), 4 familias (Cordycipitaceae, Sarcoscyphaceae, Ascobolaceae, Xylareaceae) y 3 ordenes (Hypocreales, Pezizales, Xylariales) (Tabla 1).

Tabla 1.

Especies de la División Ascomycota reportadas para el bosque secundario de la comunidad de Rio Guanche

División	Orden	Familia	Especie
Amoebozoa	Protostelida	Ceratiomyxidae	<i>Ceratiomyxa morchella</i>
Ascomycota	Hypocreales	Cordycipitaceae	<i>Akanthomyces</i> sp.
Ascomycota	Pezizales	Sarcoscyphaceae	<i>Cookeina speciosa</i>
Ascomycota	Pezizales	Sarcoscyphaceae	<i>Cookeina tricholoma</i>
Ascomycota	Pezizales	Ascobolaceae	<i>Ascobolus scatigenus</i>
Ascomycota	Xylariales	Xylareaceae	<i>Xylosphaera boitei</i>

La División Basidiomycota fue la más representativa de acuerdo al número de especímenes colectados en el bosque secundario. Se colectó un total de 47 especímenes, de los cuales se identificaron 18 especies, correspondientes a 27 géneros y 22 familias, 6 ordenes (Agaricales, Polyporales, Auriculariales, Gomphales, Phallales y Russulales), se reportaron para esta investigación 15 especímenes identificados como morfotipos (Tabla 2)

Tabla 2.

Especies de la División Basidiomycota reportadas para el bosque secundario de la comunidad de Rio Guanche

División	Orden	Familia	Especie
Basidiomycota	Auriculariales	Auriculariaceae	<i>Auricularia mesenterica</i>
Basidiomycota	Agaricales	Psathyrellaceae	<i>Coprinopsis cinerea</i>
Basidiomycota	Agaricales	Psathyrellaceae	<i>Coprinellus disseminatus</i>
Basidiomycota	Agaricales	Marasmiaceae	<i>Crinipellis</i> sp.
Basidiomycota	Polyporales	Polyporaceae	<i>Earliella scabrosa</i>
Basidiomycota	Agaricales	Mycenaceae	<i>Filoboletus gracilis</i>
Basidiomycota	Polyporales	Polyporaceae	<i>Ganoderma applanatum</i>
Basidiomycota	Polyporales	Polyporaceae	<i>Ganoderma australe</i>
Basidiomycota	Polyporales	Polyporaceae	<i>Cerrena hydnoides</i>
Basidiomycota	Polyporales	Irpicaceae	<i>Irpex rosettiformis</i>
Basidiomycota	Agaricales	Hygrophoraceae	<i>Hygrocybe</i> sp.
Basidiomycota	Polyporales	Polyporaceae	<i>Lentinus</i> sp. 1
Basidiomycota	Polyporales	Polyporaceae	<i>Lentinus</i> sp. 2
Basidiomycota	Agaricales	Agaricaceae	<i>Lepiota</i> sp.
Basidiomycota	Agaricales	Lycoperdaceae	<i>Lycoperdon</i> sp.
Basidiomycota	Agaricales	Callistosporiaceae	<i>Macrocybe</i> sp.
Basidiomycota	Agaricales	Omphalotaceae	<i>Marasmius candidus</i>
Basidiomycota	Agaricales	Marasmiaceae	<i>Marasmius</i> sp. 1
Basidiomycota	Agaricales	Marasmiaceae	<i>Marasmius</i> sp. 2
Basidiomycota	Agaricales	Marasmiaceae	<i>Marasmius</i> sp. 3
Basidiomycota	Agaricales	Pleurotaceae	<i>Nothopanus eugrammus</i>
Basidiomycota	Agaricales	Physalacriaceae	<i>Oudemonsiella canarii</i>
Basidiomycota	Agaricales	Galeropsidaceae	<i>Panaeolus antillarum</i>

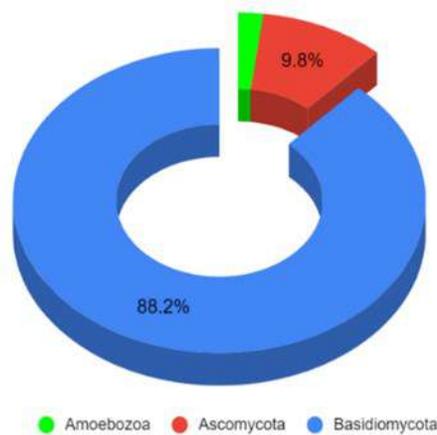
Basidiomycota	Polyporales	Lactiporaceae	<i>Laetiporus</i> sp.
Basidiomycota	Phallales	Phallaceae	<i>Phallus</i> sp.
Basidiomycota	Agaricales	Pleurotaceae	<i>Pleurotus djamor</i>
Basidiomycota	Polyporales	Polyporaceae	<i>Polyporus dictyopus</i>
Basidiomycota	Polyporales	Polyporaceae	<i>Favolus tenuiculus</i>
Basidiomycota	Gomphales	Gomphaceae	<i>Ramaria</i> sp.
Basidiomycota	Agaricales	Shizophyllaceae	<i>Schizophyllum commune</i>
Basidiomycota	Agaricales	<i>Incertae sedis</i>	<i>Trogia cantharelloides</i>
Basidiomycota	Polyporales	Polyporaceae	<i>Fabisporus sanguineus</i>
Basidiomycota	Russulales	Auriscalpiaceae	Morfotipo 4
Basidiomycota	Agaricales	Hymenogastraceae	Morfotipo 5
Basidiomycota	Agaricales	Marasmiaceae	Morfotipo 6
Basidiomycota	Agaricales	Marasmiaceae	Morfotipo 7
Basidiomycota	Agaricales	Mycenaceae	Morfotipo 8
Basidiomycota	Agaricales	Marasmiaceae	Morfotipo 9
Basidiomycota	Agaricales	Marasmiaceae	Morfotipo 19
Basidiomycota	Agaricales	Pleurotaceae	Morfotipo 20
Basidiomycota	Polyporales	Polyporaceae	Morfotipo 21
Basidiomycota	Polyporales	Meruliaceae	Morfotipo 22
Basidiomycota	Agaricales	Mycenaceae	Morfotipo 26
Basidiomycota	Agaricales	Mycenaceae	Morfotipo 27
Basidiomycota	Agaricales	Mycenaceae	Morfotipo 28
Basidiomycota	Polyporales	Polyporaceae	Morfotipo 29
Basidiomycota	Agaricales	Mycenaceae	Morfotipo 30

Representatividad de especies

La División Ascomycota representó un 9.8% de las especies colectadas mientras que la División Basidiomycota representó un 88.2%, siendo el grupo con mayor presencia en el bosque. Solo se colectó un hongo inferior de la División Amoebozoa, del Reino Protista (Figura 2).

Figura 2.

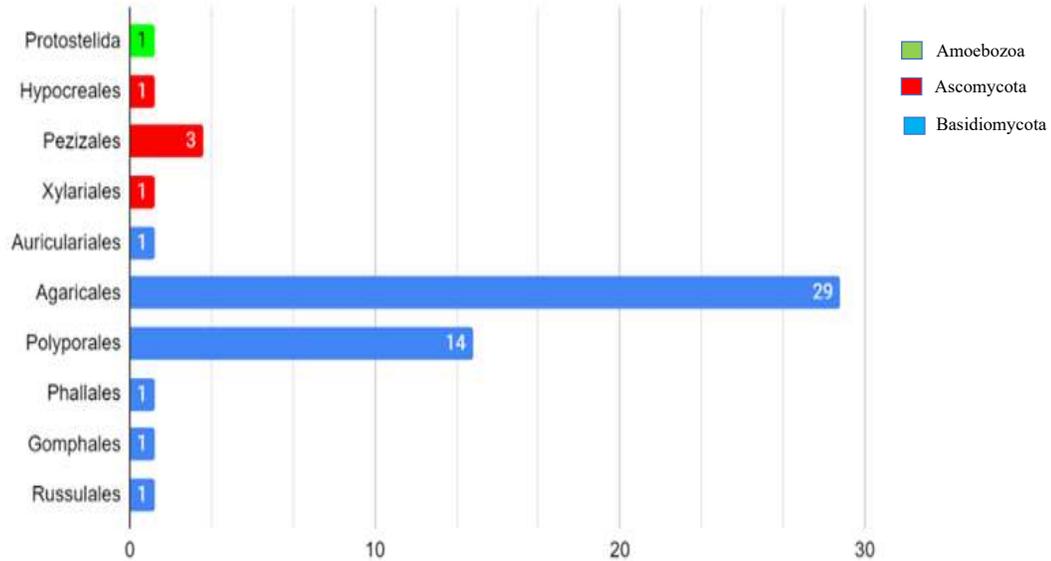
Porcentaje de las Divisiones de macrohongos en el Bosque Secundario, Guanche, PN. Portobelo



Representatividad de especies a nivel de Orden

En la División Basidiomycota se reconocieron 6 órdenes, siendo el Orden Agaricales el más abundante de la zona con 29 especímenes, seguido por el orden Polyporales con 14 especímenes. Para la División Ascomycota, el Orden Pezizales fue uno de los 3 Ordenes reportados para el sitio, con 3 especies colectadas (Figura 3).

Figura 3.
Órdenes representativos en el bosque secundario de Guanche

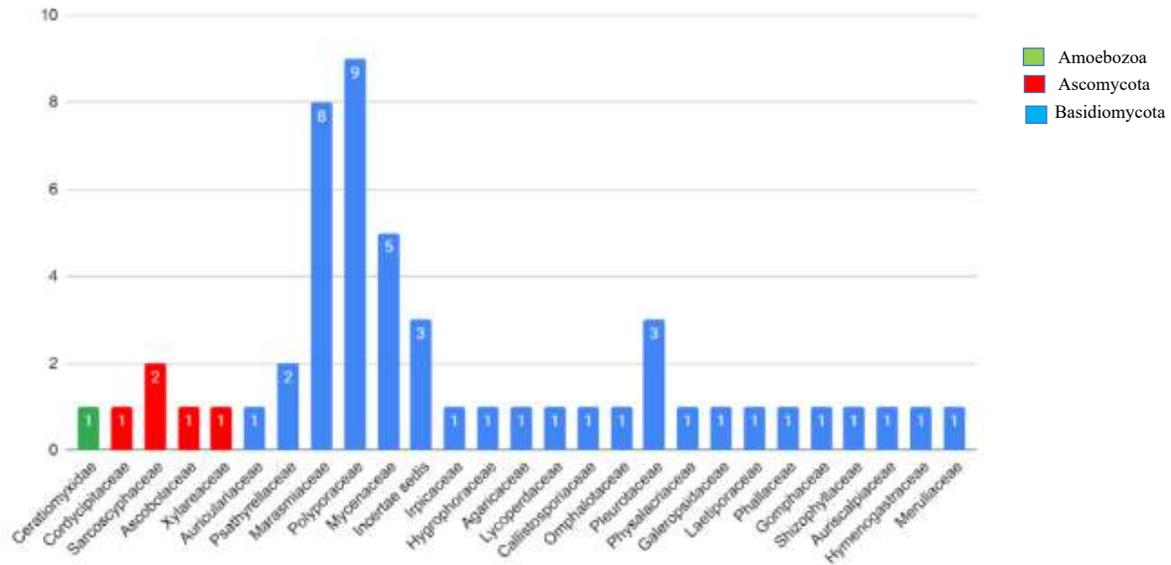


Representatividad de especies a nivel de familia

En el fragmento de bosque secundario se reconocieron 28 familias de 3 Divisiones, la familia Ceratiomyxidae fue la única perteneciente a la División Amoebozoa. Para la División Ascomycota se registraron (4) familias de las cuales la más representativa fue la Familia Sarcoscyphaceae con (2) especies colectadas. Por otro lado, la División Basidiomycota fue la mejor representada en esta zona de estudio con unas 22 Familias, de las cuales las más representativas considerando el número especies colectadas, fueron las siguientes: Polyporeaceae (9 especies), seguida de la Marasmiaceae (8 especies), Mycenaceae (5 especies), Pleurotaceae (3 especies) y Psathyrellaceae (2 especies), las otras familias estuvieron representadas por una especie. Se incluyeron 3 familias en estado de *Incertae sedis* verificadas en el listado taxonómico de especies de hongos (Index Fungorum) (Figura 4).

Figura 4.

Representatividad de las especies a nivel de Familias presentes el fragmento de Bosque Secundario de Guanche, Distrito de Portobelo, Provincia de Colón

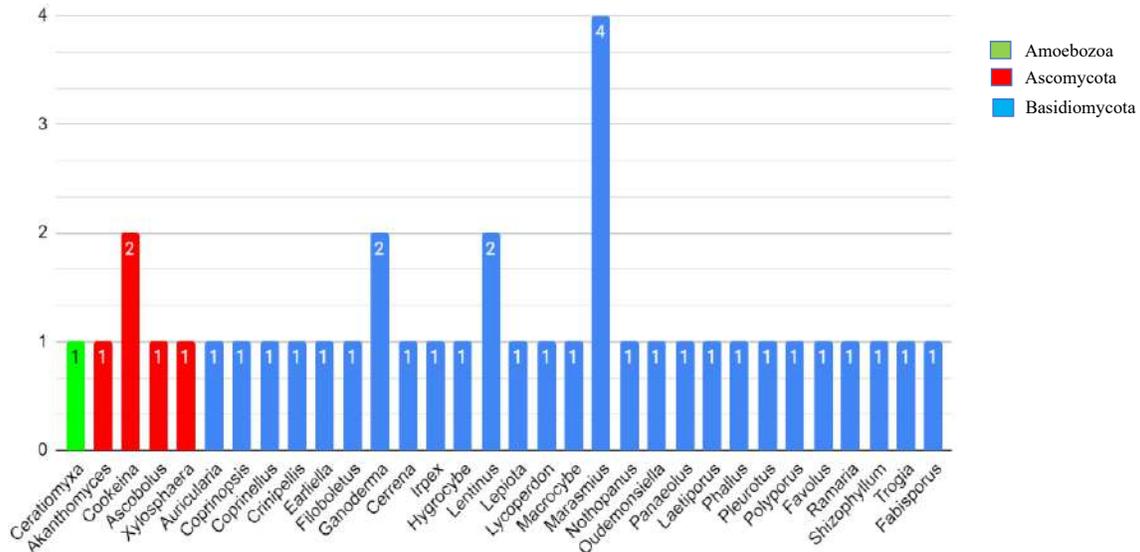


Representatividad de especies a nivel de género

En el fragmento de bosque secundario de Guanche, se registró un total de 32 géneros. De la División Amoebozoa, se registró un (1) individuo del género *Ceratiomyxa*. En cuanto a la División Ascomycota, se registró un total de 4 géneros y entre ellos el que se registró con un mayor número de especies fue el género *Cookeina*. En cuanto a la División Basidiomycota se registró un total de 27 géneros, donde el más abundante fue el género *Marasmius* (4 especímenes), *Ganoderma* (2 especies), *Lentinus* (2 especies), para otros géneros se registró una especie, como es el caso de *Auricularia*, *Coprinopsis*, *Coprinellus*, *Earliella* y *Trogia* (Figura 5).

Figura 5.

Géneros con mayor número de especies en el bosque secundario de Guanche



Los tipos de sustratos

Para esta investigación se consideraron 5 tipos de sustratos orgánicos colonizados por los macrohongos identificados en ambas zonas de estudio: Madera (Se entiende que es madera en diferentes estados de descomposición, la misma proveniente de árboles caídos, el diámetro de estos troncos tiende a ser de más de 40-60 cm de ancho), Hojarasca, (formada por todas las hojas desprendidas y que cubren el estrato suelo en el bosque), Insectos (algunos artrópodos que son afectados por especies de macrohongos), Estiércol (Excremento de ganado).

Los sustratos encontrados fueron: madera, insecto, hojarasca y estiércol. A continuación, se observa las especies colectadas según el tipo de sustrato (Tabla 3).

Tabla 3.
Especies y sus sustratos

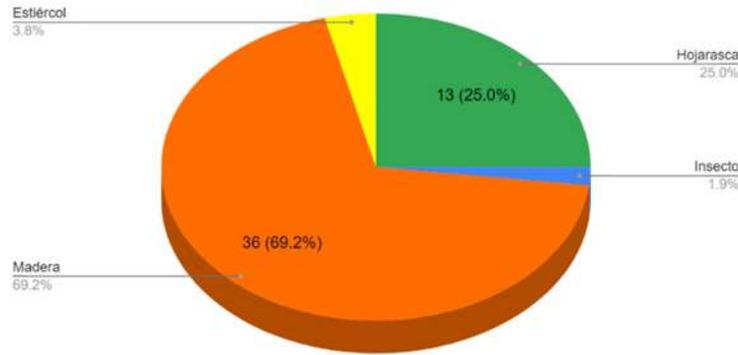
Especie	Sustrato
<i>Ceratiomyxa morchella</i>	Hojarasca
<i>Akanthomyces</i> sp.	Insecto
<i>Cookeina speciosa</i>	Madera
<i>Cookeina tricholoma</i>	Madera
<i>Ascobolus scatigenus</i>	Estiércol
<i>Xylophaera boitei</i>	Madera
<i>Auricularia mesenterica</i>	Madera
<i>Coprinopsis cinerea</i>	Madera
<i>Coprinellus disseminatus</i>	Madera
<i>Crinipellis</i> sp.	Madera
<i>Earliella scabrosa</i>	Madera
<i>Filoboletus gracilis</i>	Madera
<i>Ganoderma applanatum</i>	Madera
<i>Ganoderma australe</i>	Madera
<i>Cerrena hydnoides</i>	Madera
<i>Irpex rosetiformis</i>	Madera
<i>Hygrocybe</i> sp.	Madera
<i>Lentinus</i> sp. 1	Madera
<i>Lentinus</i> sp. 2	Madera
<i>Lepiota</i> sp.	Hojarasca
<i>Lycoperdon</i> sp.	Madera
<i>Macrocybe</i> sp.	Hojarasca
<i>Marasmius candidus</i>	Madera
<i>Marasmius</i> sp. 1	Hojarasca
<i>Marasmius</i> sp.2	Hojarasca
<i>Marasmius</i> sp. 3	Madera
<i>Nothopanus eugrammus</i>	Madera
<i>Oudemonsiella cannarii</i>	Madera
<i>Panaeolus antillarum</i>	Estiércol

<i>Laetiporus</i> sp.	Madera
<i>Phallus</i> sp.	Hojarasca
<i>Pleurotus djamor</i>	Madera
<i>Polyporus dictyopus</i>	Madera
<i>Favolus tenuiculus</i>	Madera
<i>Ramaria</i> sp.	Madera
<i>Shizophyllum commune</i>	Madera
<i>Trogia cantharelloides</i>	Madera
<i>Fabisporus sanguineus</i>	Madera
Morfotipo 4	Hojarasca
Morfotipo 5	Madera
Morfotipo 6	Hojarasca
Morfotipo 7	Hojarasca
Morfotipo 8	Hojarasca
Morfotipo 9	Hojarasca
Morfotipo 19	Madera
Morfotipo 20	Madera
Morfotipo 21	Madera
Morfotipo 22	Madera
Morfotipo 27	Hojarasca
Morfotipo 28	Hojarasca
Morfotipo 29	Madera
Morfotipo 30	Madera

En este fragmento de bosque el sustrato mejor representado en un 69% fue el sustrato Madera, el cual incluye ramas y troncos tirados a lo largo del transecto, seguido por la Hojarasca en un 25% de especies colectadas, se considera un 4% de especies colectadas en Estiércol y 1% desarrollándose sobre algunas especies de insectos (Figura 6).

Figura 6.

Tipos de sustrato de mayor preferencia para macrohongos en un fragmento de bosque secundario de Guanche, Distrito de Portobelo



DISCUSIÓN

Se identificó una notable diversidad de especies en el bosque secundario de Guanche, lo que sugiere que esta diversidad está relacionada con la amplia variedad y disponibilidad de sustratos orgánicos, propios de áreas con un alto grado de perturbación antropogénica. En esta zona predominan actividades como la tala, la construcción y mantenimiento de senderos, y la edificación de cercas para ganado y viviendas, por lo que el estudio de los macrohongos permite comprender de manera significativa las transformaciones que experimenta este ecosistema impactado.

En este estudio, la División Basidiomycota se destacó por el mayor número de especies colectadas, esto comprensible dado que es la división con el mayor número de especies que forman cuerpos fructíferos visibles, principalmente saprófitos. Esta División desempeña un papel ecológico fundamental en la protección de las plantas, estableciendo relaciones mutualistas y simbióticas mediante las cuales el hongo se beneficia de una amplia diversidad de nutrientes orgánicos, a la vez que contribuye a la defensa de las plantas contra organismos fitopatógenos. Aunque la División Ascomycota posee más de 64,000 especies, que representan aproximadamente el 75% del total del Reino Fungi (Kirk *et al.*, 2008), su presencia en este estudio fue menor en cuanto a especies colectadas. Esto se atribuye a que la mayoría de los ascomicetos son parásitos facultativos de plantas y animales, y no suelen ser visibles a simple vista ni detectables con métodos convencionales de investigación.

En relación con el Orden Agaricales, Lodge *et al* (2004) señalan que este es el orden más estudiado dentro de la División Basidiomycota y tiende a ser el más diverso en ecosistemas de latitudes bajas, lo cual explica por qué la mayoría de los estudios sobre macrohongos incluyen un elevado porcentaje de especies de este orden. Los períodos de fructificación de estos organismos suelen ser breves y delicados, dependiendo de condiciones ambientales específicas. La riqueza de especies está vinculada principalmente a la alta precipitación y la diversidad de sustratos orgánicos, especialmente la hojarasca, que es uno de los recursos más efectivos para el desarrollo de macrohongos como *Marasmius* sp. Las especies de la familia Marasmiaceae fueron las mejor representadas en este estudio, siendo especies numerosas, llamativas, comunes y muy diversas en Panamá y en los trópicos en general.

En cuanto al Orden Polyporales, se destaca por agrupar especies que son los principales descomponedores de madera en bosques tropicales. Sus cuerpos fructíferos son longevos y con consistencia leñosa o coriácea, lo que les permite adaptarse a las condiciones variables de temperatura, humedad y precipitación típicas del bosque seco tropical. Gracias a estos organismos, se garantiza una correcta gestión de la madera muerta, facilitando su descomposición y aportando nutrientes esenciales para muchos organismos que dependen de diferentes etapas de la descomposición de la madera (Kirk *et al.*, 2008).

En esta investigación también se documentaron especies utilizadas en otros estudios como bioindicadores del estado de conservación de los ecosistemas, como *Ceratiomyxa morchella*, una especie de hongo inferior (Myxomicetos/Reino Protista) descrita en Hongos de Panamá (Guzmán y Piepenbring, 2011), prefiere ambientes boscosos sombreados y muy húmedos, especialmente cerca de ríos y cascadas (Liu, 1983). Las especies *Cookeina speciosa* y *Cookeina tricolora* son especies muy fáciles de encontrar e identificar en campo, puesto que se encuentran ampliamente distribuidas en las zonas tropicales y subtropicales muy comunes en los ecosistemas selváticos de Panamá, y son bioindicadores ecológicos de poco disturbio o incluso ecosistemas muy húmedos y en procesos de recuperación (Guzman y Piepenbring, 2011).

Las especies como *Lentinus* spp. y *Cerrena hydroides* son frecuentes en vegetaciones tropicales alteradas o perturbadas, al igual que *Earliella scabrosa*, *Schizophyllum commune* y *Fabiosporus sanguineus*. La presencia de estas especies en este estudio refleja el estado de perturbación antropogénica y la disponibilidad de sustratos y condiciones ambientales propias de ecosistemas boscosos alterados, lo que resalta la necesidad de un manejo controlado de los recursos en estas áreas. Asimismo, *Panaeolus antillarum*, una especie común en el sendero de investigación, área que es utilizada como tránsito para ganado, caballos y animales domésticos de los moradores, debido a ello, es entendible que pudiera reportarse una especie como esta, ya que es una especie común en el estiércol de ganado y caballo.

Finalmente, las especies como *Auricularia mesenterica* y *Auricularia fuscosuccinea*, se caracterizan por su capacidad de retener agua, lo mismo las ayuda a sobrevivir periodos secos y son indicadoras de ambientes muy húmedos y temperaturas que son propias para el crecimiento de otras especies de macrohongos.

CONCLUSIONES

Los macrohongos son organismos muy importantes, puesto que su alta sensibilidad a la dinámica en el ecosistema y sus alteraciones antrópicas nos permite tomar mejores decisiones en materia de uso eficiente de los recursos naturales y análisis en la gestión de las áreas protegidas, ya que aportan información valiosa en la dinámica del ecosistema en el que se desarrollan y criterios que se deben tomarse en cuenta para lograr la conservación del sitio.

Algunos de los especímenes colectados tienen importancia como bioindicadores de perturbación antrópica, particularmente demostrando su presencialidad en el bosque secundario de Guanache, el cual es parte de la zona de amortiguamiento del Parque Nacional Portobelo, por lo que esta investigación evidencia las presiones antrópicas constantes a la que se ven sometidos estos fragmentos de bosques, si queremos que estas áreas sean conservadas, se deben hacer planes de gestión, control y vigilancia ambiental, los cuales deben estar acompañados por los pobladores de la zona, con el objetivo de disminuir, controlar y mitigar estas actividades perjudiciales para los ecosistemas presentes y la conservación de especies de flora, fauna y funga asociadas a estos ecosistemas.

AGRADECIMIENTO

Queremos agradecer primeramente a la Universidad de Panamá, a la Vicerrectoría de Investigación y Postgrado (VIP), por permitirnos contar con fondos para poder realizar esta investigación a través de los fondos CU-FI 2020, a la profesora Vielka Murillo por ser una fuente de ánimo y su asesoría para la confección y desarrollo de esta investigación. A nuestro guía ecológico Jason del grupo Portobelo Adventures por su destacada labor como guía experimentado y camarógrafo en las giras de campo. A todos nuestros colegas que nos acompañaron en las giras de investigación, los cuales nos animaron y colaboraron con la búsqueda y colecta de las muestras, gracias a su apoyo pudimos acumular buenas experiencias que no serán olvidadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arenas, G. (2008). *Micología Médica Ilustrada*. Generalidades. México: McGraw-Hill Interamericana.
- Aranda, Y., Legister, K., Farnum-Castro, F., & Murillo, V.E. (2014). Diversidad de macrohongos en el Parque Nacional Portobelo, Provincia de Colón. *Revista Colón Ciencias, Tecnología y Negocios*, 1 (1), 19-29.
- Bottrill, M. C., Hockings, M., & Possingham, H. (2011). In pursuit of knowledge: addressing barriers to effective conservation evaluation. *Ecology and Society*, 2, 1-14.
- Cassman, N., et al. (2016). Plant and soil fungal but not soil bacterial communities are linked in long-term fertilized grassland. *Scientific Reports*, 6, 320-680.
- Córdoba, K., Torres, P., Aguilar, Y., & Hurtado, A. (2006). Análisis comparativo de los macromicetos colectados en dos municipios del departamento del Chocó. *Revista institucional Universidad Tecnológica del Chocó*, 25, 5-9.
- Gómez, R., Marcela P., Gutiérrez Q., Kiara J. (2014) *Caracterización taxonómica y química de hongos macromicetos del Jardín Botánico de la Universidad Tecnológica de Pereira*. Pereira, 45h. Trabajo de grado (Tecnólogo Químico). Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnologías. Escuela de Química. Disponible en el catálogo en línea de la Biblioteca de la Universidad Tecnológica de Pereira.
- Guerrero, T. & Ulloa, M. (2013). *El Reino de los Hongos: Micología Básica y Aplicada*. México: UNAM, Fondo de la Cultura Económica.
- Guzmán, G., & Piepenbring, M. (2011). *Los Hongos de Panamá. Introducción a la Identificación de los Hongos Macroscópicos*. México: Instituto de Ecología, A.C.
- Hawksworth, D., & Lücking, R. (2017). Fungal diversity revisited: 2.2 to 3.8 million species. *Microbiology Spectrum*, 5 (4), 5-14.
- Huhndorf, S. M., Lodge, D. J., Wang, C. J., & Stokland, J. N. (2004). *Macrofungi on woody substrata*. In G. M. Mueller, G. F. Bills, & M. S. Foster (Eds.), *Biodiversity of Fungi. Inventory and Monitoring Methods*. New York: Elsevier Academic Press. 159–168.
- Lindblad, I. (2001). *Wood-inhabiting fungi in primary and secondary seasonally dry tropical forest, Costa Rica*. In I. Lindblad (Ed.), *Diversity and distribution of Wood-inhabiting*

- Basidiomycetes on decomposing logs-examples from tropical and boreal forests (pp. 1–23). Norway: University of Oslo.
- Liu, C. H. (1983). Myxomycetes of Taiwan IV: Myxomycetes corticícolas. *Taiwania*, 28, 89-115.
- Maron, M., Gordon, A., Mackey, B., Possingham, H., & Watson, J. (2015). Stop misuse of biodiversity offsets. *Nature*, 523, 401-403.
- McLaughlin, D., & Spatafora, J. (2014). The Mycota VII (part A). *Systematics and Evolution*, 2, 20-34.
- Mueller, G. M., Bills, G. F., & Foster, M. S. (2004). *Biodiversity of Fungi – Inventory and Monitoring*.
- Ortiz, O., Vargas, U., Lanuza, A., De La Cruz, V., & Moreno de Niño, Y. (2020). Current Status of Protected Areas in Colon Province, Panama: a Descriptive Framework for Better Management, 22, 151-174.
- Piepenbring, M. (2019). PB Checklist of Fungi in Panama. *Puente Biológico*, 1, 1-96. Recuperado de <http://revistas.unachi.ac.pa/index.php/puentebiologico/article/view/295>
- Salazar, V. (2016). *Manual de Micología Básica: Introducción al Estudio de los Hongos*. Concepción, Chile: Universidad de Concepción y ONG Micófilos.
- Talley, S., Phyllis, D., & Kursar, T. (2002). The effects of weather on fungal abundance and richness among 25 communities in the Intermountain West. *BMC Ecology*, 2 (1), 1-7.
- Trejos, M., & Farnum, F. (2014). Estimación de la diversidad de macro-hongos como indicadores de la calidad del bosque de manglar en Bahía Las Minas, Panamá. *Revista científica centros*, 3, 143-155.
- Vasco, A. M., & Franco, A. E. (2013). Diversity of Colombian macrofungi (Ascomycota Basidiomycota). *Mycotaxon*, 121, 429.
- Wright, J., & Alberto, E. (2002). *Hongos: Guía de la Región Pampeana*. Buenos Aires, Argentina: Colin Sharp.



Spectroscopic analysis and modeling of quasar 3C-279

Análisis espectroscópico y modelado del cuásar 3C-279

Franklin Vasquez Guardia

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”, Università degli Studi di Padova, Vicolo dell’Osservatorio 3, I-35122, Padova, Italia.

franklinsimon.vasquezguardia@studenti.unipd.it

<https://orcid.org/0000-0002-1413-6617>

Fecha de recepción: 1 de octubre de 2025

Fecha de aceptación: 23 de octubre de 2025

DOI: <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v28n1.a8945>

ABSTRACT

We analyze the X-ray and ultraviolet emission of the AGN 3C-279 using Swift data. Located 5 billion light-years away at a redshift distance of $Z=0.537$, 3C-279 is a bright AGN powered by a relativistic jet from its supermassive black hole and served as a calibration source for the EHT’s first black hole image.

We model the spectral emission of 3C-279 in the 0.3–6 keV range to study its luminosity evolution before, during, and after a GRB event, comparing our results with those in the previous literature. Five Swift datasets were processed with HEASARC software, using XRT and UVOT data to characterize X-ray and UV behavior. The results confirm expected luminosity peaks and flare activity, consistent with published studies, demonstrating the capability of XRT and UVOT to probe low- to mid-energy X-ray and UV phenomena.

KEYWORDS

Active Galactic Nucleus, Aperture Photometry, Spectral Analysis, Light curve

RESUMEN

Analizamos la emisión en rayos X y ultravioleta del AGN 3C-279 utilizando datos del satélite Swift. Ubicado a 5 mil millones de años luz a una distancia redshift de $Z=0.537$, 3C-279 es un núcleo galáctico activo brillante alimentado por un haz relativista de su agujero negro supermasivo y fue una fuente de calibración para la primera imagen de un agujero negro obtenida por el EHT.

Se modeló la emisión espectral de 3C-279 en el rango de 0,3 a 6 keV para estudiar su evolución de luminosidad antes, durante y después de un evento de estallido de rayos gamma GRB, comparando los resultados con la literatura existente. Se analizaron cinco conjuntos de datos de Swift, procesados con software de HEASARC, empleando datos de XRT y UVOT para caracterizar su comportamiento en rayos X y UV. Los resultados confirman los picos de luminosidad y la actividad de llamaradas esperados, demostrando la eficacia de XRT y UVOT para estudiar fenómenos astrofísicos en los rangos bajo y medio de energía.

PALABRAS CLAVE

Núcleo Activo de Galaxia, Fotometría de Apertura, Análisis Espectral, Curva de Luz

INTRODUCCIÓN

The target for our data analysis is the blazar 3C-279, located at $\alpha = 12^{\text{h}} 56^{\text{m}} 11.7^{\text{s}}$, $\delta = -05^{\text{h}} 47^{\text{m}} 21.6^{\text{s}}$ (JD 2000.0) and at a distance of $Z = 0.537$ (3.08 Gpc \approx 5 Gly) from Earth. It is powered by a supermassive black hole and exhibits intense gamma-ray variability, rapid flares, and emission across multiple wavelengths. It was the first blazar to be observed in gamma rays (Hartman et al., 1992)

A blazar is a subtype of active galactic nucleus (AGN) where the relativistic jet is pointed almost directly toward the solar system. As a result, the galactic engine can be observed more easily and appears more luminous than it would otherwise be when viewed from the side (Rajguru 2010; 2024).

Previous observations of 3C-279 have shown that the blazar experiences surges in activity lasting days, which some propose to be cyclic (Wang 2022; Hayashida 2015), separated by longer periods of stable activity lasting months or years. These surges are characterized by bursts of energy, especially in gamma rays, with reported flares in 2012 (Blinov 2021), 2015 (Singh 2020), and 2017–2018 (Prince 2020). This makes 3C-279 an ideal candidate to study the relationship between supermassive black holes and their environments and, in our case, to analyze how the flux over a certain energy range behaves during different activity states.

Figure 1.

Artistic representation of Quasar 3C-279 from scientific data (ESO 2012).



Most of the energetic flux in an AGN is primarily generated by the supermassive black hole at its center and the surrounding accretion disk formed by infalling matter (Epstein & Martin 2025). In a typical AGN, the central black hole is not isolated from its environment but surrounded by enormous quantities of matter. This matter does not fall directly into the black hole but instead accretes as it spins and is drawn toward the center (Bellovary, 2016).

This accretion process can heat the gas to temperatures of millions of degrees, producing bolometric luminosities on the order of $10^{46} - 10^{48} \text{ erg/s}$, comparable to the total energy output of entire galaxies. Additionally, friction and twisting magnetic fields enhance the chaotic activity near the black hole (Alston, 2022). If enough gravitational energy is converted into heat, a relativistic jet of highly energetic particles, such as electrons and ions, is emitted from the poles of the rotating black hole, and the AGN is classified as a quasar (Fabian 2012). If this beam is pointed toward Earth, an even higher apparent luminosity can be detected, and the object is recognized as a blazar.

AGNs typically emit radiation across the entire electromagnetic spectrum (Padovani 2023), though not all of it is detectable due to absorption by the galactic disk, intergalactic dust, high redshift, or instrument sensitivity limits.

INSTRUMENTATION

For this research, we used several datasets of 3C-279 observed with the Swift telescope. Swift is a space observatory launched in 2004 by NASA to detect and study gamma-ray bursts (GRBs). It carries three instruments: BAT (Burst Alert Telescope), XRT (X-ray Telescope), and UVOT (Ultraviolet/Optical Telescope), which together enable rapid multi-wavelength follow-up observations (Swift Team 2025)

The Burst Alert Telescope (BAT)

BAT is Swift's primary instrument, designed to detect and locate GRBs in real time and determine their sky coordinates. It then triggers the spacecraft to reorient the XRT and UVOT instruments. It also provides hard X-ray imaging of transient events, with an energy detection range of 15–150 keV, a 1.4 steradian field of view ($\approx 16\%$ of the sky), and a CdZnTe detector array of 32,768 elements (total area $\approx 5\,200\text{ cm}^2$).

The X-ray Telescope (XRT)

XRT provides precise localization and time-resolved spectroscopy of X-ray afterglows of GRBs. It has an energy coverage of 0.2–10 keV (soft to medium X-rays), an effective area of approximately 110 cm^2 at 1.5 keV, and a field of view of 23.6×23.6 arcmin (Burrows et al., 2005).

XRT operates in three modes:

- Photon Counting (PC): low count rate, full CCD imaging in 2.5 s intervals.
- Windowed Timing (WT): high count rate, 1D imaging of a 200×100 pixel strip at 1.8 ms intervals.
- Piled up Mode: handles bright sources that saturates the others.

The UV/Optical Telescope (UVOT)

UVOT provides rapid optical and ultraviolet follow-up observations of GRBs detected by Swift. It covers 170–650 nm (UV to optical), with a 30 cm aperture and 17×17 arcmin field of view. It includes six broad-band filters (V, B, U, UVW1, UVM2, UVW2), a white filter, grism, and magnifier.

Typical 5σ sensitivities at 1000 s exposure are:

Table 1.

UVOT filter response and sensitivity (at 5σ , 1000 s exposure) (Swift UVOT Filters).

Filter	Central Wavelength (\AA)	Magnitude (AB)
V	5468	22.3
B	4392	22.3
U	3465	22.7
UVW1	2600	21.7
UVM2	2246	20.7
UVW2	1928	21.3

Software

The main software used was NASA’s HEASARC HEASoft package, which includes FTOOLS and XANADU.

- XANADU : high-level, multi-mission tools for spectral, timing, and imaging analysis.
- FTOOLS: general and mission-specific tools for manipulating FITS files.
Additional utilities include:
 - FITSIO (core library for reading/writing FITS files),
 - fv (FITS browser/editor/plotter),
 - XSTAR (for modeling photoionized gases).
 SAOImage DS9 was also used for visualization and to define apertures for photometry.

Datasets

The datasets were obtained from the HEASARC database (HEASARC 2025). Two main criteria guided selection:

- (1) a long, continuous observing window; and (2) a small offset from the target.
- The first dataset (obsID 00035019011) met these requirements with a duration of 15 483 s (\approx 4.3 h) and offset of 0.3 arcmin. For the GRB flare reported by Singh (2020) on June 16, 2015 (J2000, UTC), we retrieved datasets 00035019180 and 00035019181. To complement the

analysis, we also included pre- and post-event observations in the 00035019176 and 00035019185 datasets.

Table 2.

Swift datasets used in this research.

ObsID	Date	Start (UTC)	XRT Duration (s)	UVOT Duration (s)
00035019011	30/11/2008	00:22:00	15 483.46	15 574.77
00035019176	15/06/2015	14:27:58	1995.81	1994.11
00035019180	16/06/2015	03:27:59	962.87	961.70
00035019181	16/06/2015	16:04:58	937.70	936.10
00035019185	17/06/2015	20:59:58	491.44	488.56

METHODOLOGY AND DATA PROCESSING

Each dataset contains files for UVOT, XRT, and BAT instruments. This analysis focuses on UVOT and XRT.

UVOT Data Processing

From the subset of files corresponding to the UVOT instrument, the image files with the “_sk” suffix were selected, indicating frames that contain sky coordinates, i.e., right ascension (α) and declination (δ).

The images were visually inspected using “DS9” software to confirm that the target was within the field of view and free from contaminants such as blurring or data artifacts that could render the data unusable. Each image was also checked for aspect correction to account for possible offsets between frames, as a single “_sk” image file may include multiple exposures. When aspect correction was available, the images were co-added to improve the signal-to-noise ratio (S/N). After merging, aperture photometry was performed on the co-added image. This technique measures the flux of the target by selecting a circular or elliptical aperture around the object and subtracting the flux from a surrounding background aperture that contains no other sources as seen on Figure 2.

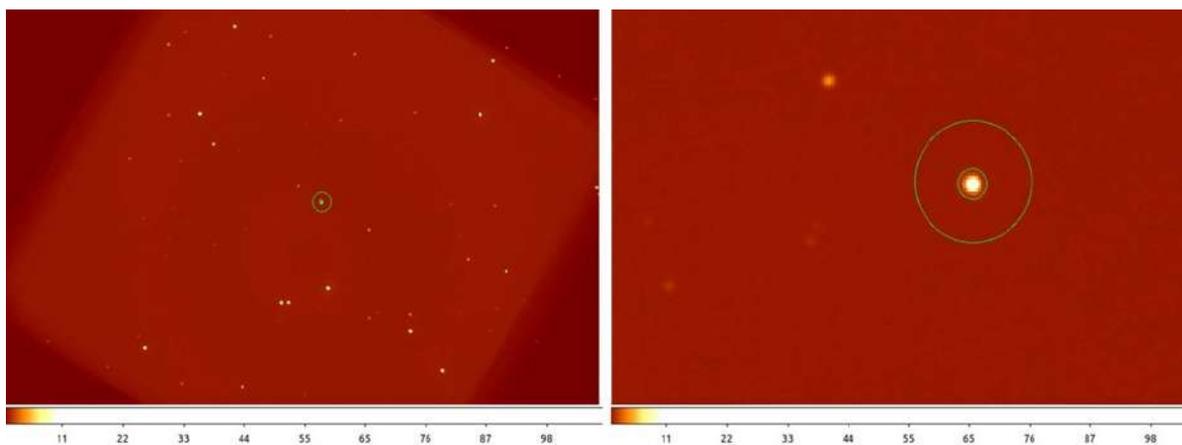
HEASoft provides two methods for analyzing sources in UVOT images: an automatic detection mode for aperture photometry and a manual mode in which the user defines the coordinates, aperture size, and shape. For this analysis, the manual mode was selected.

For all datasets, a 5-pixel aperture was used for the source and a 20-pixel aperture for the background. These values were determined through visual inspection in DS9 to minimize contamination from nearby sources. The photometric analysis was performed using the “uvotsource” command and obtained plots and images can be seen on the Results section.

A Lightcurve and a spectral plot were generated from the aperture photometry data. The number of lightcurve data points varies between datasets, while each spectral plot contains a single data point per dataset due to the telescope’s operational configuration. This is explained in greater detail in the Discussion section.

Figure 2.

Left: UVOT field of view for obsID 00035019011. Right: target region with 5 and 20 arcsec aperture rings.



XRT Data Processing

For the XRT data reduction, event files generated onboard the telescope were used, specifically those obtained when the telescope operated in Photon Counting (PC) mode. In this configuration, the full CCD frame is exposed, allowing complete spatial and spectral information to be analyzed.

The data were processed using the xrtpipeline, which automates data calibration and filtering. The input parameters include the target coordinates in right ascension (α) and declination (δ). By default, the pipeline extracts a circular region of 20 pixels (approximately 47 arcseconds) around the target. This default value was considered appropriate, as the analysis focused on energy levels up to 10 keV. According to Burrows et al. (2005) and the Swift XRT technical

documentation (NASA), approximately 90% of the Point Spread Function (PSF) is contained within a radius of about 30 arcseconds for these energy levels.

Figure 3 shows the XRT field of view for observation ID 00035019011, including the detected target and the coordinate grid.

The pipeline produces three output files: a spectrum file (.pha), a lightcurve file (.lc), and an image file (.img), as illustrated in Figure 3. The lightcurve and spectrum files were further processed separately, and their corresponding plots and analyses are presented in the Results section.

Lightcurves were produced using the “lcurve” command. Since the original lightcurves are often recorded with very short time resolutions (small bin sizes), a large number of data points may be produced. Rebinning was therefore applied, especially for long exposures or bright sources. The lcurve command allows the user to specify bin durations, determining the counts accumulated in each time bin. The binning parameters and the statistical values for each dataset are presented in the Results section.

The spectral files (.pha) were calibrated using two auxiliary files: the Response Matrix File (RMF), which converts raw counts into physical quantities such as flux and spectral parameters, and the Ancillary Response File (ARF), which describes the telescope’s effective area as a function of energy and time. Both file types are provided by the CALDB calibration database included in the HEASoft package and were applied using the “grppha” command.

Spectral analysis was carried out using the XSPEC X-ray fitting package. Before fitting, the data were inspected for channels flagged as having poor quality, typically due to a low number of counts in a given energy bin. The grppha command was also used to group the data, ensuring at least 20 counts per channel so that Gaussian statistics could be applied.

The final spectral plots were generated by excluding energy ranges outside the XRT sensitivity (below 0.3 keV and above 10.2 keV) and removing flagged channels. The resulting spectra for each dataset are shown in Figure 8.

Figure 4 shows an example spectrum from observation 00035019011, including all channels within the XRT sensitivity range.

Figure 3.

XRT detected target source and field of view for obsID 00035019011.

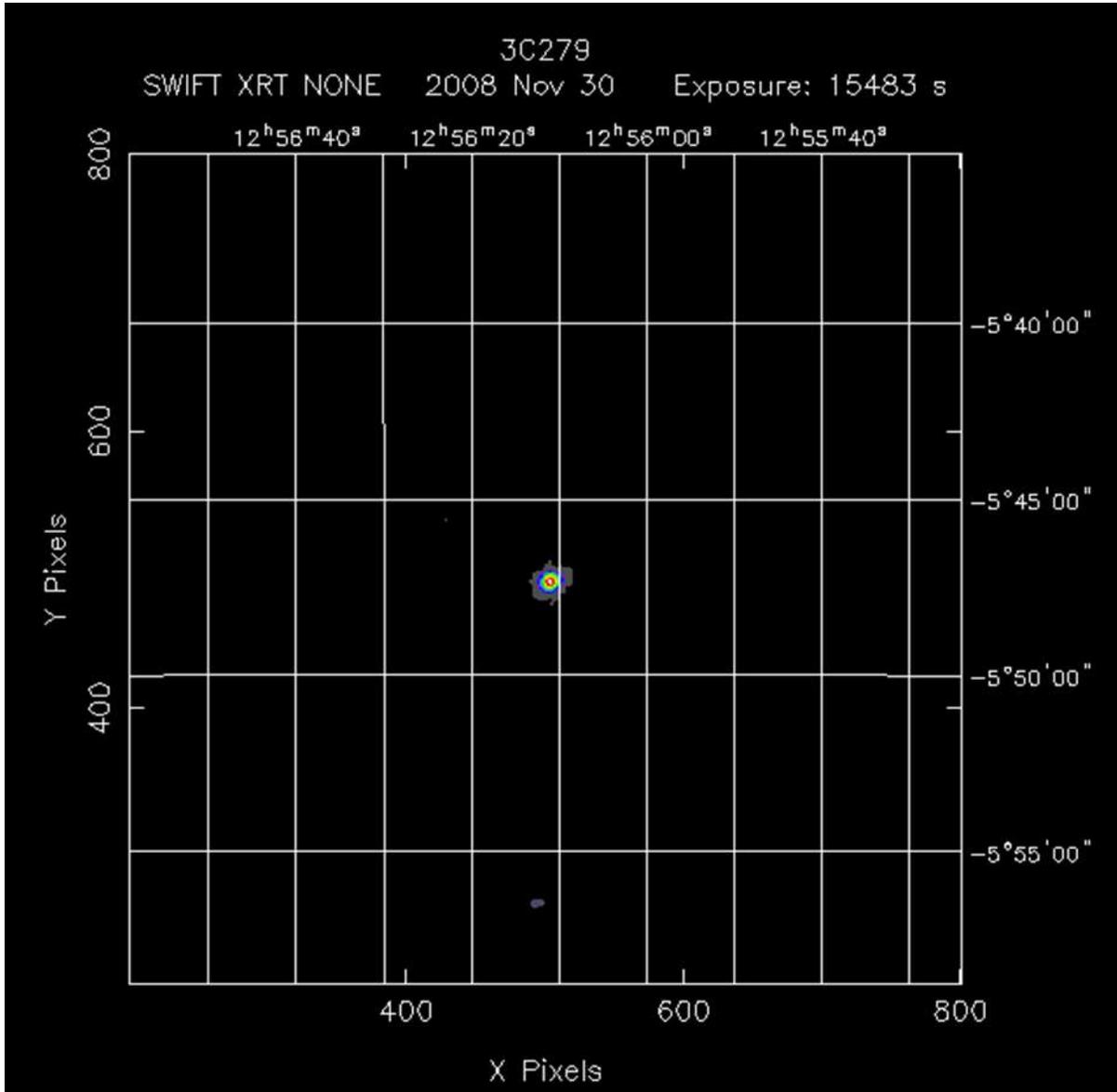
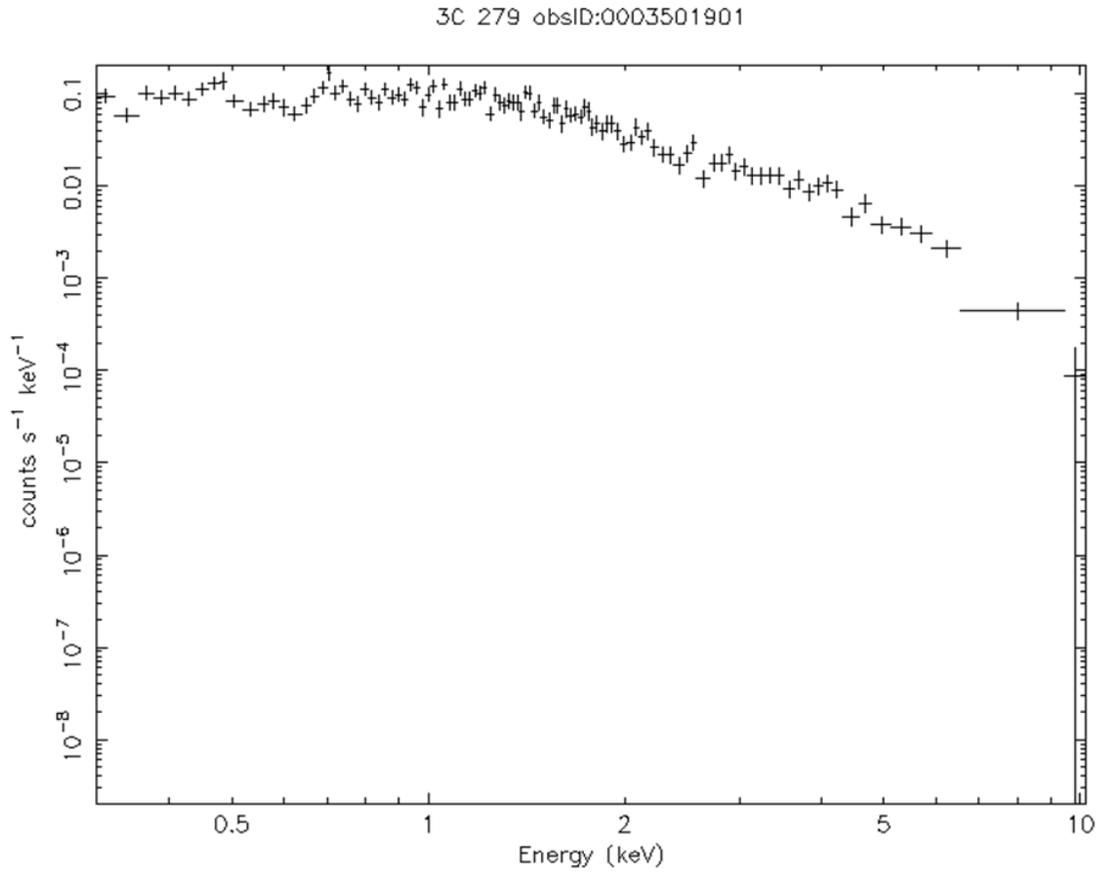


Figure 4.

Spectrum of obsID 00035019011 with all channels within XRT sensitivity range included.



Model Fitting

We then proceeded to fit the data with a model. XSPEC allows for different types of models, with multiplicative and additive being the basic types, and it also allows combining them.

By looking at our spectrum plots, especially before removing the flagged channels (Figure 4), we see that the data appear to follow a power law, quite different from the thermal emission characteristic of a stellar spectrum. Therefore, we chose a power-law model to fit our data, described by:

$$A(E) = KE^{-\alpha}$$

- A represents the additive component,
- α is the photon index of the power law,
- K represents the normalization constant in units of photons $\text{keV}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ at 1 keV.

Taking into consideration the reported distance of $Z = 0.537$ to our source 3C-279, we also included the absorption of the flux due to extinction, which refers to how much of the flux from the source has been absorbed by matter before reaching the detector. Since neutral hydrogen is commonly present in interstellar dust and gas, we include a hydrogen column density between the source and the telescope, expressed as N_H (cm^{-2}), to account for absorption.

With the model “phabs,” we take this absorption into account. This model has the form:

$$M(E) = \exp[-N_H \sigma(E)]$$

- M represents the multiplicative component of the model,
- N_H represents the galactic extinction,
- $\sigma(E)$ is the photoelectric cross-section.

To start the fitting, the command “model” allows us to input the chosen model and evaluate how well it fits the data. In our case, the command takes the form “model phabs(powerlaw).” The program takes three inputs for this model: the hydrogen column density N_H (cm^{-2}), the photon index α , and the normalization constant K (photons $\text{keV}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ at 1 keV).

The magnitude of the extinction is obtained from the “nh” command, another tool provided by XSPEC. This package simulates the attenuation of X-ray (or other electromagnetic) photons as they pass through interstellar hydrogen gas along the line of sight of the target. For 3C-279, we obtained an average value of $0.022 \times 10^{-22} \text{cm}^{-2}$ for the hydrogen column density.

Several authors (Albert 2008); (Singh 2020); (Thekkoth 2023) report a power index of approximately 2 for the energy ranges in which XRT provides reliable precision (0.3–10 keV). Therefore, we adopted a value of 2 for the power index as the model input.

The normalization factor was estimated by measuring the counts s^{-1} around the 1 keV energy level and dividing by the effective area of XRT (135cm^2).

We then froze the parameter N_H , since we consider it a reliable estimate for the hydrogen column density and wish to evaluate how well the model fits our data with this fixed value. The model was subsequently re-normalized and fitted to the data.

We used the command “error” to check the 90 % confidence level for our parameters, and performed a goodness test on the fit, as seen in the results and discussion sections.

To include the emitted flux in our model, we added an additional term with the command “editmod phabs \times cflux(powerlaw),” where we specify the energy ranges for the flux to be measured. We selected the 0.3–6 keV range for all datasets, as explained in the Discussion.

We ended up with six variables in the model, of which four were fixed: the hydrogen column density, the minimum and maximum flux magnitudes, and the normalization factor (also fixed for reference). We then re-evaluated the 90 % confidence range for the free parameters. Finally, our model allowed us to calculate the flux emitted from the source between 0.3 and 6 keV, as shown in the following section.

RESULTS

UVOT Results

For all UVOT datasets where aperture photometry was performed, we present the resulting lightcurve plots in Figure 5 and tables containing the Magnitude measured in both the AB and Vega systems in Tables 3 to 8. Spectrum plots are also presented in Figure 6. It must be mentioned that the dataset from obsID:00035019181 (see Table 2) did not produce lightcurve or spectrum plots; this is further touched upon in the Discussion. On the other hand, from the dataset of obsID:00035019011 (see Table 2), we were able to extract two lightcurve and spectrum plots, one for each of the filters used on this dataset (U and UVW2).

Table 3.

UVOT source analysis for obsID 00035019011 (U Filter)

U Filter	Source	Background [arcsec ²]	Background Limit	Coincidence Limit
Significance (σ)	427,1	5	–	–
Magnitude (Vega System)	$15,25 \pm 0,02$ [stat] \pm 0,02 [sys]	21,57	20,78	11,91
Magnitude (AB System)	$16,27 \pm 0,02$ [stat] \pm 0,02 [sys]	22,59	21,80	12,93
Flux Density [erg s ⁻¹ cm ⁻² Å ⁻¹]	$(2,81 \pm 0,06$ [stat] \pm 0,09 [sys]) $\times 10^{-15}$	$(8,33 \pm 0,01$ [stat] \pm 0,13 [sys]) $\times 10^{-18}$	$1,72 \times 10^{-17}$	$6,06 \times 10^{-14}$

Table 4.*UVOT source analysis for obsID 00035019011 (UVW2 Filter)*

UVW2 Filter	Source	Background [arcsec⁻²]	Background Limit	Coincidence Limit
Significance (σ)	97,8	5	–	–
Magnitude (Vega System)	$15,64 \pm 0,02$ [stat] \pm 0,03 [sys]	23,58	19,57	10,95
Magnitude (AB System)	$17,37 \pm 0,02$ [stat] \pm 0,03 [sys]	25,31	21,70	12,68
Flux Density [erg s ⁻¹ cm ⁻² Å ⁻¹]	$(2,96 \pm 0,05$ [stat] \pm 0,06 [sys]) $\times 10^{-15}$	$(1,97 \pm 0,02$ [stat] \pm 0,4 [sys]) $\times 10^{-18}$	$5,52 \times 10^{-17}$	$2,22 \times 10^{-14}$

Table 5.*UVOT source analysis for obsID 00035019176 (U Filter)*

U Filter	Source	Background [arcsec⁻²]	Background Limit	Coincidence Limit
Significance (σ)	205,2	5	–	–
Magnitude (Vega System)	$14,93 \pm 0,02$ [stat] \pm 0,02 [sys]	22,88	20,26	11,91
Magnitude (AB System)	$15,95 \pm 0,02$ [stat] \pm 0,02 [sys]	23,90	21,28	12,93
Flux Density [erg s ⁻¹ cm ⁻² Å ⁻¹]	$(3,77 \pm 0,08$ [stat] \pm 0,06 [sys]) $\times 10^{-15}$	$(2,49 \pm 0,01$ [stat] \pm 0,04 [sys]) $\times 10^{-18}$	$2,77 \times 10^{-17}$	$6,06 \times 10^{-14}$

Table 6.*UVOT source analysis for obsID 00035019180 (UVW2 Filter)*

UVW2 Filter	Source	Background [arcsec⁻²]	Background Limit	Coincidence Limit
Significance (σ)	74,1	5	–	–
Magnitude (Vega System)	$15,22 \pm 0,03$ [stat] $\pm 0,03$ [sys]	24,33	19,89	10,95
Magnitude (AB System)	$16,95 \pm 0,03$ [stat] $\pm 0,03$ [sys]	26,06	21,62	12,68
Flux Density [erg s ⁻¹ cm ⁻² Å ⁻¹]	$(4,83 \pm 0,10$ [stat] $\pm 0,10$ [sys]) $\times 10^{-15}$	$(9,92 \pm 0,23$ [stat] \pm $0,22$ [sys]) $\times 10^{-19}$	$5,91 \times 10^{-17}$	$2,22 \times 10^{-13}$

Table 7.*UVOT source analysis for obsID 00035019181 (UVW2 Filter)*

UVW2 Filter	Source	Background [arcsec⁻²]	Background Limit	Coincidence Limit
Significance (σ)	70,1	5	–	–
Magnitude (Vega System)	$15,30 \pm 0,03$ [stat] $\pm 0,03$ [sys]	24,33	19,88	10,95
Magnitude (AB System)	$17,03 \pm 0,03$ [stat] $\pm 0,03$ [sys]	26,06	21,61	12,68
Flux Density [erg s ⁻¹ cm ⁻² Å ⁻¹]	$(4,04 \pm 0,10$ [stat] $\pm 0,09$ [sys]) $\times 10^{-15}$	$(9,91 \pm 0,23$ [stat] \pm $0,22$ [sys]) $\times 10^{-19}$	$5,99 \times 10^{-17}$	$2,22 \times 10^{-13}$

Table 8.*UVOT source analysis for obsID 00035019185 (UVM2 Filter)*

UVM2 Filter	Source	Background [arcsec ⁻²]	Background Limit	Coincidence Limit
Significance (σ)	55,7	5	–	–
Magnitude (Vega System)	15,32 \pm 0,03 [stat] \pm 0,03 [sys]	24,02	19,51	10,42
Magnitude (AB System)	17,01 \pm 0,03 [stat] \pm 0,03 [sys]	25,71	21,20	12,11
Flux Density [erg s ⁻¹ cm ⁻² Å ⁻¹]	(3,45 \pm 0,10 [stat] \pm 0,02 [sys]) \times 10 ⁻¹⁵	(1,14 \pm 0,03 [stat] \pm 0,01 [sys]) \times 10 ⁻¹⁸	7,29 \times 10 ⁻¹⁷	3,14 \times 10 ⁻¹³

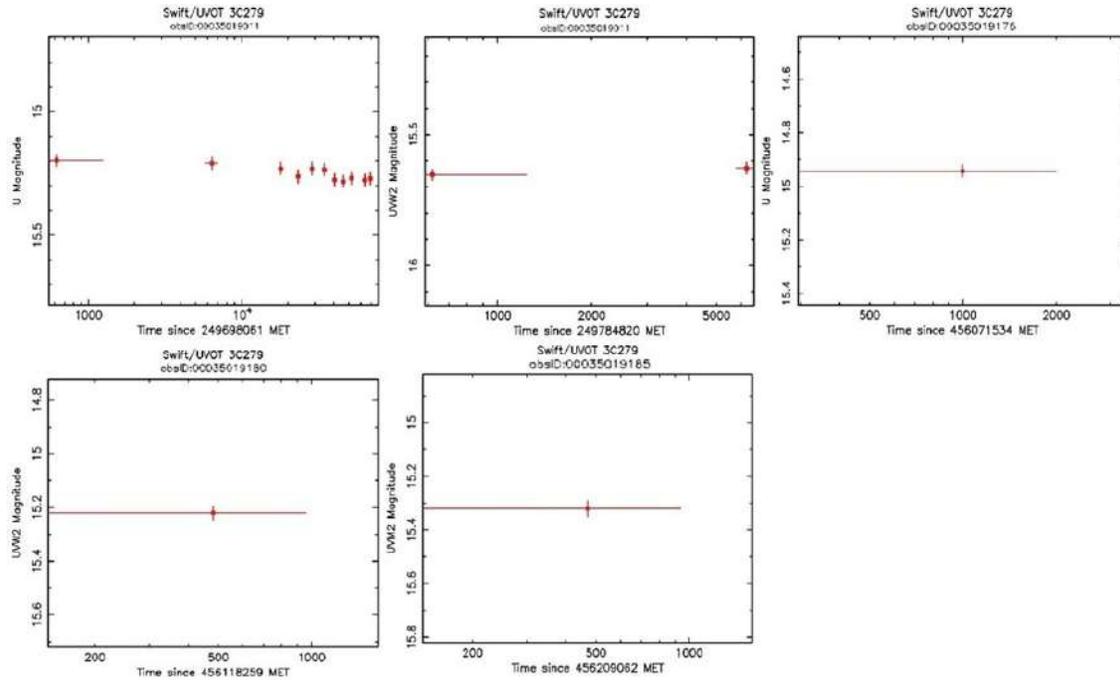
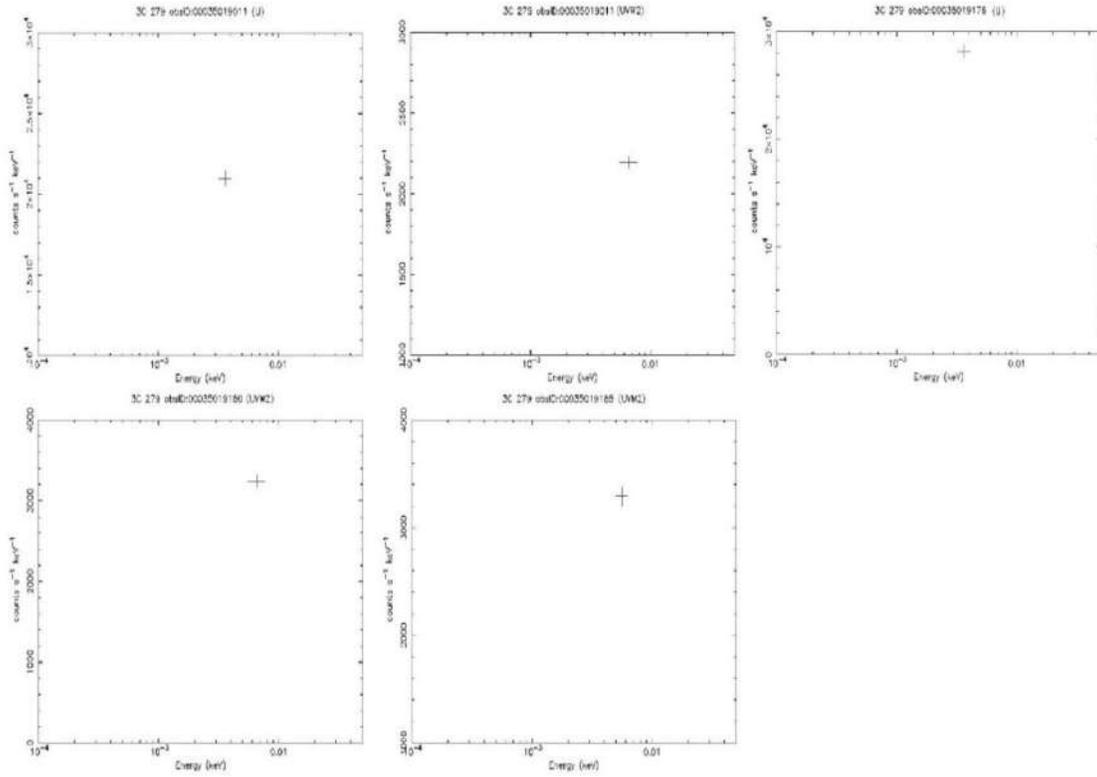
Figure 5.*Lightcurves obtained from the UVOT data.*

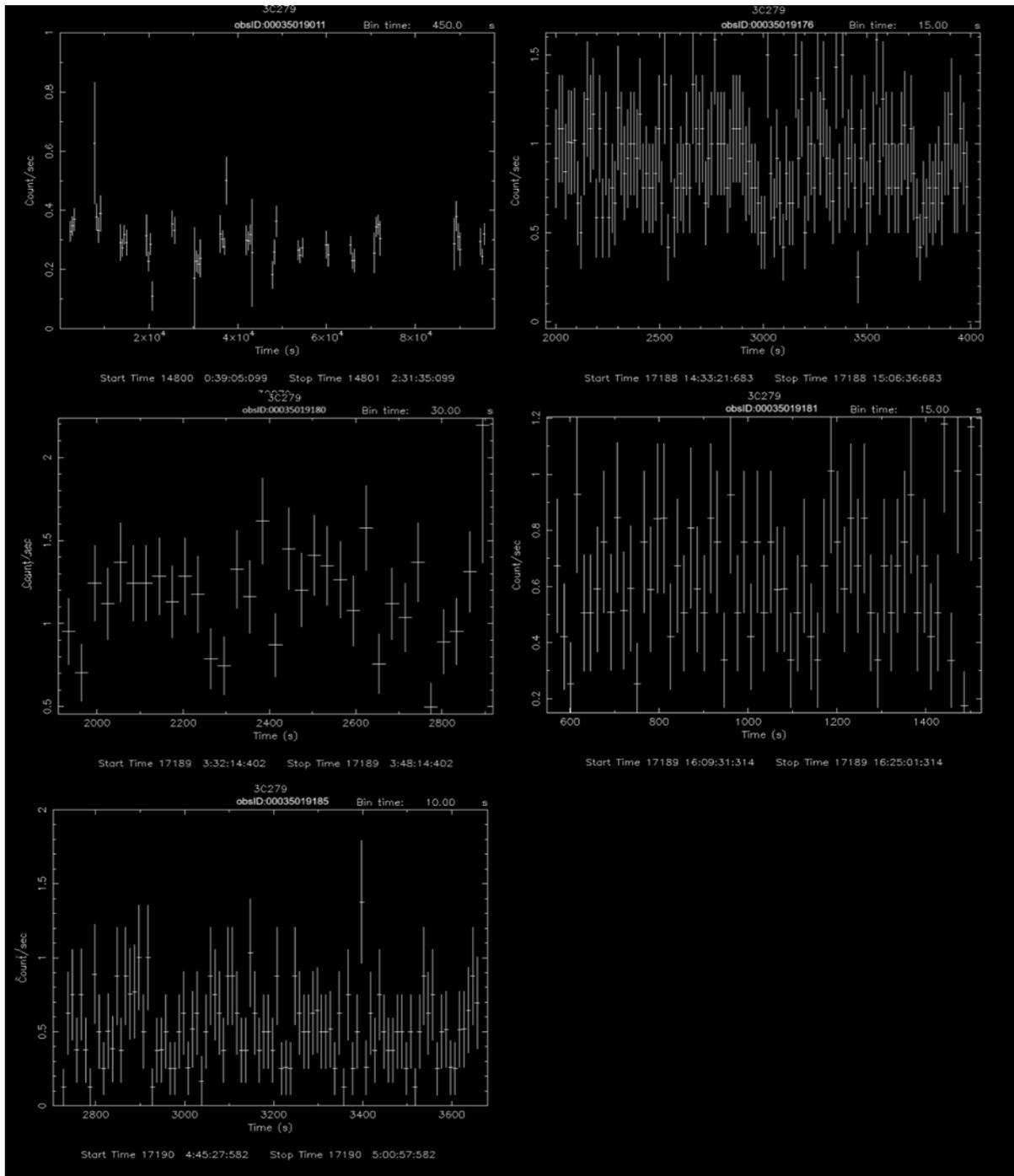
Figure 6.
Spectrum plots from UVOT data.



XRT Results

As described before, the XRT dataset analysis mainly focused on two files produced from the xrtpipeline: the lightcurve file, which plots counts/s vs time (Figure 7) and the spectrum file, which plots counts s⁻¹ keV⁻¹ vs energy (Figure 8)

Figure 7.
Lightcurves produced from all XRT observations



XRT Lightcurves

The lightcurve plots can be seen in Figure 8, and their respective statistical analysis in Tables 9 to 13.

Table 9.

Results from statistical analysis of X-ray spectrum lightcurve (obsID 00035019011)

Parameter	Obtained Value
Newbin Integration Time (s)	450.00
Interval Duration (s)	93150.00
No. of Newbins	51
Average (c/s)	$0.29860 \pm 0.90E-02$
Standard Deviation (c/s)	$0.77570E-01$
Minimum (c/s)	0.11062
Maximum (c/s)	0.62750
Variance ((c/s) ²)	$0.60171E-02 \pm 0.12E-02$
Expected Variance ((c/s) ²)	$0.40254E-02 \pm 0.81E-03$
Third Moment ((c/s) ³)	$0.62264E-03$
Average Deviation (c/s)	$0.52517E-01$
Skewness	1.4192 ± 0.34
Kurtosis	5.3714 ± 0.69
Chi-Square	40.046 dof 50
Chi-Square Prob of constancy	0.84192
Kolm.-Smir. Prob of constancy	$0.62448E-07$
RMS fractional variation	$0.98076E-01$ (3 sigma)

Table 10.*Results from statistical analysis of X-ray spectrum lightcurve (obsID 00035019176)*

Parameter	Obtained Value
Newbin Integration Time (s)	15.00
Interval Duration (s)	2010.0
No. of Newbins	134
Average (c/s)	0.89252 ± 0.24E-01
Standard Deviation (c/s)	0.25959E-01
Minimum (c/s)	0.0000
Maximum (c/s)	1.5847
Variance ((c/s) ²)	0.67385E-01 ± 0.83E-02
Expected Variance ((c/s) ²)	0.74919E-01 ± 0.92E-02
Third Moment ((c/s) ³)	0.17928E-02
Average Deviation (c/s)	0.20322
Skewness	0.10249 ± 0.21
Kurtosis	0.87967 ± 0.42
Chi-Square	111.96 dof 133
Chi-Square Prob of constancy	0.90717
Kolm.-Smir. Prob of constancy	0.28731
RMS fractional variation	< 0.21877 (3 sigma)

Table 11.*Results from statistical analysis of X-ray spectrum lightcurve (obsID 00035019180)*

Parameter	Obtained Value
Newbin Integration Time (s)	30.000
Interval Duration (s)	990.00
No. of Newbins	33
Average (c/s)	1.1733 \pm 0.46E-01
Standard Deviation (c/s)	0.31209
Minimum (c/s)	0.49750
Maximum (c/s)	2.1943
Variance ((c/s) ²)	0.97400E-01 \pm 0.24E-01
Expected Variance ((c/s) ²)	0.67122E-01 \pm 0.17E-01
Third Moment ((c/s) ³)	0.17040E-01
Average Deviation (c/s)	0.22977
Skewness	0.58691 \pm 0.43
Kurtosis	1.8792 \pm 0.85
Chi-Square	34.723 dof 32
Chi-Square Prob of constancy	0.33947
Kolm.-Smir. Prob of constancy	0.82356E-01
RMS fractional variation	< 0.15088 (3 sigma)

Table 12.*Results from statistical analysis of X-ray spectrum lightcurve (obsID 00035019181)*

Parameter	Obtained Value
Newbin Integration Time (s)	15.000
Interval Duration (s)	945.00
No. of Newbins	63
Average (c/s)	0.6928 \pm 0.30E-01
Standard Deviation (c/s)	0.21638
Minimum (c/s)	0.17420
Maximum (c/s)	1.1795
Variance ((c/s) ²)	0.46820E-01 \pm 0.84E-02
Expected Variance ((c/s) ²)	0.55380E-01 \pm 0.99E-02
Third Moment ((c/s) ³)	0.31446E-02
Average Deviation (c/s)	0.17754
Skewness	0.31039 \pm 0.31
Kurtosis	-0.17618 \pm 0.62
Chi-Square	49.977 dof 62
Chi-Square Prob of constancy	0.86382
Kolm.-Smir. Prob of constancy	0.31303
RMS fractional variation	< 0.32991 (3 sigma)

Table 13.*Results from statistical analysis of X-ray spectrum lightcurve (obsID 00035019185)*

Parameter	Obtained Value
Newbin Integration Time (s)	10.00
Interval Duration (s)	940.00
No. of Newbins	94
Average (c/s)	$0.52987 \pm 0.27E-01$
Standard Deviation (c/s)	0.24238
Minimum (c/s)	0.12490
Maximum (c/s)	1.3770
Variance ((c/s) ²)	$0.59187E-01 \pm 0.87E-02$
Expected Variance ((c/s) ²)	$0.66850E-01 \pm 0.98E-02$
Third Moment ((c/s) ³)	0.79465E-02
Average Deviation (c/s)	0.19213
Skewness	0.15186 ± 0.25
Kurtosis	0.31080 ± 0.51
Chi-Square	82.902 dof 93
Chi-Square Prob of constancy	0.76411
Kolm.-Smir. Prob of constancy	0.47376
RMS fractional variation	< 0.38174 (3 sigma)

XRT Spectra

We present the results of the spectrum plots for all datasets in Figure 8. In each panel, the model fit appears as a continuous line over the data points (top), and the residuals are plotted below. The goodness test results are plotted in Figure 9, and the results for the model fit, measured flux, and uncertainties are shown in Tables 14 to 18.

Figure 8.
Model fit and residuals for all XRT datasets.

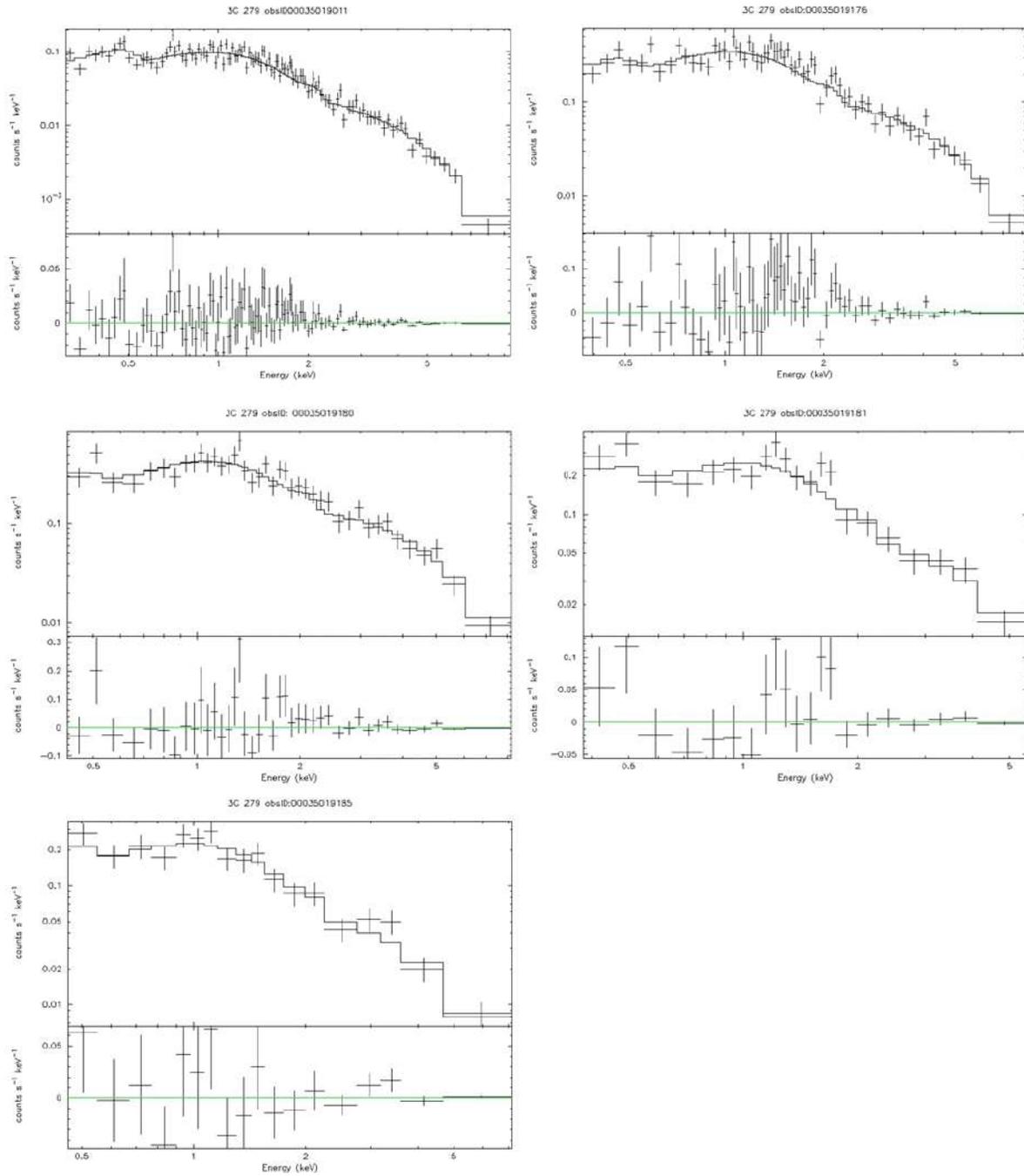


Figure 9.
Goodness test plots from all model fits.

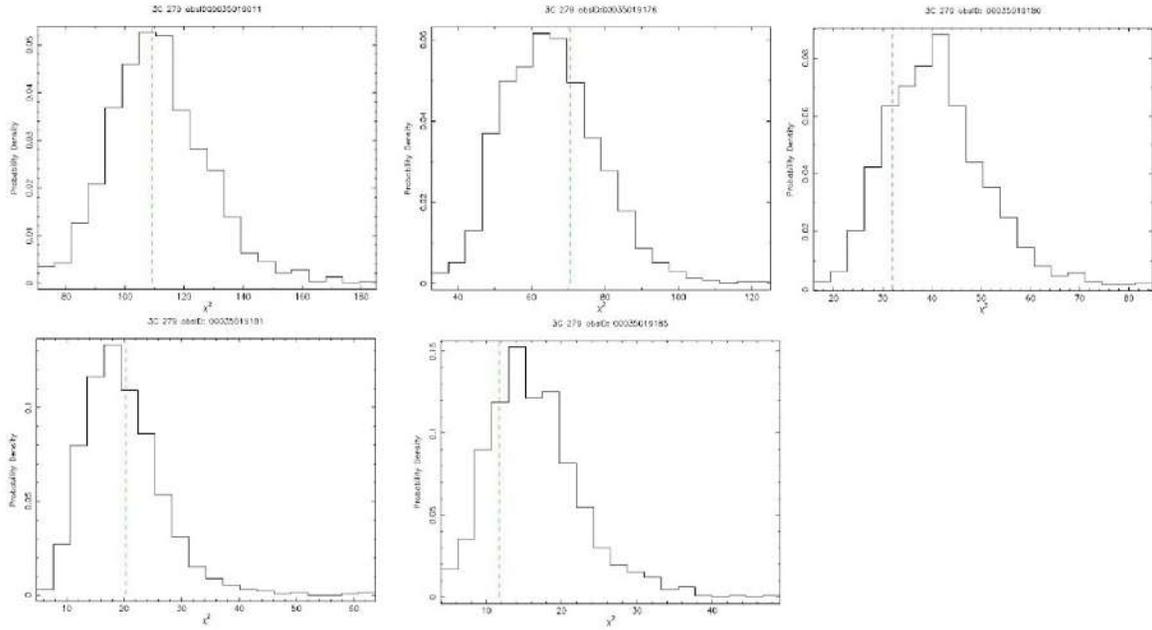


Table 14.
X-ray spectrum model results (obsID 00035019011)

Parameter	Obtained Value
N_H (cm ⁻²)	Frozen at $0,022 \times 10^{20}$
Power Index	1,621 (-0,044 – +0,044)
Normalization Factor	$1,937 (-0,066 – +0,066) \times 10^{-3}$
Flux _{0,3–6 keV} (log ₁₀)	-10,841 (-0,019 – +0,018)
Flux _{0,3–6 keV} (erg cm ⁻² s ⁻¹)	$1,44 (-0,060 – +0,063) \times 10^{-11}$
Luminosity (erg s ⁻¹)	$1,657 (0,070 – 0,073) \times 10^{46}$
Goodness 1000 test (%)	46,90
Reduced χ^2	1,012

Table 15.
X-ray spectrum model results (obsID 00035019176)

Parameter	Obtained Value
N_H (cm ⁻²)	Frozen at $0,022 \times 10^{20}$
Power Index	1,316 (-0,044 – +0,044)
Normalization Factor	5,209 (-0,280 – +0,278) $\times 10^{-3}$
Flux _{0,3–6 keV} (log ₁₀)	-10,344 (-0,025 – +0,024)
Flux _{0,3–6 keV} (erg cm ⁻² s ⁻¹)	4,529 (-0,250 – +0,261) $\times 10^{-11}$
Luminosity (erg s ⁻¹)	5,212 (0,290 – 0,302) $\times 10^{46}$
Goodness 1000 test (%)	68,00
Reduced χ^2	1,104

Table 16.
X-ray spectrum model results (obsID 00035019180)

Parameter	Obtained Value
N_H (cm ⁻²)	Frozen at $0,022 \times 10^{20}$
Power Index	1,177 (-0,081 – +0,082)
Normalization Factor	6,370 (-0,462 – +0,461) $\times 10^{-3}$
Flux _{0,3–6 keV} (log ₁₀)	-10,194 (-0,032 – +0,036)
Flux _{0,3–6 keV} (erg cm ⁻² s ⁻¹)	6,397 (-0,530 – +0,471) $\times 10^{-11}$
Luminosity (erg s ⁻¹)	7,362 (0,302 – 0,544) $\times 10^{46}$
Goodness 1000 test (%)	19,10
Reduced χ^2	0,779

Table 17.
X-ray spectrum model results (obsID 00035019181)

Parameter	Obtained Value
N_H (cm ⁻²)	Frozen at $0,022 \times 10^{20}$
Power Index	1,483 (-0,129 – +0,132)
Normalization Factor	3,844 (-0,358 – +0,355) $\times 10^{-3}$
Flux _{0,3–6 keV} (log ₁₀)	-10,645 (-0,044 – +0,040)
Flux _{0,3–6 keV} (erg cm ⁻² s ⁻¹)	2,265 (-0,189 – +0,167) $\times 10^{-11}$
Luminosity (erg s ⁻¹)	2,607 (0,027 – 0,193) $\times 10^{46}$
Goodness 1000 test (%)	58,40
Reduced χ^2	0,969

Table 18.
X-ray spectrum model results (obsID 00035019185)

Parameter	Obtained Value
N_H (cm ⁻²)	Frozen at $0,022 \times 10^{20}$
Power Index	1,506 (-0,144 – +0,149)
Normalization Factor	3,552 (-0,377 – +0,374) $\times 10^{-3}$
Flux _{0,3–6 keV} (log ₁₀)	-10,642 (-0,048 – +0,044)
Flux _{0,3–6 keV} (erg cm ⁻² s ⁻¹)	2,280 (-0,231 – +0,252) $\times 10^{-11}$
Luminosity (erg s ⁻¹)	2,640 (0,266 – 0,290) $\times 10^{46}$
Goodness 1000 test (%)	22,30
Reduced χ^2	0,658

DISCUSSION

From our datasets we can see that, in observation date order, each subsequent dataset has less observing time than the one before. This was not intentional in the selection of the datasets; however, this can have an impact on the interpretation of our results, because the datasets that have longer observation durations also will have an increased S/N. This can clearly be seen in the UVOT results tables in the σ significance.

The fact that different UVOT observations also were done with different filters between them makes a combined analysis of the flux over datasets more difficult, since each filter will have different responses. Ideally, for our purposes, datasets taken with one filter should be compared to datasets utilizing the same filter.

The lightcurves and spectra plots from UVOT may also seem devoid of data at first glance considering that, for example, the dataset obsID:00035019011 was obtained from a 4 h observation window and one plot only contains one datapoint. However, this is due to the way the UVOT telescope operates in comparison to XRT; UVOT collects data in exposure-based images, meaning that each data point comes from an entire integration period rather than a continuous stream of detected photons analyzed individually, as is otherwise the case for XRT photon counting mode (Swift Team 2025). Thus, only one dataset (obsID:00035019011) produced a lightcurve with enough datapoints to observe a behavior across time during the observation window, where no significant variability in the observation window of about 4 h is displayed.

On the other hand, one dataset (obsID:00035019181) did not produce any lightcurve or spectrum plot for UVOT. It was downloaded and analyzed multiple times without success, so we attribute this to some type of information missing from the dataset which the pipeline requires to perform the plots. However, this dataset nor others presented further problems in the data reduction process.

Since XRT does not use filters but measures across the full available range of the telescope continuously (0.2–10 keV), comparisons between datasets in XRT are more relevant than those of UVOT in our analysis.

For the XRT datasets, we organized the datapoints in both the lightcurve and the spectrum files in order to be able to apply Gaussian statistics to the results. The χ^2 is the result of the comparison between the lightcurve and a constant count rate; the reduced χ^2 indicates a good agreement between the data and the model if the value is lower than 1. It is obtained by dividing χ^2 by the number of bins, and the probability of constancy indicates the probability of the source's flux emission being constant.

Since XRT measures each photon individually as it reaches the detector instead of over an integrated period of time, it is much more sensitive to changes in exposure time for each dataset, as we still need a minimum of 20 counts per bin to perform Gaussian statistics. This can be seen in the XRT lightcurves and spectra: plots that come from longer exposure windows have more datapoints and thus their statistics are more robust than those with fewer datapoints.

The flux energy range we chose to focus our analysis on (0.3–6 keV) was chosen from observing how each spectrum plot turned out on XRT for each dataset and selecting the minimum common values between them. That is, when removing the bad data as flagged by XSPEC for each spectrum, we chose the flux range that all datasets were able to measure without bad-quality flags. It is possible to assume that with longer observation windows across all datasets we could increase the higher end of the measured flux.

Given that we had a common flux range measured across all datasets, we decided to include the estimated luminosity in the final results.

We also performed a goodness test on each dataset, where XSPEC performs simulations of the data based on the current chosen model with its parameters and compares the statistical values calculated with those corresponding to the real measured data. In our case, we chose 1000 of these simulations.

From a goodness test, we can deduce that a high percentage result (close to 1) means that the observed test statistic is not extreme compared to the simulated ones; on the other hand, a lower percentage result (close to 0) means that the observed test statistic is more extreme than most of the simulated ones, suggesting that the observed data is unlikely under the null hypothesis, that is, it is a bad fit.

Our results for the goodness test can be seen in Figure 9 and in Tables 14 to 19.

It is evident from the goodness test also that the more datapoints we are able to analyze, the more confidence we have in the model. However, even though some of our model fits had low goodness values (obsID:00035019180, obsID:00035019185), these are the same datasets which resulted in a lower number of bins, which in turn comes from the short observation windows. In any case, the χ^2 analysis and, more so, our obtained values for the photon index in the power-law model range from 1.177 to 1.621, which is consistent with findings for the photon index across the same energy range in other studies. (Thekkoth 2023) reports ≈ 1.5 , and (Giuliani 2008) reports ≈ 1.4 for the photon index.

The conversion from logarithmic flux to flux in $erg\ cm^{-2}\ s^{-1}$, used in the computation for luminosity, was calculated with:

$$F = 10^{F_{Log_{10}}}$$

$$\sigma_f = F \cdot \ln(10) \cdot \sigma_{10^{F_{Log_{10}}}}$$

$$\sigma_f = F \cdot \ln(10) \cdot \sigma_{10^{F_{Log_{10}}}}$$

Where:

- F is the flux in $erg\ cm^{-2}\ s^{-1}$
- $F_{Log_{10}}$ is the logarithmic flux
- $\sigma_{10^{F_{Log_{10}}}}$ is the uncertainty in the logarithmic flux
-

The formula to calculate luminosity L from flux F is given by:

$$L = 4\pi d^2 F$$

Where:

- L is the luminosity in $erg\ s^{-1}$
- d is the distance to the object in cm
- F is the flux in $erg\ cm^{-2}\ s^{-1}$

The error propagation formula for the measured luminosity L is:

$$\frac{\sigma_L}{L} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_F}{F}\right)^2}$$

This allowed us to analyze the luminosity output of the AGN before, during, and after the reported GRB event we desired to study.

We measured a significant increase in luminosity during the reported burst event, with a value of $\approx 5.212 \times 10^{46}\ erg\ s^{-1}$ (obsID: 00035019176) immediately before the peak of the event, rising to $\approx 7.362 \times 10^{46}\ erg\ s^{-1}$ during the highest emission (obsID: 00035019180), and a posterior decrease to $2.607 \times 10^{46}\ erg\ s^{-1}$ after the event (obsID: 00035019181), all within the range of 0.3–6 keV.

The dataset obsID: 00035019011, which had the longest exposure time, resulted in a measured luminosity of $1.657 \times 10^{46} \text{ erg s}^{-1}$. Results for the luminosity in the soft-to-mid X-ray energy range in the literature for 3C-279 are consistent with our findings, as (Paliya 2015), (Beresnyak 2019), and others report luminosity levels of up to $\approx 10^{46} \text{ erg s}^{-1}$ for increased activity states of this target.

Some researchers suggest that the peaks in activity of 3C-279 take several days to develop (Singh 2020), meaning that our dataset pertaining to immediately before the supposed peak of the event (obsID: 00035019180) may have been taken when the AGN was already in an active state. This interpretation is consistent with our measured luminosities; however, an increase–peak–decrease trend can still be observed when comparing the datasets.

Authors such as (Wang 2022) and (Wendel 2021) propose external inverse Compton scattering as one of the main mechanisms responsible for some of the GRB events Swift detects, first by BAT and then by UVOT and XRT, as increases in soft-to-medium X-ray activity (0.1–12 keV). This is consistent with the energy ranges and results presented in this report.

CONCLUSIONS

UVOT and XRT are excellent tools to analyze and characterize the behavior of transient events; however, particular consideration must be taken in the choice of target and the techniques applied, given that the telescope’s instruments have different limitations and advantages.

UVOT uses filters and is designed to study low X-ray sources through integrated exposure frames, while XRT is aimed at studying mid-level X-ray sources and is able to analyze the full spectrum over this energy range.

Longer exposures with XRT will result in a more robust model for sources, but even with shorter observation windows, if enough datasets are considered, a reliable model can be proposed, as demonstrated in this report.

We successfully processed data from the XRT and UVOT instruments aboard the Swift telescope. We proposed a spectral model for the blazar 3C-279 that aligns with existing literature in the low-to-mid X-ray energy range, including flux and luminosity outputs. Additionally, we accurately measured an increase, peak, and subsequent decrease in the AGN’s luminosity during a reported GRB event, with flux and luminosity magnitudes consistent with those found in the literature.

Suggestions for further research on the modeling and characterization of parameters from this AGN include:

- incorporating more datasets with long exposure windows for XRT,
- utilizing UVOT datasets with the same filter across multiple exposures, to enable the production of lightcurves with more datapoints,
- and performing simultaneous analyses of both instruments' data rather than treating them separately.
-

These improvements would allow for a more comprehensive understanding of the AGN's behavior during other reported GRB events.

BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

- Albert, J., Aliu, E., Anderhub, H., Antonelli, L.A., Antoranz, P., Backes, M. *et al.* (2008). Very-high-energy gamma rays from a distant quasar: how transparent is the universe? *Science*, 320 (5884), 1752–1754. <https://doi.org/10.1126/science.1157087>
- Akiyama, K., Alberdi, A., Alef, W. *et al.* (2019). First M87 Event Horizon Telescope results VI: the shadow and mass of the central black hole. *Astrophys. J. Lett.*, 875 (1), L6. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab1141>
- Alston, W., Giustini, M. & Petrucci, P.O. (2022). The super-massive black hole close environment in active galactic nuclei. *arXiv preprint*, arXiv:2206.11790. <https://arxiv.org/abs/2206.11790>
- Bellovary, J.M., Low, M.-M.M., McKernan, B. & Ford, K.E.S. (2016). Migration traps in disks around supermassive black holes. *Astrophys. J. Lett.*, 819 (2), L17. <https://doi.org/10.3847/2041-8205/819/2/L17>
- Beresnyak, A.R., Istomin, Ya.N. & Pariev, V.I. (1997). Synchrotron emission from relativistic parsec-scale jets. *arXiv preprint*, arXiv:astro-ph/9704046. <https://arxiv.org/abs/astro-ph/9704046>
- Blinov, D., Jorstad, S.G., Larionov, V.M. *et al.* (2021). Repeated pattern of gamma-ray flares in the light curve of the blazar 3C-279. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 505 (3), 4616–4625. <https://doi.org/10.1093/mnras/stab1484>
- Burrows, D.N., Hill, J.E., Nousek, J.A. *et al.* (2005). The Swift X-Ray Telescope. *Space Sci. Rev.*, 120 (3–4), 165–195. <https://doi.org/10.1007/s11214-005-5097-2>

- Epstein-Martin, M., Tagawa, H., Haiman, Z. & Perna, R. (2025). Time-dependent models of AGN disks with radiation from embedded stellar-mass black holes. *arXiv preprint*, arXiv:2405.09380. <https://arxiv.org/abs/2405.09380>
- Fabian, A.C. (2012). Observational evidence of active galactic nuclei feedback. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 50 (1), 455–489. <https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081811-125521>
- Fermi-LAT Collaboration (2010). A change in the optical polarization associated with a γ -ray flare in the blazar 3C-279. *Nature*, 463 (7283), 919–923. <https://doi.org/10.1038/nature08841>
- Giuliani, A., D’Ammando, F., Vercellone, S. *et al.* (2008). AGILE observation of a gamma-ray flare from the blazar 3C-279. *Astron. Astrophys.*, 494 (2), 509–513. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:200810785>
- Hartman, R. C., Bertsch, D. L., Fichtel, C. E., *et al.* (1992). Detection of high-energy gamma radiation from quasar 3C 279 by the EGRET telescope on the Compton Gamma Ray Observatory. *Astrophysical Journal Letters*, 385, L1–L4. <https://doi.org/10.1086/186263>
- Hayashida, M., Nalewajko, K., Madejski, G.M. *et al.* (2015). Rapid variability of blazar 3C-279 during flaring states in 2013–2014 with joint Fermi-LAT, NuSTAR, Swift, and ground-based multi-wavelength observations. *Astrophys. J.*, 807 (1), 79. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/807/1/79>
- HEASARC (2025). XSPEC manual. Available at: <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/xanadu/xspec/manual/XspecManual.html> (Accessed 25 March 2025).
- HEASARC (2025). WebPIMMS (W3PIMMS tool). Available at: <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/Tools/w3pimms/w3pimms.pl> (Accessed 25 March 2025).
- HEASARC (2025). High Energy Astrophysics Science Archive Research Center (HEASARC). Available at: <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/W3Browse/swift.pl> (Accessed 26 March 2025).
- NASA Swift Team (2025). Swift observatory: about. Available at: https://swift.gsfc.nasa.gov/about_swift/ (Accessed 26 March 2025).

- NASA Swift Team (2025). Swift XRT point spread function (PSF). Available at: https://swift.gsfc.nasa.gov/proposals/tech_appd/swiffta_v17/node36.html (Accessed 25 March 2025).
- NASA/IPAC Extragalactic Database (NED) (2025) 3C-279. Available at: https://ned.ipac.caltech.edu/byname?objname=3C279&hconst=67.8&omegam=0.308&omegav=0.692&wmap=4&corr_z=1 (Accessed 25 March 2025).
- Padovani, P. (2023). A multi-wavelength view of active galactic nuclei with an emphasis on gamma-rays. *arXiv preprint*, arXiv:2302.12540. <https://arxiv.org/abs/2302.12540>
- Paliya, V.S., Sahayanathan, S. & Stalin, C.S. (2015). Multi-wavelength observations of 3C-279 during the extremely bright gamma-ray flare in 2014 March–April. *Astrophys. J.*, 803 (1), 15. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/803/1/15>
- Prince, R. (2020). Broadband variability and correlation study of 3C-279 during flares of 2017–2018. *Astrophys. J.*, 890 (2), 164. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab6b1e>
- Rajguru *et al.* (2024). Accretion disc–jet decomposition from the optical–near infrared monitoring of Fermi blazars. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 535 (4), 3595–3610. <https://doi.org/10.1093/mnras/stae2608>
- Romoli, C., Zacharias, M., Meyer, M. *et al.* (2017). Observation of the extremely bright flare of the FSRQ 3C-279 with H.E.S.S. II. *arXiv preprint*, arXiv:1708.00882. <https://arxiv.org/abs/1708.00882>
- Singh, K.K., Meintjes, P.J. & Ramamonjisoa, F.A. (2020). Understanding the giant gamma-ray outburst on June 16, 2015 from the blazar 3C-279. *Astrophys. Space Sci.*, 365 (2), 1–9. <https://doi.org/10.1007/s10509-020-3746-2>
- Swift Team (2025). UVOT filters. Available at: <https://www.swift.ac.uk/analysis/uvot/filters.php> (Accessed 25 March 2025).
- Thekkoth, A., Sahayanathan, S., Shah, Z., Paliya, V.S. & Ravikumar, C.D. (2023). Understanding the broad-band emission process of 3C-279 through long-term spectral analysis. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 526 (4), 6364–6380. <https://doi.org/10.1093/mnras/stad3094>
- Wang, G., Fan, J., Xiao, H. & Cai, J. (2022). Variability and spectral behavior of gamma-ray flares of 3C-279. *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 134 (1040), 104101. <https://doi.org/10.1088/1538-3873/ac98e0>

Wendel, C., Shukla, A., & Mannheim, K. (2021). Pair cascades at the edge of the broad-line region shaping the gamma-ray spectrum of 3C-279. *Astrophys. J.*, 917 (1), 32. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac0a6e>

European Southern Observatory (ESO) (2012). A stunning image of the galaxy NGC 6559 captured by the VLT. Available at: <https://www.eso.org/public/italy/images/eso1229a/> (Accessed 2012).



Contaminación lumínica en Panamá: diagnóstico, desafíos y estrategias para un desarrollo sostenible

Light pollution in Panama: diagnosis, challenges and strategies for sustainable development

Adam's Martínez Soto

Ministerio de Educación, Colegio Dr. Harmodio Arias Madrid, Dolega Chiriquí, Panamá.

adams.martinez@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0001-8060-686X>

Yaris Rodríguez

Ministerio de Educación, Colegio Beatriz Miranda de Cabal, Panamá.

yais.rodriguez@meduca.edu.pa

<https://orcid.org/0000-0003-0177-0042>

Vicente Forero Villao

Universidad Marítima Internacional de Panamá, Departamento de Física, Panamá

vforero@umpi.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0003-3088-4866>

Eduardo Chung

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Física, Panamá.

eduardo.chungng@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0003-2834-9450>

Fecha de recepción: 25 de mayo de 2025

Fecha de aceptación: 23 de octubre de 2025

DOI: <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v28n1.a8946>

RESUMEN

La contaminación lumínica es un problema ambiental en crecimiento que afecta la observación astronómica, la biodiversidad, la salud humana y la eficiencia energética. En Panamá, este fenómeno ha recibido escasa atención académica y política, a pesar del incremento sostenido del brillo del cielo nocturno asociado al crecimiento urbano y al uso indiscriminado de iluminación artificial. Este estudio analizó la situación actual mediante la revisión de 53 documentos, además datos satelitales VIIRS y herramientas estratégicas como FODA y PESTEL. Las evidencias muestran la necesidad de regulaciones estricta y campañas de concienciación ciudadana.

PALABRAS CLAVE

Contaminación lumínica, alumbrado público, biodiversidad, sostenibilidad, regulación ambiental.

ABSTRACT

Light pollution is a growing environmental problem that affects astronomical observation, biodiversity, human health, and energy efficiency. In Panama, this phenomenon has received little academic and political attention, despite the sustained increase in the brightness of the night sky associated with urban growth and the indiscriminate use of artificial lighting. This study analyzed the current situation by reviewing 53 documents, as well as VIIRS satellite data and strategic tools such as SWOT and PESTEL. The evidence shows the need for strict regulations and public awareness campaigns.

KEYWORDS

Light pollution, public lighting, biodiversity, sustainability, environmental regulation.

INTRODUCCIÓN

La contaminación lumínica, definida como la emisión excesiva o mal direccionada de luz artificial que degrada la oscuridad del cielo nocturno, constituye una preocupación ambiental creciente con repercusiones en la biodiversidad, la salud humana, la economía y la astronomía (Khorram, Yusefi and Keykha, 2014; Goronczy, 2021). El avance de la urbanización y el uso indiscriminado de iluminación artificial han transformado los ecosistemas nocturnos, alterando ritmos circadianos y afectando tanto a especies silvestres como a los seres humanos (Falcón *et al.*, 2020; Grubisic and van Grunsven, 2021).

En el ámbito astronómico, este fenómeno incrementa el brillo del cielo nocturno y reduce el contraste necesario para observar objetos de baja luminosidad, limitando el desarrollo científico y cultural vinculado a la observación del universo. Además, que representa un despilfarro energético que contribuye al cambio climático (Hall, 2022; Varela Perez, 2023). Desde una perspectiva sanitaria, se asocia a trastornos del sueño, alteraciones hormonales y enfermedades metabólicas (Assad, Fatma and Kumar, 2022; Dufier and Touitou, 2022).

A nivel internacional, la Declaración de La Palma (International Commission for the Protection of the Night Sky, 2007) y la Declaración de Cielos Oscuros de la IAU (2020) reconocen el cielo nocturno como patrimonio científico, cultural y ambiental, instando a los gobiernos a adoptar regulaciones para su protección.

En Panamá, la situación es particularmente crítica: la biodiversidad única del país convive con una rápida expansión urbana y un marco normativo aún limitado, en el que la contaminación lumínica no ha sido reconocida como prioridad ambiental. Esto genera riesgos tanto para la conservación de ecosistemas sensibles como para el desarrollo de la astronomía en nuestro territorio.

En este contexto, el presente estudio ofrece un diagnóstico de la contaminación lumínica en Panamá a partir de una revisión bibliográfica sistemática, la interpretación de datos satelitales VIIRS (2012–2023) y el uso de herramientas estratégicas como FODA y PESTEL, con el fin de identificar impactos, vacíos de investigación y oportunidades para orientar políticas públicas y estrategias de mitigación.

Marco Conceptual

Comprendiendo la Contaminación Lumínica

La contaminación lumínica se manifiesta en diversas formas, cada una con efectos diferenciados sobre la biodiversidad, la salud y la observación astronómica:

- Resplandor del cielo nocturno (skyglow): incremento del brillo del cielo que dificulta la observación astronómica (Goronczy, 2021).
- Intrusión lumínica: entrada de luz artificial en espacios no deseados, con impactos en la calidad del sueño humano (Srivastava *et al.*, 2022).
- Deslumbramiento: reducción de la visibilidad causada por un exceso de brillo y un mal diseño de luminarias.
- Sobreiluminación: uso innecesario de luz que incrementa el gasto energético (Rajkhowa, 2012).
- Desorden lumínico (clutter): concentración excesiva de luces brillantes en entornos urbanos densos (Bedi, Puntambekar and Singh, 2021b).

Las principales fuentes incluyen el alumbrado público y de edificios, vallas publicitarias, faros de vehículos, actividades industriales y la urbanización acelerada con uso extendido de LED de alta temperatura de color (Mu *et al.*, 2021; Hannachi and Slimani, 2022).

En Panamá, estas fuentes se concentran en áreas urbanas y turísticas como la Cinta Costera en Ciudad de Panamá (Fig. 1), donde la iluminación artificial genera un resplandor que afecta tanto la calidad del cielo nocturno como los ecosistemas circundantes, como es el caso del Parque nacional Camino de Cruces.

Figura 1.

Vista nocturna de la Cinta Costera, Ciudad de Panamá, donde se aprecia el resplandor del cielo nocturno producto de la iluminación urbana. (Fotografía: cortesía de Abdiel Gil).



Además de la intensidad de la luz, la contaminación lumínica se asocia al uso de espectros inadecuados, en particular la luz azul de los LED, que afecta los ritmos circadianos y los ciclos naturales de oscuridad. Esto confirma su carácter multidimensional, con implicaciones que requieren enfoques específicos según el área de análisis (astronomía, salud o biodiversidad).

Impactos de la Contaminación Lumínica

La contaminación lumínica genera efectos que abarcan múltiples dimensiones:

- Ambientales: altera los ciclos naturales de luz y oscuridad, afectando agentes polinizadores, aves migratorias, murciélagos y la fauna marina (Falcón *et al.*, 2020; Marangoni *et al.*, 2022). Además, modificaciones en la fisiología de plantas y las dinámicas de los ecosistemas (Luarte *et al.*, 2016; Kumar *et al.*, 2024).
- Salud humana: la exposición prolongada a luz artificial nocturna, en especial la luz azul de los LED, interfiere con los ritmos circadianos y aumenta el riesgo de trastornos del sueño, enfermedades metabólicas y problemas de salud ocular (Falchi *et al.*, 2011; Dufier and Touitou, 2022).
- Económicos: el uso ineficiente de iluminación implica un gasto energético innecesario que contribuye al cambio climático (Bedi, Puntambekar and Singh, 2021a; Zhang and Cheng, 2023).

- Astronomía: reduce la calidad de las observaciones científicas y actividades educativas (Hall, 2022; Hearnshaw, 2024).

Su carácter multidimensional confirma la necesidad de abordajes integrales que combinen monitoreo científico, educación ciudadana y políticas públicas específicas.

Métodos de Evaluación de la Contaminación Lumínica

La literatura especializada identifica diversos enfoques para cuantificar la contaminación lumínica, cada uno con alcances y limitaciones:

- Fotómetros y cámaras panorámicas: instrumentos como el Sky Quality Meter (SQM) permiten medir el brillo del cielo en unidades estandarizadas ($\text{mag}/\text{arcsec}^2$), mientras que las cámaras ofrecen mapas espaciales más detallados (Cinzano, 2004; Zamorano Calvo *et al.*, 2015).
- Plataformas basadas en el Internet de las cosas (Iot): integran sensores de luz y GPS, facilitando monitoreo distribuido y en tiempo real en áreas urbanas (Redzuan *et al.*, 2017; Dizon-Paradis *et al.*, 2022).
- Imágenes satelitales: sensores como VIIRS o registros desde la Estación Espacial Internacional permiten mapear la radiancia nocturna a gran escala y evaluar tendencias en diferentes periodos (Fang *et al.*, 2023).

En este estudio se emplearon imágenes satelitales VIIRS (2012–2023) y revisión bibliográfica sistemática para caracterizar la evolución de la contaminación lumínica en Panamá. Esta combinación permitió no solo identificar un incremento sostenido del brillo nocturno, sino también relacionarlo con el crecimiento económico nacional, aportando evidencia clave para orientar políticas públicas y futuras investigaciones locales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio adoptó un enfoque exploratorio y descriptivo, combinando una revisión bibliográfica sistemática con el análisis de datos satelitales para evaluar la contaminación lumínica en Panamá.

Revisión bibliográfica

La búsqueda se realizó en bases de datos científicas internacionales (Scopus, Web of Science, Google Scholar) y en el repositorio especializado ALAN_DB (Artificial Light at Night Database), que recopila literatura revisada por pares sobre luz artificial nocturna. Además, se incluyeron documentos gubernamentales y normativas panameñas relacionadas con alumbrado público y gestión ambiental.

Se emplearon combinaciones de palabras clave y operadores booleanos como: “contaminación lumínica” AND “biodiversidad”, “light pollution” AND “health”, “artificial light at night” OR “ALAN” AND “Panamá”. Estas estrategias permitieron recuperar literatura científica, tesis y normativas no indexadas en bases de datos tradicionales.

Criterios de inclusión y exclusión

Criterios de inclusión:

- Publicaciones en español e inglés entre 2010 y 2024.
- Estudios revisados por pares que abordaran impactos de la contaminación lumínica en biodiversidad, salud humana, economía, urbanismo o astronomía.
- Documentos gubernamentales y tesis locales relacionados con el contexto panameño.

Criterios exclusión:

- Estudios con enfoque exclusivamente técnico (eficiencia energética sin considerar impactos ambientales o biológicos).
- Documentos sin revisión por pares ni respaldo institucional.
- Publicaciones centradas en contextos regionales no extrapolables al caso panameño o latinoamericano.

Proceso de selección de la literatura

La búsqueda inicial identificó 5 326 registros en las bases de datos consultadas. No encontramos duplicados, se eliminaron 803 publicaciones por ser anteriores al año 2010 quedando 4 524 registros únicos. A partir de título y resumen, se excluyeron 4 401 documentos por no cumplir con los criterios, quedando 123 artículos para revisión a texto completo.

De estos, 75 documentos fueron descartados por no cumplir los criterios de inclusión. La muestra final estuvo compuesta por 53 documentos:

- 48 artículos internacionales revisados por pares,
- 2 tesis nacionales,
- 3 documentos gubernamentales de Panamá.

Este proceso se representa en la Figura 2, siguiendo las etapas de identificación, cribado, elegibilidad e inclusión adaptadas del modelo PRISMA (Kahale et al., 2021).

Clasificación temática

Los documentos incluidos se organizaron en seis categorías: Biodiversidad y Ecología, Salud Humana, Urbanismo, Modelos de Detección, Regulaciones y Políticas, Astronomía. Esta clasificación permitió identificar tendencias internacionales, vacíos de información en Panamá y prioridades de investigación.

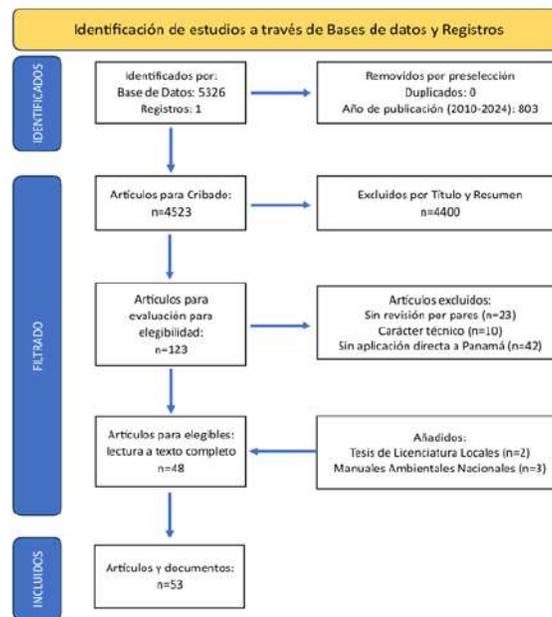
Herramientas estratégicas

Se aplicaron dos marcos de análisis:

- FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas): para evaluar el contexto regulatorio y normativo nacional.
- PESTEL (Político, Económico, Social, Tecnológico, Ecológico y Legal): para diseñar estrategias de mitigación adaptadas a Panamá, tomando en cuenta experiencias internacionales (Stewart, 1965; Aguilar, 1967).

Figura 2.

Diagrama de flujo del proceso de selección de artículos, basado en el modelo PRISMA.



Análisis satelital

Se emplearon datos del Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) para el periodo 2012–2023, descargados de la plataforma Light Pollution Map. Los mapas geospaciales fueron provistos por dicho portal, mientras que los datos anuales de radiancia fueron procesados y organizados en series temporales.

Posteriormente, los valores de radiancia nocturna se compararon con el Producto Interno Bruto (PIB) nacional, utilizando estadísticas del Banco Mundial. Esta comparación permitió explorar la relación entre el crecimiento económico y el incremento de la iluminación artificial en Panamá.

RESULTADOS

Selección y clasificación de la literatura científica

Del proceso de búsqueda y depuración se obtuvieron 48 artículos internacionales revisados por pares, 2 tesis locales y 3 documentos regulatorios nacionales. Los textos se organizaron en seis categorías temáticas:

- Biodiversidad y Ecología: 11 documentos
- Salud Humana: 6 documentos
- Urbanismo: 8 documentos
- Astronomía: 8 documentos
- Modelos de Detección: 8 documentos
- Regulaciones y Políticas: 12 documentos

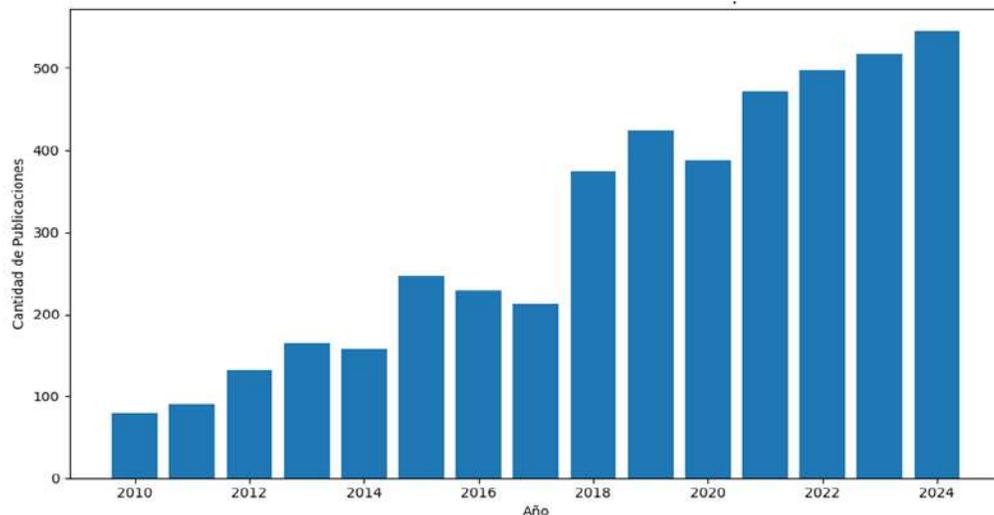
Para facilitar la trazabilidad de la revisión bibliográfica, se elaboró un cuadro resumen con los 53 documentos seleccionados (48 artículos internacionales, 2 tesis nacionales y 3 documentos regulatorios de Panamá). El detalle completo de los 53 documentos incluidos en la revisión bibliográfica se presenta en el Anexo (Cuadro 3), donde se especifican autores, año, tipo de documento, área temática y el título.

Evolución temporal de las publicaciones (2010–2024)

El número de publicaciones sobre contaminación lumínica mostró un crecimiento sostenido, con un repunte significativo a partir de 2016 y un máximo en 2023–2024 (Fig. 3).

Figura 3.

Evolución del número de publicaciones sobre contaminación lumínica entre 2010 y 2024.

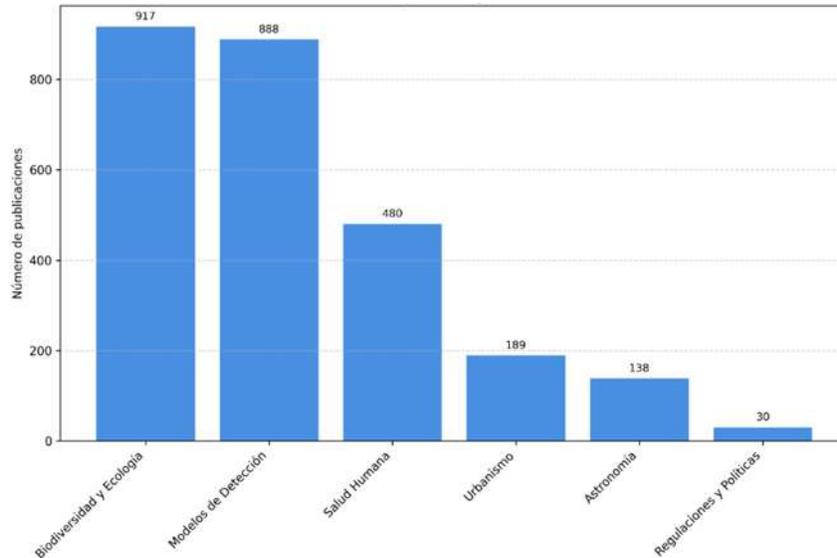


Distribución temática

La mayor proporción de estudios corresponde a Biodiversidad y Ecología, seguida de Modelos de Detección y Salud Humana. En contraste, áreas como Urbanismo, Astronomía y Regulaciones/Políticas presentan menor representación (Fig. 4).

Figura 4.

Distribución de publicaciones científicas por categoría temática entre 2010 y 2024, según la revisión bibliográfica realizada.



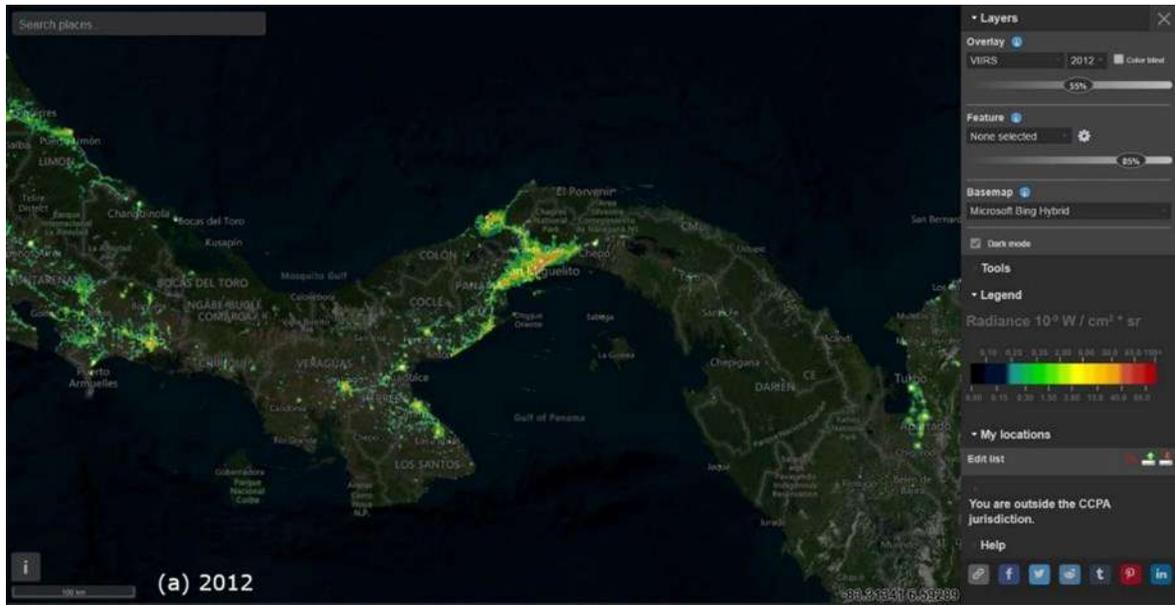
Resultados geospaciales para Panamá

El análisis satelital con VIIRS evidenció un incremento del 85.64 % en la radiancia nocturna entre 2012 y 2023. La serie temporal mostró una reducción en 2020–2021, atribuida a la pandemia de COVID-19, y un repunte en 2023.

La evolución de este fenómeno lo podemos visualizar en todo el territorio, podemos ver un aumento distribuido a lo largo de la vía interamericana con focos en las ciudades de provincia (Fig. 5).

Figura 5.

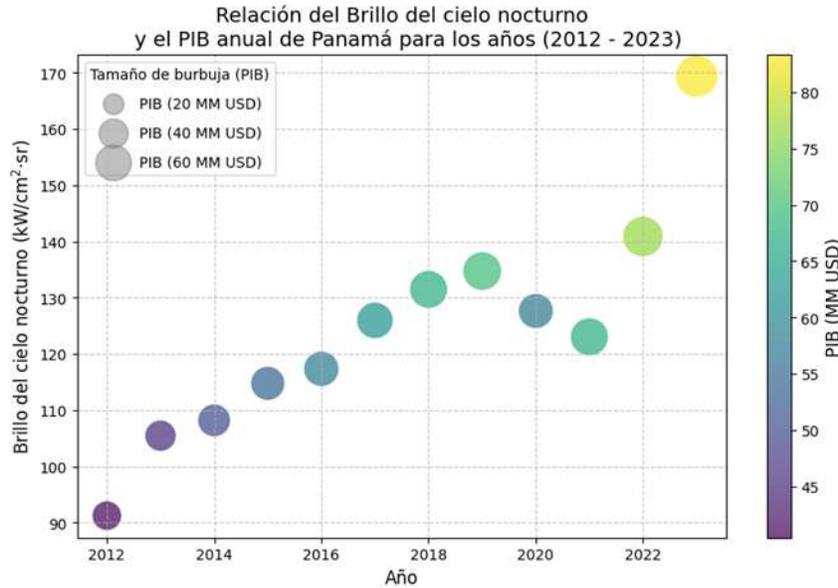
Mapa de evolución de la contaminación lumínica en Panamá, comparación entre 2012 (a) y 2023 (b), basado en datos del sensor VIIRS. Fuente: Light Pollution Map (n.d.).



Al comparar esta serie temporal comparativa (Figura 6), de los datos VIIRS y los registros de Producto Interno Bruto del país, podemos observar una relación entre el crecimiento económico y el aumento de la iluminación artificial.

Figura 6.

Brillo del cielo nocturno anual en Panamá según VIIRS Country Statistics (2012–2023) y Producto Interno Bruto anual según el Banco Mundial (precios actuales, 10/30/24). Elaboración del equipo de investigación.



Asimismo, la tabla completa de valores de radiancia y PIB anual que sustenta estas figuras se presenta en el Anexo (Cuadro 4).

DISCUSIÓN

Los resultados muestran que la contaminación lumínica es una problemática abordada desde múltiples perspectivas, con diferencias notables entre categorías temáticas y un claro contraste entre los avances internacionales y la situación nacional.

Biodiversidad y Ecología

De los 11 artículos revisados, se documentan efectos consistentes sobre la fauna nocturna como desorientación en crías de tortugas marinas (Arízaga Medina and Cárdenas Pasato, 2020), alteraciones en aves migratorias (Owens *et al.*, 2020) y cambios en el proceso polinización (Grubisic and van Grunsven, 2021). Para el contexto panameño, el estudio de Flores y De La Cruz (2023) confirma que la iluminación en las playas interrumpe la orientación de la tortuga golfina (*Lepidochelys olivacea*), lo que evidencia que especies

emblemáticas del país ya están en riesgo. Esto subraya la urgencia de integrar este tipo de contaminación en los planes de conservación y regulaciones.

Salud Humana

Los 6 estudios analizados destacan riesgos por la exposición prolongada a la luz artificial nocturna, incluyendo alteraciones circadianas y enfermedades metabólicas (Falchi *et al.*, 2011; Cao, Xu and Yin, 2023; Muñoz Ccuro *et al.*, 2024). El uso de luminarias con filtros espectrales (Menéndez-Velázquez, Morales and García-Delgado, 2022) se plantea como alternativa preventiva. En Panamá, la ausencia de estudios epidemiológicos confirma un vacío crítico que limita la incorporación de esta dimensión en la agenda de salud pública.

Urbanismo

Los 8 estudios de esta categoría evidencian la estrecha relación entre expansión urbana y aumento de la radiancia global (Kyba *et al.*, 2017). En Panamá, diagnósticos pioneros como los de Pino (2016) y Visuette (2024) documentan el deterioro del cielo nocturno en comunidades urbanas, reflejando la ausencia de criterios ambientales en la planificación territorial. La experiencia internacional demuestra que el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y normativas urbanas específicas son herramientas efectivas que podrían adaptarse al contexto local (Elsahragty and Kim, 2015; Rueda-Espinosa *et al.*, 2023).

Astronomía

Los 8 artículos revisados confirman la pérdida global de calidad del cielo nocturno (Falchi *et al.*, 2016; Hearnshaw, 2024), agravada por la proliferación de satélites (Hall, 2022; Koller-Thompson *et al.*, 2020). Panamá, ha tenido un aumento del 85.64 % en la radiancia entre 2012 y 2023 refleja un deterioro paralelo al crecimiento económico, lo que amenaza tanto la investigación científica como la educación astronómica.

Modelos de Detección

Los 8 estudios en este campo resaltan el potencial de tecnologías como plataformas IoT y modelos híbridos de evaluación (Dizon-Paradis *et al.*, 2022; Zhao and Fu, 2023). Si bien en Panamá estas metodologías aún no se han implementado de forma sistemática, su adopción facilitaría un monitoreo más preciso y la construcción de indicadores comparables a nivel internacional (Fang *et al.*, 2023).

Regulaciones y Políticas

Los 12 documentos analizados abarcan artículos académicos, iniciativas internacionales y normativas gubernamentales. Se destacan experiencias como los Dark Sky Parks (Alva *et al.*, 2023) y proyectos de ley como el Dark Sky Stewardship Act (Rep. Sherrill, 2024). En contraste, Panamá cuenta únicamente con disposiciones fragmentadas por la Autoridad Nacional de los Servicios Públicos (ASEP) (2019), lo que confirma un vacío normativo que limita la gestión integral del problema.

Análisis Estratégico

El análisis FODA, tabla 1, permitió identificar fortalezas y oportunidades vinculadas al interés creciente por la sostenibilidad y la disponibilidad de tecnologías eficientes, pero también debilidades como la falta de estudios locales y de monitoreo sistemático, así como amenazas derivadas de la expansión urbana sin regulación y la resistencia de sectores económicos.

Tabla 1.

Análisis FODA de las regulaciones ambientales y de servicios públicos en Panamá.

F O R T A L E Z A S	<ul style="list-style-type: none"> Regulación: La normativa panameña en materia de alumbrado público reconoce la contaminación lumínica e incluye medidas para su mitigación (Autoridad Nacional de los Servicios Públicos (ASEP), 2019). Interés por la sostenibilidad: Panamá ha avanzado en regulaciones ambientales y estrategias de desarrollo sostenible, lo que puede facilitar la inclusión de regulaciones más específicas sobre iluminación artificial. Zonas protegidas: La biodiversidad única de Panamá y la presencia de áreas naturales protegidas permiten la creación de reservas de cielos oscuros, como estrategia para mitigar la contaminación lumínica.
O P O R T U N I D A D E S	<ul style="list-style-type: none"> Integración con estrategias de sostenibilidad urbana: La contaminación lumínica puede abordarse dentro de planes más amplios de ciudades inteligentes y sostenibilidad. Concienciación sobre impactos en salud y biodiversidad: El creciente número de estudios que relacionan la contaminación lumínica con alteraciones en los ritmos circadianos y la biodiversidad puede generar presión pública para su regulación. Implementación de tecnologías eficientes: Las nuevas tecnologías de iluminación, como LED de baja temperatura de color y sensores inteligentes, pueden ayudar a mitigar el problema sin comprometer la seguridad.
D E B I L I D A D E S	<ul style="list-style-type: none"> Reconocimiento: La contaminación lumínica no está clasificada entre los principales problemas ambientales de Panamá, lo que limita su inclusión en políticas nacionales (Ministerio de Ambiente, 2023). Estudios locales: No existen suficientes investigaciones en Panamá sobre la evolución de la contaminación lumínica y sus impactos. Monitoreo y medición sistemática: Actualmente, no hay un sistema de monitoreo regular de la contaminación lumínica en Panamá, lo que dificulta la toma de decisiones basada en datos.
A M E N A Z A S	<ul style="list-style-type: none"> Expansión urbana: El crecimiento acelerado de la infraestructura urbana sin normativas específicas sobre iluminación puede agravar la contaminación lumínica. Conciencia pública: La contaminación lumínica sigue siendo percibida como un problema menor, lo que reduce la demanda de regulaciones más estrictas. Resistencia: La implementación de normativas más estrictas podría enfrentar oposición por parte de la industria de la iluminación, el comercio y otros sectores que dependen de la publicidad luminosa.

Por su parte, el PESTEL, cuadro 2, evidenció que la mitigación de la contaminación lumínica requiere un abordaje integral que combine regulaciones más estrictas, incentivos económicos, campañas de sensibilización, innovación tecnológica, estrategias de conservación ecológica y un marco legal robusto.

Tabla 2.

Estrategias de mitigación de la contaminación lumínica en Panamá según el marco PESTEL

P O L Í T I C O	Acción	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollar regulaciones estrictas que promuevan el uso de tecnologías avanzadas de iluminación en áreas urbanas y rurales, siguiendo normativas internacionales y estudios recientes sobre el tema (Elsahragty and Kim, 2015). • Integrar la contaminación lumínica dentro de las estrategias ambientales nacionales y los planes de ordenamiento territorial. • Promover acuerdos interinstitucionales para garantizar la aplicación efectiva de regulaciones en áreas protegidas.
	Impacto	<ul style="list-style-type: none"> • Un marco normativo específico fomentaría la implementación de tecnologías de iluminación sostenible, fortalecería la adopción de prácticas de conservación y permitiría una mejor coordinación entre entidades gubernamentales, el sector privado y la sociedad.
E C O N Ó M I C O	Acción	<ul style="list-style-type: none"> • Ofrecer incentivos fiscales y financiamiento sostenible para las empresas y municipios que implementen LED de baja temperatura de color y ajustes espectrales adecuados, reduciendo las emisiones de luz azul (Kamei <i>et al.</i>, 2021). • Fomentar la implementación de un alumbrado público mediante alianzas que prioricen la sostenibilidad y eficiencia energética. • Implementar un sistema, donde los sectores que generen más emisiones de luz deban invertir en compensaciones ambientales.
	Impacto	<ul style="list-style-type: none"> • Reducirá costos operativos a largo plazo, promoverá la inversión en tecnologías sostenibles y permitirá una transición gradual hacia sistemas de iluminación adaptativa y regulada.
S O C I A L	Acción	<ul style="list-style-type: none"> • Promover campañas de sensibilización pública que informen a la ciudadanía sobre los efectos adversos de la contaminación lumínica en la salud, la biodiversidad y la observación astronómica (Marangoni <i>et al.</i>, 2022). • Incluir programas educativos en escuelas y universidades para promover una cultura de iluminación responsable. Adoptando, plataformas de ciencia ciudadana para monitorear la contaminación lumínica. • Implementar programas de iluminación sostenible en espacios públicos, integrando participación comunitaria en el diseño y mantenimiento de la infraestructura.
	Impacto	<ul style="list-style-type: none"> • Aumentará la concienciación y el apoyo social para la reducción de la contaminación lumínica, fomentando cambios en los hábitos de iluminación y mayor exigencia hacia políticas sostenibles.
T E C N O L O G Í A	Acción	<ul style="list-style-type: none"> • Implementar tecnologías de iluminación inteligente, como LED con sensores de atenuación, reguladores de intensidad lumínica y sistemas automatizados que ajusten la iluminación según las necesidades del entorno (Kamei <i>et al.</i>, 2021) • Aplicar herramientas de teledetección satelital como VIIRS y redes de sensores urbanos para el monitoreo en tiempo real de la contaminación lumínica (Zhao and Fu, 2023).

Ó G I C O	Impacto	<ul style="list-style-type: none"> Incentivar la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías de iluminación de bajo impacto ambiental, especialmente en sectores comerciales e industriales.
		<ul style="list-style-type: none"> Optimizará el uso de la luz artificial, reduciendo su impacto sin comprometer la seguridad ni la funcionalidad del alumbrado urbano. Permitirá la detección temprana de zonas con altos niveles de contaminación lumínica y facilitando la toma de decisiones basadas en datos locales.
E C O L Ó G I C O	Acción	<ul style="list-style-type: none"> Establecer reservas de cielos oscuros en áreas naturales protegidas para reducir la intrusión lumínica en ecosistemas sensibles. Implementar regulaciones sobre temperatura de color y espectro de luz en entornos ecológicamente críticos (Zhang <i>et al.</i>, 2019). Desarrollar planes de restauración ecológica en zonas afectadas por la contaminación lumínica, promoviendo corredores biológicos nocturnos y el uso de vegetación que actúe como barrera lumínica. Evaluar la posibilidad de imponer restricciones horarias en el alumbrado público en zonas de baja circulación nocturna.
		<ul style="list-style-type: none"> Ayudará a mitigar los efectos negativos de la luz artificial en la biodiversidad, protegiendo especies nocturnas como aves migratorias, polinizadores y la fauna marina. Contribuyendo a preservar el equilibrio de los ecosistemas y mejorar la calidad del cielo nocturno.
L E G A L	Acción	<ul style="list-style-type: none"> Fortalecer los mecanismos de fiscalización y cumplimiento normativo, asegurando la correcta aplicación de las regulaciones sobre alumbrado público. Implementar multas y sanciones escalonadas para empresas que no cumplan con estándares de iluminación sostenible (Pothukuchi, 2023). Integrar criterios de contaminación lumínica en códigos de construcción y zonificación urbana, restringiendo el uso de publicidad lumínica en áreas residenciales y naturales (Ministerio de Ambiente, 2023). Adaptar normativas internacionales como las establecidas por la International Dark-Sky Association (IDA) para garantizar la protección del cielo nocturno.
		<ul style="list-style-type: none"> Mejorará la regulación y el cumplimiento normativo, reduciendo el impacto de la contaminación lumínica en áreas urbanas y naturales. Creando un marco de responsabilidad compartida entre el sector privado, el gobierno y la sociedad para una mejor gestión de la iluminación artificial.

Síntesis

Los resultados evidencian que la contaminación lumínica constituye una problemática multidimensional. La comparación con experiencias internacionales demuestra que la implementación de marcos regulatorios específicos, tecnologías de iluminación sostenible y programas de educación ciudadana puede reducir significativamente la contaminación lumínica.

Aunque existe un cuerpo robusto de evidencia internacional que documenta sus efectos, en Panamá los estudios son aún incipientes, limitados a diagnósticos locales y normativas fragmentadas. La ausencia de investigaciones, monitoreo continuo y organizado, representan desafíos clave que limitan la capacidad de gestión.

Estos hallazgos se alinean directamente con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular:

- ODS 3 (Salud y bienestar), al evidenciar los efectos de la luz artificial en los ritmos circadianos y enfermedades metabólicas.
- ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles), al destacar la necesidad de integrar criterios de iluminación responsable en la planificación urbana.
- ODS 13 (Acción por el clima), por el vínculo entre consumo energético y emisiones asociadas al uso ineficiente de luz artificial.
- ODS 15 (Vida de ecosistemas terrestres), al documentar los impactos sobre especies emblemáticas como tortugas marinas, aves migratorias y polinizadores nocturnos.

Cabe destacar que la inclusión del tema en el currículo escolar y en programas de educación ambiental es esencial para fomentar una conciencia ciudadana temprana, que permita reconocer la contaminación lumínica como un problema ambiental prioritario y promover un cambio cultural hacia prácticas de iluminación más sostenibles y responsables.

CONCLUSIONES

La evidencia confirma que la contaminación lumínica en Panamá ha aumentado de forma sostenida, vinculada al crecimiento urbano y económico, con efectos documentados sobre la biodiversidad, la salud y la astronomía. Pese a algunos avances regulatorios, persisten vacíos normativos, ausencia de monitoreo sistemático y limitada investigación local. Enfrentar estos desafíos demanda regulaciones más estrictas, tecnologías de iluminación sostenibles y campañas de sensibilización que integren este tema en la educación ambiental y el currículo escolar. Se requiere un enfoque interdisciplinario y políticas públicas sólidas para mitigar sus efectos y avanzar hacia un desarrollo urbano sostenible, en consonancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, F.J. (1967) *Scanning the business environment*. Edited by Macmillan. New York: Studies of the modern corporation, An Arkville Press book.
- Alva, A. *et al.* (2023) “Dark Sky Parks: public policy that turns off the lights,” *Journal of Environmental Planning and Management* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1080/09640568.2023.2275535>.
- Arízaga Medina, R.E. & Cárdenas Pasato, L.E. (2020) “Efecto de la luz artificial en la anidación de tortugas marinas en playas del Cantón Puerto López, Manabí, Ecuador,”

- INNOVA Research Journal*, 5(3.1), pp. 300–314. Available at: <https://doi.org/10.33890/INNOVA.V5.N3.1.2020.1512>.
- Assad, H., Fatma, I. & Kumar, A. (2022) “Health Impacts/Risks of Light Pollution,” in *Health Impacts/Risks of Light Pollution*. Available at: <https://doi.org/10.1201/9781003185109-5>.
- Autoridad Nacional de los Servicios Públicos (ASEP) (2019) *Reglamento de alumbrado público en Panamá, ASEP*. Panamá.
- Bedi, T.K., Puntambekar, K. & Singh, S. (2021a) “Assessment of Light Pollution in Indian Scenario: A Case of Bangalore,” *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 102(3). Available at: <https://doi.org/10.1007/s40030-021-00530-3>.
- Bedi, T.K., Puntambekar, K. & Singh, S. (2021b) “Light pollution in India: appraisal of artificial night sky brightness of cities,” *Environment, Development and Sustainability*, 23(12). Available at: <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01384-2>.
- Cao, M., Xu, T. & Yin, D. (2023) “Understanding light pollution: Recent advances on its health threats and regulations,” *Journal of Environmental Sciences*, 127, pp. 589–602. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.JES.2022.06.020>.
- Cinzano, P. (2004) “A portable spectrophotometer for light pollution measurements,” *Mem SA It Suppl*, 5.
- Dizon-Paradis, R.N. *et al.* (2022) “Light Pollution Monitoring Using A Modular IoT Sensor Platform,” in *Proceedings - 2022 IEEE International Conference on Smart Internet of Things, SmartIoT 2022*. Available at: <https://doi.org/10.1109/SmartIoT55134.2022.00014>.
- Dufier, J.L. & Touitou, Y. (2022) “Pollution lumineuse,” *La Revue du praticien*, 72(2).
- Elsahragty, M. & Kim, J.L. (2015) “Assessment and Strategies to Reduce Light Pollution Using Geographic Information Systems,” *Procedia Engineering*, 118, pp. 479–488. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2015.08.458>.
- Falchi, F. *et al.* (2011) “Limiting the impact of light pollution on human health, environment and stellar visibility,” *Journal of Environmental Management*, 92(10), pp. 2714–2722. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2011.06.029>.

- Falcón, J. *et al.* (2020) “Exposure to Artificial Light at Night and the Consequences for Flora, Fauna, and Ecosystems,” *Frontiers in Neuroscience*. Available at: <https://doi.org/10.3389/fnins.2020.602796>.
- Fang, L. *et al.* (2023) “Light Pollution Index System Model Based on Markov Random Field,” *Mathematics*, 11(13). Available at: <https://doi.org/10.3390/math11133030>.
- Flores, E.E. & De La Cruz, J.R. (2023) “Nesting activity of *Lepidochelys olivacea*, and the effect of artificial shade at Cascajilloso beach, a newly inhabited nesting site in Pacific Panama,” *Marine Ecology*, 44(6). Available at: <https://doi.org/10.1111/maec.12773>.
- Goronczy, E.E. (2021) “What Is Light Pollution?,” in *Light Pollution in Metropolises*. Available at: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-29723-7>.
- Grubisic, M. & van Grunsven, R.H. (2021) “Artificial light at night disrupts species interactions and changes insect communities,” *Current Opinion in Insect Science*. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cois.2021.06.007>.
- Hall, D.T. (2022) “Semi-Empirical Astronomical Light Pollution Evaluation of Satellite Constellations,” *Journal of the Astronautical Sciences*, 69(6). Available at: <https://doi.org/10.1007/s40295-022-00358-4>.
- Hannachi, E. & Slimani, Y. (2022) “Source, Impact, and Perspective of Light Pollution,” in *Source, Impact, and Perspective of Light Pollution*. Available at: <https://doi.org/10.1201/9781003185109-4>.
- Hearnshaw, J. (2024) “Light Pollution and the Future of Space Science and Astronomy,” pp. 259–271. Available at: https://doi.org/10.1007/978-981-97-0714-0_12.
- IAU (2020) *Light Pollution* | IAU. Available at: https://www-iau-org.translate.google/public/themes/light_pollution/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc (Accessed: February 25, 2025).
- International Commission for the Protection of the Night Sky (2007) *Declaration in Defence of the Quality of the Night Sky and the Right to Starlight: The La Palma Declaration*. Available at: https://fundacionstarlight.org/docs/files/33_english-declaration-in-defense-of-the-quality-of-the-night-sky-and-the-right-to-starlight.pdf (Accessed: September 10, 2025).

- Kamei, M. *et al.* (2021) “Effects of replacing outdoor lighting with white LEDs with different correlated color temperatures on the attraction of nocturnal insects,” *Applied Entomology and Zoology*, 56(2). Available at: <https://doi.org/10.1007/s13355-021-00729-7>.
- Khorram, A., Yusefi, M. & Keykha, S. (2014) “Light Pollution, a World Problem,” *Health Scope*, 3(4). Available at: <https://doi.org/10.17795/jhealthscope-24065>.
- Kumar, V. *et al.* (2024) “Observations on the Effect of Artificial Lights on Foraging Behaviour of Greater Shot-Nosed Fruit Bat, *Cynopterus sphinx* (Vahl, 1797) in Babasaheb Bhimrao Ambedkar University Campus, Lucknow, India,” *Records of the Zoological Survey of India*, 124, pp. 547–564. Available at: <https://doi.org/10.26515/RZSI/V124/I1S/2024/172761>.
- Kyba, C.C.M. *et al.* (2017) “Artificially lit surface of Earth at night increasing in radiance and extent,” *Science Advances*, 3(11). Available at: https://doi.org/10.1126/SCIADV.1701528/SUPPL_FILE/1701528_SM.PDF.
- Luarte, T. *et al.* (2016) “Light pollution reduces activity, food consumption and growth rates in a sandy beach invertebrate,” *Environmental Pollution*, 218, pp. 1147–1153. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2016.08.068>.
- Marangoni, L.F.B. *et al.* (2022) “Impacts of artificial light at night in marine ecosystems—A review,” *Global Change Biology*, 28(18). Available at: <https://doi.org/10.1111/gcb.16264>.
- Menéndez-Velázquez, A., Morales, D. and García-Delgado, A.B. (2022) “Light Pollution and Circadian Misalignment: A Healthy, Blue-Free, White Light-Emitting Diode to Avoid Chronodisruption,” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(3), pp. 1849–1849. Available at: <https://doi.org/10.3390/IJERPH19031849>.
- Ministerio de Ambiente (2023) “Principales problemas ambientales de Panamá.” in. Panamá: Dirección Nacional de Gestión Integrada de Cuencas Hidrográficas.
- Mu, H. *et al.* (2021) “Evaluation of light pollution in global protected areas from 1992 to 2018,” *Remote Sensing*, 13(9). Available at: <https://doi.org/10.3390/rs13091849>.

- Muñoz Ccuro, F.E. *et al.* (2024) “Impact of Light Pollution on Human Rights and Biodiversity,” *Academic Journal of Interdisciplinary Studies*, 13(1), p. 402. Available at: <https://doi.org/10.36941/ajis-2024-0030>.
- Owens, A.C.S. *et al.* (2020) “Light pollution is a driver of insect declines,” *Biological Conservation*, 241, p. 108259. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.BIOCON.2019.108259>.
- Pino, M. (2016) *Diagnóstico del nivel de Contaminación Lumínica que presenta la comunidad de Llano Marín a causa del alumbrado público*. Universidad de Panamá.
- Pothukuchi, K. (2023) “Mitigating urban light pollution: A review of municipal regulations and implications for planners,” *Journal of Urban Affairs* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1080/07352166.2023.2247506>.
- Rajkhowa, R. (2012) “Light Pollution and Impact of Light Pollution,” *International Journal of Science and Research (IJSR) ISSN (Online Impact Factor, 3(10)*.
- Redzuan, M. *et al.* (2017) “Spatial Model of Sky Brightness Magnitude in Langkawi Island, Malaysia,” *Research in Astronomy and Astrophysics*, 17(4). Available at: <https://doi.org/10.1088/1674-4527/17/4/37>.
- Rep. Sherrill, M. [D-N.-11] (2024) “Text - H.R.9409 - 118th Congress (2023-2024): DoD Dark Sky Stewardship Act.” Available at: <https://www.congress.gov/bill/118th-congress/house-bill/9409/text> (Accessed: September 6, 2025).
- Rueda-Espinosa, K.J. *et al.* (2023) “Illuminating the threat: a decade-long analysis of light pollution in Colombian main urban centers through satellite imagery,” *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 47(183), pp. 242–258. Available at: <https://doi.org/10.18257/RACCEFYN.1867>.
- Srivastava, M. *et al.* (2022) “Light Pollution: Adverse Health Impacts,” in *Light Pollution: Adverse Health Impacts*. Available at: <https://doi.org/10.1201/9781003185109-6>.
- Stewart, R.F., B.O.J. & M.A. (1965) “Formal planning: The staff planner’s role at start up (No. 250).”

- Varela Perez, A.M. (2023) “The increasing effects of light pollution on professional and amateur astronomy,” *Science*. Available at: <https://doi.org/10.1126/science.adg0269>.
- Visuette, V. (2024) *La luz artificial y su efecto en la calidad del cielo nocturno en comunidades de Panamá Oeste*. Universidad de Panamá.
- Zamorano Calvo, J. *et al.* (2015) *REECL SQM network | Red española de estudios sobre la contaminación lumínica*. Available at: <https://guaix.fis.ucm.es/reec/SQM-REECL> (Accessed: June 26, 2024).
- Zhang, G. *et al.* (2019) “Spectral optimization of color temperature tunable white LEDs with red LEDs instead of phosphor for an excellent IES color fidelity index,” *OSA Continuum*, 2(4). Available at: <https://doi.org/10.1364/osac.2.001056>.
- Zhang, Y. & Cheng, L. (2023) “Evaluation Model of Location Light Pollution Level based on Analytic Hierarchy Process and Entropy Weight Method,” in *E3S Web of Conferences*. Available at: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339303035>.
- Zhao, G. & Fu, X. (2023) “Construction of A Light Pollution Evaluation System Based on Subjective and Objective Integration Empowerment,” *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 59. Available at: <https://doi.org/10.54097/hset.v59i.10092>.

ANEXO

Cuadro 3.

Documentos revisados y clasificados por categoría temática. Elaboración del equipo de investigación a partir de la revisión bibliográfica.

Nº	Autor(es)	Año	Tipo de documento	Área temática	Título
1	Owens et al.	2020	Artículo	Biodiversidad y Ecología	Light pollution is a driver of insect declines
2	Falcón, J et al.	2020	Artículo	Biodiversidad y Ecología	Exposure to artificial light at night and the consequences for flora, fauna, and ecosystems.
3	Arizaga Medina & Cárdenas Pasato	2020	Artículo	Biodiversidad y Ecología	Efecto de la luz artificial en la anidación de tortugas marinas
4	Flores & De la Cruz	2023	Artículo (Panamá)	Biodiversidad y Ecología	Nesting activity of <i>Lepidochelys olivacea</i>
5	Luarte et al.	2016	Artículo	Biodiversidad y Ecología	Light pollution reduces activity
6	Marangoni et al.	2022	Artículo	Biodiversidad y Ecología	Impacts of artificial light at night in marine ecosystems
7	Grubisic & van Grunsven	2021	Artículo	Biodiversidad y Ecología	Artificial light at night disrupts species interactions
8	Jung & Kalko	2010	Artículo	Biodiversidad y Ecología	Where forest meets urbanization
9	Kamei et al.	2021	Artículo	Biodiversidad y Ecología	Effects of replacing outdoor lighting
10	Kumar et al.	2024	Artículo	Biodiversidad y Ecología	Effect of artificial lights on foraging behaviour of bats
11	Pauwels	2019	Artículo	Biodiversidad y Ecología	Light pollution & biodiversity
12	Valdés et al.	2022	Artículo	Salud Humana	Blue-free WLEDs to avoid chronodisruption
13	Cao et al.	2023	Artículo	Salud Humana	Health threats and regulations
14	Assad, Fatma & Kumar	2022	Artículo	Salud Humana	Health impacts/risks of light pollution
15	Dufier & Touitou	2022	Artículo	Salud Humana	Pollution lumineuse
16	Falchi et al.	2011	Artículo	Salud Humana	Limiting the impact of light pollution
17	Muñoz Ccuro et al.	2024	Artículo	Salud Humana	Light pollution, human rights and biodiversity
18	Kyba et al.	2017	Artículo	Urbanismo	Artificially lit surface of Earth at night
19	Falchi et al.	2019	Artículo	Urbanismo	Light pollution in USA and Europe

20	Pino	2016	Tesis (Panamá)	Urbanismo	Diagnóstico de la contaminación lumínica en Llano Marín
21	Visuette	2024	Tesis (Panamá)	Urbanismo	La luz artificial y su efecto en la calidad del cielo nocturno
22	Rueda-Espinosa et al.	2023	Artículo	Urbanismo	Illuminating the threat
23	Mayer-Pinto et al.	2022	Artículo	Urbanismo	Light pollution: a landscape-scale issue
24	Chen	2023	Artículo	Urbanismo	Light pollution risk assessment
25	Elsahragty & Kim	2015	Artículo	Urbanismo	Assessment and strategies to reduce light pollution using GIS
26	Falchi et al.	2016	Artículo	Astronomía	The new world atlas of artificial night sky brightness
27	Kocifaj et al.	2014	Artículo	Astronomía	Particulate matter as an amplifier
28	Hall	2022	Artículo	Astronomía	Astronomical evaluation of satellite constellations
29	Hearnshaw	2024	Artículo	Astronomía	Light pollution and the future of space science
30	Varela Perez	2023	Artículo	Astronomía	Effects of light pollution on professional and amateur astronomy
31	Koller-Thompson et al.	2020	Artículo	Astronomía	Light pollution from satellites
32	Zamorano Calvo et al.	2015	Artículo	Astronomía	REECL SQM network
33	Cinzano	2004	Artículo	Astronomía	Portable spectrophotometer
34	Mu et al.	2021	Artículo	Modelos de Detección	Evaluation of light pollution in global protected areas
35	Dizon-Paradis et al.	2022	Artículo	Modelos de Detección	Light pollution monitoring using IoT platform
36	Redzuan et al.	2017	Artículo	Modelos de Detección	Spatial model of sky brightness
37	Galatanu	2017	Artículo	Modelos de Detección	Luminance measurements
38	Fang et al.	2023	Artículo	Modelos de Detección	Light Pollution Index System Model
39	Zhao & Fu	2023	Artículo	Modelos de Detección	Light pollution evaluation system
40	Wang et al.	2023	Artículo	Modelos de Detección	Research Light Pollution based on EWM
41	Zhang et al.	2019	Artículo	Modelos de Detección	Spectral optimization of LEDs
42	Alva et al.	2023	Artículo	Regulaciones y Políticas	Dark Sky Parks
43	Pothukuchi	2023	Artículo	Regulaciones y Políticas	Mitigating urban light pollution

44	DoD	2024	Documento	Regulaciones y Políticas	Dark Sky Stewardship Act (EE.UU.)
45	Ministerio de Ambiente	2022	Documento (Panamá)	Regulaciones y Políticas	Guía de Legislación Ambiental de Panamá
46	ASEP	2019	Documento (Panamá)	Regulaciones y Políticas	Reglamento de alumbrado público
47	Ministerio de Ambiente	2023	Documento (Panamá)	Regulaciones y Políticas	Principales problemas ambientales de Panamá
48	Marin	2009	Artículo	Regulaciones y Políticas	Starlight: a common heritage
49	IAU	2020	Documento Internacional	Regulaciones y Políticas	Light Pollution
50	Rajkhowa	2012	Artículo	Regulaciones y Políticas	Light Pollution and Impact
51	Srivastava et al.	2022	Artículo	Regulaciones y Políticas	Approaches for Light Pollution Prevention
52	Hannachi & Slimani	2022	Artículo	Regulaciones y Políticas	Source, impact, and perspective of light pollution
53	Falchi et al.	2023	Artículo	Regulaciones y Políticas	Light pollution indicators for observatories

Cuadro 4.

Radiancia anual nocturna de Panamá (2012–2024) según datos VIIRS.

Año	Radiancia ($10^3 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$)	PIB (MM USD)
2012	91.248	40.43
2013	105.467	45.60
2014	108.202	49.92
2015	114.780	54.09
2016	117.362	57.91
2017	125.972	62.20
2018	131.478	67.29
2019	134.746	69.72
2020	127.649	57.09
2021	123.046	67.41
2022	140.878	76.52
2023	169.376	83.38

Fuente: Radiancia: Light Pollution Map (<https://www.lightpollutionmap.info>). PIB: Banco Mundial (World Bank Data). Elaboración del equipo de investigación (2024).



Caracterización eléctrica y determinación de la eficiencia de un módulo de celdas solares policristalinas bajo condiciones no estándares: caso de estudio Radioshack 277-1205

Electrical characterization and determination of the efficiency of a polycrystalline solar cell module under non-standard conditions: case study Radioshack 277-1205

Ramiro A. Villarreal G.

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Física, Panamá.

ramiro.villarreal@up.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0001-0887-6707>

Fecha de recepción: 30 de junio de 2025

Fecha de aceptación: 28 de octubre de 2025

DOI: <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v28n1.a8952>

RESUMEN

Se determinaron, la curva I vs V , el factor de forma y la eficiencia de un módulo de celda solar policristalina, marca RadioShack de 6Vcc y 50mAh con encapsulado 277-1205. Esto, con un valor de irradiancia constante de 217W/m^2 ($24,3^\circ\text{C}$) proveniente de un bombillo incandescente de 200W a una distancia de 13,0cm. Teniendo presente, en que estas no eran las condiciones STC, se fueron midiendo los valores de voltaje y corriente del módulo de celda solar, al conectarle diferentes resistencias en paralelo. Posteriormente, se construyó la curva I vs V y se creó un modelo del diodo simple. Con estos datos, se calculó la potencia correspondiente para cada resistencia ajustada. Finalmente, con la potencia máxima obtenida (114,60mW), el voltaje a circuito abierto, la corriente en corto circuito y la superficie de dicho módulo, se calcularon, el factor de forma y la eficiencia de conversión de energía, los cuales fueron de 0,60 y 23,7%, respectivamente. Estos resultados fueron comparados con estudios previos en los cuales, no se utilizaron las condiciones STC y también, con estudios en los cuales sí se utilizaron las condiciones STC. Estas comparaciones reflejaron dos hechos, el primero, es que bajo condiciones STC, el factor de forma será mayor que el obtenido. Y el segundo, es que el valor de eficiencia obtenida, puede variar a causa de la no linealidad entre la potencia máxima generada y la irradiancia incidente.

PALABRAS CLAVE

Célula solar policristalina, curva característica I vs V , factor de forma, eficiencia de conversión de energía.

ABSTRACT

The I vs V curve, fill factor and efficiency of a 6Vcc, 50mAh RadioShack brand polycrystalline solar cell module with 277-1205 encapsulation were determined. This, with a constant irradiance value of 217W/m^2 ($24,3^\circ\text{C}$) coming from a 200W incandescent bulb at a distance of 13,0cm. Keeping in mind that these were not the STC conditions, the voltage and current values of the solar cell module were measured by connecting different resistors in parallel. Subsequently, the I vs V curve was constructed and a simple diode model was created. With these data, the corresponding power for each adjusted resistance was calculated. Finally, with the maximum power obtained (114,60mW), the open circuit voltage, the short circuit current and the surface of said module, the fill factor and the energy conversion efficiency were calculated, which were 0,60 and 23,7%, respectively. These results were compared with previous studies in which STC conditions were not used and also with studies in which STC conditions were used. These comparisons reflected two facts, the first is that under STC conditions, the fill factor will be greater than the one obtained. And the second is that the efficiency value obtained may vary due to the non-linearity between the maximum power generated and the incident irradiance.

KEYWORDS

Célula solar policristalina, curva característica I vs V , factor de forma, eficiencia de conversión de energía.

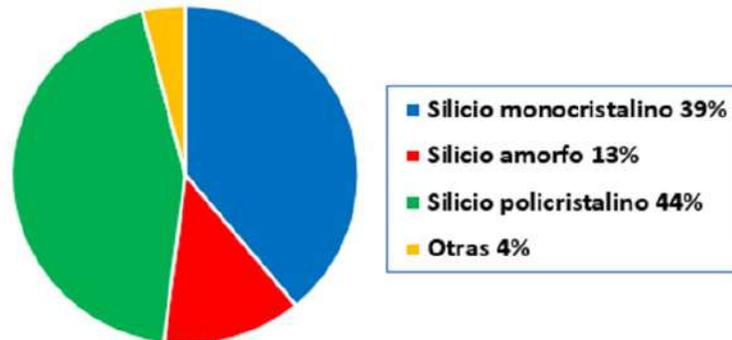
INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen una amplia gama de celdas fabricadas con diferentes materiales y estructuras, pero todo esto con el fin de obtener la máxima eficiencia posible a un costo accesible (Barzola & Rubinib, 2013). Por otro lado, vale la pena mencionar que la materia base de estas celdas son materiales semiconductores también utilizados en otros dispositivos, tales como, diodos, transistores, circuitos integrados, etc. Se han obtenido experimentalmente celdas con eficiencias próximas al 30%, mientras que las fabricadas industrialmente superan, con frecuencia, el 15%. Las celdas de silicio cristalino, las mismas con una eficiencia del 18%, comparten el mercado con las celdas policristalinas (Flores & Domínguez, 2016). Sin embargo, las celdas de capa delgada de silicio amorfo son más económicas, pero también considerablemente menos eficientes. Se están empezando a fabricar celdas de capa delgada de diferentes compuestos semiconductores como el telurio de cadmio (CdTe) y el diseleniuro indio (In_2Se_3) que prometen eficiencias aceptables combinadas con precios más bajos. También se están trabajando en celdas de alta eficiencia de silicio monocristalino, arseniuro de galio (GaAs) y fosforo de indio (InP) para usos y aplicaciones más especializadas

(Arencibia-Carballo, 2016). En la figura 1 se muestran la disponibilidad de las celdas solares más comunes en el mercado (Flores & Domínguez, 2016).

Figura 1.

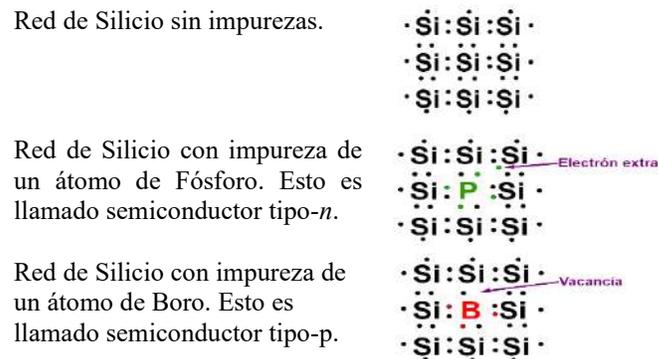
Disponibilidad de las celdas solares más comunes en el mercado.



Como ya se mencionó, una celda solar está hecha de un material semiconductor de silicio (Si). Un átomo de silicio tiene cuatro electrones de valencia, lo que le permite formar una red cristalina con otros cuatro átomos de silicio vecinos. Cuando una impureza tal como el fósforo (P), o el arsénico (As), o el antimonio (Sb), los cuales tienen cinco electrones de valencia, es adicionado uno de estos, el electrón de más puede ser fácilmente liberado para convertirse en un electrón de conducción (García, 2011). Un semiconductor con un electrón de más es llamado, semiconductor tipo-*n*. Ahora, si se agrega una impureza, tal como el aluminio (Al), o el boro (B), o el indio (In), los cuales tienen tres electrones de valencia, al cristal de silicio en cuestión, se le crearía un agujero en los electrones de enlace (García, 2011). Un semiconductor con una vacancia es llamado, semiconductor tipo-*p*. La figura 2 muestra estos tres tipos de enlace.

Figura 2.

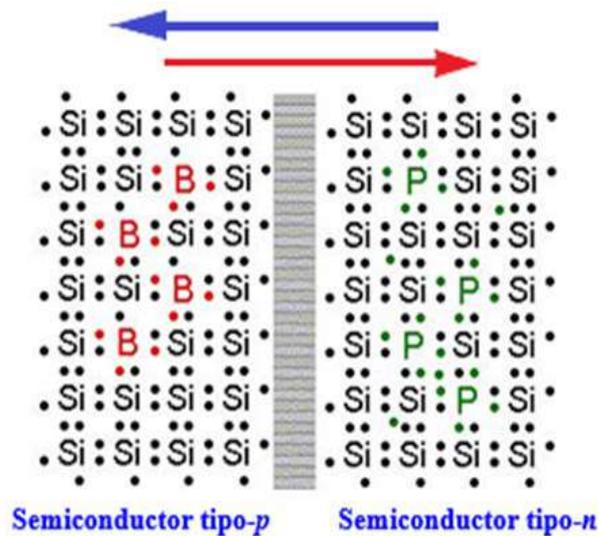
Estructura química básica de un semiconductor basado en Silicio



Una unión semiconductor $p-n$, se forma al unir un material con una deficiencia de un electrón (semiconductor tipo- p) y otra con un electrón de más (semiconductor tipo- n). Si un electrón ubicado cerca de la denominada “longitud de difusión” (región dentro de la unión $p-n$), absorbe un fotón con suficiente energía para hacer un salto energético entre la banda de conducción y la banda de valencia (Cabezas-Maslanczuk *et al.*, 2018), se produce un “hueco” en la banda de valencia, lo que corresponde a la generación de un par “electrón-hueco”. A causa de esto, existe una alta probabilidad de que estos portadores de carga eléctrica (par electrón-hueco) sean separados por el elevado campo eléctrico existente en la unión $p-n$, forzando así, el desplazamiento del electrón hacia la región del semiconductor tipo- n y el hueco hacia la región del semiconductor tipo- p (figura 3), creándose, con ello, una corriente de electrones que va desde el semiconductor tipo- n hacia el semiconductor tipo- p (Flores & Domínguez, 2016).

Figura 3.

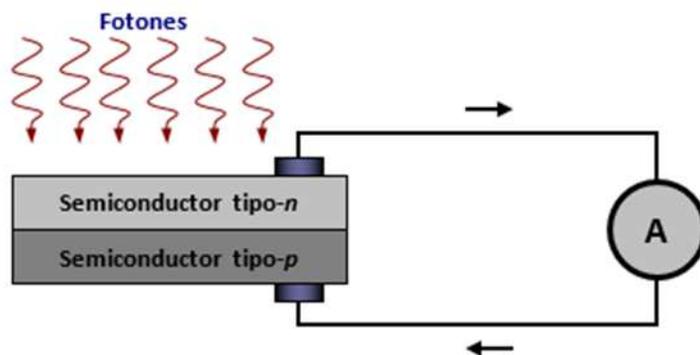
Formación del par electrón-hueco, en una unión semiconductor tipo $p-n$. La flecha roja indica la dirección del electrón y la flecha azul la dirección del hueco.



La figura 4 esquematiza este fenómeno de inducción de corriente eléctrica en la unión semiconductor tipo $p-n$, aplicado a un circuito eléctrico externo al arreglo semiconductor.

Figura 4.

Fenómeno de inducción de corriente eléctrica a causa de la incidencia de fotones sobre la unión semiconductor p-n.



Las flechas en negro muestran el sentido en que se desplazan los electrones. Por otra parte, debemos recordar que, en electricidad, el sentido de la corriente eléctrica en un cable es opuesto al sentido de desplazamiento de los electrones en el mismo, de modo, que las dos flechas negras en el diagrama, van en sentido opuesto a la corriente eléctrica. El dispositivo de lado derecho del cable representa un medidor de corriente eléctrica o amperímetro.

Una desventaja de los dispositivos que utilizan celdas de silicio es su respuesta espectral, la cual posee sus máximos valores entre el rojo y el infrarrojo cercano del espectro solar. Pero, por otro lado, tiene ventajas, tales como, un bajo costo (Rodríguez, 2024) y su rápido tiempo de respuesta para una medición instantánea.

Al conocerse la relación entre la radiación incidente y la corriente generada para estos dispositivos semiconductores, es posible ubicar a los mismos en una categoría de “fotodetectores” (Aguirre *et al.*, 2022). En este contexto, hay tres tipos principales de fotodetectores: los fotovoltaicos, los fotoconductivos y los fotoemisivos. Los fotovoltaicos son los más simples de los fotodetectores y proporcionan la ventaja adicional de un voltaje medible sin requerimiento de una batería externa al ser irradiados con luz visible o radiación cercana al ultravioleta. Estos son los comúnmente conocidos como fotoceldas (Salazar-Peralta *et al.*, 2016). Los fotoconductivos, en esta categoría ocurre que las fotoceldas para mediciones en la región espectral del infrarrojo son frecuentemente del tipo, en la cual, la conductancia eléctrica del material varía con el flujo de la radiación espectral incidente.

Muchos de estos dispositivos requieren enfriamiento con la consecuente complejidad en los sistemas de medición. A diferencia de los detectores fotovoltaicos, los detectores

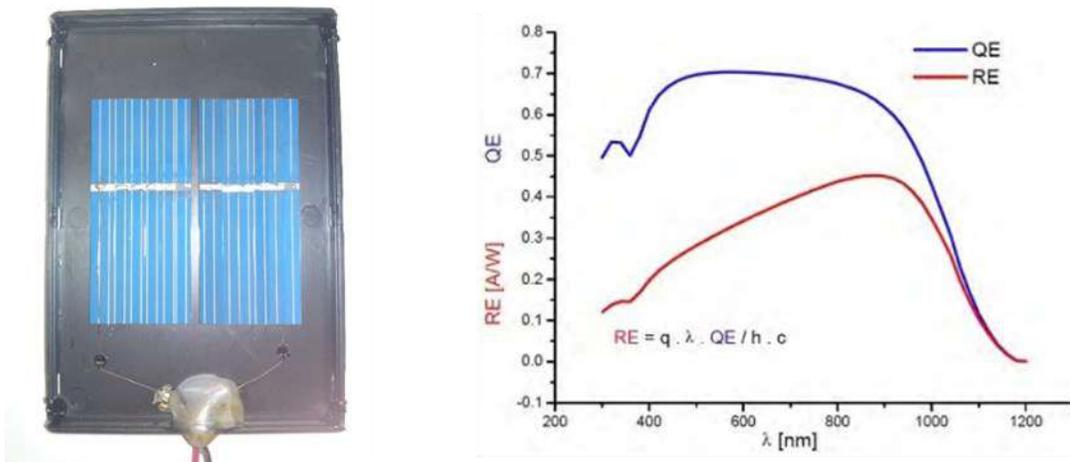
fotoconductivos requieren una batería externa. Estos se conocen en el área de la electrónica como resistencia variable con la luz o LDR por sus siglas en inglés. Y finalmente, los fotoemisivos. En estos detectores, los electrones son expulsados del material, para posteriormente ser colectados al ánodo para dar un flujo de corriente a través del detector. Existen dos tipos generales: los fotodiodos (los cuales son de baja ganancia) y los fototransistores (que tienen una buena ganancia).

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó un módulo de celda solar de silicio policristalino (figura 5, lado izquierdo), marca *RadioShack*, modelo 277-1205 y con características eléctricas: 6,0V de corriente continua a circuito abierto y 50mA de corriente máxima a corto circuito. La misma posee dimensiones rectangulares 4,90cm×4,60cm. Pero debe tenerse claro que el encapsulado o cubierta de fábrica es de dimensiones 9,50cm×6,40cm.

Figura 5.

(Izquierda) Módulo de celda solar de silicio policristalino, marca *RadioShack* de 6V cc y 50mAh con encapsulado 277-1205. (Derecha) Respuesta Espectral (RE) y Eficiencia Cuántica (QE) típica de una celda de silicio cristalino (García, 2011)



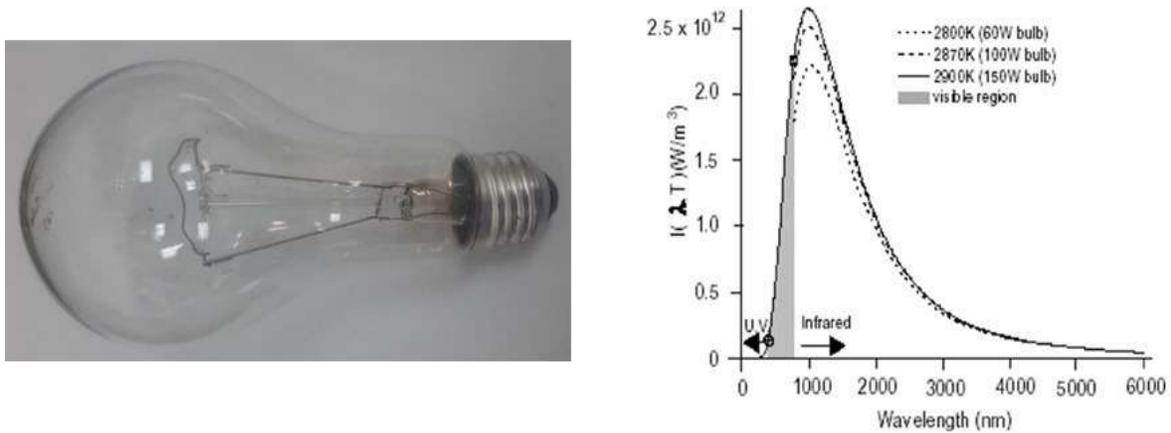
Por otro lado, la respuesta espectral juega un papel importante en su caracterización (Rojas Hernández, 2011), esto recordando que dicho concepto se define como la corriente de cortocircuito por unidad de potencia incidente de luz monocromática, en función de la longitud de onda (García, 2011). Razón por la cual, esta característica es mostrada en la figura 5, lado derecho. En dicha gráfica, se puede apreciar que la respuesta espectral para este

dispositivo tiene un máximo de longitud de onda en 900nm, lo cual corresponde al infrarrojo, en particular, al infrarrojo cercano (NIR).

Como fuente de luz, se utilizó un bombillo incandescente transparente con filamento de tungsteno y 200W de potencia (Rajendra, 2020), para una conexión de 120V_{rms} (figura 6, izquierda) y ubicado a una distancia constante de 13,0cm del módulo de celda solar (figura 9).

Figura 6.

(Izquierda) Bombillo incandescente con filamento de tungsteno y potencia eléctrica de 200W. (Derecha) Energía irradiada en función de la longitud de onda correspondiente a un bombillo incandescente de tungsteno (Sebitosi & Pillay, 2007)



Una vez el filamento de dicho bombillo está irradiando en equilibrio con el entorno, el mismo se comporta según la ley de radiación de Planck (Rajendra, 2020), alcanzando una temperatura de 2900K (Sebitosi & Pillay, 2007). Según la ley de desplazamiento de Wien, el espectro de emisión (figura 6, derecha) correspondiente a este bombillo, tiene una longitud de onda máxima de alrededor de 1000nm, lo que corresponde al infrarrojo cercano (NIR).

Lo cual es bastante adecuado para la respuesta espectral del módulo de celda solar en cuestión. Vale la pena mencionar, que los resultados obtenidos en este estudio, se pueden comparar con otros estudios previos, tales como Roy & Sarkar, 2014 y Mengata *et al.*, 2022, en donde también se utilizaron bombillos incandescentes para caracterizar módulos de celda solar.

Para la medición de la irradiancia se utilizó un medidor de irradiancia solar marca *Fluke*, modelo *IRRI-SOL* (figura 7), el mismo también puede medir temperatura de manera simultánea. Las especificaciones técnicas de este dispositivo se muestran en la tabla 1.

Figura 7.

Medidor de irradiancia solar marca Fluke, modelo IRRI-SOL.



Tabla 1.

Especificaciones técnicas del medidor de irradiancia solar marca Fluke, modelo IRRI-SOL.

Irradiance	
Measuring Range	0 to 1400 W/m ²
Resolution	1 W/m ²
Measuring Accuracy	± (5 % + 5 Digit)
Temperature Measurement	
Measuring range (°C)	-22 °F to 212 °F (-30 °C to 100 °C)
Resolution	0.2 °F (0.1 °C) / 1 °F @ >100 °F
Measuring Accuracy	±2 °F (±1 °C) @ 14 °F to 167 °F (-10 °C to 75 °C), ±4 °F (±2 °C) @ -22 °F to 14 °F (-30 °C to -10 °C) and 167 °F to 212 °F (75 °C to 100 °C)

Para las mediciones de voltaje, corriente y resistencia, se utilizaron dos multímetros digitales, marca MEXTECH, modelo DT603 (figura 8). Las especificaciones técnicas de estos dispositivos se muestran en la tabla 2.

Figura 8.

Multímetros digitales marca MEXTECH, modelo DT603.



Tabla 2.

Especificaciones técnicas de los multímetros digitales marca MEXTECH, modelo DT603

Function	Ranges	Accuracy
AC Voltage	6V/60V/600V/1000V	±1.0%
DC Voltage	600mV/6V/60V/600V/1000V	±0.5%
AC Current	6mA/60mA/600mA/10A	±1.5% (up to 600mA), ±3.0% (in A Range)
DC Current	600μA/6mA/60mA/600mA/10A	±1.0% (up to 600mA), ±2.0% (in A Range)
Resistance	600Ω/6kΩ/60kΩ/600kΩ/6mΩ/60MΩ	±0.8%

Las resistencias empleadas, para la caracterización del módulo de celda solar, eran resistencias de carbón de 0,50W de potencia. La tabla 3 muestra los diversos valores que se usaron, con sus respectivas tolerancias.

Tabla 3.

Resistencias empleadas en la toma de datos.

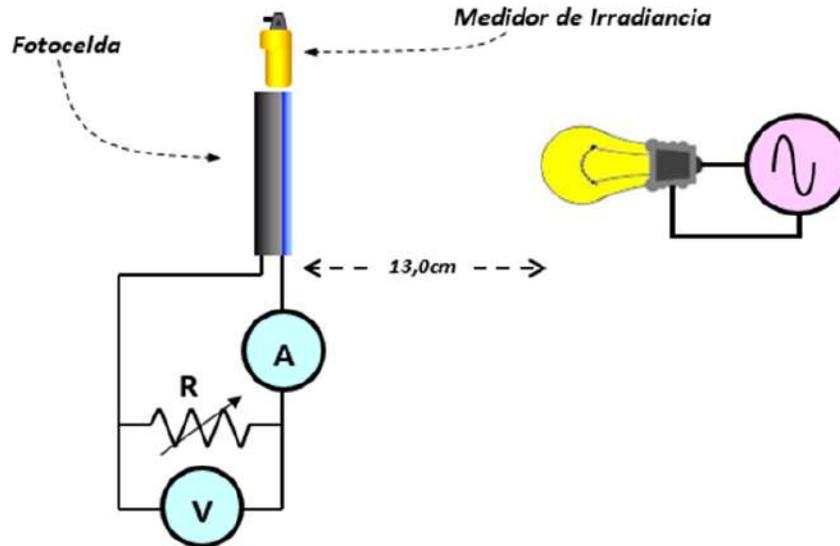
Cantidad	Valor (Ω)	Tolerancia
1	100k	10%
2	20k	10%
4	10k	10%
2	5k	5%
2	1k	10%
5	100	5%
2	40	5%
5	10	5%

Sistema para la toma de datos

La figura 9 esquematiza el sistema para la toma de datos de voltaje y corriente, que se empleó para caracterizar el módulo de celda solar (Novoa Jerez *et al.*, 2020). En dicho sistema, el dispositivo con la letra “V”, representa al voltímetro, el dispositivo con la letra “A”, representa al amperímetro y la “R”, el valor de la resistencia o el valor de una resistencia equivalente, esto, debido a que, durante la toma de datos, en algunas ocasiones, se combinaron algunas resistencias en un arreglo en paralelo, con el fin de generar una diversidad de valores.

Figura 9.

Sistema de toma de datos de voltaje y corriente para caracterizar el módulo de celda solar policristalina.



El procedimiento para la toma de datos fue muy sencillo, solo se cambiaba el valor de la resistencia o se combinaba con otra u otras en un arreglo en paralelo, montado en un tablero de conexiones (protoboard). Hecho esto, se anotaron los valores correspondientes de resistencia equivalente, voltaje y corriente eléctrica. Sin embargo, los valores de potencia eléctrica fueron calculados con el producto del voltaje por la corriente eléctrica respectiva (Novoa Jerez *et al.*, 2020), es decir

$$P = VI \quad (1)$$

Ahora bien, debido a que se mantuvo constante la distancia del bombillo incandescente al módulo de celda solar, durante el proceso de medición, la irradiancia tenía un valor constante de 217W/m^2 . Adicional a esto, se registró una temperatura de $24,3^\circ\text{C}$, tal y como se aprecia en la figura 10.

Figura 10.

Valores de irradiancia y temperatura medidos por el irradiómetro IRR1-SOL. En esta imagen, el mismo se encuentra en modo HOLD.



Con el objetivo de hacer una comparación de este estudio con el realizado por Mengata *et al.*, 2022, se midió la iluminancia que incidía sobre este módulo de celda solar, bajo las condiciones mencionadas en el sistema de la figura 9. El valor obtenido fue de 4309,84 lx, dicha medida fue realizada con el sistema de adquisición de datos *Xplorer GLX, PASPort*, marca PASCO, modelo PS-2002 y con la sonda *Light Sensor*, modelo PS-2106A, con rangos: 0-2,6 lx, 0-260 lx y 0-26000 lx. Resolución del 0,01% del valor máximo del rango seleccionado y una temperatura de operación entre 0-40°C.

Resistencia característica

La razón por la cual, se coloca una resistencia en paralelo con el módulo de celda solar en el sistema de la figura 9, es a causa, de que uno de los principales efectos que ocurren en los módulos de celda solar después de ser irradiados, es la saturación de cargas eléctricas en la salida de voltaje. Esto debido a la ausencia de un dispositivo que drene estos excesos. Este dispositivo, bien puede ser una resistencia en paralelo con dicho módulo de celda solar (Othman, 2012). Ahora bien, es requerido que la resistencia mencionada, tenga un valor particular, ya que, si posee un valor muy alto con respecto al adecuado, el efecto de saturación continuará. Y, por el contrario, si es muy bajo con respecto al adecuado, se drenará más de

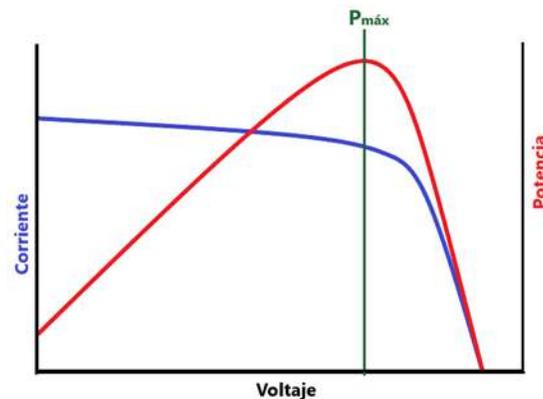
lo necesario y el voltaje caerá independientemente del valor la irradiancia incidente. En otros términos, una resistencia característica correspondiente a este sistema, es la que provoca que el módulo de celda solar entregue la mayor cantidad de energía por unidad de tiempo. Según la literatura consultada (Othman, 2012), el conocimiento de esta resistencia característica tiene la utilidad de hacer que el voltaje de salida del módulo de celda solar tenga un comportamiento lineal con respecto a la irradiancia incidente, lo cual resulta bastante conveniente, si dicho dispositivo semiconductor se desea utilizar como algún tipo de medidor de irradiancia. Sin embargo, esta correspondencia lineal no se puede corroborar en este artículo, ya que la irradiancia incidente era constante.

Factor de forma y la eficiencia de conversión de energía

Tomando como referencia el sistema anterior (figura 9), se debe destacar que el comportamiento de parámetros, tales como, el voltaje generado, la corriente eléctrica drenada, la potencia eléctrica generada, el tamaño del módulo de celda solar y el valor de la irradiancia incidente, definen qué tan eficiente es este dispositivo semiconductor, en su conversión de energía recibida por irradiación versus la energía eléctrica entregada por la misma. Ahora bien, el comportamiento real de los parámetros eléctricos para el sistema esquematizado en la figura 9, es similar al modelo mostrado en la figura 11

Figura 11.

Modelo de las gráficas I vs V y P vs V , que representan el comportamiento real de dichos parámetros eléctricos para un sistema equivalente al de la figura 9 (a irradiancia constante)



Si un módulo de celda solar se comportara como una fuente ideal de energía eléctrica (a irradiancia constante), la gráfica I vs V tendría forma rectangular (Novoa Jerez *et al.*, 2020).

Desde esta perspectiva, la potencia máxima ideal correspondería al rectángulo mostrado en la figura 12, el cual estaría representado por el producto de la corriente en corto circuito I_{sc} y el voltaje a circuito abierto V_{oc} .

Figura 12.

El rectángulo delimitado por la corriente en corto circuito I_{sc} y el voltaje a circuito abierto V_{oc} , correspondería a una potencia máxima ideal entregado por un módulo de celda solar.

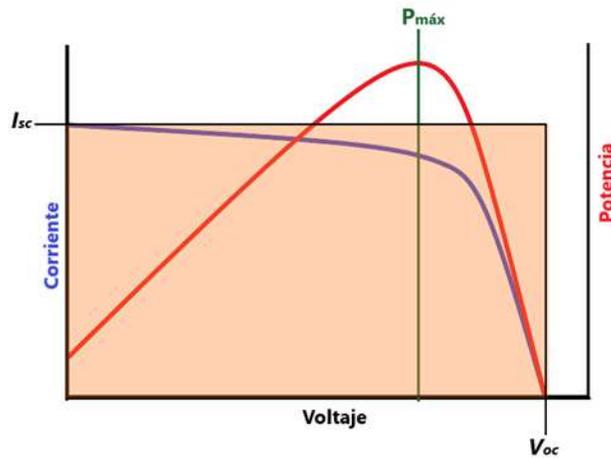
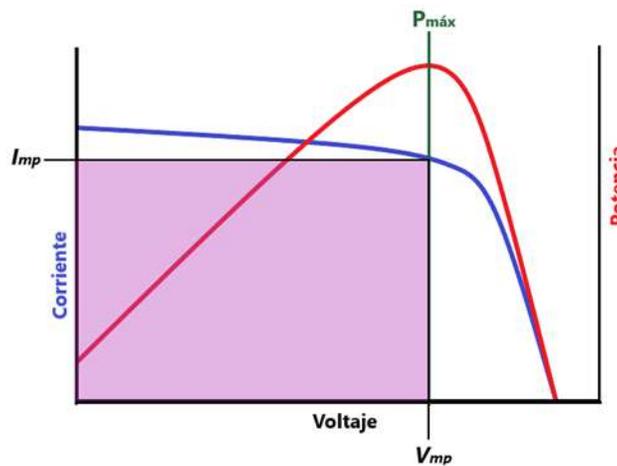


Figura 13.

El rectángulo delimitado por la corriente I_{mp} y el voltaje V_{mp} , correspondería, a una potencia máxima real entregada por un módulo de celda solar.



Un factor o cociente muy útil para definir una comparación entre el comportamiento real y el comportamiento ideal, es el denominado *factor de forma* o *FF* por sus siglas en inglés (*fill factor*). Este, se define como el cociente entre la potencia eléctrica máxima entregada y el producto de la corriente eléctrica en cortocircuito y el voltaje a circuito abierto (Calle Martín, 2021). Lo que correspondería a la siguiente expresión matemática

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{sc}V_{oc}} \quad (2)$$

Teniendo presente en la expresión (2) que

$$P_{max} = I_{mp}V_{mp} \quad (3)$$

Según Torres-Pacheco *et al.*, 2018, este es un parámetro importante para evaluar el rendimiento de las celdas solares comerciales.

Otro factor útil para definir la eficiencia de un módulo de celda solar, pero en términos de porcentaje de energía, es *la eficiencia de conversión de energía*, representada con la letra griega η .

El mismo, manifiesta qué porcentaje de energía en forma de radiación incidente sobre el módulo de célula solar, ha sido convertido a energía eléctrica (Torres-Pacheco *et al.*, 2018). La expresión analítica para este factor es

$$\eta = \frac{FF \cdot I_{sc} V_{oc}}{\phi A} \times 100\% \quad (4)$$

En donde, ϕ y A , representan respectivamente, la irradiancia incidente sobre el módulo de celda solar y la superficie de la misma en unidades de m^2 .

Modelo del Diodo simple

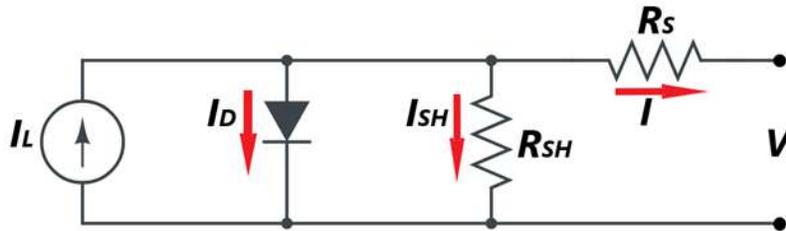
La curva ideal de I vs V , correspondiente a un módulo de celda solar, se ve alterada, principalmente, por la presencia de tres factores (Flores & Domínguez, 2016). El primero es el factor de idealidad m , el cual está asociado a un factor de corrección cuyo valor suele estar entre 1 y 2 (Ndegwa *et al.*, 2020). El segundo factor, es lo equivalente a una resistencia en serie R_S en la salida de voltaje y corriente de este dispositivo semiconductor. Dicha resistencia en serie, es un parámetro que deriva de la resistencia interna del módulo de celda solar y se debe, específicamente, a la malla de metalización, a la resistencia de los contactos y a la resistencia del propio semiconductor (Flores & Domínguez, 2016). Y como tercer factor, lo equivalente a una resistencia en paralelo R_{SH} en la salida de voltaje y corriente. Este

parámetro tiene su origen en las imperfecciones de la calidad de la unión $p-n$ y es responsable de la existencia de fugas de corriente eléctrica (Flores & Domínguez, 2016). Vale la pena mencionar, que estos dos últimos factores afectan el factor de forma de un módulo de celda solar (Torres-Pacheco *et al.*, 2018), el cual será abordado posteriormente.

En base a la información mencionada en el párrafo anterior, el modelo matemático que representa a un módulo de celda solar a través del esquema de un circuito eléctrico, se conoce con el nombre de “modelo de diodo simple” (Chan & Phang, 1987). Dicho circuito eléctrico está representado en la figura 14.

Figura 14.

Modelo del diodo simple para representar el comportamiento del voltaje y la corriente eléctrica en un módulo de celda solar.



En este modelo, el efecto fotoeléctrico es representado con una fuente de corriente (extremo izquierdo de la figura 14), la cual genera una corriente eléctrica representada por I_L . En ausencia de iluminación, la corriente eléctrica que circula a través del módulo de celda solar coincide con una corriente eléctrica I_D que circula por un diodo (mostrado en la figura 14) y esto es debido a la combinación inducida dentro del dispositivo por efecto del voltaje V y la temperatura T . Por otro lado, en presencia de iluminación, la corriente I_L es equivalente a la corriente que genera la fuente, estando la misma en paralelo con el diodo, esto representa una analogía a la unión $p-n$ del módulo de celda solar (Flores & Domínguez, 2016). La corriente de salida I es igual a la diferencia entre la corriente I_L y la corriente del diodo I_D . Sin embargo, a circuito abierto y con iluminación, toda la corriente generada pasa a través del diodo, dándole sentido a la corriente nula en la salida del módulo de celda solar. Ahora bien, en cortocircuito, el voltaje en la salida de este módulo de celda solar es nulo y toda la corriente pasa a través de las cargas externas.

Tomando en consideración todo lo mencionado anteriormente, se plantea el modelo analítico del diodo simple (Ndegwa *et al.*, 2020), el cual es

$$I = I_{PH} - I_0 \left(e^{\frac{qe(V+R_S I)}{mk_B T}} - 1 \right) - \frac{V+R_S I}{R_{SH}} \quad (5)$$

La corriente eléctrica I_{PH} está relacionada con la fotocorriente generada en el efecto fotoeléctrico (Calle Martín, 2021). El parámetro I_0 es denominado corriente inversa de saturación del diodo y depende en gran medida de la temperatura T (Flores & Domínguez, 2016). Para este modelo matemático, el factor de idealidad m se ajustó a 1, además, teniendo presente que q_e es la carga de un electrón, k_B es la constante de Boltzmann y T la temperatura del sistema en unidades de Kelvin.

Para que la expresión (5), modele la curva experimental I vs V , mostrada en la figura 11, es requerido que dicha expresión pueda representar una curva a nivel de la forma

$$f(V, I) = 0 \quad (6)$$

En donde, la misma debe pasar por estos puntos experimentales en el mejor ajuste posible. Pero para realizar dicho ajuste, es requerido calcular los parámetros: I_{PH} , I_0 , R_S y R_{SH} correspondientes a este sistema.

Como primer paso para obtener estos parámetros, se procede algebraicamente, dejando I_{PH} , I_0 y R_{SH} en función de R_S (Novoa Jerez *et al.*, 2020). Sin embargo, de manera previa, es necesario calcular las constantes C_A , C_B y C_C , cada una, correspondiente a los siguientes casos:

Caso 1: módulo de celda solar a circuito abierto

Para este caso $I = 0$ y $V = V_{OC}$, con lo que se ajusta

$$C_A = e^{\frac{q_e V_{OC}}{k_B T}} - 1 \quad (7)$$

Obteniendo la siguiente expresión

$$I_0 = \frac{I_{PH}}{C_A} - \frac{V_{OC}}{C_A R_{SH}} \quad (8)$$

Caso 2: módulo de celda solar en corto circuito

Para este caso $V = 0$ y $I = I_{SC}$, con lo que se ajusta

$$C_B = e^{\frac{q_e R_S I_{SC}}{k_B T}} - 1 \quad (9)$$

Obteniendo la siguiente expresión

$$I_{PH} = \frac{I_{SC} \left(1 + \frac{R_S}{R_{SH}}\right) C_A - \frac{V_{OC} C_B}{R_{SH}}}{(C_A - C_B)} \quad (10)$$

Caso 3: máxima potencia entregada por el módulo de celda solar

Para este caso $V = V_{MP}$ y $I = I_{MP}$, en donde

$$P_{MAX} = V_{MP} I_{MP}$$

Con lo que se ajusta

$$C_C = e^{\frac{q_e(V_{MP} + R_S I_{MP})}{k_B T}} - 1 \quad (11)$$

Obteniendo la siguiente expresión

$$R_{SH} = \frac{V_{OC}(C_C - C_B) - V_{MP}(C_A - C_B)}{I_{MP}(C_A - C_B) - I_{SC}(C_A - C_C)} - R_S \quad (12)$$

Para el tratamiento numérico, primero se ingresan los parámetros: q_e , V_{OC} , I_{SC} , k_B , T , V_{MP} y I_{MP} . Nótese que C_A puede ser calculada inmediatamente, con dichos parámetros ingresados. Posterior a esto, se manipula el valor de R_S y ya que el resto de los parámetros C_B , C_C , R_{SH} , I_{PH} y I_0 , dependen de dicho valor, se crea un algoritmo para calcular cada uno de estos parámetros, de forma dinámica y así, ajustar la curva a nivel (expresión (6)), hasta aproximarse al comportamiento experimental (curva I vs V) en su mayor medida (Novoa Jerez *et al.*, 2020). Por otro lado, dicho algoritmo debe tener el siguiente orden cronológico para el cálculo de estos parámetros, con una dependencia en “cadena”, siguiendo el orden mostrado en las expresiones desde la (13) hasta la (17)

$$C_B = C_B(R_S) \quad (13)$$

$$C_C = C_C(R_S) \quad (14)$$

$$R_{SH} = R_{SH}(C_B, C_C, R_S) \quad (15)$$

$$I_{PH} = I_{PH}(C_B, R_S, R_{SH}) \quad (16)$$

$$I_0 = I_0(R_{SH}, I_{PH}) \quad (17)$$

Por cuestiones de simplicidad, el resto de los valores, de los cuales dependen estos parámetros, se dejaron de manera implícita. Ahora bien, el software utilizado para dicho ajuste fue el software libre Geogebra versión 6.0.829.0. La figura 15 expone de forma concisa el diagrama de flujo empleado en el tratamiento numérico de los datos.

Figura 15.

Diagrama de flujo que describe de manera concisa el procedimiento para calcular los parámetros del modelo analítico del diodo simple correspondiente al módulo de celda solar en cuestión.



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el sistema esquematizado en la figura 9 se generaron los siguientes datos.

Tabla 4.

Valores de voltaje y corriente eléctrica obtenidos en el sistema esquematizado en la figura 9

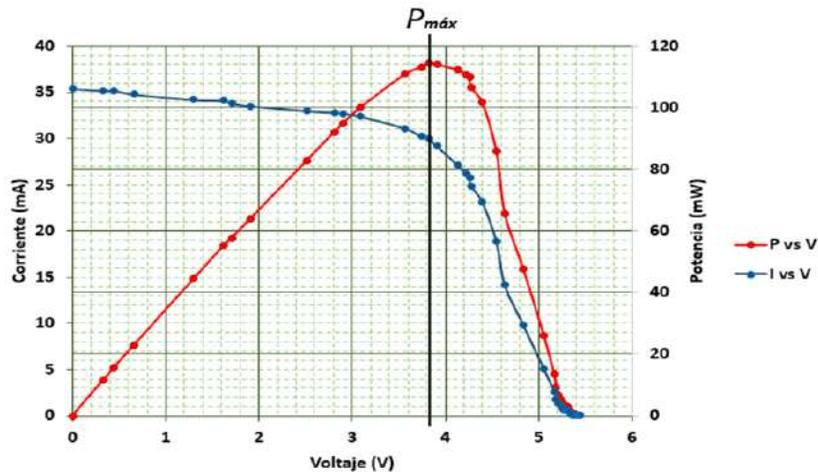
Resistencia (Ω)	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)
99000	5,44	0,06	0,33
90200	5,41	0,06	0,32
80300	5,39	0,07	0,38
70300	5,39	0,08	0,43
60300	5,38	0,09	0,48
50200	5,37	0,11	0,59
40100	5,35	0,14	0,75
30000	5,35	0,18	0,96
20100	5,34	0,27	1,44

10000	5,32	0,53	2,82
8800	5,28	0,60	3,17
7800	5,27	0,67	3,53
6920	5,26	0,76	4,00
5930	5,25	0,89	4,67
4900	5,23	1,06	5,54
3950	5,21	1,32	6,88
2960	5,19	1,75	9,08
1970	5,17	2,62	13,55
992	5,06	5,12	25,91
494	4,84	9,84	47,63
330	4,64	14,15	65,66
248	4,55	18,90	86,00
196	4,40	23,10	101,64
176	4,28	24,90	106,57
170	4,26	25,80	109,91
166	4,23	26,20	110,83
157	4,13	27,20	112,34
138	3,91	29,20	114,17
131	3,82	30,00	114,60
128	3,75	30,20	113,25
119	3,57	31,10	111,03
98	3,09	32,40	100,12
92	2,90	32,70	94,83
89	2,81	32,80	92,17
79	2,51	33,00	82,83
59	1,91	33,50	63,99
52	1,71	33,80	57,80
50	1,62	34,10	55,24
40	1,30	34,20	44,46
20	0,66	34,80	22,97
13	0,45	35,20	15,84
11	0,33	35,20	11,62
0	0,00	35,40	0,00

La figura 16 muestra la superposición de la curva característica I vs V y la gráfica de la respuesta de potencia en función del voltaje, señalizando sobre ambas, el punto en donde la potencia es máxima. Estas dos gráficas son la referencia principal para interpretar el comportamiento eléctrico de este módulo de celda solar.

Figura 16.

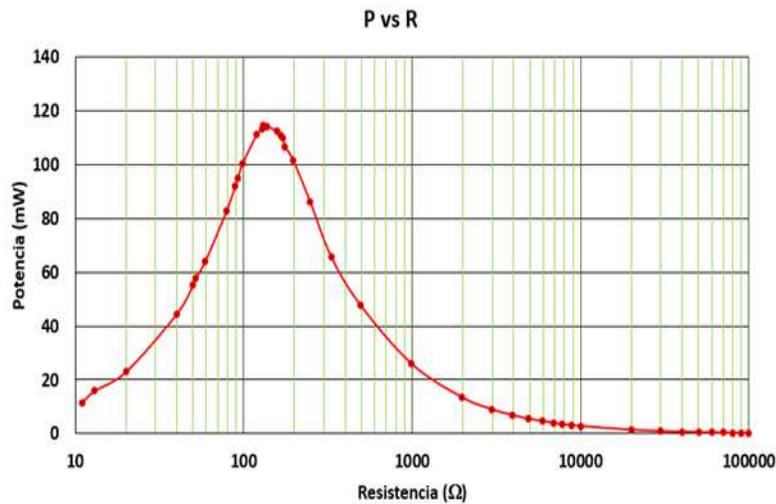
Superposición de las gráficas I vs V y P vs V , señalizando en ambas, el punto en donde la potencia es máxima. Esto para una irradiancia incidente constante de $217\text{W}/\text{m}^2$ y una temperatura de $24,3^\circ\text{C}$.



Por otro lado, la figura 17 muestra la potencia generada en función del valor de la resistencia (o la equivalente) conectada en paralelo con el módulo de celda solar.

Figura 17.

Gráfica que muestra la potencia entregada por el módulo de celda solar versus la resistencia conectada a la misma.



Nótese que la figura 17 corrobora que existe un valor particular de resistencia que provoca un máximo de potencia eléctrica generada por el módulo de celda solar, y tal como se pudo apreciar en la tabla 4, dicho valor corresponde a 131Ω , en donde este valor máximo de potencia fue de $114,60\text{mW}$. No se puede pasar por alto el hecho de que los valores de resistencia son discretos, razón por la cual, el punto más alto o el máximo de potencia generada en la figura 17, no es un punto en sí, sino más bien una región. En otras palabras, el valor de 131Ω es un valor aproximado asociado con un error, ya sea este, sistemático o propio del sistema empleado. Adicional a esto, en torno a este valor característico de resistencia, se produce una inflexión en el comportamiento, tanto del voltaje (figura 18), como de la corriente eléctrica (figura 19), lo que da sentido a la curva característica de I vs V (figura 16).

Figura 18.

Gráfica de voltaje generado por el módulo de celda solar en función de la resistencia conectada.

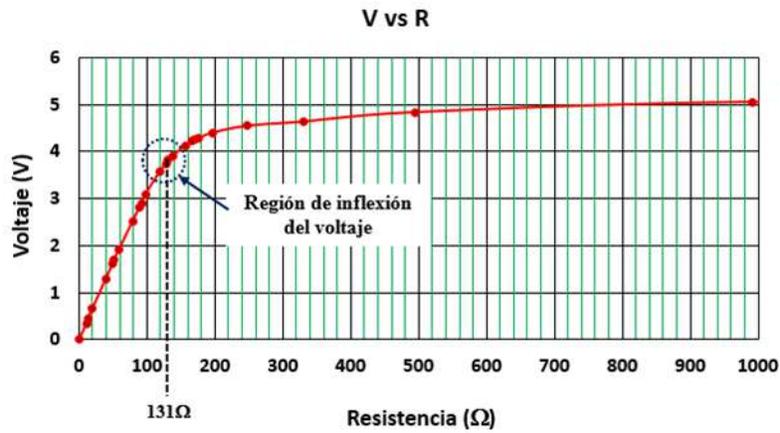
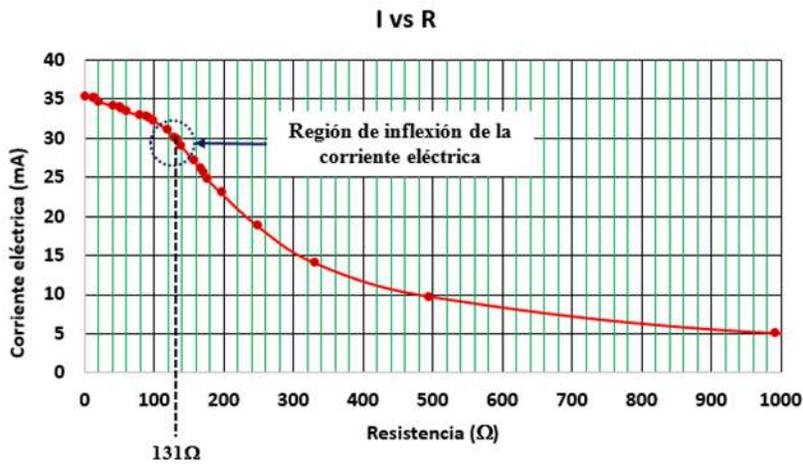


Figura 19. Gráfica de la corriente eléctrica drenada del módulo de celda solar en función de la resistencia conectada.



Cálculo del factor de forma y la eficiencia de conversión de energía, correspondientes a este módulo de celda solar policristalina.

Con toda la información disponible, se procede a calcular el factor de forma FF y la eficiencia de conversión de energía η (Torres-Pacheco *et al.*, 2018). Ahora bien, para el cálculo del factor de forma, se utiliza la expresión (2) y de la tabla 4, se aprecia que, para la potencia máxima, los valores de I_{mp} y V_{mp} fueron de 30,00mA y 3,82V, respectivamente. Para el caso de la corriente eléctrica a corto circuito I_{sc} y el voltaje a circuito abierto V_{oc} se obtuvieron los valores de 35,40mA y 5,44V, respectivamente. Por razones de estabilidad, en la toma de datos, el voltaje a circuito abierto corresponde al caso de la resistencia de mayor valor (99000 Ω). Finalmente, se plantea

$$FF = \frac{(30,00mA)(3,82V)}{(35,40mA)(5,44V)}$$

Obteniendo para el factor de forma

$$FF = 0,60$$

Si el proceso de medición se realiza bajo condiciones estándares o STC (Torres-Pacheco *et al.*, 2018), los módulos de celda solar típicas tienden a tener un factor de forma mayor a 0,70. Para tal caso, de ser inferior a dicho valor, las mismas se considerarían de muy bajas prestaciones (Calle Martín, 2021).

Para el cálculo de la eficiencia de conversión de energía, se utiliza la expresión (4). Adicional a esto, se mostró en la figura 10, que la irradiancia fue de 217 W/m². Por otro lado, en el párrafo previo a la figura 5, se mencionó que las dimensiones rectangulares de este dispositivo semiconductor son 4,90cm×4,60cm. De manera que

$$A = (4,90 \times 10^{-2}m)(4,60 \times 10^{-2}m)$$

$$A = 2,25 \times 10^{-3}m^2$$

Por consiguiente, la eficiencia de conversión de energía sería

$$\eta = \frac{(0,60)(35,40 \times 10^{-3}A)(5,44V)}{(217W/m^2)(2,25 \times 10^{-3}m^2)} \times 100\%$$

$$\eta = 23,7\%$$

Según Torres-Pacheco *et al.*, 2018, los actuales módulos de celdas solares de silicio están en un rango de eficiencia de alrededor del 24%. Pero, teniendo presente que este criterio deriva de un proceso de medición bajo condiciones estándares o STC (Torres-Pacheco *et al.*, 2018).

Por otro lado, Roy & Sarkar, 2014, desarrollaron un mecanismo simple para la caracterizaron de un módulo de celdas solar, sin las condiciones STC. Dicho mecanismo disponía de una plataforma horizontal, con 18 bombillos incandescentes de tungsteno, el mismo podía desplazarse verticalmente para ajustar la irradiancia incidente. El módulo de celdas solar en cuestión era uno de marca japonés, modelo No. GL230/M25, 22Wp y 56cm×33cm de área. Con este sistema, se obtuvieron los siguientes resultados

Tabla 5.

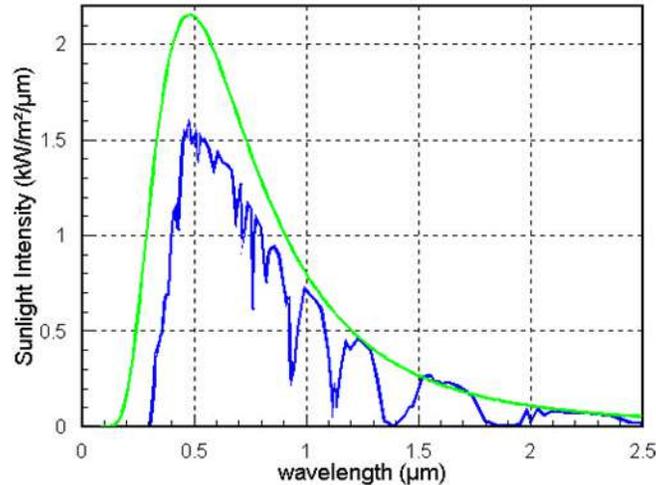
Factores de forma obtenidos para diferentes irradiancias (Roy & Sarkar, 2014).

Irradiancia (W/m ²)	V_{mp} (V)	I_{mp} (A)	$P_{m\acute{a}x}$ (W)	FF
1080	12,5	1,35	16,88	0,6736
950	13,3	1,10	14,63	0,6505
850	11,7	0,67	7,84	0,6626
100	11,6	0,55	6,38	0,6606

Pero antes de analizar los datos de la tabla 5, lo primero que se debe destacar, es que, al igual que el sistema descrito en este artículo, se utilizó como fuentes de irradiancia, bombillos incandescentes de tungsteno. El espectro de emisión de estos se mostró en la figura 6 (lado derecho), en donde se mencionó que el pico de emisión es de alrededor de 1000nm, lo que corresponde al infrarrojo cercano (NIR). Sin embargo, para un proceso de caracterización de un módulo de celdas solares, bajo condiciones STC, se utiliza la radiación solar, con un valor de irradiancia de 1000W/m² y una masa de aire de 1.5 (AM1.5), lo que corresponde a una incidencia de los rayos del Sol en un ángulo zenit de 48,19° y a cielo despejado. Pero durante el ingreso de los rayos del Sol, hasta la superficie de la Tierra (a nivel del mar), los mismos interactúan con la atmósfera, ocurriendo diferentes efectos tales como: absorción, dispersión, reflexión, etc., modificando el espectro de radiación del Sol (Honsberg & Bowden, 2019). La figura 20 muestra la comparación del espectro de radiación solar antes de ingresar a la atmósfera de la Tierra (color verde) y el espectro de radiación solar incidente sobre la superficie de la Tierra (color azul) pero con un ángulo zenit de 48,19° (AM1.5).

Figura 20.

Comparación del espectro de radiación solar, antes de ingresar a la atmósfera terrestre (color verde), con el espectro de radiación solar incidente sobre la superficie de la Tierra (color azul), el mismo, bajo condición de AM1.5 (Honsberg & Bowden, 2019).



El espectro de radiación sobre la superficie de la Tierra ya no corresponde plenamente a un cuerpo negro, debido a la ausencia de algunas longitudes de onda. No obstante, mantiene el máximo de emisión alrededor de la longitud de onda de $0,5\mu\text{m}$ (gamma entre el azul y el verde). A pesar de la diferencia entre el máximo de emisión de este espectro y el máximo de emisión del bombillo incandescente de tungsteno, el factor de forma, en la tabla 5, tiende a un valor en los cuatro casos. Dicha tendencia es

$$FF \approx 0,6$$

Los autores registraron una eficiencia del 12,45% con este sistema. Resulta evidente la similitud entre los factores de forma entre ambos estudios. No así, las eficiencias, en donde esta última es apenas la mitad de la calculada en este artículo. Esta comparación no está muy fundamentada, ya que se trata de dos módulos de celdas solares diferentes. En contraste, y con el objetivo de hacer una comparación más directa, entre una caracterización bajo condiciones STC y otra realizada sin las condiciones STC, Mengata *et al.*, 2022, caracteriza cuatro módulos de celdas solares, dos monocristalinas y dos policristalinas, bajo condiciones no STC. Pero en este caso, los autores sí disponían de los correspondientes parámetros eléctricos medidos por el fabricante, bajo condiciones STC. La tabla 6 muestra la comparación entre el factor de forma correspondiente a cada módulo de celda solar, según el fabricante (condiciones STC) y el factor de forma de las mismas, según el estudio realizado por Mengata *et al.*, 2022, sin las condiciones STC.

Tabla 6.

Comparación entre factores de forma obtenidos bajo condiciones STC y factores de forma obtenido sin las condiciones STC (Mengata et al., 2022).

<i>Módulo de celda solar</i>	<i>FF obtenido bajo condiciones STC</i>	<i>FF obtenido sin las condiciones STC (uso de un bombillo incandescente de 60W)</i>
Silicio monocristalino MD-WLT13302L, fabricado por la empresa China Zhong shan Huifo Solar Technology Co. Ltd.	0,6707	100 lx → 0,5377 500 lx → 0,5849 800 lx → 0,5271 1000 lx → 0,5703 1500 lx → 0,6144 2000 lx → 0,6221
Silicio policristalino Fabricado por Wining Star Co. Ltd., China.	0,7621	100 lx → 0,5901 500 lx → 0,6283 800 lx → 0,6256 1000 lx → 0,6314 1500 lx → 0,6621 2000 lx → 0,6872
Silicio policristalino Fabricado por M/S Khan Co. Ltd., India.	0,8381	100 lx → 0,3689 500 lx → 0,4679 800 lx → 0,4599 1000 lx → 0,3897 1500 lx → 0,4408 2000 lx → 0,4279
Silicio monocristalino Hebei Oushang Photovoltaic Technology Co. Ltd., China.	0,7047	100 lx → 0,5960 500 lx → 0,6496 800 lx → 0,6523 1000 lx → 0,6616 1500 lx → 0,6847 2000 lx → 0,6860

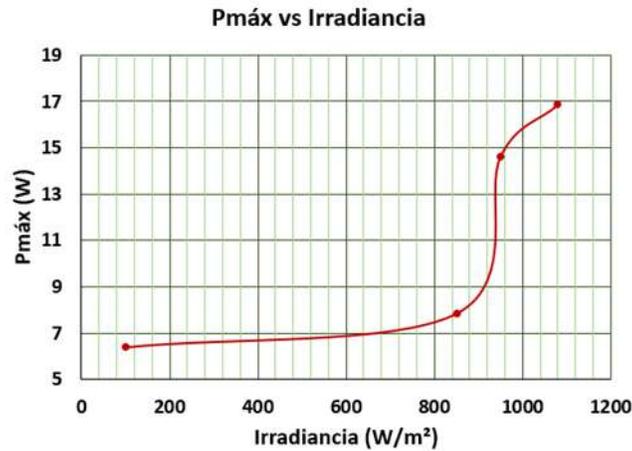
Lo primero que se puede mencionar en este estudio, es que no se midió la irradiancia en el procedimiento no estándar (STC), lo cual es una limitación para efectos de comparación con

procedimientos de caracterización de módulos de celdas solares, bajo condiciones STC. La información que brinda la cantidad física iluminancia es limitada con respecto a los detalles del espectro de radiación de una fuente, razón por la cual, se utiliza la cantidad física irradiancia para dichas caracterizaciones. Por consiguiente, este estudio (Mengata *et al.*, 2022) no puede cuantificar valores de eficiencia para ninguno de los cuatro módulos de celda solar. Otro detalle que se aprecia en la tabla 6 para todos los módulos de celda solar, es que, al aumentar la iluminancia, existe una leve tendencia de aumento del factor de forma (Mengata *et al.*, 2022), desvelando implícitamente, la dependencia del factor de forma versus el valor de irradiancia. No obstante, el valor de iluminancia registrado en este artículo para el bombillo de 200W a solo 13,0cm de distancia del módulo de celda solar, fue de 4309,84 lx. Esta información indica que los datos de iluminancia mostrados en la tabla 6, corresponden a valores bajos de irradiancia, muy por debajo de 1000W/m².

Ahora bien, haciendo una comparación de los factores de forma obtenidos sin las condiciones STC para los dos módulos de celdas solares de silicio policristalino en este estudio (tabla 6), se aprecia que el módulo de celda solar fabricado por Wining Star Co. Ltd. (China) tiene una menor dispersión de los valores calculados de FF , que los valores de FF calculados para el módulo de celda solar fabricado por M/S Khan Co. Ltd. (India). Dichas dispersiones se toman con respecto a los valores calculados de FF , bajo condiciones STC, respectivamente. Estos argumentos sugieren que el factor de forma para el módulo de celda solar de silicio policristalino, marca *RadioShack*, modelo 277-1205, debe ser mayor que el registrado en este artículo. Adicional a esto, las expresiones (2) y (4), muestran que la eficiencia de conversión de energía depende principalmente del cociente entre la potencia máxima generada por el módulo de celda solar y la irradiancia incidente. La tabla 5 corrobora, tal y como es de esperarse, que esta potencia máxima aumenta con la irradiancia incidente. Pero la independencia de dicha eficiencia, de la irradiancia incidente, solo sería posible, si la relación entre la potencia máxima y la irradiancia fuera lineal. La figura 21 muestra que dicha relación no es lineal.

Figura 21.

Gráfica de la potencia máxima generada por el módulo de celda solar vs la irradiancia incidente (Roy & Sarkar, 2014).



Este hecho manifiesta que el cálculo de la eficiencia de conversión de energía, depende de la magnitud de la irradiancia incidente, por lo que el valor de 23,7% registrado en este artículo, puede variar bajo condiciones STC.

Parámetros obtenidos en el modelo del diodo simple, correspondiente a este módulo de celda solar policristalina.

La tabla 7 muestra los parámetros ajustados correspondientes al modelo del diodo simple y planteados en la expresión (5), para este módulo de celda solar policristalina. Esto, gracias al ajuste numérico descrito en la sección anterior.

Tabla 7.

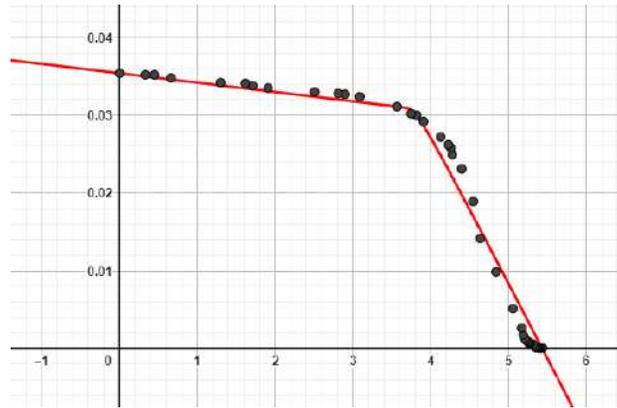
Parámetros ajustados para el modelo del diodo simple en cuestión.

Parámetro	Valor ajustado (3 cifras significativas)
R_S	50,9Ω
R_{SH}	781Ω
I_{PH}	0,0377A
I_0	$1,92 \times 10^{-94}$ A

Finalmente, la figura 22 muestra la comparación entre el modelo del diodo simple ajustado y los datos experimentales (Vera-Dávila *et al.*, 2018).

Figura 22.

Gráfica del modelo del diodo simple (curva roja) y curva experimental I vs V (puntos negros) correspondientes al módulo de celda solar en cuestión, utilizando el software Geogebra versión 6.0.829.0.



CONCLUSIONES

Para la caracterización de un módulo de celda solar, no solo basta conocer parámetros, tales como, sus dimensiones, su estructura química, la radiación incidente, la temperatura de equilibrio en el sistema de toma de datos, etc., sino, además conocer el comportamiento de la corriente eléctrica y el voltaje generado en su salida, al colocarle una resistencia en paralelo. Recalcando que, para dicha caracterización, es necesario variar la resistencia mencionada, con lo que finalmente, se puede construir la curva característica I vs V , la cual es crucial para determinar el factor de forma y la eficiencia de conversión de energía. Adicional a esto, el modelo del diodo simple desvela características estructurales muy importantes de un módulo de celda solar, pero de manera indirecta, ya que este modelo es solo un modelo matemático diseñado a través de un circuito eléctrico en el cual se hacen analogías con la estructura de este tipo de semiconductores pero que tienen su correspondencia con parámetros que sí se pueden medir directamente.

Un detalle en este estudio, que puede resultar muy ventajoso, es que la respuesta espectral de este módulo de celda solar de silicio policristalino posee su máximo de longitud de onda en el infrarrojo cercano y que similarmente, la distribución de longitud de onda, como cuerpo negro, de la fuente de radiación (bombillo incandescente de tungsteno) posee su máximo de longitud de onda, también, en el infrarrojo cercano. De manera, que la mayor incidencia de fotones con cierta longitud de onda concuerda con una mejor respuesta de dicho módulo de celda solar.

Con respecto a la información cuantitativa obtenida, se puede mencionar, que el módulo de celda solar en cuestión ofrece una corriente máxima o corriente a corto circuito de 35,40mA,

además, de un voltaje máximo o voltaje a circuito abierto de 5,44V y una potencia máxima entregada de 114,60mW para una irradiancia de 217W/m². Cabe mencionar, que al ser este valor de irradiancia muy bajo comparado con el utilizado en las condiciones STC, ocurren dos situaciones. La primera, es que el factor de forma, el cual fue de 0,60, al ser comparado con valores de *FF* obtenidos en otros sistemas en que también se utilizaron bombillos incandescentes de tungsteno, se aprecian valores similares de *FF*, pero inferiores a los obtenidos bajo condiciones STC. Segundo, la eficiencia de conversión de energía para este dispositivo semiconductor se calculó en 23,7%, pero al observar en estudios previos, en los que utilizaron bombillos incandescentes de tungsteno, que no hay una relación lineal entre la potencia máxima generada y la irradiancia incidente, ocurrirá, que dicho valor de eficiencia obtenida podría variar bajo condiciones STC.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre, A., Hernández, D., Ordoñez, L., Martínez, L. (2022). *Comparación de eficiencias de conversión de energía en celdas fotovoltaicas de silicio monocristalino, policristalino y amorfo para mediciones meteorológicas de la ciudad Santiago de Cali* (Informe No. 5). Instituto Nacional de Metrología / Universidad Santiago de Cali. <https://inm.gov.co/wp-content/uploads/2022/06/Trabajo-No.5.pdf>
- Arencibia-Carballo, G. (2016). *La importancia del uso de paneles solares en la generación de energía eléctrica*. *Revista Electrónica de Veterinaria*, Vol. 17, No. 9, pp. 1-4. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=63647456002>
- Barzola, J., Rubin, L. (2013). *Eficiencia de una celda solar común y su comparación con celdas de tecnología HIT*. *Revista Tecnológica ESPOL – RTE*, Vol. 26, No. 2, pp. 1-15. https://www.researchgate.net/publication/267211218_Eficiencia_de_una_celda_solar_comun_y_su_comparacion_con_celdas_de_tecnologia_HIT
- Cabezas-Maslanczuk, M. D., Franco-Brazês, J. I., & Fasoli-Tolosa, H. J., (2018). *Diseño y evaluación de un panel solar fotovoltaico y térmico para poblaciones dispersas en regiones de gran amplitud térmica*. *Revista Ingeniería Investigación y Tecnología*, Volumen 19, No. 2, pp. 209-221. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2018.19n2.018>
- Calle Martín, R. D. L. (2021). *Caracterización de curvas I-V en paneles fotovoltaicos bifaciales* (Tesis de Grado en Ingeniería Eléctrica). Universidad de Valladolid. <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/47961/TFG-I-1926.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Chan, D. S. H. & Phang, J. C. H. (1987). *Analytical methods for the extraction of solar-cell single- and double-diode model parameters from I-V characteristics*. In IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 34, No. 2, pp. 286-293.
<https://doi.org/10.1109/T-ED.1987.22920>
- Flores Rivera, N. R. & Domínguez Ramírez, M. A. (2016). *Medición de la eficiencia energética de los paneles solares de silicio* (Tesis de Maestría). Centro de investigación en materiales avanzados, S. C. Posgrado.
<https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1004/215>
- García, J. A. (2011). *Respuesta Espectral en Celdas Solares Multi-Juntura de Estructura Monolítica Basadas en Semiconductores III-V*. 10.13140/RG.2.2.13127.50089. (Tesis de Licenciatura en Ciencias Físicas). Universidad de Buenos Aires.
https://www.researchgate.net/publication/317168359_Respuesta_Espectral_en_Celdas_Solares_Multi-Juntura_de_Estructura_Monolitica_Basadas_en_Semiconductores_III-V
- Honsberg, C. B. & Bowden, S. G. (2019). *Photovoltaics Education Website*.
www.pveducation.org
- Mengata, G. M., Perabi, S. N., Ndi, F. E. & Wiysahnyuy, Y. S. (2022). *Characterization of solar photovoltaic modules powered by artificial light for use as a source for smart sensors*. Energy Reports, Volume 8, Pages 12105-12116.
<https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.09.056>
- Ndegwa, R., Simiyu, J., Ayieta, E. & Odero, N. (2020). *A Fast and Accurate Analytical Method for Parameter Determination of a Photovoltaic System Based on Manufacturer's Data*. Journal of Renewable Energy, Volume 2020, 7580279, p. 18.
<https://doi.org/10.1155/2020/7580279>
- Novoa Jerez, J. E., Alfaro, M., Alfaro, I. & Guerra, R. (2020). *Determinación de la eficiencia de un mini panel solar fotovoltaico: Una experiencia de laboratorio en energías renovables*. Educación Química. Volumen 31(2), pp. 22-37.
<https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2020.2.70300>
- Othman, A. M., El-arini, M. M. M., Ghitas, A., & Fathy, A. (2012). *Realworld maximum power point tracking simulation of PV system based on Fuzzy Logic control*. NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics, 1(2), 186–194.
<https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2012.12.016>

- Rajendra, N. (2020) Study on Emitted Radiations from Filament Bulb of Different Power. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 8, 1615-1645.
<https://doi.org/10.4236/jamp.2020.88124>
- Rodríguez, A. G., (2024). *Paneles solares, un beneficio económico y ambiental*. *Revista Materiales Avanzados, Volumen 53*, No. 40, pp. 53-56.
<https://doi.org/10.22201/iim.rma.2024.40.31>
- Rojas Hernández, R. E., (2011). *Caracterización espectral de células solares comerciales* (Tesis de Maestría en Física y Tecnología de los láseres). Universidad de Salamanca.
<https://lbt.usal.es/wp-content/uploads/2015/12/TFM.pdf>
- Roy, S. & Sarkar, P. (2014). *Study the Characteristics of PV Module Using a Sun Simulator*. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. Vol. 3 Issue 4.
https://www.researchgate.net/publication/327633501_Study_the_Characteristics_of_PV_Module_Using_a_Sun_Simulator
- Salazar-Peralta, A., Pichardo-S. J. A., & Pichardo-S, U. (2016). *La energía solar, una alternativa para la generación de energía renovable*. *Revista de Investigación y Desarrollo, Vol. 2*, No. 5, pp. 11-20.
https://www.ecorfan.org/spain/researchjournals/Investigacion_y_Desarrollo/vol2num5/Revista_de_Investigaci%C3%B3n_y_Desarrollo_V2_N5_2.pdf
- Sebitosi, A. B. & Pillay, P. (2007). *New Technologies for Rural Lighting in Developing Countries: White LEDs*. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. Vol. 22, No. 3, pp. 674-679.
<https://core.ac.uk/download/pdf/211511316.pdf>
- Torres-Pacheco, S., Jurado-Pérez, F., Granados-Lieberman, D. & Lozano-Luna, A. (2018). *Eficiencia en paneles solares*. *Revista del Diseño Innovativo, Volumen 2*, No. 2, pp. 9-21.
https://www.ecorfan.org/taiwan/research_journals/Diseno_Innovativo/vol2num2/Revista_Diseno_Innovativo_V2_N2.pdf
- Vera-Dávila, A. G., Delgado- Ariza, J. C., & Sepúlveda-Mora, S. B. (2018). *Validación del modelo matemático de un panel solar empleando la herramienta Simulink de Matlab*. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación (RIDI)*, Vol. 8, No. 2, pp. 343-356.
<https://doi:10.19053/20278306.v8.n2.2018.7972>



Caracterización Físicoquímica y Biológica de los principales ríos adyacentes al golfo de Montijo, Veraguas, Panamá

Physical-Chemical and Biological characterization of the main rivers adjacent to the gulf of Montijo, Veraguas, Panama

Viterbo Rodríguez

Universidad de Panamá, Centro Regional Universitario de Veraguas, Panamá.

viterbo.rodriguez@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0003-1592-4479>

Jonathan Rodríguez-Morales

Universidad de Panamá, Centro Regional Universitario de Veraguas, Panamá

jonoelodrig@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0001-6498-127X>

Diego Bonilla-Franco

Universidad de Panamá, Centro Regional Universitario de Veraguas, Panamá

diegobonilla3014@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0005-5690-410X>

Fecha de recepción: 21 de junio de 2025

Fecha de aceptación: 30 de octubre de 2025

DOI: <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v28n1.a8953>

RESUMEN

Con la finalidad de realizar la caracterización físicoquímica, biológica y el diagnóstico de la calidad del agua de los ríos Torio, Mariato, Tebario, Suay, Ponuga, San Pedro, San Pablo y Caté, se valoraron las características físicoquímicas del agua, tales como: temperatura, oxígeno disuelto, conductibilidad eléctrica, turbidez, sólidos totales, salinidad, pH, color, sulfato, sílice, sulfuro, fosfatos, cloro total, nitratos y amonios desde el mes de enero a diciembre de 2024. También, se recolectaron insectos acuáticos de enero a mayo de 2024, con una recolecta mensual, para un total de 5 giras. En el diagnóstico de la calidad ambiental se utilizó el índice de calidad ambiental (ICA) y para el diagnóstico de la calidad biológica el índice BMWP adaptado para Veraguas. En la caracterización físicoquímica de los ríos, los agrupamientos hechos con el ACP fueron confirmados mediante el análisis clúster que permitió diferenciar dos conglomerados al evaluar los ríos muestreados. La caracterización biológica usando la similitud en la estructura de géneros de las comunidades de insectos acuáticos con el coeficiente de similitud de Jaccard se forman dos grupos. El grupo 1, formado por el río Suay, el grupo 2, formado por los ríos San Pablo, Tebario, Mariato, San Pedro, Caté, Ponuga y Torio. Los ríos Torio,

Suay y San Pablo fueron diagnosticados con una calidad biológica de agua dudosa con el índice BMWP/Veraguas, mientras que, los ríos Mariato, Tebario, Ponuga, Cate y San Pedro con los porcentajes más altos de colectores-filtradores y colectores-recolectores y los porcentajes más bajos de depredadores se diagnosticaron como ríos de calidad biológica aceptable.

PALABRAS CLAVE

Aguas superficiales, Análisis de componentes principales (PCA), caracterización biológica, caracterización fisicoquímica, Golfo de Montijo, Panamá.

ABSTRACT

To perform the physicochemical and biological characterization and diagnose the water quality of the Torio, Mariato, Tebario, Suay, Ponuga, San Pedro, San Pablo, and Caté rivers, the physicochemical characteristics of the water were assessed from January to December 2024. These characteristics included: temperature, dissolved oxygen, electrical conductivity, turbidity, total solids, salinity, pH, color, sulfate, silica, sulfide, phosphates, total chlorine, nitrates, and ammonium. Additionally, aquatic insects were collected monthly from January to May 2024, for a total of 5 trips. For the environmental quality diagnosis, the Environmental Quality Index (EQI) was used, and for the biological quality diagnosis, the BMWP index adapted for Veraguas was applied. In the rivers' physicochemical characterization, the groupings made with PCA (Principal Component Analysis) were confirmed by a cluster analysis, which differentiated two conglomerates when evaluating the sampled rivers. The biological characterization, using the similarity in the genus structure of the aquatic insect communities with the Jaccard similarity coefficient, formed two groups. Group 1 was composed of the Suay River, and Group 2 was composed of the San Pablo, Tebario, Mariato, San Pedro, Caté, Ponuga, and Torio rivers. The Torio, Suay, and San Pablo rivers were diagnosed with doubtful biological water quality using the BMWP/Veraguas index, while the Mariato, Tebario, Ponuga, Cate, and San Pedro rivers, with the highest percentages of collector-filterers and collector-gatherers and the lowest percentages of predators, were diagnosed as rivers of acceptable biological quality

KEYWORDS

Biological characterization, Gulf of Montijo, Panama, physicochemical characterization, principal component Analysis (PCA), Surface waters

INTRODUCCIÓN

La creciente contaminación de los ríos y sus ecosistemas asociados, producto del desarrollo e industrialización de los sectores de producción primaria y otras actividades humanas, ha incrementado el interés por conocer el estado del agua y la diversidad de las comunidades de insectos acuáticos presentes en ellos, así como, su variabilidad, evolución y comportamiento a lo largo del tiempo (Ríos et al., 2015, Gualdrón-Durán, 2016). En este contexto, la calidad del agua es fundamental, ya que refleja la capacidad de los ecosistemas acuáticos para mantener su biota estable y saludable (Cumbreira y Rodríguez, 2018; Rodríguez et al., 2022); la valoración de este indicador puede realizarse a través del análisis de la estructura y

composición de las comunidades biológicas, empleando tanto técnicas fisicoquímicas como biológicas (Sermeño et al., 2010).

Los métodos convencionales para la evaluación de la calidad del agua, fundamentados en pruebas fisicoquímicas y microbiológicas, han sido complementados en las últimas décadas con la utilización de organismos bioindicadores, especialmente los insectos acuáticos (Chará-Serna et al., 2010; Gualdrón-Durán, 2016; Santamaría y Bernal-Vega, 2016; Valdés y Castillo, 2023). A diferencia de los métodos fisicoquímicos, los bioindicadores nos facilitan la detección de alteraciones y perturbaciones ecológicas a través de la presencia o ausencia, abundancia y distribución de organismos particulares, los cuales son susceptibles a cambios en la calidad del agua (Bernal y Castillo, 2012; Guinard et al., 2013; Ríos et al., 2015; Santamaría y Bernal-Vega, 2016). Sin embargo, ya que, los bioindicadores no logran identificar patógenos peligrosos para la salud humana (Arroyo y Encalada, 2009), es recomendable fusionar ambos métodos para una mejor evaluación.

Los macroinvertebrados acuáticos, especialmente los insectos, han sido ampliamente utilizados como bioindicadores a nivel global, debido a su sensibilidad a las alteraciones ambientales producto de la contaminación (Rodríguez et al., 2022). Estos organismos viven en condiciones ambientales específicas y a menudo predecibles (Sánchez-Argüello et al., 2010), por lo cual cualquier modificación en su ambiente tendrá efectos directos sobre su supervivencia, abundancia y distribución, esto nos proporciona cuantiosa información sobre el nivel de polución en los cuerpos de agua (Fenoglio et al., 2002; Rodríguez-Barrios et al., 2011; Santamaría y Bernal-Vega, 2016). Adicionalmente, algunos macroinvertebrados poseen la capacidad de reflejar no solo las condiciones presentes del agua, sino también su evolución a lo largo de determinado tiempo (Guinard et al., 2013). En este escenario, los índices bióticos con macroinvertebrados bentónicos resultan efectivos para valorar la condición ecológica de los ecosistemas acuáticos en relación a procesos de contaminación (Mendoza, 2003, Rodríguez y Cárdenas, 2017).

La comprensión de la estructura y la condición de las comunidades bentónicas constituye un aspecto fundamental para evaluar la calidad del agua. En este contexto, es esencial analizar el papel ecológico de los insectos acuáticos, incluyendo su comportamiento y estrategias alimenticias, es decir, los métodos utilizados para la obtención de alimento y las características de este (Arroyo y Encalada, 2009). Desde esta perspectiva, los macroinvertebrados pueden clasificarse en Grupos Funcionales Alimentarios (GFA), que incluyen colectores, colectores-filtradores, colectores-recolectores, depredadores, raspadores y fragmentadores (Merritt y Cummins, 2008). Otra clasificación relevante se basa en el tipo de alimento consumido, lo que permite agruparlos en gremios o grupos tróficos, como detritívoros, herbívoros y depredadores (Cumbrera y Rodríguez, 2018; Guzmán-Soto y Tamarís-Turizo, 2014).

Pese a que los índices bióticos se han aplicado con éxito en sistemas de regiones templadas de Norteamérica, su adaptación a ecosistemas neotropicales sigue siendo un desafío puesto que existen diferencias en la historia de vida de las comunidades de macroinvertebrados (Rodríguez-Barrios et al., 2011). En regiones como Costa Rica, Colombia y Panamá, se han desarrollado adaptaciones del índice Biological Monitoring Working Party (BMWP) para reflejar mejor las características propias de los ecosistemas tropicales (Rodríguez et al., 2022). Sin embargo, la gran diversidad biológica de los ríos tropicales, junto con la falta de guías taxonómicas específicas para la región, dificulta la clasificación precisa de las especies y el análisis de sus roles ecológicos (Rodríguez y Cárdenas, 2017; Rodríguez-Barrios et al., 2011).

En Panamá, el estudio de la entomofauna acuática ha avanzado desde las primeras clasificaciones que buscaban describir los taxones existentes en diferentes ríos a nivel de familia y género (Rodríguez y León, 2003; Rodríguez y Mendoza, 2003; Rodríguez y Sánchez, 2001) hacia el análisis de las comunidades de macroinvertebrados y su aplicación como bioindicadores de la calidad biológica del agua (Sánchez-Argüello et al., 2010, Rodríguez et al., 2022). Diversos estudios han abordado la evaluación de la calidad del agua en distintas cuencas, lo que ha permitido identificar los niveles de contaminación y las fuentes probables del problema. En particular, la provincia de Veraguas ha sido objeto de investigaciones sobre la calidad biológica de los ríos (Cumbreira y Rodríguez, 2018; Rodríguez et al., 2009, 2014, 2022; Rodríguez et al., 2015, 2017), aunque aún es necesario profundizar en el análisis de otras cuencas para comprender mejor las variaciones y posibles problemas ambientales (Valdés-Sánchez y Castillo-Adams, 2023).

Las cuencas que drenan hacia el Golfo de Montijo tienen una importancia ecológica y social significativa, al sustentar una rica biodiversidad pesquera y ser el sustento de numerosas comunidades humanas. Como zona de amortiguamiento del Parque Nacional Isla Coiba, el Golfo de Montijo desempeña un papel esencial en la conectividad ecológica, actuando como un área clave para la transición entre los ecosistemas costeros y marinos. Su amplia red de manglares, estuarios y humedales proporciona refugio, alimentación y áreas de reproducción para múltiples especies de importancia ecológica y económica. Además, es un espacio privilegiado donde pueden estudiarse dinámicas ecológicas complejas, interacciones tróficas y procesos biogeoquímicos esenciales para la conservación de la biodiversidad. Por ello, el análisis de la entomofauna acuática en sus ríos y la evaluación de la calidad biológica del agua son fundamentales para comprender las alteraciones que puedan afectar estos ecosistemas estratégicos, cuya integridad es vital para la resiliencia de las especies y los servicios ecosistémicos de la región.

METODOLOGÍA

Área de estudio

Las características de los sitios de muestreo y sus coordenadas se describen en la (Tabla 1). Los ríos Torio, Mariato, Tebario y Suay, pertenecen a la cuenca denominada, cuenca hidrográfica entre los ríos San Pedro y el Tonosí, (cuenca 122), la cual drena un área de 2.467 Km² en la que se encuentra el río principal: el río Quebro, que vierte sus aguas hacia la vertiente del Pacífico, golfo de Montijo. Los ríos Ponuga y San Pedro pertenecen a la cuenca hidrográfica del río San Pedro, (cuenca 120), la cual drena un área de 976.41 km², en la cual el río principal es el río San Pedro que vierte sus aguas hacia el pacífico en el golfo de Montijo. El río San Pablo perteneciente a la cuenca de su mismo nombre (cuenca 118), con un área de 2,504.85 km², este río es el principal de dicha cuenca y drena sus aguas al golfo de Montijo. El río Caté se ubica en la cuenca denominada entre los ríos Tarazará y San Pablo (cuenca 116) donde el río principal es el río Caté, esta cuenca tiene un área de 900.18 km² y drena hacia el golfo de Montijo (Figura 1). Cada estación de muestreo tubo una longitud de 50 m y fueron seleccionadas tomando en cuenta la mayor diversidad de hábitats posibles como lo sugiere la metodología propuesta por (Sermeño et al., 2010).

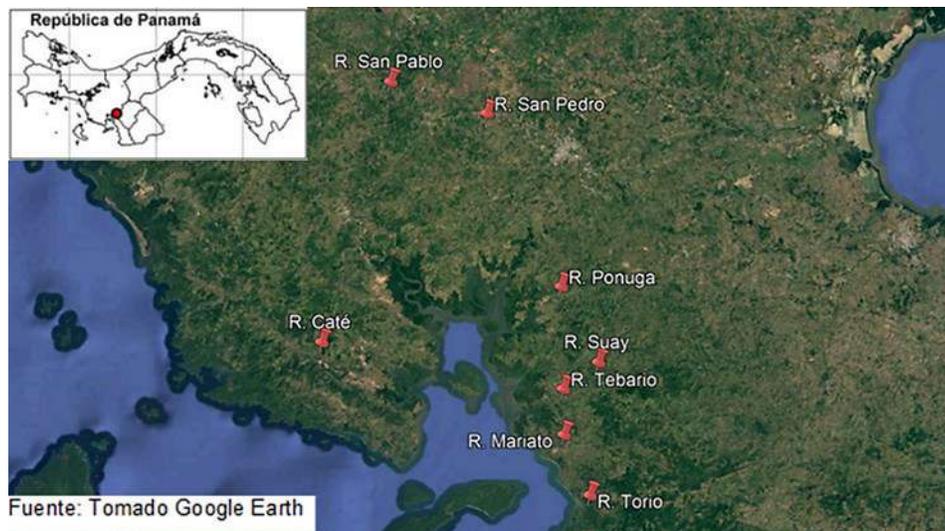
De acuerdo con los datos meteorológicos de temperaturas y precipitaciones, de las estaciones próximas a los sitios de muestreo, el área de estudio registra 2.882 mm anuales (estación Ponuga, 40 m.s.n.m.) y promedia 27,1 °C de temperatura anual (estación Montijo, 50 m.s.n.m.) (IMHPA 2024). Por tanto, según la clasificación climática de Köppen- Geiger (Peel et al., 2007) el área presenta un clima tropical de sabana de invierno seco (*Aw*). Para la caracterización del área de estudio, evaluando el efecto anual de la aridez, (ocasionada por el periodo seco estacional de enero a marzo), se aplicó el índice de aridez de Martonne ($I_m=77,6$), por lo que el área se encuentra en una región climática per-húmeda, donde el índice presenta valores >60 (Rivera 2022). Finalmente, con base a los citados valores de temperatura, precipitación y altitud citados, el área se encuentra dentro de la zona de vida de bosque húmedo tropical, según Holdridge (1996).

Tabla 1.
Características y coordenadas de los sitios de muestreos.

Ríos muestreados	Características del sitio	Coordenadas (UTM)	Altitud (m.s.n.m)
Torio	Presenta corriente rápida, sustratos arenosos, rocosos y de hojarasca, boque de galería abundante.	17 N 507237 834075	12
Mariato	Corrientes rápidas, sustratos rocosos, lodosos y de hojarasca, una sección con mucha vegetación y otra con escasa, se extraen materiales del lecho del río.	17 N 502693 844606	17
Tebario	Corrientes rápidas, con sustratos arenosos y rocosos en su mayoría, también presenta hojarasca en menor proporción, bosque de galería escaso. Sitio de extracción de agua para actividades agrícolas.	17 N 502568 852552	20
Suay	Sitio de balneario, corrientes lentas, sustratos arenosos, lodosos y de hojarasca. Escasos árboles y vegetación de herbazales (potreros) en su mayoría.	17 N 502909 855312	14
Ponuga	Presenta corrientes medias, con sustratos fango-arenosos, pocas rocas y hojarasca. Bosque de galería escaso y vegetación de herbazales a las riberas del río.	17 N 502186 870327	18
San Pedro	Corrientes rápidas, sustratos rocosos, lodosos y de hojarasca. Bosque de galería a los márgenes del río, área de ganadería.	17 N 489240 900432	53
San Pablo	Corrientes rápidas, con sustratos arenosos y rocosos en su mayoría, también presenta hojarasca en menor proporción, bosque de galería escaso. Sitio de balneario con varias viviendas en las bordes del río.	17 N 472437 905945	55
Río Caté	Corrientes rápidas, sustratos arenofangosos, hojarasca abundante, pocas rocas. Sitio de unión con el río San Rafael. Bosques de galería abundantes.	17 N 460397 860676	42

Figura 1.

Ubicación de las estaciones muestreo en los ríos Torio, Mariato, Tebario, Suay, Ponuga, San Pedro, San Pablo y Caté.



Toma de parámetros fisicoquímicos

El periodo de muestreo para las variables abióticas fue de 12 meses de enero a diciembre de 2024. Se valoraron “*in situ*” las siguientes características fisicoquímicas del agua: temperatura, oxígeno disuelto (OD), conductibilidad eléctrica (cond), turbidez, sólidos totales (TDS), salinidad y pH, con la ayuda de un medidor portátil multiparamétrico YSI ProQuatro. Las siguientes características fisicoquímicas del agua y el análisis de nutrientes se determinaron en el laboratorio húmedo del CCIMBIO-CRUV-UP: color, sulfato (mg/L SO_4^{2-}), sílice HR (mg/L SiO_2), sulfuro (mg/L S^{2-}), fósforo (mg/L PO_4^{3-}), fósforo (mg/L P_4), cloro total (mg/L Cl_2), nitrato (mg/L N^-), nitrato (mg/L NO_3^-), amonio (mg/L N) y amonio (mg/L NH_4^+), con la ayuda de un Fotómetro YSI 9500. El procedimiento de toma de muestras y su traslado al laboratorio se hicieron siguiendo el protocolo, para tomas de muestras de calidad de agua, estipulado en el reglamento técnico del Decreto Ejecutivo No. 75. Del 4 de junio de 2008. (Gaceta oficial de Panamá 2008).

Evaluación de la calidad del agua usando en índice de calidad ambiental (ICA).

El índice de calidad de ambiental (ICA), se calculó en base a siete parámetros: oxígeno disuelto (%), ortofosfatos (P- PO_4), nitratos (N- NO_3), potencial de hidrógeno (pH), temperatura, turbiedad y sólidos totales; (Shah y Joshi, (2015), cada variable tiene una ponderación o peso de importancia (Tabla 2). La ponderación se puede ajustar a medida que las inquietudes sobre la calidad ambiental cambien a lo largo del año (ACP, 2022). Para la

determinación de este índice se utilizó la metodología propuesta por (Peñafiel-Romero, (2014); Carrillo-Alvarado y Urgilés-Calles, (2016) y ACP, (2022). (Tabla 2).

Tabla 2.

Pesos relativos de los parámetros de acuerdo a su importancia.

PARÁMETRO	PESO RELATIVO (W_i)	IMPORTANCIA
Oxígeno disuelto	0,23	Condiciones críticas para la vida acuática
pH	0,16	Condiciones para la vida acuática y agua potable
Fosfatos	0,13	Determinar niveles de eutrofización
Nitratos	0,13	Determinar niveles de eutrofización y riesgos de consumo
Temperatura	0,13	Crítico para la vida acuática y consumo humano
Sólidos disueltos totales	0,11	Limitantes para agua de consumo humano
Turbiedad	0,11	Limitantes para agua de consumo humano

Fórmula para el cálculo el índice ICA

$$ICA = \sum_{i=1}^7 q_i * W_i$$

Donde ICA: índice de calidad ambiental

i: Cada uno de los siete parámetros elegidos

W_i : es el peso unitario de cada parámetro (Tabla 2)

q_i : es la calificación de subíndice de 0 a 100 para cada variable (Tabla 2).

Evaluación de la calidad biológica del agua.

Índice Biological Monitoring Working Party (BMWP)

Se aplicó el índice biótico BMWP adaptado para la provincia de Veracruz (BMWP-Veraguas), empleando la tabla de puntuaciones del índice BMWP-Veraguas establecida por Rodríguez et al., (2009). Los valores de este índice se obtienen al sumar las puntuaciones que le corresponden a cada familia recolectada en cada estación de muestreo (Alba-Tercedor y Sánchez-Ortega, 1988, Rodríguez et al., 2022), entre más alto sea el valor numérico menor es la tolerancia de los insectos a la contaminación. Luego de obtener el cálculo de índice BMWP/Veraguas, se diagnostica la calidad biológica del agua en cinco categorías usando la tabla 3.

Tabla 3.

Significados de los valores BMWP y colores a utilizar para representación cartográfica.

Clase	Calidad	Valor	Significado	Color
I	Buena	>101	Agua limpia, no contaminada	AZUL
II	Aceptable	61 - 100	No alterada de modo sensible	VERDE
III	Dudosa	36 - 60	Evidentes efectos de contaminación	AMARILLO
IV	Crítica	16 - 35	Aguas muy contaminadas	NARANJA
V	Muy crítica	< 15	Aguas fuertemente contaminadas	ROJO

Trabajo en campo y recolección de los insectos acuáticos asociada a los ríos Torio, Mariato, Tebario, Suay, Ponuga, Caté, San Pablo y San Pedro.

Los muestreos se realizaron de enero a mayo de 2024, con una recolecta mensual, para un total de 5 giras. Para la captura de los insectos se utilizaron redes tipo D-Net de apertura de malla de 500 μm , haciendo barridos a lo largo de las orillas y zonas de poca profundidad para capturar los insectos que se encontraban en los diferentes sustratos (piedras, hojarascas, troncos, fango, etc.).

El contenido atrapado en la red era revisado “*in situ*” con la ayuda de pinzas entomológicas que facilitaban la extracción de los macroinvertebrados. Estas pinzas también fueron utilizadas directamente sobre los sustratos cuando se dificultaba el uso de la red. Para conservar los especímenes capturados se colocaron en envases plásticos debidamente rotulados a los que se les colocó alcohol etílico al 70% con una o dos gotas de glicerina para mantener la flexibilidad de las diferentes estructuras de los organismos (Roldán-Peréz, 1988). El tiempo de muestreo en cada río fue de 30 minutos y se realizó con la ayuda de 2 personas.

La identificación de los insectos colectados se realizó con la ayuda de un estereoscopio marca OLYMOUS, Modelo SZX7 y se llevó hasta el menor nivel taxonómico posible (género y en algunos casos al nivel de familia), empleando las claves propuestas por Roldán-Peréz (1988,1999); Flowers y De La Rosa (2010); Ramírez (2010); Gutiérrez-Fonseca (2010); Springer (2010). Todas las muestras se identificaron y depositaron en el laboratorio del Centro de Capacitación, Investigación y Monitoreo de la Biodiversidad en Coiba (CCIMBIO), Centro Regional Universitario de Veraguas, Universidad de Panamá.

Asignación de grupos funcionales alimentarios (GFA)

A los géneros de insectos recolectados se les asignó su grupo funcional alimentario según lo establecido en la literatura especializada para taxones del neotrópico: Bello y Cabrea (2001); Tomanova et al. (2006); Baptista et al. (2006); Fenoglio et al. (2008), Domínguez y Fernández (2009); Reynaga (2009); Chará-Serna et al. (2010); Rodríguez-Barrios et al. (2011); Chará-Serna et al. (2012); Guzmán-Soto y Tamarís-Turizo (2014); Rodríguez et al. (2014) y Rodríguez et al. (2015). A los especímenes que carecían de información para la zona neotropical, les fue asignado el grupo funcional alimentario propuesto por Merritt et al. (2008) para Norteamérica. Los grupos funcionales considerados fueron: recolectores, colectores-recolectores, colectores-filtradores, raspadores, depredadores y fragmentadores.

Análisis estadístico

Se utilizaron herramientas de estadística multivariada frecuentemente utilizadas en la caracterización fisicoquímica y biológica de cuerpos de agua superficiales, como el análisis de componentes principales (ACP) y el análisis clúster (Moresi, et al, 2019, Rodríguez et al, 2022).

RESULTADOS

Análisis de los parámetros fisicoquímicos

Los resultados de los valores promedios obtenidos para cada parámetro fisicoquímico en los muestreos realizados aparecen en la tabla 4, como se puede observar, al comparar el promedio de los valores de cada parámetro, con los valores permitidos por las normas de calidad de aguas continentales (Decreto Ejecutivo No. 75 de 4 de junio de 2008), se encontró un 100 % de cumplimiento para cada parámetro estudiado.

Antes de ejecutar los análisis de componentes principales (ACP), se aplicó a todo el conjunto de datos de la tabla 4, la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov con una probabilidad del 95%. La hipótesis nula de que los datos son normales es rechazada al nivel de significancia de ($p < 0,05$), una vez que la matriz de datos fue estandarizada con la prueba de Kaiser: rotación: Varimax, se procedió a realizar el ACP. Después de verificar que los valores de la medida de adecuación del muestreo de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) fuera aceptable de 0.680 y la prueba de esfericidad de Barlett indicara si las variables están significativamente relacionadas ($p=0.0001$), se observó que los dos primeros componentes principales explican el 98.6 % de la variabilidad de la matriz de datos ($F1= 94.69$ % y $F2= 3.91$ %). En el ACP podemos apreciar en el cuadrante superior derecho a los ríos San Pablo (muy alejado), a los San Pedro y Mariato (formando un grupo) y al río Ponuga (muy cerca del río Caté), estos ríos del cuadrante superior derecho tienen una correlación positiva con los parámetros color,

temperatura y turbidez. En el cuadrante inferior derecho aparecen los ríos Caté (muy cerca de Ponuga); Tebario, Torio y Suay agrupados, estos ríos tienen una correlación negativa con los parámetros de conductibilidad, sílice HR y oxígeno disuelto. Estos agrupamientos fueron confirmados mediante el análisis cluster que permite diferenciar dos conglomerados al evaluar todos los ríos muestreados (Figura 3). Aunque la similitud de los ríos muestreados está arriba del 72 %, lo que indicaría una composición de parámetros fisicoquímicos semejantes, se puede observar entre ellos niveles de similitud mayores como, por ejemplo: Caté y Ponuga; Torio y Suay; y el río San Pablo muy alejado del resto.

Tabla 4.

Valores promedios de los parámetros evaluados, nivel de calidad permitido para aguas continentales por Decreto Ejecutivo No. 75 del 4 de junio de 2008, de los ríos Torio, Mariato, Tebario, Suay, Ponuga, Caté, San Pablo y San Pedro en los muestreos desde el mes de enero al mes de diciembre de 2024.

PARÁMETROS Y UNIDADES	NIVEL DE CALIDAD	RIOS							
		TORIO	MARIATO	TEBARIO	SUAY	PONUGA	CATÉ	SAN PABLO	SAN PEDRO
Temperatura °C	—	26.23	27.23	26.61	27.58	28.14	26.14	27.86	27.81
Oxígeno disuelto (mg/L)	> 7	4.18	4.06	4.15	4.01	3.77	4.02	3.87	3.50
Oxígeno disuelto (%)	—	51.83	51.43	51.93	51.10	48.51	49.78	49.59	44.72
Conductividad (µS/cm)	< 850	139.04	96.77	97.79	162.32	209.86	136.96	68.32	136.45
Sólidos totales disueltos (mg/L)	< 500	0.09	0.06	0.06	0.11	0.13	0.09	0.05	0.08
Salinidad (ppm)	0,50	0.07	0.05	0.05	0.08	0.10	0.07	0.03	0.06
pH (unidad de pH)	6,5 a 8,5	8.01	7.88	7.78	7.94	7.67	8.17	7.94	7.59
Color (mg/L Pt)	< 100	32.22	71.11	25.22	55.56	119.44	75.56	101.11	107.22
Turbidez (FTU)	< 50	22.44	31.11	4.44	14.44	18.00	5.11	25.89	20.44
Sulfato (mg/L SO ₄ ²⁻)	< 250	1.20	1.50	1.50	2.40	3.40	2.80	2.80	2.10
Sulfuro (mg/L S ²⁻)	—	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02
*Sílice LR (mg/L SiO ₂)	—	> 4.0	> 4.0	> 4.0	> 4.0	> 4.0	> 4.0	> 4.0	> 4.0
Sílice HR (mg/L SiO ₂)	—	38.17	30.25	40.50	38.25	48.00	46.25	18.00	28.00
Fosfato (mg/L PO ₄ ³⁻)	—	0.25	0.14	0.23	0.37	0.33	0.30	0.17	0.46
Fosfato (mg/L P)	—	0.07	0.04	0.08	0.10	0.11	0.08	0.06	0.15
Cloro libre (mg/L Cl ₂)	0.3 a 0.8	0.04	0.06	0.02	0.06	0.11	0.05	0.06	0.07
Cloro total (mg/L Cl ₂)	< 500	0.05	0.07	0.02	0.07	0.10	0.05	0.06	0.07
Nitrato (mg/L N)	< 10	0.49	0.31	0.39	0.24	0.41	0.46	0.42	0.42
Nitrato (mg/L NO ₃ ⁻)	< 10	1.83	1.33	1.64	3.05	1.81	2.00	1.95	1.57
Amonio (mg/L N)	—	0.02	0.03	0.01	0.02	0.04	0.03	0.03	0.04
Amonio (mg/L NH ₄ ⁺)	—	0.02	0.05	0.02	0.03	0.05	0.02	0.03	0.06
Fenol (mg/L C ₆ H ₅ OH)	—	0.03	0.04	0.03	0.05	0.02	0.03	0.03	0.05

*Rango de lectura para sílice LR = 0 – 4.0 mg/l (mayor al rango de medición)

Figura 2.

Análisis de componentes principales de los parámetros fisicoquímicos de los ríos Torio, Mariato, Tebario, Suay, Ponuga, Caté, San Pablo y San Pedro en los muestreos realizados desde el mes de enero al mes de diciembre de 2024.

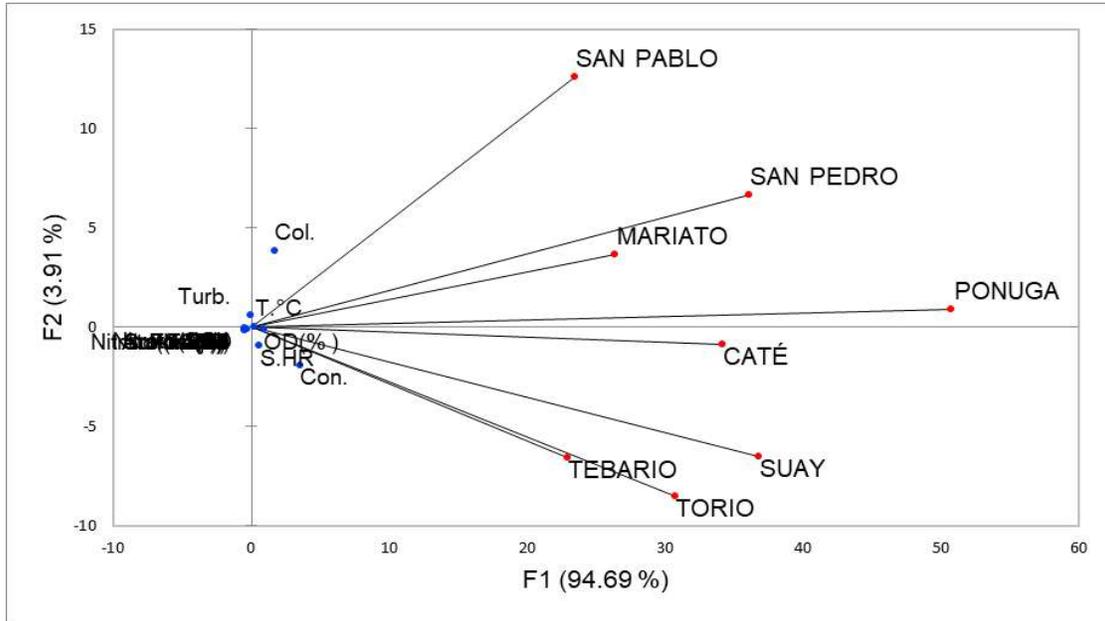
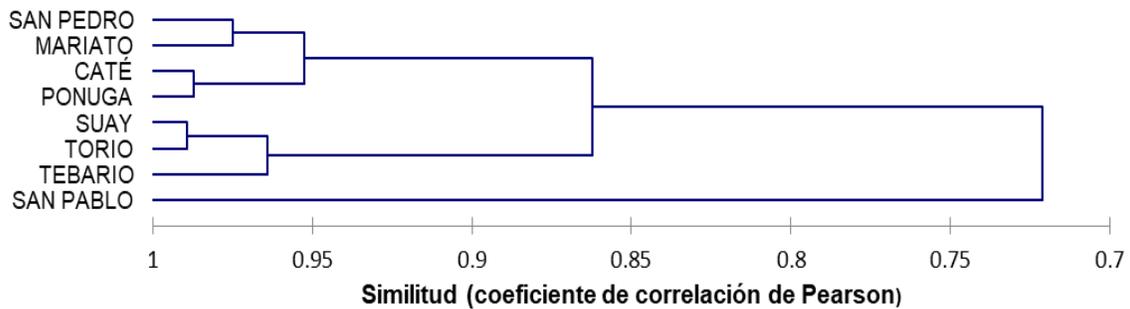


Figura 3.

La clusterización aglomerativa jerárquica (CAJ) de los parámetros físico-químicos de los ríos Torio, Mariato, Tebario, Suay, Ponuga, Caté, San Pablo y San Pedro en los muestreos realizados desde el mes de enero al mes de diciembre de 2024. Método de aglomeración (vinculación completa) y Similitud (coeficiente de correlación de Pearson).



Análisis de la calidad del agua utilizando el Índice de calidad ambiental (ICA), criterio general.

El índice ICA reveló una ponderación de 65, 66, 69, 64, 66 y 58, para los ríos Torio, Mariato, Tebario, Suay, San Pablo y San Pedro, respectivamente, por lo que se caracterizan, utilizando el criterio general, como ríos poco contaminados. Los ríos Ponuga y Cate obtuvieron una ponderación de 70 y se caracterizan con una calidad de agua aceptable. No se obtuvo ningún valor que pudiera categorizar a estos ríos como de calidad no contaminado, contaminado o altamente contaminado (Tabla 5).

Tabla 5.

Índice de calidad ambiental (ICA) de los ríos Torio, Mariato, Tebario, Suay, Ponuga, Caté, San Pablo y San Pedro, desde el mes de enero al mes de noviembre de 2024, utilizando el criterio general.

ESTACION	RIOS							
	TORIO	MARIATO	TEBARIO	SUAY	PONUGA	CATÉ	SAN PABLO	SAN PEDRO
SECA	70	70	71	69	74	71	71	60
TRANSICIÓN	66	61	68	64	70	72	64	55
LLUVIOSA	58	69	67	66	65	66	63	60
Índice ICA	65	66	69	64	70	70	66	58
Descriptor	Ríos poco contaminados				Ríos de calidad aceptable		Ríos poco contaminados	

Análisis de la calidad biológica del agua utilizando el Índice BMWP-Veraguas.

En la aplicación del índice BMWP calibrado para la provincia de Veraguas se obtuvieron valores promedios para la estación seca de 58, 72, 67, 54, 81, 86, 60 y 73 para los ríos Torio, Mariato, Tebario, Suay, Ponuga, Caté, San Pablo y San Pedro, respectivamente. Los ríos Torio, Suay y San Pablo fueron categorizados con una calidad biológica de agua dudosa (evidentes efectos de contaminación), mientras que, los ríos Mariato, Tebario, Ponuga, Caté, San Pedro se categorizaron con una calidad biológica aceptable (no alterada de modo sensible) No se obtuvo ningún valor que pudiera categorizar a estos ríos como de calidad biológica de agua buena, crítica o muy crítica (Tabla 6).

Tabla 6.

Calidad biológica del agua de los ríos Torio, Mariato, Tebario, Suay, Ponuga, Caté, San Pablo y San Pedro, desde el mes de enero al mes de mayo de 2024 (en la época seca), utilizando el índice BMWP/Veraguas. (***) Ríos crecidos.

MESES	RIOS							
	TORIO	MARIATO	TEBARIO	SUAY	PONUGA	CATÉ	SAN PABLO	SAN PEDRO
Enero	46	49	27	42	76	76	84	81
Febrero	63	52	82	62	97	114	80	115
Marzo	68	116	104	58	78	104	31	58
Abril	57	71	98	55	73	98	47	40
Mayo	***	***	25	***	***	40	***	***
PROMEDIO	58	72	67	54	81	86	60	73
BMWP/V	DUDOSA	ACEPTABLE	ACEPTABLE	DUDOSA	ACEPTABLE	ACEPTABLE	DUDOSA	ACEPTABLE

Estructura numérica de las comunidades de insectos acuáticos en los ríos Torio, Mariato, Tebario, Suay, Ponuga, Caté, San Pablo y San Pedro.

En cuanto a los insectos acuáticos, la tabla 7 recoge los órdenes, las familias y la abundancia de los géneros encontrados en los ríos Torio, Mariato, Tebario, Suay, Ponuga, Caté, San Pablo y San Pedro.

Tabla 7.

Estructura numérica y composición de las comunidades de insectos acuáticos asociados a los ríos Torio, Mariato, Tebario, Suay, Ponuga, Caté, San Pablo y San Pedro, desde el mes de enero de 2024 (en época seca)

FAMILIA	GÉNERO	RIOS							
		Torio	Mariato	Tebario	Suay	Ponuga	Caté	San Pablo	San Pedro
ORDEN:BLATTODEA									
Blaberidae	(*)	0	0	0	0	0	0	2	0
ORDEN:COLEOPTERA									
Staphylinidae	<i>Stenus</i>	20	4	17	3	1	3	13	3
	<i>Helichus</i>	30	18	34	19	3	17	2	5
Dryopidae	<i>Pelonomus</i>	4	0	0	0	3	8	0	3
	<i>Elmoparnus</i>	0	0	0	4	0	0	0	0
Hydrophilidae	<i>Tropisternus</i>	1	0	0	0	0	0	0	0
Elmidae	<i>Cleptelmis</i>	0	2	1	0	1	1	2	0
	<i>Heterelmis</i>	0	0	1	0	0	0	0	0
Psephenidae	<i>Psephenops</i>	3	6	6	7	4	28	5	5
Ptilodactylidae	<i>Anchytarsus</i>	1	4	0	0	0	4	0	3
Gyrinidae	<i>Andogyrus</i>	0	0	0	0	0	0	1	1
Chrysomelidae	<i>Donacia</i>	0	2	0	1	0	1	0	0

Scirtidae	<i>Elodes</i>	0	0	0	0	0	0	1	3
ORDEN:DIPTERA									
Culicidae	<i>Culex</i>	0	2	0	0	0	0	0	0
	<i>Anopheles</i>	0	0	0	0	0	1	0	0
Syrphidae	*****	0	1	0	0	0	0	0	0
	<i>Hexatoma</i>	0	0	2	16	0	2	0	0
Tipulidae	<i>Limonia</i>	0	0	0	0	0	1	0	0
	<i>Tipula</i>	0	0	1	0	0	0	0	0
Simuliidae	<i>Simulium</i>	0	0	0	1	0	1	2	2
Chironomidae	<i>Chironomus</i>	0	0	0	1	0	0	0	0
ORDEN: EPHEMEROPTERA									
Leptophlebiidae	<i>Farroses</i>	12	15	17	29	43	11	2	6
	<i>Traverella</i>	0	19	10	6	1	0	1	3
	<i>Thraulodes</i>	8	4	21	17	41	23	15	9
	<i>Terpides</i>	5	0	1	0	0	12	0	7
Heptageniidae	<i>Vacupernius</i>	0	0	0	2	0	0	0	0
	<i>Maccaffertium</i>	6	4	1	4	0	1	1	3
	<i>Americabeatis</i>	2	0	10	3	1	1	2	11
Baetidae	<i>Baetis</i>	0	1	0	0	0	0	0	0
	<i>Baetodes</i>	0	1	0	1	0	0	0	3
	<i>Camelobaetidius</i>	1	1	7	0	0	2	0	0
	<i>Mayobaetis</i>	0	0	5	0	0	0	0	0
Leptohephidae	<i>Leptephyphes</i>	1	7	31	5	11	4	1	8
	<i>Tricorythodes</i>	0	0	0	1	0	4	0	0
	<i>Asioplex</i>	0	0	0	2	0	0	0	0
ORDEN:HETEROPTERA									
Gerridae	<i>Gerris</i>	2	19	0	20	2	0	1	9
	<i>Trepobates</i>	5	16	6	13	1	0	0	8
	<i>Eurygerris</i>	0	10	2	18	0	0	17	0
	<i>Limnogonus</i>	0	0	1	0	0	0	0	0
	<i>Metrobates</i>	4	7	0	2	5	8	0	2
	<i>Potamobates</i>	0	0	2	4	0	0	2	0
	<i>Brachymera</i>	0	0	0	6	0	0	0	0
Veliidae	<i>Rhagovelia</i>	54	44	21	41	29	10	63	18
	<i>Microvelia</i>	0	9	2	0	0	0	2	0
	<i>Steridulivelia</i>	0	0	0	0	0	0	2	0
Notonectidae	<i>Martagena</i>	7	0	0	1	0	0	2	0
Mesoveliidae	<i>Mesoveloidea</i>	3	2	3	0	0	2	1	12
Saltidae	<i>Micracanthia</i>	0	0	0	0	1	0	0	0
	<i>Limnocoris</i>	2	1	3	1	7	3	3	0
Naucoridae	<i>Cryphocricos</i>	5	0	3	0	7	7	0	1
	<i>Pelocoris</i>	1	0	2	0	3	1	0	2
	<i>Ambrysus</i>	0	0	0	0	0	1	3	0
Hebridae	<i>Hebrus</i>	5	3	3	0	1	3	2	1
Belostomatidae	<i>Belostoma</i>	0	0	0	0	0	2	0	1
Hydrometridae	<i>Hydrometra</i>	0	2	0	0	0	0	0	0
ORDEN:LEPIDOPTERA									

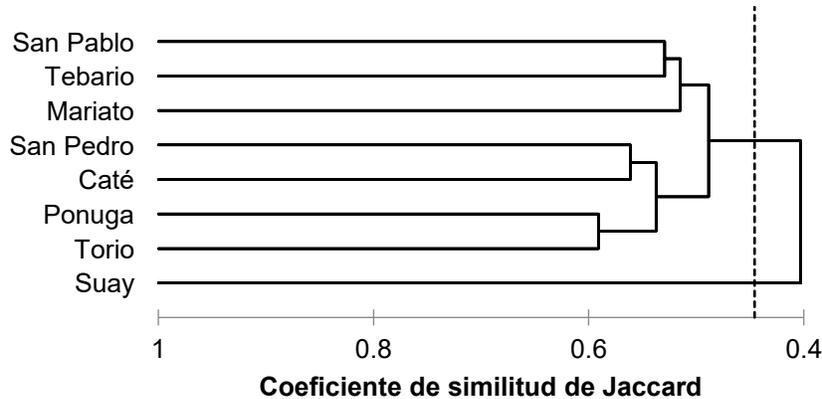
Crambidae	<i>Nymphulinae</i>	1	2	0	0	0	1	1	0
ORDEN:MEGALOPTERA									
Corydalidae	<i>Corydalis</i>	1	1	2	0	1	3	1	4
ORDEN:ODONATA									
Platysticidae	<i>Palaemnema</i>	1	0	1	0	2	0	10	3
	<i>Brechmorhoga</i>	0	0	0	0	8	0	0	4
Libellulidae	<i>Pantala</i>	0	0	0	0	4	1	0	0
	<i>Dythemis</i>	0	7	0	0	0	8	0	6
	<i>Macrothemis</i>	1	0	0	0	2	1	0	0
Gomphidae	<i>Progomphus</i>	2	7	4	1	6	16	2	8
	<i>Phyllogomphoides</i>	0	0	1	0	19	3	0	5
	<i>Aphylla</i>	0	0	0	0	0	1	0	0
Coenagrionidae	<i>Agriogomphus</i>	0	0	0	0	0	0	0	1
	<i>Argia</i>	3	6	3	5	19	3	3	11
	<i>Acanthagrion</i>	0	0	0	0	0	2	0	0
Calopterygidae	<i>Telebasis</i>	2	1	15	0	4	5	0	0
	<i>Ischura</i>	0	0	0	0	0	2	0	1
Polythoridae	<i>Hetaerina</i>	0	1	8	0	0	2	1	2
Polythoridae	<i>Cora</i>	0	1	0	0	3	3	0	0
Corduliidae	<i>Neocordulia</i>	0	0	0	0	0	1	0	1
ORDEN:PLECOPTERA									
Perlidae	<i>Anacroneria</i>	0	8	13	0	12	22	1	10
ORDEN:TRICHOPTERA									
Philopotamidae	<i>Chimarra</i>	24	4	93	4	46	50	6	18
Policentropodidae	<i>Polycentropus</i>	6	1	2	1	4	12	2	1
	<i>Leptonema</i>	5	25	29	3	26	18	8	13
Hydropsychidae	<i>Macronema</i>	0	0	1	0	0	0	0	0
	<i>Smicridea</i>	6	19	29	6	11	14	5	11
	<i>Calopsyche</i>	0	0	1	0	7	0	0	0
Odontoceridae	<i>Marilia</i>	0	0	0	0	0	0	1	0
Ecnomidae	<i>Austrotinodes</i>	0	0	0	0	3	0	0	0
Leptoceridae	<i>Atanaticia</i>	0	0	0	3	0	0	0	0
TOTAL		234	287	415	251	342	330	189	228

Semejanzas entre la estructura de las comunidades a nivel de géneros, mediante el coeficiente de Jaccard

Los resultados obtenidos en la aplicación del coeficiente de similitud de Jaccard se muestran en la figura 4, en donde se pueden apreciar claramente la presencia de dos grupos. El grupo 1 formado por el río Suay, el grupo 2 formado por los ríos San Pablo, Tebario, Mariato, San Pedro, Caté, Ponuga y Torio.

Figura 4.

Dendrograma del análisis Cluster (Coeficiente de similitud de Jaccard y vinculación flexible (beta = 0), correlación cofenética: -0.879). Semejanzas en la estructura de géneros de las comunidades de insectos acuáticos, encontradas en los tramos estudiados de los ríos Torio, y Mariato Tebario, Suay, Ponuga, Caté, San Pablo y San Pedro desde el mes de enero al mes de mayo de 2024 (en la época seca).



Clasificación de grupos funcionales alimentarios de los insectos acuáticos muestreados en los ríos Torio, Mariato, Tebario, Suay, Ponuga, Cate, San Pablo y San Pedro.

La figura 5, se muestra el análisis de los componentes principales (ACP) y en la figura 6 y aparecen los porcentajes de abundancia de los GFA de los géneros de insectos acuáticos encontrados en los ríos Torio, Mariato, Tebario, Suay y en la figura 7 aparecen los porcentajes de abundancia de los GFA de los géneros de insectos acuáticos encontrados en los ríos Ponuga, Caté, San Pablo y San Pedro.

El análisis de los ACP para la estructura de los grupos funcionales alimentarios muestra que los dos primeros componentes principales explican el 96.47 % de la variabilidad de la matriz de datos (F1 el 87.70 % y F2 el 8.77 %). Después de verificar que los valores de la medida de adecuación del muestreo de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) fuera aceptable (0.598), podemos apreciar que los ríos Tebario, Ponuga y Caté, se ubican en el cuadrante superior derecho y tienen una relación con los grupos funcionales colectores-filtradores y colectores-recolectores. Los ríos Mariato, San Pedro, San Pablo, Suay y Torio se ubicaron en el cuadrante inferior derecho, mostrando una relación con el GFA de los depredadores. Los ríos Torio, Suay y San Pablo aparecen muy juntos en el cuadrante inferior derecho, estos ríos tienen las características de poseer el porcentaje de abundancia mayor de depredadores 53.4

%, 52.8 % y 69.5, respectivamente, y los porcentajes de abundancia más bajos de los grupos funcionales colectores-filtradores y colectores-recolectores. Los ríos Torio, Suay y San Pablo fueron diagnosticados con una calidad biológica de agua dudosa con el índice BMWP/Veraguas, mientras que, los ríos Mariato, Tebario, Ponuga, Cate y San Pedro con los porcentajes más altos de colectores-filtradores y colectores-recolectores y los porcentajes mas bajos de depredadores se diagnosticaron como ríos de calidad biológica aceptable (Figura 6 y Figura 7).

Figura 5.

Análisis de los componentes principales (ACP) para la estructura de los grupos funcionales alimentarios en la comunidad de insectos acuáticos de los ríos Torio, Mariato, Tebario, Suay, Ponuga, Caté, San Pablo y San Pedro.

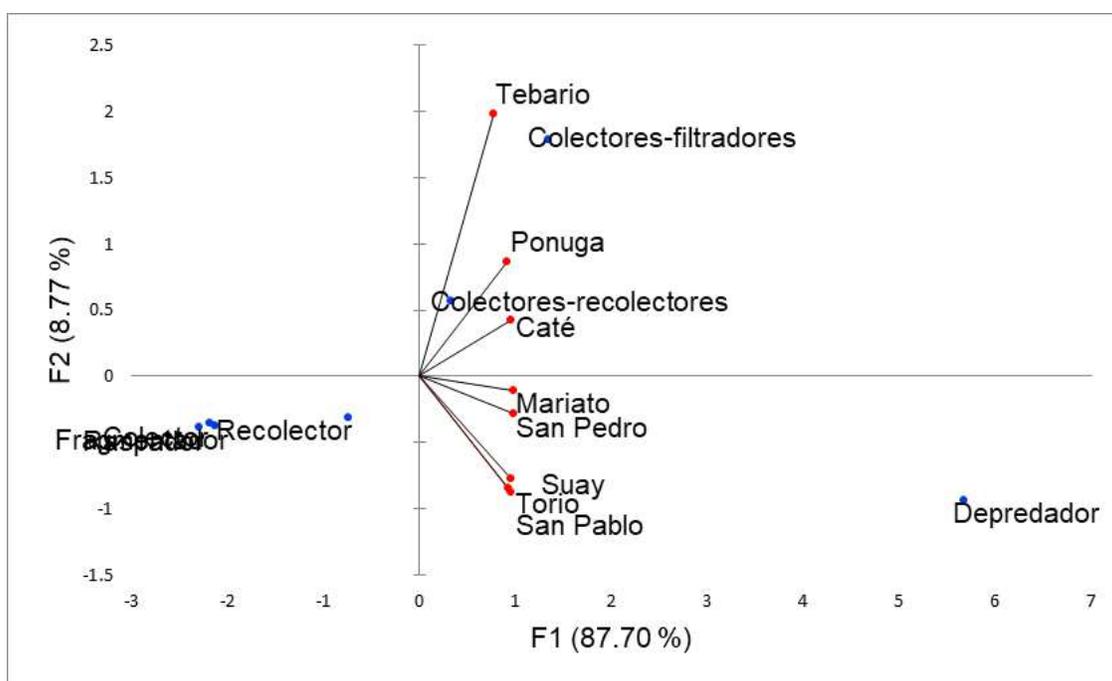


Figura 6.

Abundancia en porcentaje de los grupos funcionales alimentarios (GFA) de los géneros de insectos acuáticos encontrados en los ríos Torio, Mariato, Tebario y Suay, desde el mes de enero al mes de mayo de 2024 (en la época seca). S.I. (género sin información del GFA).

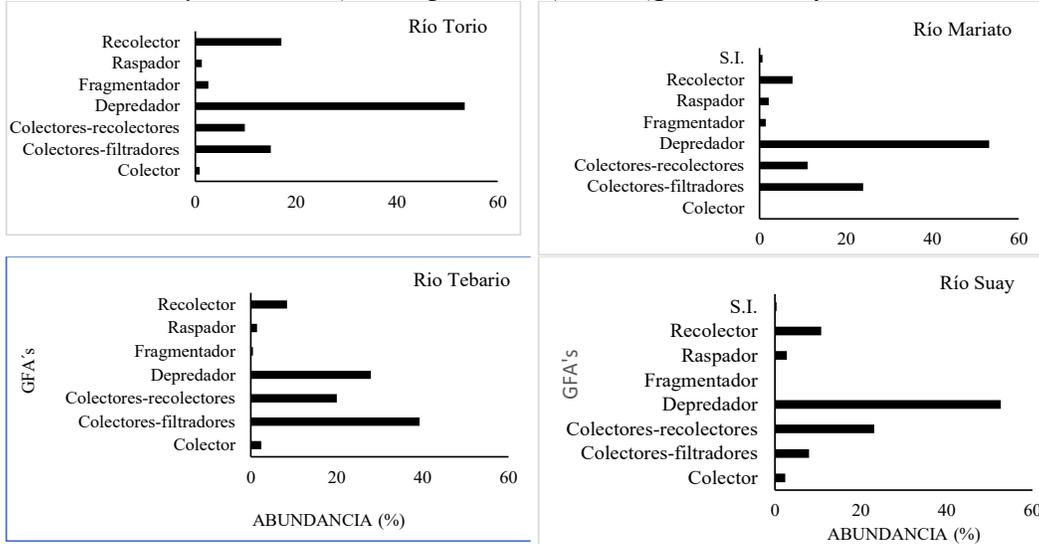
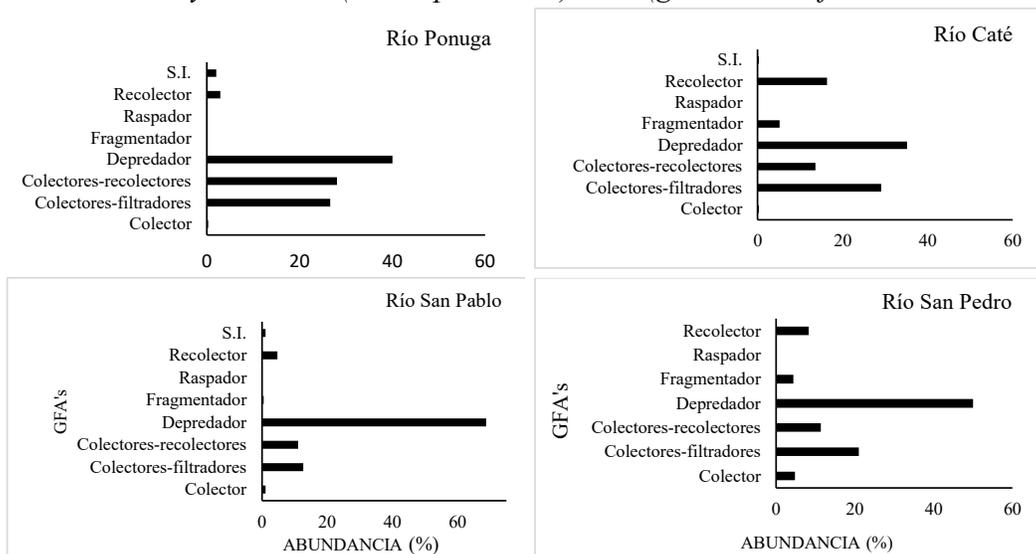


Figura 7.

Abundancia en porcentaje de los grupos funcionales alimentarios de los géneros de insectos acuáticos encontrados en los ríos Ponuga, Caté, San Pablo y San Pedro, desde el mes de enero al mes de mayo de 2024 (en la época seca). S.I. (género sin información del GFA).



DISCUSIÓN

Análisis de los parámetros fisicoquímicos

Al comparar el promedio de los valores de los 22 parámetros evaluados en los ríos Torio, Mariato, Tebario, Suay, Ponuga, Caté, San Pablo y San Pedro, con los valores permitidos por las normas de calidad de aguas continentales en Panamá, se encontró un 100 % de cumplimiento para cada parámetro estudiado. Los informes de calidad del agua de los ríos y embalses de la cuenca del canal para los años 2020, 2021 y 2022 que analizaron los mismos parámetros, también obtuvieron un 100 % de cumplimiento con las normas establecidas y un diagnóstico de calidades de agua con el índice ICA de aceptable, para los ríos y embalses de la cuenca del canal (Autoridad del Canal de Panamá, 2020, 2021 y 2022). Razón por la cual, se podría pensar que los ríos objeto de este estudio, al obtener el 100 % de cumplimiento con las normas establecidas para los parámetros fisicoquímicos, tendrían calidades de agua con el índice ICA de aceptable, pero no fue así.

En el análisis de los componentes principales podemos apreciar en el cuadrante superior derecho al río San Pablo, muy alejado del grupo, el análisis análisis (CAJ) confirma que los ríos Torio, Mariato, Tebario, Suay, Ponuga, Caté y San Pedro, forman un grupo y el río San Pablo forma el otro grupo, una de las razones podría deberse a que el río San Pablo tiene los niveles más altos de temperatura y turbidez y los niveles más bajos de salinidad, sílice HR y sólidos totales disueltos. Algunos autores han comunicado que los parámetros fisicoquímicos, en algunos casos, reflejan una tendencia generalizada del impacto humano, reflejando altos valores de conductividad, turbidez y sólidos disueltos (Sánchez-Argüello et al. 2010). Este incremento de conductividad, sólidos disueltos y turbidez han sido reportados en otros estudios en sitios degradados como resultado del impacto humano (Sutherland et al., 2002; Sánchez-Argüello et al. 2010).

De los ríos estudiados, solamente, el río San Pablo cuenta con un embalse en la parte alta y está sometido a descargas intermitentes. La retención de sedimentos en dicho embalse puede ejercer un impacto ecológico, afectando la concentración de sólidos totales disueltos y aumentando la temperatura y turbidez, según lo comunicado por (Oscoz et al 2006, Winton et al. 2019, Winton, et al. 2023), por lo que nos sugiere que, las descargas intermitentes del agua de los embalses, tiene un efecto sobre los parámetros fisicoquímicos de los sitios que se ubican aguas abajo del embalse. Chen, et al. 2023 demostraron que los embalses alteran las características hidro-geofísicas de los ríos, incluido el régimen hidrológico, el régimen de sedimentos y la temperatura del agua.

Análisis de la calidad biológica del agua en los ríos estudiados

Con el diagnóstico de calidad utilizando el índice ICA, se diagnosticaron en los ríos Ponuga y Caté una calidad de agua aceptable y en los ríos Torio, Mariato, Tebario, Suay, San Pablo

y San Pedro el diagnóstico fue de ríos poco contaminados, mientras que, el diagnóstico de calidad con el índice BMWP/V caracterizó a los ríos Mariato, Tebario, Ponuga, Cate y San Pedro como ríos de calidad biológica aceptable, mientras que, los ríos Torío, Suay y San Pablo como ríos de calidad biológica del agua dudosa. No se obtuvo ningún valor que pudiera categorizar a estos ríos como de calidad biológica excelente, muy contaminada o extremadamente contaminada. Los resultados de los índices ICA y BMWP/V evidencian de manera general calidades de agua similares en el presente estudio. Resultados parecidos a los encontrados por Sánchez-Argüello et al., 2010 en la cuenca del río Capira, al comparar los resultados del diagnóstico de calidad, de los índices ICA y BMWP. Existe una tendencia natural en los ríos a perder la calidad biológica de sus aguas a medida que se avanza agua abajo (Alba-Tercedor y Sánchez Ortega, 1988), quizás el grado de perturbación encontrado al diagnosticar la calidad del agua sea el producto de este fenómeno.

Al comparar los índices, el ICA tiene la desventaja, de no ser sensible a la contaminación por metales pesados (Montoya et al. 2011), la inclusión en los muestreos del índice BMWP/V subsanaría esta desventaja, ya que los macroinvertebrados son sensibles al efecto de estos metales y requiriere a su vez, una menor inversión económica (Montoya et al. 2011).

Semejanzas entre la estructura de las comunidades a nivel de géneros.

El análisis clúster realizado con el coeficiente de similitud de Jaccard, evidencia que el río Suay tiene una estructura de géneros en la comunidad de insectos acuáticos con un nivel de similitud menor de 45 %, a la vez obtuvo el promedio más bajo para el índice BMWP/V de 54, mientras que, las comunidades de los ríos San Pablo, Tebario, Mariato, San Pedro, Caté, Ponuga y Torío, que muestran una similitud mayor de 50 %. Rodríguez et al., 2023 en un estudio realizado en el corregimiento de Pixvae, utilizando el índice BMWP/V comunican que los ríos con similitud en la estructura bentónica de géneros muestran una misma calidad biológica del agua. Una explicación posible de la buena calidad biológica encontrada en los ríos Ponuga y Caté utilizando el índice BMWP/V podría deberse a la abundancia de insectos acuáticos y de los grupos funcionales de colectores-filtradores y colectores-recolectores, grupos que indican una mayor disponibilidad de materia orgánica particulada fina (Oscoz et al 2006).

Estructura numérica de las comunidades de insectos acuáticos en los ríos estudiados.

En los ríos Torío, Mariato, Suay, San Pedro y San Pablo el orden dominante en cuanto a número de individuos fue el de los Heteroptera, algunos autores, comunican la tendencia a la disminución de los valores de los índices ICA y BMWP/V, debido a la reducción de los individuos de los órdenes de Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera en la estructura bentónica de las comunidades, lo cual se ha evidenciado en diferentes latitudes (Montoya et al. 2011, Rodríguez, et al. 2022), quizás esto explicaría la diferencia de la calidad del agua, entre los ríos Torío, Mariato, Suay, San Pedro y San Pablo con el índice ICA, agua de calidad

poco contaminada y los ríos Ponuga y Caté, con los Ephemeroptera, Trichoptera y Plecoptera, como los órdenes dominantes, y una calidad de agua aceptable. Resultados similares, en cuanto a la abundancia del orden Heteroptera, fueron obtenidos por Rodríguez y Sánchez (2001) en el río Santa Clara, Rodríguez y León (2003) en el río Tríbique, Rodríguez y Mendoza (2003) en el río Agué, Lombardo y Rodríguez (2008) en el río Santa María, Guinard et al., (2013) en el río Gariché en la época seca. La gran abundancia de Hemípteros en estos ríos puede estar relacionada, a la capacidad de adaptarse a diferentes hábitats acuáticos, siendo poco exigentes en la calidad del ambiente y teniendo un rango mayor de tolerancia a la polución en niveles moderados (Arias-Paco et al., 2021).

Clasificación de grupos funcionales alimentarios de los insectos acuáticos en los ríos estudiados.

En los ríos estudiados el grupo funcional alimentario más abundante en cuanto al número de individuos fueron los depredadores. Estudios realizados por López et al., (2012) en la quebrada Santa Inés, Honduras y Rodríguez y Cárdenas (2017) en los ríos La Chorrera y Zaratí, Panamá, encontraron como grupo funcional de alimentación, en cuanto a riqueza y abundancia a los depredadores también comunican una calidad de agua mala, para ambos ríos. De igual manera, Rodríguez et al. (2017) encontraron este grupo dominante en el tramo bajo del río Tríbique. Rivera-Usme (2013) señala que los depredadores son indicadores de ambientes con mayores niveles de eutrofización y su gran abundancia radica en que están mejor adaptados a estas condiciones, por ser más competitivos, regulando otras poblaciones de macroinvertebrados como dípteros. Además, un incremento de depredadores disminuye otros grupos funcionales de alimentación de gran importancia, como los colectores y fragmentadores (Rodríguez-Barrios et al., 2011; Rodríguez y Cárdenas, 2017).

CONCLUSIONES

- La caracterización de los parámetros fisicoquímicos de los ríos objeto de este estudio, reveló que, los valores promedios de los parámetros evaluados cumplen con el nivel de calidad permitido para aguas continentales establecidos por la normativa panameña, lo que parece indicar de manera general una calidad ambiental de regular a buena.
- Los ríos como el San Pablo que están sometidos a descargas intermitentes pueden experimentar variaciones en la caracterización de los parámetros fisicoquímicos lo que se convierte en su principal causa de degradación.
- Los resultados del diagnóstico de la calidad del agua de los ríos estudiados y la estructura de la comunidad de insectos acuáticos, es lo esperado en sistemas lóticos en condiciones similares aguas abajo, ya que existe una tendencia natural en los ríos a perder la calidad biológica de sus aguas a medida que se avanza aguas abajo

- Los grupos funcionales de alimentación podrían ser usados, como indicadores de la calidad biológica del agua o como complemento a los sistemas de evaluación, basados en la composición y en estructura taxonómica de las comunidades acuáticas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias a la ayuda económica del Proyecto FID22-102, financiado por la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT). De manera muy especial, agradecemos la participación de profesores, estudiantes de tesis y, en general, a todo el grupo de trabajo del Centro de Capacitación, Investigación y Monitoreo de la Biodiversidad en Coiba (CCIMBIO-COIBA), del Centro Regional Universitario de Veraguas, Universidad de Panamá.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alba-Tercedor, J., & B. Pujante. (2000). BMWP, un adattamento spagnolo del British Biological Monitoring Working Party (BMWP) Score System. *Biol. Amb.* 14(2): 65-67.
- Alba-Tercedor, J., & Sánchez-Ortega, A. (1988). Un método rápido y simple para evaluar la calidad biológica de las aguas corrientes basado en el de Hellawell (1978). *Limnética.* 4, 51-56.
- Alba-Tercedor, J. (1996). Macroinvertebrados acuáticos y calidad de las aguas de los ríos, IV Simposio del agua en Andalucía (SIAGA), *Almería*, 2, 203-213. <https://cidta.usal.es/calidad/documentos/blanco2/indice%20BMWP.pdf>
- Arias-Paco, A., Mata-Núñez, M., & Alvarado-Barrantes, R. (2021). Effect of soapy water on the behavior of semiaquatic Heteropterans (Gerromorpha) from two neotropical aquatic ecosystems. *Rev. biol. trop.*, 69(3), 873–887. <https://doi.org/10.15517/rbt.v69i3.46018>
- Arroyo J., C., & Encalada, A. C. (2009). Evaluation of the quality of water through benthic macroinvertebrates and biological indices in tropical rivers in montane cloud forest. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 1(1). <https://doi.org/10.18272/aci.v1i1.4>
- Autoridad del Canal de Panamá (ACP). (2020) Informe de calidad de agua de la cuenca del canal.
- Autoridad del Canal de Panamá (ACP). (2021). Informe de calidad de agua de la cuenca del canal.

- Autoridad del Canal de Panamá (ACP). (2022). Informe de calidad de agua de la cuenca del canal.
- Baptista, D. F., Buss, D. F., Dias, L. G., Nessimian, J. L., Da Silva, E. R., De Moraes Neto, A. H. A., De Carvalho, S. N., De Oliveira, M. A., & Andrade, L. R. (2006). Functional feeding groups of Brazilian Ephemeroptera nymphs: Ultrastructure of mouthparts. *Ann. Limnol*, 42(2), 87–96. <https://doi.org/10.1051/limn/2006013>
- Bello, C., & Cabrera, M. I. (2001). Alimentación ninfal de Leptophlebiidae (Insecta: Ephemeroptera) en el Caño Paso del Diablo, Venezuela. *Rev. biol. trop.*, 49, 1–4.
- Bernal, J. A., & Castillo, H. M. (2012). Diversidad, distribución de los insectos acuáticos y calidad del agua de la subcuenca alta y media del río Mula, Chiriquí, Panamá. *Tecnociencia*, 14(1), 35–52.
- Carrillo-Alvarado, M. S. & Urgilés-Calle, P. D. (2016). Determinación del índice de calidad de agua ICA-NSF de los ríos Mazar y Pindilig. Universidad de Cuenca, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil. Ecuador. Pág. 142. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/items/08315a5d-6da4-4b65-a09a-5a76395fd015>
- Chará-Serna, A. M.; Chará, J. D.; Zúñiga, Del Carmen M., Pedraza, G. X., & Giraldo, L. P. (2010). Clasificación trófica de insectos acuáticos en ocho quebradas protegidas de la ecorregión cafetera colombiana. *Universitas Scientarum*, Vol.15, (1): pp: 27–36. Pontificia Universidad Javeriana, Colombia. <http://dx.doi.org/10.11144/javeriana.SC15-1.tcoa>
- Chará-Serna, A., Chará, J., Zúñiga, M., Pearson, R., & Boyero, L. (2012), Diets of leaf litter-associated invertebrates in three tropical streams. *Ann. Limnol.* 48, 139–144. <https://doi.org/10.1051/limn/2012013>
- Chen, Q., Li, Q., Lin, Y., Zhang, J., Xia, J., Ni, J., Cooke, S. J., Best, J., He, S., Feng, T., Chen, Y., Tonina, D., Benjankar, R., Birk, S., Fleischmann, A. S., Yan, H., & Tang, L. (2023). River damming impacts on fish habitat and associated conservation measures. *Reviews of Geophysics*. 61:1-64. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2023RG000819>
- Cumbrera, A., & Rodríguez, V. (2018). Estructura trófica a nivel de grupos funcionales de alimentación de la comunidad de insectos acuáticos y calidad biológica del agua en la parte media-baja del río Cardenillo, Veraguas. *Visión Antataura*, 2, 16–40.

- De Martonne, E. (1927). Regions of Interior-Basin Drainage. *Geogr. Rev.*, 17(3), pp. 397-414. doi:10.2307/208323
- Domínguez, E., & Fernández, H. (2009). Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos. Sistemática y biología. Fundación Miguel Lillo. Tucuman-Argentina. 656 pp.
- Fenoglio, S., Bo T., Czekaj, A., & Rooeciszewska, E. (2008). Feeding habits, fine structure and microhabitat preference of *Euthyplocia hecuba* (Hagen, 1861) (Ephemeroptera: Euthyplociidae) nymphs from Honduras. *Folia Biol.* 56, 43-49.
- Flowers, R., & De La Rosa, C. (2010). Ephemeroptera. *Rev. biol. trop.*, 58 (4), 63-93.
- Gaceta Oficial de Panamá Número 26078 (2008). Decreto Ejecutivo No. 75. Del 4 de junio de 2008. <https://www.gacetaoficial.gob.pa/Busqueda>
- Gualdrón-Durán, L. E. (2016). Evaluación de la calidad de agua de ríos de Colombia usando parámetros fisicoquímicos y biológicos. *Dinámica Ambiental*, 1, 83-102. <https://doi.org/10.18041/2590-6704/ambiental.1.2016.4593>
- Guinard, J. D. C., Ríos, T., & Bernal-Vega, J. A. (2013). Diversidad de macroinvertebrados acuáticos y calidad del agua de las cuencas alta y baja del río Gariché, provincia de Chiriquí, Panamá. *Gestión y Ambiente*, 16(2), 61–70.
- Gutiérrez-Fonseca, P. (2010). Plecoptera. *Rev. biol. trop.*, 58 (4), 139-148.
- Guzmán-Soto, C. J., & Tamarís-Turizo, C. E. (2014). Hábitos alimentarios de individuos inmaduros de Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera en la parte media de un río tropical de montaña. *Rev. biol. trop.*, 62(2), 169–178. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=44932430012>
- Hafizur, R. M., Nuralam, H. M., & Romainul, I. M. (2017). Investigation of physicochemical parameter, heavy metal in Turag river water and adjacent industrial effluent in Bangladesh. *Journal of Science, Technology and Environment Informatics*, 05(01), 347-360. Crossref: <http://doi.org/10.18801/jstei.050117.37>
- Holdridge LR. (1996). Ecología basada en zonas de vida. Quinta Reimpresión. San José, Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- Lombardo, R. C., & Rodríguez, V. (2008). Calidad biológica del agua de la parte media baja del río Santa María, provincia de Veraguas, república de Panamá. *Tecnociencia*, 10(1), 19–32.

- López, L. I.; Gutiérrez, P., & Mora, J. M. (2012). Macrofauna Acuática de la Quebrada Santa Inés, Subcuenca del Río Yeguaré. Honduras. *Revista Ceiba*. 51(1). 17-28.
- Merritt, R. W, Cummins, K. W., & Berg, M. B. (2008). An introduction to the aquatic insects of North America. 4th edition. Kendall/Hunt Publishing Company, 4050 Westmark Drive, Dubuque, Iowa, USA. 2008. 1158 pp.
- Montoya-Moreno, Y., Acosta, Y., y Zuluaga, E. (2011). Evolución de la calidad del agua en el río Negro y sus principales tributarios empleando como indicadores los índices ICA, el BMWP/Col y el ASPT. *Caldasia* 33(1): 193-210.
- Moresi, A. L., Ruiz-Díaz, J. D., Pellerano, R. G., & Vázquez, F. (2019). Caracterización fisicoquímica del río Corriente, aplicando Análisis de Componentes Principales y Análisis de Clústers. <https://repositorio.unne.edu.ar/handle/123456789/27983>
- Oscoz, J., Campos, F., & Escala, M. C. (2006). Variación de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos en relación con la calidad de las aguas. *Limnetica*, 25 (3): 683-692. (2006). DOI: 10.23818/limn.25.46
- Peel, M., Finlayson, B., & McMahon, T. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences* 11: 1633-1644. <https://dx.doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Peñañiel-Romero, A. G. (2014). Evaluación de la calidad del agua del río Tomebamba mediante el índice ICA del instituto mexicano de tecnología del agua. [Tesis de grado]. Universidad de Cuenca, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil. Ecuador. Págs, 90. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/items/6f7883a5-f680-41f6-87d0-a527c690c39c>
- Ramírez, A. (2010). Odonata. *Revista Biología Tropical*. 58 (4), 97-136,
- Reynaga, M, (2009), Hábitos alimentarios de larvas de Trichoptera (Insecta) de una cuenca subtropical. *Ecol. austral*. 19, 208-209.
- Rivera J. (2022). Teoría y métodos para la práctica de la Geografía Física: Estudio de casos - Panamá. Imp. Colombia. Panamá: Ed. Novo Art, S.A.
- Rivera-Usme, J. J., Pinilla-Agudelo, G. A., & Rangel-Ch, J. O. (2013). Ensamblaje de macroinvertebrados acuáticos y su relación con las variables físicas y químicas en el humedal de Jaboque-Colombia. *Caldasia* 35(2): 389-408.

- Rodríguez, C., Jurado, Y., & Rodríguez, V. (2022). Estructura numérica de los insectos acuáticos en la deriva y su relación con la comunidad bentónica, en un tramo del río Zaratí, provincia de Coclé, Panamá. *Tecnociencia*, Vol. 24, (1): 45-71
- Rodríguez, V. E., Duarte, G., & Fuentes, J. (2015). Familias y géneros de ninfas maduras de Ephemeroptera en los ríos de la provincia de Veraguas y su clasificación trófica en grupos funcionales alimentarios. *Tecnociencia*, 17(2), 73–89.
- Rodríguez, V. E., & Cárdenas, X. (2017). Estructura trófica de la entomofauna acuática y calidad del agua de los ríos Zaratí y La Chorrera, provincia de Coclé, república de Panamá. *Tecnociencia*, 19(1), 33–59.
- Rodríguez, V. E., & León, H. (2003). Insectos acuáticos asociados al río Tríbique, en el distrito de Soná, provincia de Veraguas. *Tecnociencia*, 5(1), 51–64.
- Rodríguez, V. E., & Sánchez, N. (2001). Entomofauna asociada al río Santa Clara en Veraguas, república de Panamá. *Tecnociencia*, 3(2), 73–87.
- Rodríguez, V., & Mendoza, M. (2003). Entomofauna acuática asociada al río Agué, en La Mesa, Veraguas, Panamá. *Tecnociencia*, 5(2), 109–119.
- Rodríguez, V., Acosta, S., & Aguilar, N. (2022). Estructura trófica de la comunidad de insectos acuáticos y calidad biológica del agua en un tramo de los ríos limón, Lovaina, Rosario¹, Rosario², Pixvae y De Mona, en el corregimiento de Pixvae, distrito de las Palmas, provincia de Veraguas. *Rev. Col. Cienc.*, Vol. 4 (1), pp. 62-85.
- Rodríguez, V., De Gracia, V., & Peña, B. (2014). Familias y géneros de Trichóptera en los ríos de la provincia de Veraguas y su clasificación trófica en grupos funcionales alimenticios funcionales. *Tecnociencia*, 16(2), 33–53.
- Rodríguez, V., González, E., & Rudas, J. (2017). Estructura comunitaria y grupos funcionales alimentarios de la entomofauna acuática del río Tríbique, distrito de Soná, provincia de Veraguas, Panamá. *Tecnociencia*, 19(1), 85–106.
- Rodríguez, V., Robles, N., & Pimentel, Y. (2009). Calidad biológica del agua de los ríos Sábalo, Piña, Ponuga, Pocrí y Suay en la provincia de Veraguas, Panamá. *Tecnociencia*, 11(1), 75–89.

- Rodríguez-Barrios, J., Ospina-Tórres, R., & Turizo-Correa, R. (2011). Grupos funcionales alimentarios de macroinvertebrados acuáticos en el río Gaira, Colombia. *Rev. Biol. Trop.* <https://www.scielo.sa.cr/pdf/rbt/v59n4/a09v59n4.pdf>
- Roldán-Pérez, G. (1988). Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del Departamento de Antioquia. Ed. Impreades Presencia S.A. Bogotá, Colombia. 217
- Roldán-Pérez, G. (1999). Los macroinvertebrados y su valor como indicadores de la calidad del agua. *Revista Acad. Colomb. Ci. Exact.* 23 (88), 375-387.
- Sánchez-Argüello, R., Cornejo, A., Boyero, L., Santos Murgas, A., Luisa, M., & Emails, P. (2010). Evaluación de la calidad del agua en la cuenca del río Capira, Panamá. *Tecnociencia*, 12(2), 57–70. <https://revistas.up.ac.pa/index.php/tecnociencia/article/view/905>
- Santamaría, E. E., & Bernal-Vega, J. A. (2016). Diversidad de macroinvertebrados acuáticos y calidad del agua en cuenca alta del río Chiriquí Viejo, provincia de Chiriquí, Panamá. *Tecnociencia*, 18, 1–24. <https://revistasvip.up.ac.pa/index.php/tecnociencias/article/view/821>
- Sermeño, J. M., Pérez, D., Paniagua Cienfuegos, M. R., Menjívar Rosa, R. A., Bonilla de Torres, B. L., Carranza Estrada, F. A., Ángeles Gonzales, C. de los., Flores Tensos, J. M., Gutiérrez Fonseca, Pablo., Hernández Martínez, M. Ángel., Arias de Linares, A. Yanira., & Monterrosa Urías, A. J. (2010). Determinación de la calidad ambiental de las aguas ríos de El Salvador, utilizando invertebrados acuáticos: índice biológico a nivel de familias de invertebrados acuáticos en El Salvador (IBF-SV-2010). Ciudad Universitaria, San Salvador, El Salvador
- Shah, K. A., & Joshi, G. S. (2015). Evaluation of water quality index for River Sabarmati, Gujarat, India. *Appl Water Sci.* Volume 7, pages 1349–1358. <https://link.springer.com/article/10.1007/s13201-015-0318-7>
- Springer, M. (2010). Trichoptera. *Revista Biología Tropical.* 58(4), 151-198.
- Sutherland, B., Meyer, J., & Gardiner, E. (2002) Effects of land cover on sediment regime and fish assemblage structure in four southern Appalachian streams. *Freshw. Biol.* 47: 1791-1805. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2427.2002.00927.x>
- Tomanova, S., Goitia, E., & Helešic, J. (2006). Trophic levels and functional feeding groups of macroinvertebrates in neotropical streams. *Hidrobiol.* 556(1), 251–264. <https://doi.org/10.1007/s10750-005-1255-5>

- Valdés-Sánchez, V. V., & Castillo-Adams, H. J. (2023). Calidad biológica de cuatro ríos de la provincia de Bocas del Toro con el uso de macroinvertebrados acuáticos. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(3), 1736–1760. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i3.6307
- Winton, R. S., Calamita, E., & Wehrl, B. (2019) Reviews and syntheses: Dams, water quality and tropical reservoir stratification, *Biogeosciences*, 16, 1657–1671, <https://bg.copernicus.org/articles/16/1657/2019/>
- Winton, R. S., López-Casas, S., Valencia-Rodríguez, D., Bernal-Forero, C., Delgado, J., Wehrl, B., & Jiménez-Segura, L. (2023). Patrones y factores impulsores de cambios en la calidad del agua asociados a embalses en los Andes tropicales. *SciELO Scientific Electronic Library Online*. <https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.5549>.



Estructura poblacional del gato doméstico *Felis catus* (Carnivora: Felidae) en el Campus Central de la Universidad de Panamá, ciudad de Panamá, Panamá

Population structure of the domestic cat *Felis catus* (Carnivora: Felidae) at the Central Campus of the University of Panama, Panama City, Panama

Jenny Cedeño

Universidad de Panamá, Programa de Maestría en Ciencias Biológicas, Panamá.

jcedenio2000@yahoo.es

<https://orcid.org/0000-0003-1762-9457>

Orlando Ortiz

Universidad de Panamá, Programa de Maestría en Ciencias Biológicas, Panamá

ortizopma@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-7805-0046>

Christel Ramos

Universidad de Panamá, Programa de Maestría en Ciencias Biológicas, Panamá

christel.ramos@fgml.com

<https://orcid.org/0000-0003-3334-4929>

Lany Valdés

lanyvalds@yahoo.com

<https://orcid.org/0009-0005-7611-1502>

Jaime R. Rau

Universidad de Los Lagos, Departamento de Ciencias Biológicas & Biodiversidad, Laboratorio de Ecología, Campus Osorno, Casilla 933, Osorno. Chile.

jrau@ulagos.cl

<https://orcid.org/0000-0003-0444-578X>

Fecha de recepción: 1 de abril de 2025

Fecha de aceptación: 30 de octubre de 2025

DOI: <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v28n1.a8954>

RESUMEN

Por su impacto sobre presas nativas y transmisión de enfermedades los gatos domésticos están considerados entre los 100 invasores biológicos más dañinos del mundo. Dentro de los objetivos de este estudio está saber cuál es la estructura poblacional del gato doméstico. Para ello se estimó la abundancia y densidad de la especie, su estructura de edades y tasa de sexos a través de métodos de captura, marca y recaptura fotográfica. La

población de gatos se caracterizó por la dominancia de individuos adultos, comparativamente con otros estudios estos presentaron una baja abundancia y densidad y una proporción de sexos 1:1. Para calcular la abundancia de la población de gatos el método de captura, marca y recaptura de Schnabel presentó una estimación más robusta y confiable que el método de Lincoln-Petersen.

PALABRAS CLAVE

Área urbana, ecología de poblaciones, estructura de edades, tasa de sexos

ABSTRACT

Because its impact on native prey and transmission of diseases domestic cats are considered among the 100 most harmful biological invaders in the world. Among the objectives of this study is to determine the population structure of the domestic cat. To this end, the abundance and density of the species, its age structure, and sex ratio were estimated using capture, mark, and recapture photography. The cat population was characterized by the dominance of adult individuals; compared to other studies, these showed low abundance and density and a 1:1 sex ratio. Schnabel's capture-mark-recapture method provided a more robust and reliable estimate of cat population abundance in comparison with the Lincoln-Petersen method.

KEYWORDS

Age structure, population ecology, urban area, sex ratio

INTRODUCCIÓN

La estimación de la abundancia de poblaciones de mamíferos es un componente importante de los programas de monitoreo, para proveer datos para manejo, y de las investigaciones ecológicas, para describir patrones de distribución de mamíferos y explicar los procesos que determinan esas distribuciones (Walker *et al.*, 2000). Según Anderson *et al.* (1996), los estudios sobre las poblaciones de animales domésticos, como el gato, son necesarios para la planificación de acciones sanitarias.

Los gatos domésticos (*Felis catus*) son abundantes en áreas urbanas (Driscoll *et al.* 2007). Su ciclo reproductivo es relativamente corto, son capaces de producir hasta cuatro camadas por año y hasta ocho crías por camada. Los individuos alcanzan la madurez sexual entre los siete a 12 meses de edad y tienen un tiempo de gestación de 56 a 69 días. Por otro lado, los gatos en estado feral pueden causar disminuciones o extinciones de especies nativas (Barratt, 1997). Además, estos felinos son considerados como una de las 100 especies exóticas invasoras más dañinas del mundo puesto que impactan negativamente sobre presas nativas y transmiten enfermedades (Lowe *et al.*, 2000).

En un estudio realizado por Sáez & De la Rosa (2013), en el Campus Central de la Universidad de Panamá, se menciona que la prevalencia de *Toxoplasma gondii* está estrechamente relacionada con la presencia de gatos, representando un peligro potencial en la transmisión de infecciones por enteroparásitos (véase un meta-análisis efectuado para Latinoamérica en Bonilla-Aldana *et al.*, 2023).

Por ello, la finalidad de este estudio es determinar la estructura poblacional del gato doméstico como base para la creación de futuras medidas de manejo o control de dicha población en el campus central de la Universidad de Panamá.

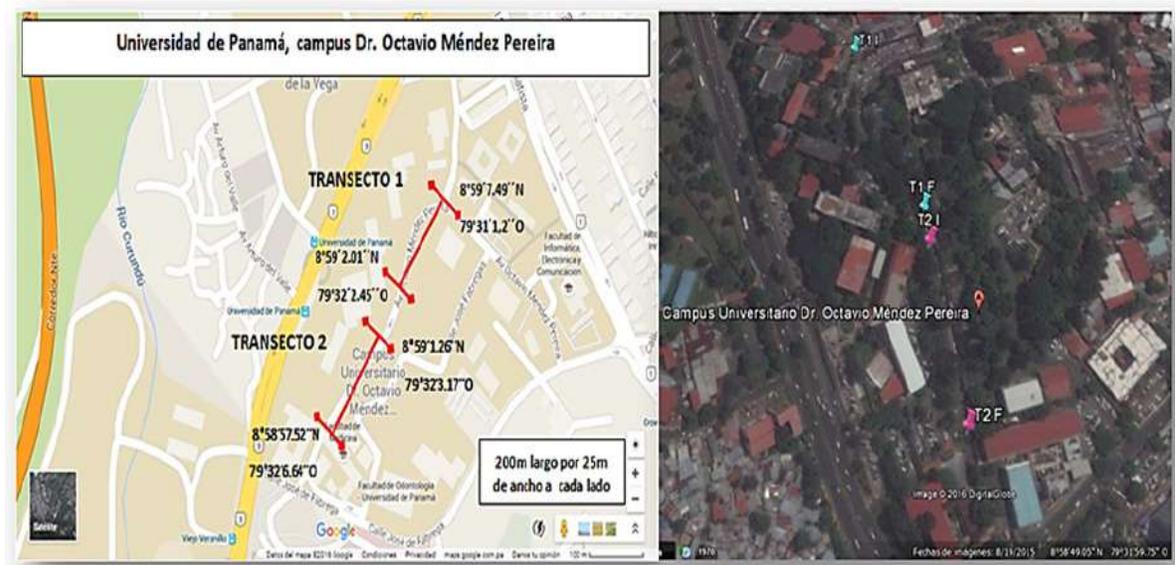
MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Este trabajo se realizó en el Campus Central de la Universidad de Panamá, ciudad de Panamá, Panamá, localizado en la Vía Transistmica en la urbanización El Cangrejo (Fig. 1). El área cubierta se estimó en 30 ha.

Figura 1.

Sitio de estudio. Transectos ubicados dentro de la Universidad de Panamá, Panamá, Campus Central de la Universidad de Panamá, ciudad de Panamá.



Trabajo de Campo

Se realizaron tres muestreos del 11 al 13 de enero de 2016, en dos transectos de 200 m de longitud y 50 m de ancho para cubrir apropiadamente el área de estudio (Fig. 1). El recorrido de los transectos inició primero a las 8:00 am, con una duración de 30 minutos por cada uno. Al visualizar y encontrar los gatos en los transectos se registró en base a su tamaño corporal y comportamiento el número de individuos juveniles y adultos, el número de machos y hembras y la posición global (GPS). Posteriormente, se observó el patrón de coloración, manchas y cicatrices en la cabeza, tronco, cola y patas para la identificación correcta de los individuos. Además, se tomaron fotografías en distintos ángulos con una cámara digital.

Las imágenes de los individuos fueron seleccionadas de acuerdo a sus patrones de coloración y rasgos morfométricos y se le asignó un código en una tabla de anotaciones, las cuales fueron utilizadas para evitar duplicación de los registros.

Método de Captura y Recaptura (CMR)

Puesto que se utilizó un método CMR, en este trabajo una “captura” fue definida como la observación de un individuo en un día de muestreo y una “recaptura” como el mismo individuo fotografiado e identificado en el siguiente muestreo.

Análisis de datos

Abundancia

Las estimaciones de la abundancia de *Felis catus* fueron generadas con dos métodos: Lincoln-Petersen y Schnabel, utilizando el programa *Ecological Methodology* versión 6.1 (Krebs, 1999).

El método de Lincoln-Petersen requiere tomar datos de dos eventos, una donde se capturan y marcan (en este estudio se utilizó el patrón de coloración y otros rasgos morfológicos para diferenciar entre animales) los individuos, la segunda donde se capturan y se cuentan los individuos capturados con marcas (Alcoy, 2013). El estimador de Schnabel extiende el método de Lincoln-Petersen para estimar el tamaño poblacional de un estudio de captura-marca-recaptura, cuando la captura y las marcaciones ocurren en diversas ocasiones (Schnabel, 1938). Los límites aproximados de confianza al 95% para este estimador se obtuvieron tratando al total de recapturas como una variable de Poisson (Krebs, 1999).

Método de Lincoln-Petersen

$$\hat{N} = \frac{M(C + 1)}{(R + 1)}$$

M= Número de individuos marcados por primera vez

C= Total de números de individuos capturados la segunda vez

R= Número de individuos que fueron recapturados la segunda vez

N= Número estimado de la población

Método de Schnabel

$$\hat{N} = \frac{\sum_t (C_t M_t)}{\sum_t R_t}$$

Ct = Número de individuos capturados la primera vez en la muestra t

Rt = número de individuos que ya están marcados, cuando son capturados en la muestra t

Mt= número total de animales previamente marcados en el tiempo t

Densidad

La densidad absoluta se define como el número de individuos expresado por unidad de área (Brower *et al.*, 1997). La densidad se estimó utilizando la siguiente ecuación:

$$\hat{D} = \frac{n}{2L(D)}$$

n= Tamaño de la muestra

L= Longitud del transecto

D= ancho del transecto

Tasa de sexos y estructura de edades

Para estimar la proporción de sexos y edades de la muestra, se utiliza la siguiente fórmula:

$$\hat{p} = a/n \quad \text{donde,}$$

a= número de individuos por sexo/edad

n= tamaño de la muestra

Para estimar la tasa de sexo y la distribución de edades se utilizó el programa *Ecological Methodology* versión 6.1 (Krebs, 1999). Los gráficos se construyeron con el programa EXCEL.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se registraron 42 individuos en total, 23 en el primer transecto y 19 en el segundo (Anexo 1).

Abundancia

Tabla 1.

Estimación de la población de gatos utilizando el estimador de Lincoln-Petersen y Schnabel.

Índice	Población estimada	Límite inferior	Límite superior
Petersen	46	32	95
Schnabel	75	46	130

*límites con un 95% de confianza

Al comparar los métodos de Lincoln-Petersen y Schnabel; el primero presentó un valor de abundancia más bajo (ver Cuadro 1). La literatura indica que el método de Lincoln-Petersen tiende a sobre estimar el tamaño de la población (Seber, 1973; Krebs, 1999). El método de Schnabel es considerado, según Krebs (1999), uno de los más robustos empleados en estudios ecológicos.

Es probable que en este estudio la abundancia de gatos observada sea mayor a la estimada, debido al poco esfuerzo de muestreo y al tamaño del área muestreada.

Por otra parte, las estimaciones se efectuaron durante el día y se ha informado que la actividad de los gatos aumenta durante la noche (Romanowski 1998). Así, futuras estimaciones deben evaluar la población de gatos en el Campus Central de la Universidad de Panamá durante el día y también la noche.

Densidad

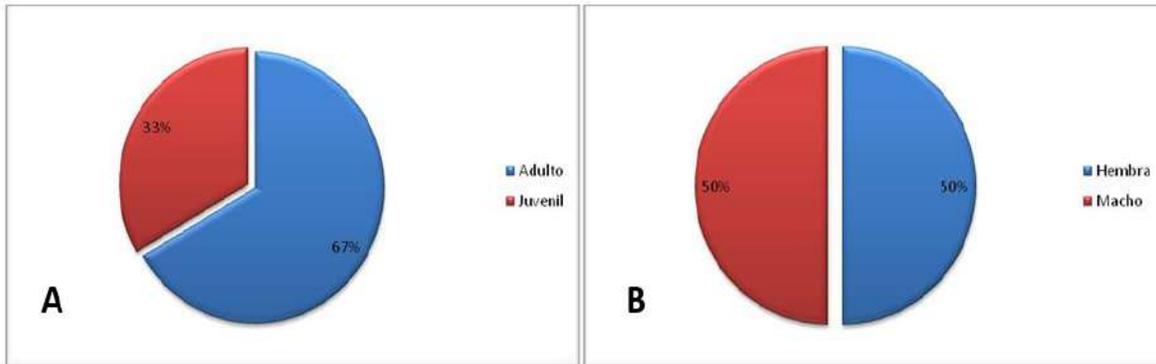
Para el primer transecto, se obtuvo una densidad de 1.15 gatos por km² (obtenida de dividir el tamaño de la población por el área de muestreo), mientras que, para el segundo transecto, se obtuvo una densidad de 0.95 por km². Empleando el valor de abundancia de Schnabel, se obtuvo una densidad de 2 gatos por km². Utilizando el valor obtenido de abundancia con el método de Lincoln- Petersen, se obtuvo una densidad de 1.15 gatos por km². Nuestros resultados indican que la densidad poblacional es baja, comparada con otros estudios realizados en áreas urbana (Sims *et al.*, 2008; Lessa & Bergallo, 2012; Thomas *et al.*, 2012, 2014).

Tasa de sexos y estructura de edades

Se categorizaron 28 individuos adultos y 14 individuos juveniles (N = 42). Para 36 animales se obtuvo una proporción de sexos de 1:1, 18 machos y 18 hembras (Fig. 2).

Figura 2.

Representación gráfica de la tasa de edades (A) y la tasa de sexos en *Felis catus* (B).



Proporción de sexos.

Se obtuvo una proporción de sexos observada de 50% (Fig. 2B). Los límites de confianza para una población finita oscilan entre 49% a 51%. Según Thomas *et al.* (2014), no hay diferencias significativas entre el número de machos y hembras en su área máxima diaria de zona urbana.

Proporción de edades.

Se obtuvo una proporción de 67% de individuos adultos, con límites de confianza al 95% de 65% a 68% para una población finita (Fig. 2A). Estos resultados sugieren que la población de gatos en el campus va a ir aumentando a través del tiempo.

CONCLUSIONES

Aunque comparativamente la densidad de gatos fue baja, de acuerdo con los datos obtenidos para la tasa de sexos y la estructura de edades se postula que, sin un adecuado control, la población de gatos domésticos en el campus de la Universidad de Panamá podría aumentar y verse afectadas las poblaciones de aves, ardillas y lagartijas dentro del campus. Por ello, se recomiendan más estudios para evaluar su impacto sobre estas presas potenciales y su papel como vectores transmisores de enfermedades.

AGRADECIMIENTOS

El último autor (JRR) agradece al M. Cs. Jacobo Arauz por haberle invitado a impartir un curso de ecología de poblaciones a estudiantes de la Maestría en Ciencias Biológicas de la Universidad de Panamá, Ciudad de Panamá, Panamá. La coautora LV agradece a la SENACYT de Panamá- contrato de subsidio económico DDCCT N° 004-2023 por financiar su estadía en la Universidad de Los Lagos, Chile, donde se escribió la versión final de este manuscrito. Finalmente, se agradece a tres revisores anónimos por sus acuciosas críticas y comentarios que mejoraron este texto y al editor de la revista por su constructiva ayuda. Finalmente agradecemos el apoyo invaluable brindado por el Licenciado Steve González (QEPD), por la concreción de esta investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcoy JC. 2013. The Schnabel Method: An Ecological Approach to Productive Vocabulary Size Estimation. *International Proceedings of Economics Development and Research* Vol. 68 N° 5.
- Anderson P, Beaudoin J, Castro J González B, Landi, P, Marcos E, Molina J. 1996. Relevamiento demográfico de animales domésticos en la Ciudad de Buenos Aires (1994). *Revista de Medicina Veterinaria*, Vol. 3 N° 77.
- Barrat, DG. 1997. Home ranges size, habitat utilization and movement patterns of suburban and farm cats, *Felis catus*. *Ecography* 20(3): 271–280.
- Bonilla-Aldana DK, Morales-García LV, Ulloque Badaracco JR, Mosquera-Rojas MD, Alarcón-Braga EA, Hernandez-Bustamante EA, Al-kassab-Córdoba A, Benites-Zapata VA, Rodriguez-Morales AJ, Delgado O. 2023. Prevalence of *Toxocara* eggs in Latin American parks: a systematic review and meta-analysis. *Infez. Med.* 31(3): 329-349.
- Brower J, Zar J, von Ende C. 1997. *Field and laboratory methods for general ecology*. 4th ed. WCB/McGraw-Hill.
- Driscoll CA, Menotti-Raymond M, Roca AL, Hupe K, Johnson WE, Geffen E, Harley EH, Delibes M, Pontier D, Kitchener AC, Yamaguchi N, O'Brien SJ, Macdonald DW. 2007. The Near Eastern Origin of Cat Domestication. *Science* 317: 519-523.
- Dubey, J.P. (2009). *Toxoplasmosis of Animals and Humans*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.

- Krebs, C. J. 1999. Ecological methodology (Vol. 620). Menlo Park, California: Benjamin/Cummings.
- Lessa ICM. & Bergallo HG. 2012. Modelling the population control of the domestic cat: an example from an island in Brazil. *Braz. J. Biol.* 72(3): 445-452.
- Lowe S, Browne M, Boudjelas S, De Poorter, M. 2000. 100 of the world's worst invasive alien species: a selection from the global invasive species database. Invasive Species Specialist Group Species Survival Commission, World Conservation Union (IUCN), Auckland, New Zealand.
- Romanowski J. 1988. Abundance and activity of the domestic cat (*Felis catus L.*) in the suburban zone. *Polish Ecological Studies* 14: 213–221
- Sáez V, De la Rosa Y. 2013. Prevalencia de *Toxoplasma gondii* y otros enteroparásitos en suelos y pastos en la Universidad de Panamá. Tesis de Licenciatura.
- Schnabel, ZE. 1938. The estimation of the total fish population of a lake. *The American Mathematical Monthly* 45(6), 348-352.
- Seber GAF. 1973. The estimation of animal abundance and related parameters. Bristol: J. W. Arrowsmith Ltd.
- Sims V, Evans KL, Newson, S.E., Tratalos, J.A., Gaston, K.J. 2008. Avian assemblage structure and domestic cat densities in urban environments. *Divers Distrib* 14(2):387–399.
- Thomas RL, Fellowes MDE, Baker PJ. 2012. Spatio-temporal variation in predation by urban domestic cats (*Felis catus*) and the acceptability of possible management actions in the UK. *PLoS One* 7(11): e49369.
- Thomas RL, Baker PJ, Fellowes MD. 2014. Ranging characteristics of the domestic cat (*Felis catus*) in an urban environment. *Urban Ecosystems* 17: 911-921.
- Walker RS, Novaro AJ, Nichols JD. 2000. Consideraciones para la estimación de abundancia de poblaciones de mamíferos. *Mastozoología Neotropical* 7(2) :73-80.

ANEXO 1.

Imágenes de Felis catus observados en el Campus Central de la Universidad de Panamá, Panamá.





Caracterización morfodinámica y mecanismos de estructuración de la playa Monagre, Los Santos, Panamá.

Morphodynamic characterization and morphological structuring of Monagre beach, Los Santos, Panama

Maritzel Carrera Flores

Universidad de Panamá, Centro Regional Universitario de Azuero, Escuela de Biología, Panamá.

maritzelc01@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0002-0356-0567>

Nelva Villarreal

Universidad de Panamá, Centro Regional Universitario de Azuero, Escuela de Biología, Panamá.

nelva.villarreal@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0001-5091-9945>

Italo Goti

Universidad de Panamá, Centro Regional Universitario de Azuero, Escuela de Biología, Panamá.

italo.goti@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0001-5702-5389>

Juan Antonio Gómez H.

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Escuela de Biología, Panamá.

Juanay05@hotmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-8548-3018>

Fecha de recepción: 29 de septiembre de 2025

Fecha de aceptación: 31 de octubre de 2025

DOI: <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v28n1.a8955>

RESUMEN

Se determinó la característica morfodinámica y el tipo de ola de rompiente de la playa Monagre, Los Santos, Panamá, a través de la evaluación de variables oceanográficas (altura, período y amplitud de la ola de rompiente, ángulo de incidencia de la ola sobre la playa); morfológicas (pendiente, granulometría y amplitud de la playa) y meteorológicas (dirección y velocidad del viento), a través de visitas mensuales, el día de marea más baja de sicigia, entre marzo y agosto de 2021. La tangente de la pendiente varió de 0,0164 en el transecto M1, con amplitud de la playa de 88,66 m y 0,0130 en el transecto M2, con largo de 110,40 m. La granulometría se caracterizó por ser arena fina ($Mz = 2,23 \phi$). La playa se interpretó como disipativa, de acuerdo al Parámetro de escala de rompiente ($639,92 \pm 119,15$) y el Índice de similaridad de surf ($0,0018 \pm 0,0013$) y olas “spilling”,

según el Número de Iribarren ($0,1492 \pm 0,0865$) y el Parámetro de Galvin ($0,1749 \pm 0,166$), durante todo el período de estudio, además de la presencia de una sola barra transversal, según el Parámetro de barra ($26,01 \pm 27,15$). De acuerdo a lo obtenido se construyó un modelo de la interacción de las variables y el efecto mixto del oleaje y las mareas en la estructuración morfológica de la playa, aunado al impacto del viento.

PALABRAS CLAVE

Intermareal, playa arenosa, hidrodinámica costera, modelo morfológico, evolución costera

ABSTRACT

The morphodynamic characteristics and type of breaking wave at Monagre Beach, Los Santos, Panama, were determined through the evaluation of oceanographic variables (height, period and amplitude of the breaking wave, angle of incidence of the wave on the beach); morphological variables (slope, granulometry and width of the beach) and meteorological variables (wind direction and speed), through monthly visits, on the day of the lowest syzygy tide, between March and August 2021. The tangent of the slope varied from 0.0164 in transept M1, with a beach width of 88.66 m, and 0.0130 in transept M2, with a length of 110.40 m. The granulometry was characterized by being fine sand ($Mz = 2.23 \phi$). The beach was characterized by being dissipative type, according to the Break Scale Parameter (639.92 ± 1119.15) and the Surf Similarity Index (0.0018 ± 0.0013) and “spilling” type waves, according to the Iribarren Number (0.1492 ± 0.0865) and the Galvin Parameter (0.1749 ± 0.166), throughout the study period, in addition to the presence of a single transverse bar, according to the Bar Parameter (26.01 ± 27.15). According to the obtained data, a model was constructed of the interaction of the variables and the mixed effect of waves and tides on the morphological structuring of the beach, in addition to the impact of the wind, was built.

KEYWORDS

Intertidal, sandy beach, coastal hydrodynamic, morphologic model, coastal evolution.

INTRODUCCIÓN

La zona costera es una de las áreas más dinámicas del planeta, se registran constantes cambios en el espacio y tiempo (Muehe, 2021), que pueden darse a microescala y mesoescalas, principalmente por el efecto de mareas, el oleaje y el desbalance sedimentario (Pardo-Pascual et al., 2019). De acuerdo a Short & Jackson (2013), las interacciones que se producen en la playa, mediante procesos de asomeramiento, el quiebre de las olas y su expresión en el sustrato durante estos cambios constantes se reflejan en características morfodinámicas específicas.

La extensión y las características morfosedimentarias de las playas arenosas dependen básicamente de la variación de las mareas, la altura y el periodo de las olas, el tamaño del grano de sedimento transportado en el agua y de la forma de la playa (Short, 1999). De

acuerdo al grado de exposición de estos a los agentes hidrodinámicos los hacen variables, y experimentan diferentes niveles de energía del oleaje y, en consecuencia, distintas características morfológicas y sedimentarias (Oliveira et al., 2012).

En Panamá, algunos estudios realizados en el área de interés de la presente investigación, específicamente en las playas de El Rompió y Los Guayaberos, se destacan los efectos morfológicos, oceanográficos y morfodinámicos entre mayo y noviembre de 2011, en ambas playas (Valdés, 2013). La evaluación de las características morfodinámicas y la relación de las variables que intervienen en el comportamiento morfológico de la playa (González, 2013) y la dinámica de los procesos erosivos/acrecivos a mediano plazo entre los años 2011 al 2017 (Goti, 2017), son elementos que describen las geoformas de la playa.

Evaluar las características morfodinámicas de playas arenosas mediante la caracterización de los agentes que la modelan, facilitan la aplicación de estrategias de gestión costera y el estudio de los procesos de erosión y acreción que modifican la playa (Short & Jackson, 2013; Manso et al., 2003). Por tales razones el objetivo de la presente investigación es determinar las características morfodinámicas de la playa Monagre, Los Santos, Panamá, a través de variables oceanográficas, morfológicas y climáticas, deslindar la estructura que la define y el desarrollo de un modelo conceptual que la caracterice.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló en la playa Monagre, Los Santos, Panamá, situada en el borde oriental de la península de Azuero, Golfo de Panamá, a $7^{\circ} 58' 41,59''$ N $80^{\circ} 20' 47,99''$ O, de carácter rectilínea, en la margen derecha de la desembocadura del río La Villa (Figura 1). Se establecieron dos perfiles, perpendiculares a la línea de la playa.

Las muestras se tomaron una vez al mes, en período de la marea más baja de sicigia en la mañana, entre marzo y agosto de 2021.

Figura 1.

Sitio de estudio, playa Monagre, Los Santos, Panamá



Se determinaron las variables ligadas a procesos morfodinámicos: altura de la ola de quiebre (H_b), con jalón graduado, período (T), con cronómetro, amplitud (L_b) con cinta graduada de fibra de vidrio, a partir de lo cual se calculó el peralte de la ola de rompiente (H_b/L_b), la energía (E) y la celeridad (c) de la ola. La dirección de la ola (Dir α) se definió con brújula lensática y el ángulo de incidencia de esta sobre la playa (α), con transportador, la velocidad del viento (U) con anemómetro Skywatch Eole y la dirección del viento (Dir U) con veleta. Se calculó la amplitud relativa de la marea de sicigia (RTR), según Masselink & Short (1993), además de los perfiles de la playa ($\tan \beta_1$ y $\tan \beta_2$), con distancia de 480 m entre transeptos, mediante el método de Emery (1961), con mediciones cada 2 m. Además, la presencia de barras transversales según el Parámetro de barra (B^*) (Short & Aagaard, 1993).

El análisis granulométrico se realizó mediante el método de tamizado en seco (Suguio, 1973), y los valores estadísticos se expresaron de acuerdo a las ecuaciones de Folk & Ward (1957), granulometría media (Mz), clasificación (σ_1), asimetría (S_{K1}) y curtosis (K_G).

Con los valores obtenidos se calcularon los índices morfodinámicos: Índice de similaridad de surf (ξ) (Battjes, 1974), número de Iribarren (ξ_b) (Iribarren & Nogales, 1949), parámetro de escala de rompiente (ϵ) (Guza & Inman, 1975) y el parámetro de Galvin (B) (Galvin, 1968), mediante las ecuaciones indicadas en la Tabla 1. Además, se determinó la salinidad del agua (Sal) con refractómetro óptico, modelo Extex. Los análisis estadísticos se desarrollaron con los paquetes: PAST 4.0 y BioEstat 3.5.

Tabla 1.*Índices para la determinación de las características morfodinámicas de playas arenosas*

Índice	Ecuación y valor límite	Componentes y clasificación
Índice de similaridad de surf (ξ) (Battjes, 1974)	$\xi = \frac{\tan \beta}{\sqrt{\frac{2\pi H_i}{gT^2}}}$ $\xi < 0,5$	ξ = Índice de similaridad de Surf = $I_r = \xi_o$ tan β = Pendiente de la playa = m H_o = altura de la ola en profundidad L_o = Longitud de onda del oleaje en aguas profundas Olas “spilling”
Número de Iribarren (ξ_b) (Iribarren & Nogales, 1949)	$I_r = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H/L_o}}$ $< 0,2$	I_r = Número de Iribarren tan α = pendiente de la playa H = altura de la ola de rompiente L_o = Amplitud de la ola profunda Olas “spilling”
Parámetro de escala de rompiente (ϵ) (Guza & Inman, 1975)	$\epsilon = \frac{\sigma^2 H_b}{2g \tan^2 \beta}$ $\epsilon > 20$	ϵ = Parámetro de escala de rompiente σ = Frecuencia de oleaje en radianes (1/s) H_b = Altura de la ola de rompiente g = Aceleración de la gravedad tan β = Pendiente de la playa Playa disipativa
Parámetro de Galvin (B) (Galvin, 1968)	$B = \frac{H_b}{g \cdot m \cdot T^2}$ $B > 0,068$	B = Parámetro de Galvin H_b = Altura de la ola de rompiente g = aceleración de la gravedad T = período de la ola tan β = Pendiente de la playa m = pendiente de la playa Olas “spilling”
Amplitud relativa de la marea (RTR)	$RTR = \frac{TR}{H_b}$ $RTR > 15$	RTR = Amplitud relativa de la marea TR = Amplitud promedio de marea en épocas de marea de sicigia = CM, carrera de marea H_b = Altura de la ola de rompiente Playa en transición dominada por la marea
Parámetro de barra Short & Aagaard (1993)	$B^* = \frac{X_s}{g \cdot T^2 \cdot \tan \beta}$ $B^* < 50$	B^* = Parámetro de barra X_s = alargamiento da zona de surf g = aceleración de La gravedad T = Período de la ola tan β = pendiente de la playa Barra única

RESULTADOS

Las variables que caracterizan la morfodinámica de la playa presentaron el siguiente promedio \pm d.s., la altura media de la ola, $0,18 \pm 0,0393$ m, período $3,15 \pm 0,4662$ s, amplitud de la ola $65,50 \pm 11,768$ m, velocidad del viento $8,52 \pm 4,9201$ m/s, energía de la ola $0,0408 \pm 0,017$ joules/m², celeridad $1,65 \pm 0,4512$ m/s, peralte $0,0362 \pm 0,0094$, amplitud relativa de la marea $30,03 \pm 57,53$ (Tabla 2).

El ángulo de incidencia de la ola sobre la playa mostró una media angular \pm desviación angular de $2,6^\circ \pm 0,4359^\circ$, la dirección de la ola media fue de este-noreste, $79,18^\circ \pm 8,77^\circ$ y la dirección del viento, del norte, $337,86^\circ \pm 57,76^\circ$.

La pendiente de la playa $\tan \beta_1$, varió entre 0,0034 y 0,0312, con longitud del transepto, representado como amplitud de la playa (Y_b), que osciló entre 82 a 94 m, con promedio de $85,20 \pm 3,45$ m en el perfil M1 y de $135,0 \pm 11,49$ m en el M2 (Figura 2).

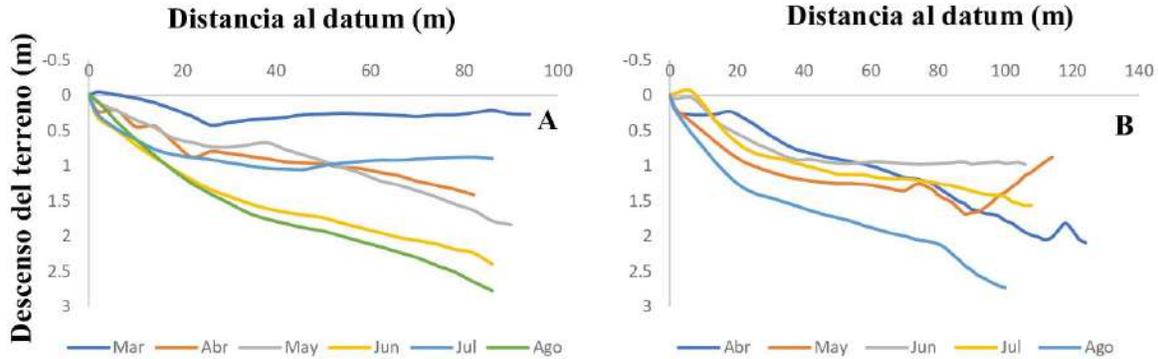
Tabla 2.

Estadística básica de las variables medidas y calculadas que definen la característica morfodinámica de la playa.

Variables	Unidad	\bar{x}	d.s.	Var.	Mín.	Máx.
H_b	m	0,18	0,0393	0,0015	0,13	0,22
T	s	3,15	0,4662	0,2173	2,69	3,74
L_b	m	5,10	11,768	1,3849	2,8	6,09
T °C	°C	32,17	1,472	2,1667	30	34
S o/oo	UPS	21,83	2,4014	5,7667	20	26
U	m/s	8,52	4,9201	24,2071	3,08	17,49
$\tan \beta_1$		0,0164	0,0103	0,0001	0,0034	0,0312
E	joules/m ²	0,0408	0,017	0,0003	0,0229	0,0615
c	m/s	1,65	0,4512	0,2036	0,98	2,20
H_b/L_b		0,0362	0,0094	0,0001	0,023	0,048
RTR		30,03	57,533	33,101	23,74	37,69
ε		639,92	1119,15	1252500	47,09	2894,66
Y_b	m	88,67	48,442	23,4667	82	94
ζ		0,0018	0,0013	0	0,0003	0,0038
ζ_b		0,1492	0,0865	0,0075	0,0329	0,2583
B		0,1749	0,166	0,0275	0,04249	0,4945
B*		26,0170	27,1558	737,44	0	70,57

Figura 2.

Variación mensual de los perfiles de la playa Monagre, entre marzo y agosto de 2021. A. Perfil M1, β_1 , B. Perfil M2, β_2 .



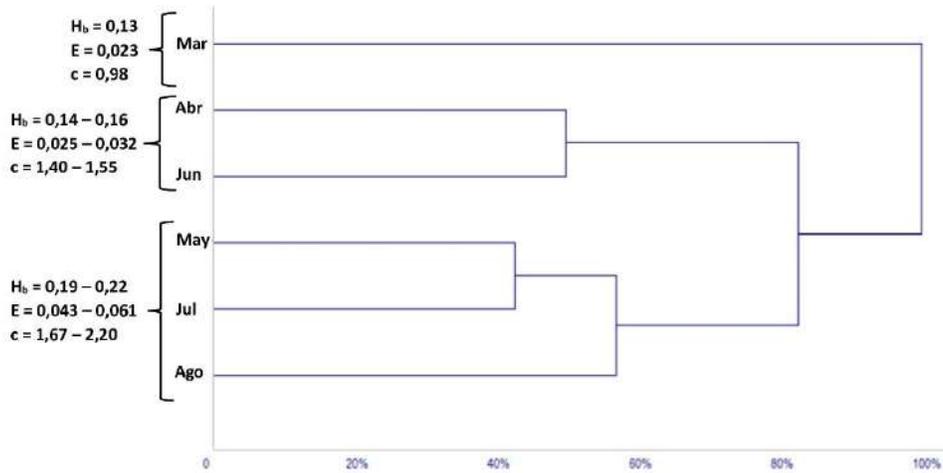
La granulometría media (M_z) promedio fue de $2,23 \pm 0,39 \phi$, correspondiente a arena fina, la clasificación (σ_1), $0,91 \pm 0,22$, a sedimento moderadamente seleccionado, asimetría (S_{KI}), de $0,23 \pm 0,19$ que correspondió a asimetría positiva y la curtosis (K_G) de $1,02 \pm 0,19$ que indica ser leptocúrtica.

Los índices morfodinámicos obtenidos fueron: Parámetro de escala de rompiente (ϵ), $639,92 \pm 1119,50$ con valores entre 47,09 y 2894,66, que caracterización a la playa como disipativa. El Índice de similaridad de surf (ξ), $0,0018 \pm 0,0013$, número de Iribarren (ξ_b), $0,1492 \pm 0,0865$ y el parámetro de Galvin (B) $0,1749 \pm 0,1660$, caracterizaron a las olas como tipo “spilling”, propio de playas morfodinámicamente disipativas (Cuadro 1). No se observó diferencias entre período seco y lluvioso, sin embargo, el dendrograma muestra similitud temporal entre meses no continuos (Figura 3).

El parámetro de barra (Short & Aagaard, 1993) calculado presentó un promedio de $20,02 \pm 27,15$, lo que indico la presencia de solo una barra transversal en la playa.

Figura 3.

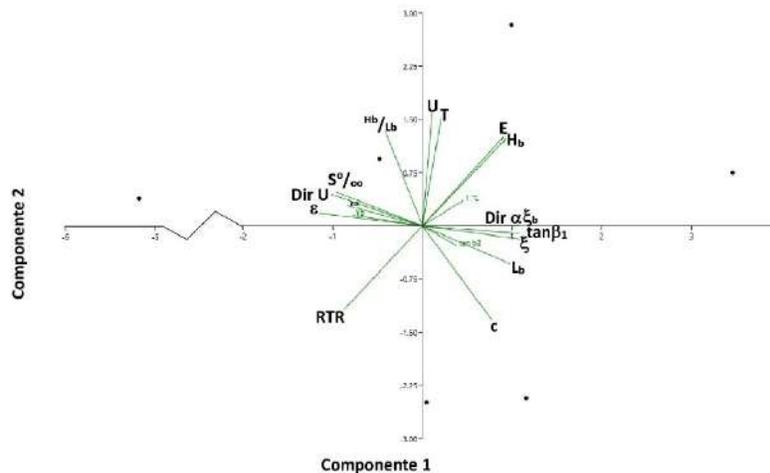
Dendrograma según método de Ward y distancia de Bray-Curtis, de similitud temporal de las características morfodinámicas de la playa Monagre de marzo a agosto de 2021.



Las principales variables que definen las características morfodinámicas de la playa fueron la dirección de la ola ($Dir \alpha$), la pendiente de la playa ($\tan \beta_1$), el número de Iribarren (ξ), la velocidad del viento (U) y el período de la ola (T), sin embargo, la caracterización de esta se describe a partir del resto de las variables destacadas en color negro de la figura 4, que se reflejan en el análisis de componentes principales (ACP) y que explican el 67 % de la variabilidad de este. Las variables de color verde de la figura no presentaron evidencia estadística que puedan influir sobre las características de la playa (Figura 4).

Figura 4.

Análisis de componentes principales de las variables de estudio en la playa Monagre



El Índice de similaridad de surf, la pendiente de la playa, la dirección de la ola, el número de Iribarren y la amplitud de la ola, explicaron directamente el componente 1, mientras que la salinidad, la dirección del viento y el parámetro de escala de rompiente, lo hicieron de manera inversa. La velocidad del viento, el período de la ola, el peralte, la energía, la altura de la ola, explicaron el componente 2 directa e inversamente por la amplitud relativa de la marea y la celeridad (Figura 4).

La altura de la ola se correlacionó con la energía de la ola ($r_s = 0,9856$ $p = 0,003$) y con la amplitud relativa de la marea ($r_s = 0,9276$ $p = 0,0077$), el período de la ola con la velocidad del viento ($r_s = 1,0$ $p < 0,0001$), el peralte se relacionó inversamente con la amplitud de la ola ($r_s = -0,9276$ $p = 0,0007$) con la celeridad ($r_s = -0,8986$ $p = 0,007$) y (Tabla 3).

Tabla 3.

Índice de correlación de Spearman y p-valor de la relación de las variables lineales

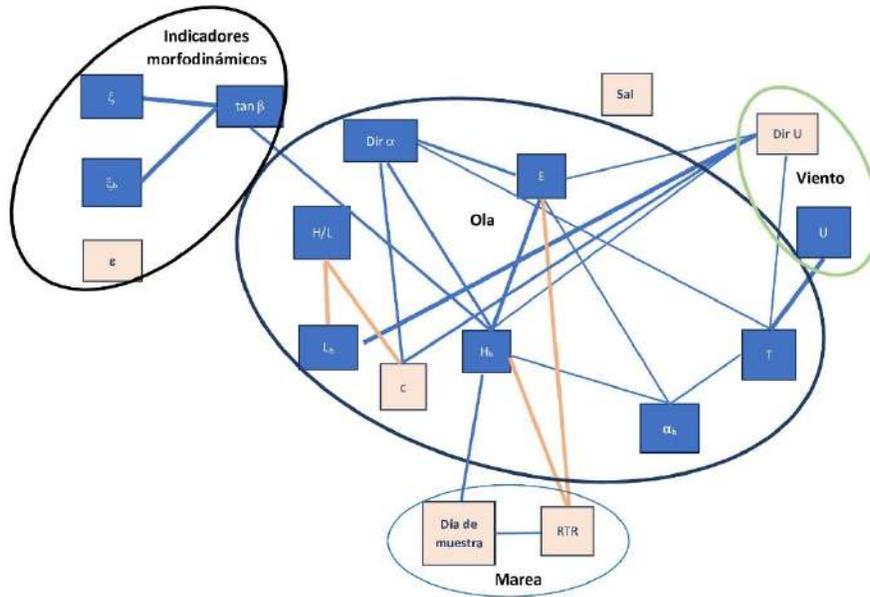
	E	RTR	L_b	c	U	ξ	ξ_b
H_b	$r = 0,9856$ $p = 0,003$	$r = -0,9276$ $p = 0,0077$					
RTR	$r = -0,9429$ $p = 0,0048$						
H/L			$r = -0,9276$ $p = 0,0077$	$r = -0,8986$ $P = 0,0077$			
T					$r = 1,0$ $p < 0,0001$		
$\tan \beta_1$						$r = 1,0$ $p < 0,0001$	$r = 1,0$ $p < 0,0001$

Se encontró correlación de la pendiente de la playa con los indicadores morfodinámicos: Índice de similaridad de surf y Número de Iribarren, ambos con $r_s = 1,00$ $p < 0,0001$.

A partir de las relaciones anteriores se desarrolló el modelo conceptual de variables que definen la morfodinámica disipativa y olas spilling de la playa Monagre. Este modelo caracterizó de dicha playa, agrupada en cuatro factores: ola, viento, marea e indicadores morfodinámicos. En color azul se plasmó los estancos que describen directamente las variables de los dos primeros componentes del ACP, y en rosado, las variables que los explican inversamente. Las líneas azules indican correlación directamente proporcional sobre las variables conectadas, mientras que las rosadas, las correlaciones inversas y finalmente, el grueso de las líneas señala la fuerza de la correlación (Figura 5).

Figura 5.

Modelo conceptual de variables que definen la característica disipativa de playa Monagre



DISCUSIÓN

La caracterización de la playa Monagre, de acuerdo a los índices obtenidos en la presente investigación la definen como morfodinámicamente disipativa, este tipo de ambiente explica que la energía de las olas incide, principalmente, en la zona de quiebre y posteriormente se disipa, a través de olas tipo “spilling”, en una planicie relativamente estable, en dirección a tierra firme (Sherman, 2018). Además, la morfodinámica señalada, caracteriza una zona poco profunda con olas de gran amplitud (Cornett, 2008). A partir de la rompiente, el viento transfiere empuje hacia el oleaje, que se disipa en dirección a la playa (Aagard et al., 2013), y la baja frecuencia de las olas disipadas, en la sección inferior, resuspende el sedimento transportándolos hacia la playa o hacia el mar, lo que produce barras transversales en esta última dirección (Aagard & Greenwood, 2008).

Las variables registradas en esta playa coinciden con lo planteado por Guza (1974), quien caracterizó originalmente este tipo disipativo e indica que la longitud de onda es de aproximadamente 6 m, valor próximo al encontrado en esta playa, además, Mohd Zaini et al. (2015) en Malasia, señalan que este tipo morfodinámico se caracteriza por perfil entre $0,64^\circ$ y $2,41^\circ$ y ancho de la playa entre 80 a 130 m, valores entre los cuales se encuadran los obtenidos en la presente investigación.

A pesar de que no se obtuvo diferencia temporal de las características medidas, como si se observa en la playa de Ajuruteua, Brasil (Alves & El Robrini, 2006), en Monagre se presenta similaridad de períodos, basado en la característica de tres variables: altura de la ola de rompiente, energía y celeridad de esta. Valores altos de estas separan los meses de temporada lluviosa.

A diferencia de las playas de bolsillo que se caracterizan por presentar variaciones en la dinámica erosión/acreción periódica marcada de manera secuencial en el tiempo (Larpieta et al., 2022), en playas rectilíneas este proceso no es tan evidente. Esta característica se debe al efecto de la energía de las olas de rompiente sobre el movimiento de arena en la playa (Tarbuck & Lugens, 2005) debido al efecto de la masa de agua, que puede ser longitudinal o transversal a esta (Blanes Eckert, 2008).

Estudios realizados en las playas aledañas El Rompío y Los Guayaberos, Gonzalez (2013) observó un comportamiento semejante, con variaciones de perfil que no siguen el ritmo de las temporadas seca y lluviosa, tal como si se obtuvo en la península de Malasia, donde Rahim et al. (2016) señalan que es marcado el proceso de erosión que se da durante la temporada lluviosa, mientras la acreción en la seca, que resulta diferente en la zona de estudio donde el proceso se produce de manera continua, intercalada.

La característica granulométrica coincide con la reportada por Castillo (2013) en la playa contigua de El Rompío, cuyo valor de Mz fue de $2,26 \pm 0,22 \phi$. La variación del diámetro granulométrico y la clasificación del sedimento se asemeja lo reportado por Prodder et al. (2017), quienes indican que son el reflejo de la energía de las olas sobre el sustrato en este tipo morfodinámico de playa, lo cual se debe al arrastre de sedimento por los bores disipados en la zona de surf, que acumulan material en el área intermareal del litoral (Aagaard et al., 2013)

Anthony (1998) menciona que el indicador, parámetro de Dean, usado ampliamente para determinar la característica morfodinámica de las playas, se ajusta muy bien en ambientes micro y mesomareales, sin embargo, en el caso de que el área esté sometida a amplitudes de marea muy alta, o playas macromareales, este se aparta de la característica real en campo. En ese sentido Muehe (1998) desarrolla el parámetro Delta (Δ); además, Sherman (2018) señala que el Número de Iribarren (ξ_b) y el Parámetro de Escala de Rompiente (ξ), resultan ser más adecuados para la caracterización morfodinámica, en especial este último.

De acuerdo con la clasificación de Batjes (1974) el número de Iribarren indica ola tipo “spilling”, corroborado por el parámetro de escala de rompiente, que según Wright & Short (1984) caracteriza este tipo de ola, propio de playas disipativas (Guza & Inman, 1975).

El número de Iribarren describe la estabilidad de la ola frente a la pendiente de la playa, señala si la ola asciende o desciende sobre el intermareal o si se disipa la energía. Si bien, la construcción de la ecuación del número de Iribarren procede de la relación de este indicador con la pendiente de la playa, la altura de la ola que incide sobre la ruptura de esta (Grassa Garrido, 2018), la presente investigación solo indica relación con la pendiente de la playa, aun así, demuestra ser un buen clasificador de la condición morfodinámica de la playa Monagre.

Davis & Hayes (1984) describen la relación entre la amplitud de la marea y la altura de la ola de rompiente, Short (2016) establece formalmente esta correspondencia al fijar el indicador “amplitud relativa de la marea” (RTR) que ha sido utilizado, junto con el parámetro de Dean, para clasificar el tipo morfodinámico de las playas (McLachlan & Dorvlo, 2005).

La relación inversa de la altura de la ola y la amplitud de la marea es inherente a la fórmula que describe el RTR, esta relación fue insinuada originalmente por Davis & Hayes (1984) y consolidada finalmente por Short (2016), la cual ha servido para describir el tipo de mecanismo hidrodinámico que domina la playa, ya sea la marea o las olas; según Anthony & Orford (2002), las características de la playa son el producto del efecto de estos fenómenos. La propuesta de Masselink & Short (1993) sobre el indicador RTR, como efecto directo de la marea sobre el ambiente costero, puede no ser efectivo en casos que se tengan olas de poca altura, en playas macromareales (Levoy et al. 2000), que no es el caso de la playa Monagre, que, a pesar de presentar estas características, el indicador resultó una herramienta efectiva para catalogar la morfodinámica de la playa de estudio, basado en los valores calculados en el período de estudio.

Gómez et al. (2022) presentan valores de RTR de 7,41 en las playa contiguas de El Rompío y 9,18 en Los Guayaberos, Alves & El-Robrini (2006) mostraron un valor único de 4,79 en la playa Ajuruteua, situada en la región amazónica, Brasil, con características macromareales, De Oliveira et al. (2014) en esta misma playa obtuvieron valores entre 6,6 y 16, además encontraron que en temporada seca el dato obtenido es superior a 10, mientras que en la lluviosa es inferior a este, sin embargo, en la presente investigación no se observó variación estacional, de hecho en temporada lluviosa se obtuvo mayor variabilidad, que incluye los valores de la seca.

El indicador RTR obtenido sugiere playa dominada por la marea (Pereira et al., 2020), con tendencia a formar una planicie mareal (Masselink & Short, 1993), sin embargo, Levoy et al (2000) indican que el valor alto de RTR, más que indicar una planicie de marea está relacionado con playas macromareales, como se indicó anteriormente.

Con relación al evento que domina las características morfológicas y morfodinámicas de la zona costera, Anthony & Orford (2002) muestran que casi la totalidad de las playas están sometidas al efecto mixto de la incidencia de las mareas y la energía de las olas, con excepción de aquellas donde no hay olas, en las cuales domina la marea o aquellas en que las olas son tan fuertes que enmascaran la importancia de estas. Los datos encontrados en la presente investigación confirman esta afirmación, ya que se describe el efecto de la marea, no solo mediante el valor del RTR, si no también, la amplitud de la marea, reflejada en la relación con el día de colecta.

El ritmo mareal, a lo largo del año, sigue los patrones astronómicos del efecto gravitacional del sistema sol -tierra- luna y la rotación de los astros sobre las masas de agua en el planeta (Pugh & Woodworth, 2014), asociados al efecto morfodinámico sobre la playa, de acuerdo a las mareas semidiurnas que acompañan el ritmo lunar (Pereira et al., 2020), de esta manera la amplitud de la marea relativa refleja esta variación durante el transcurso del año y en especial durante el período de estudio.

La relación del viento con la energía, celeridad, altura y amplitud de la ola ha sido señalada por Zheng et al. (2020) como el forzamiento ola – viento, que afecta la formación de bancos en playas arenosas, a través de la deposición y resuspensión del sedimento transportado por la ola (Fagherazzi et al. (2007), que junto con las corrientes transversales y longitudinales que se producen en la playa inducen fuerzas hidrodinámicas que modelan la morfodinámica del sitio (Maan et al., 2018).

Aunado a lo anterior, todas las variables ligadas a la dinámica de las olas mostraron estar relacionadas e indicaron buen acople con las características de la playa Monagre, lo que sugiere que la morfodinámica de esta es el producto del efecto conjunto de las olas y la marea, además de la influencia del viento sobre la zona de estudio. La separación temporal de características específicas está estructurada por parámetros ligados al oleaje, como son la altura de la ola, la energía y la celeridad de esta y la influencia que ejerce la amplitud de la marea, claramente representado en el modelo conceptual desarrollado.

Power (2020) señala que la celeridad en la zona de surf se relaciona mejor con la profundidad debajo de la cresta de la ola, representada por el peralte, y no con la profundidad de la zona de rompiente; este comportamiento no se observa en la presente investigación, al correlacionarse las variables, ya que, según el modelo desarrollado, la celeridad depende de la dirección de la ola y del viento.

A pesar de la falta de equipo tecnológico para realizar la presente investigación, con los medios rudimentarios utilizados, se pudo desarrollar los análisis correspondientes para la caracterización de la playa Monagre. Hay que destacar, que el principal indicador

morfodinámico, Número de Dean (Ω^2), usado tradicionalmente en Australia (Write & Short, 1984) y en Europa (Castelle et al., 2020), no muestra ser funcional en América Latina, tal como es el caso de Brasil (Muehe, 1998; Klein & Menezes, 2001) y Panamá. La dificultad de poder hacer los análisis donde se resalta las relaciones angulares y direccionales, lo recomendable es utilizar estadística circular, sin embargo, tradicionalmente se utiliza, de manera equivocada, la estadística lineal.

CONCLUSIONES

El efecto de la marea, reflejado en el día de la toma de muestra, resulta ser un factor importante en la estructuración de los resultados de la altura, energía y celeridad de la ola para definir la temporalidad morfodinámica de la playa.

La playa Monagre, durante el período de estudio se caracteriza por ser morfodinámicamente disipativa, con olas “spilling”, de acuerdo a las variables evaluadas. Por otro lado, se evidencia el efecto mixto del oleaje y las mareas en la estructuración morfológica de la misma, aunado a la energía del viento, lo cual se refleja en el modelo conceptual propuesto, que evidencia la relación entre estos elementos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aagaard, T., & Greenwood, B. (2008). Oscillatory infragravity wave contribution to surf zone sediment transport—the role of advection. *Mar. Geol.*, 251, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2008.01.017>
- Aagaard, T. Greenwod, B. & Hughes, M. (2013). Sediment transport on dissipative, intermediate and reflective beaches. *Earth Sci. Rev.*, 124, 32.-50. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.05.002>
- Alves, M.A.M. da S. & El-Robrini, M. (2006). Morphodynamics of a macrotidal beach: Ajutretua, Bragança North Brazil. *J. Coast. Res.*, 39, 949-951.
- Anthony, E.J. (1998). Sediment wave parametric characterization of beaches. *J. Coast. Res.*, 14, 347-352.
- Anthony, E.J. & Orford, J.D. (2002). Between wave-and-tide-dominated coast: the middle ground revisited. *J. Coast. Res.*, 36, 8-15.
- Battjes, J. A. (1974). “*Surf Similarity.*” Proceedings of 14th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, Copenhagen, Denmark, June 24–28.

- Blanes Eckert, C. (2008). Caracterización granulométrica de las playas del litoral gerundense. Implicaciones para el transporte de sedimentos. Univ. Polit. Catalunya. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/6036?locale-attribute=en>
- Castelle, B., & Harley, M.D. (2020). *Extreme events: impact and recovery*. In: *Sandy Beach 584 Morphodynamics*. Ed. Jackson, D.W.T. and Short, A.D., 533-556, Elsevier.
- Castillo, C.J. (2013). *Distribución espacial de los organismos de la playa El Rompio, corregimiento de Santa Ana, Provincia de Los Santos*. [Tesis de Licenciatura] Universidad de Panamá. 42 p.
- Cornett, A. (2008). *A global wave energy resource assessment*. In Proceedings of the 18th International Offshore and Polar Engineering Conference, Vancouver, BC, Canada, 6–11 July 2008; ISOPE-2008-TPC-579, pp. 1–9
- Davis, R.A. & Hayes, M.O. (1984). What is a wave-dominated coast? *Mar. Geol.*, 60, 313-329.
- De Oliveira, S.M., Pereira, L.C.C. & Vila-Concejo, A. (2014). Processos morfodinâmicos em uma praia de macromaré no litoral amazônico. *Quat. Environm. Geosc.*, 5(2), 126-136. <https://doi.org/10.5380/abequa.v5i2.36418>
- Emery, K.O. (1961). A simple method of measuring beach profiles. *Limnol. Oceanogr.*, 6(1), 90-93.
- Fagherazzi, S., Palermo, C., Rulli, M. C., Carniello, L. & Defina, A. (2007). Wind waves in shallow microtidal basins and the dynamic equilibrium of tidal flats. *J. Geoph. Res. Earth Surf.*, 112(2), 1–12. <https://doi.org/10.1029/2006JF000572>
- Folk, R.L. & Ward, W.C. (1957). Brazos river bar. A study in the significance of grain size parameter. *J. Sed. Petrol.*, 27(1), 3-26.
- Galvin, C.J. (1968). Breaker type classification on three Laboratory beaches. *J. Geoph. Res.*, 73:3651-3659.
- Gómez H, J.A., Marín, B. & Goti, I. (2022). Características morfodinámicas y procesos erosivos en dos playas arenosas de Panamá y su relación con el meiobentos. *Bol. Oceanogr. Univ. Oriente.*, 61(1), 79-102.

- González, J.L. (2013). *Evaluación de índices morfodinámicos de playas y su aplicación en El Rompío y Los Guayaberos, playas arenosas para la estación seca del año 2012*. [Tesis de Licenciatura] Universidad de Panamá.
- Goti, I. (2017). Morfodinámica de playa arenosa en período acrecivo, estudio a mediano plazo. *Visión Antataura*, 1(2):95-96.
- Grassa Garrido, J.M. (2018). La costa construida, el cambio de clima y el número de Iribarren. *Ingeniería Civil*, 191, 56-73.
- Guza, R.T. (1974). *Excitation of edge waves and their role in the formation of beach cusps*. Thesis University of California. 102 p.
- Guza, R. & Inman, D. (1975). Edge waves and beach cusps. *J. Geoph. Res.*, 80(21), 2997-3012.
- Iribarren, C.R. & Nogales, C. (1949). *Protection des ports*. Section II. Comm. 4. XVIIth Int. Nav. Congress, Lisbon, 31-80.
- Klein, A.H.F. & Menezes, J.T. (2001). Beach morphodynamics and profile sequence for a headland bay coast. *J. Coast. Res.*, 17(4), 812-835.
- Lapietra, I., Lisco, S., Capozzoli, L., De Giosa, F., Mastronuzzi, G., Mele, D., Milli, S., Romano, G., Sabatier, F., Scardino, G., & Moretti, M. (2022). Potential Beach Monitoring Based on Integrated Methods. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(12), 1949. <https://doi.org/10.3390/jmse10121949>
- Levoy, F., Anthony, E.J., Monfort, O. & Larsonneur, C. (2000). The morphodynamics of megatidal beaches in Normandy, France. *Mar. Geol.*, 171, 39-59. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(00\)00110-9](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(00)00110-9)
- Maan, D.C., van Prooijen, B.C., Zhu, Q., & Wang, Z.B. (2018). Morphodynamic feedback loops control stable fringing flats. *J.G.R: Earth Surf.*, 123, 2993–3012. <https://doi.org/10.1029/2018JF004659>
- Manso, V., Stalliviere, I. C. & Guerra, N. C. (2003). Morfologia e sedimentologia da plataforma continental interna entre as praias porto de Galinhas e Campos - litoral sul de Pernambuco, Brasil. *Pesquisas em Geociências*, 30(2), 17-25.

- Masselink, G. & Short, A.D. (1993). The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: A conceptual beach model. *J. Coast. Res.*, 9(3), 785-800.
- McLachlan, A. & Dorvlo, A. (2005). Global patterns in sandy beach macrobenthic communities. *J. Coast. Res.*, 21(4), 674–687. <https://doi.org/10.2112/03-0114.1>
- Muehe, D. (1998). Estado morfodinâmico praias no instante da observação: uma alternativa de identificação. *Rev. Bras. Oceanogr.*, 46(2), 157-169.
- Muehe, D. (2001). Critérios morfodinâmicos para o estabelecimento de limites da orla Costeira para fins de gerenciamento. *Rev. Bras. Geomorf.*, 2(1): 35-44. <https://doi.org/10.20502/rbg.v2i1.6>
- Mohd Zaini, M., M.Z., Saad, S., Hadi, M.S.A., Yunus, K. & Sapon, N. (2015). Beach-face morphodynamics of different morphological settings along Teluk Chempeda, to Kuala Pahang, Malaysia. *Jurnal Teknologi*, 77(25), 51-56.
- Pardo-Pascual, J.E., Roca Moya, R. & Segura-Beltrán, F. (2019). Análisis de la evolución de la línea de costa entre Alcossebre y Orpesa a partir de fotografía aérea. *Cuadernos de Geografía*, 102, 39-72. <https://doi.org/10.7203/CGUV.102.14511>
- Pereira, L., Concejo, A.V. & Trindade, W. (2020). *Tidal modulation*. In Jackson, S. & Short, A. (eds.). *Sandy Beach Morphodynamics*. 87-101. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-02420-2>
- Power, H.E. (2020). *Breaking waves*. In Jackson, D.W.T & Short, A.D. *Sandy beach morphodynamics*. Elsevier. 103-130. <https://doi.org/10.1016/j.ajog.2020.08.113>
- Prodger, S., Russell, P. & Davidson, M. (2017). Grain-size distributions on high-energy sandy beaches and their relation to wave dissipation. *Sedimentology*, 64(5), 1289-1302. <https://doi.org/10.1111/sed.12353>
- Pugh, D., Woodworth, P. L., & Woodworth, P. (2014). *Sea-level science: understanding tides, surges, tsunamis and mean sea-level changes*. Cambridge University Press. 394 p. <https://doi.org/10.1080/00107514.2015.1005682>
- Oliveira, U.R., Parizotto, B.A., Horn Filho, N.O. & Bonetti, J. (2012). Setorização morfossedimentar das praias arenosas da ilha de Santa Catarina (SC) utilizando técnicas de análise estatística multivariada. *GRAVEL*, 10(1), 1-11.

- Rahim, N.S, Jamal, M.H., Waha b, AIK.A., Othman, I.K, Ismail, Z., Othman, N. & As'ar, R. (2016). Sandy beach profile evolution. *Malay. J. Civil Eng.*, 3: 301-336.
- Sherman, D. (2018). *Dissipative beaches*. In Finkl., C. & Makowski, C. (eds.). *Encyclopedia of Coastal Science*. Encyclopedia of Earth Science Series. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48657-4_123-2
- Short, A.D. (1999). *Handbook of beach and shoreface morphodynamics*. John Wiley & Sons, Chichester. 379 p.
- Short, A.D. (2016). The coastal studies unit and development of the Australian beach models. In: Vila-Concejo, A.; McCarroll, R.J.; Kennedy, D.M. & Bruce, E. (eds.), *Proceedings of the 14th International Coastal Symposium (Sydney, Australia)*. *J. Coast. Res.*, Special Issue, 75, 1-7. <https://doi.org/10.2112/SI75-001.1>
- Short, A.D. & Aagaard, T. (1993). Single and multi-bar beach change models. *J. Coast. Res.*, 15, 141-157.
- Short, A.D. & Jackson, D.W.T. (2013). *Beach morphodynamics*. In Shroder, J.F. (ed.) *Treatise on Geomorphology*, Academic Press, 10, 106-129. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6-00275-X>
- Suguio, K. (1973). *Introdução à Sedimentologia*. Editora Blucher/USP. 317 p.
- Tarbuck, E.J. & Lutgens, F.K. (2010). *Ciencias de la tierra. Una introducción a la Geología Física*. 9ª Ed. Pearson Prentice Hall. 686 p
- Valdés, S.E. (2013). *Morfodinámica comparativa de las playas El Rompío y Los Guayaberos*. [Tesis de Licenciatura]. Universidad de Panamá.
- Wright, L.D.; Short, A.D. (1984). Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. *Mar. Geol.*, 56, 93–118
- Zheng, Z., Ma, X., Ma, Y. & Dong, G., (2020). Wave estimation within a port using a fully nonlinear Boussinesq wave model and artificial neural networks. *Ocean Engineering*, 216: 108073. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108073>



SHORT COMMUNICATION

First report of the nematode *Eustrongylides* sp. (Nematoda: Dioctophymatidae) in the sardine *astyanax panamensis* in Darién, Panama

Primer reporte del nematodo *Eustrongylides* sp. (Nematoda: Dioctophymatidae) en la sardina *astyanax panamensis* en Darién, Panamá

Kedric Bosco González Serrano

Universidad de Panamá, Facultad de Medicina Veterinaria, Departamento de Enfermedades Transmisibles y Salud Pública, Panamá.

kedricg75@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-3010-2070>

Luis C. Rodríguez

Universidad de Panamá, Facultad de Medicina Veterinaria, Departamento de Enfermedades Transmisibles y Salud Pública, Panamá.

luiscarlos1426@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-0109-0605>

Rogemif Fuentes M.

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Biología Marina y Limnología, Panamá.

rogemifdaniel@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-4389-2665>

Fecha de recepción: 8 de abril de 2025

Fecha de aceptación: 31 de octubre de 2025

DOI: <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v28n1.a8956>

ABSTRACT

Astyanax panamensis is a species of sardine with an omnivorous diet and is often used as a subsistence food in various regions of the country. In this study, we report for the first time the presence of larvae of the genus *Eustrongylides* parasitizing this species in the Darién region. *Eustrongylides* sp. has previously been described from Lake Gatun in two host species; however, there is no recent evidence of its distribution in other provinces of Panama, which poses a risk due to its zoonotic potential. In this study, larvae of *Eustrongylides* sp. were morphologically identified, with an average length of 4.3 mm, and were found in the hosts' musculature. The

average number of larvae per individual was one; however, some individuals were found to be parasitized by up to three larvae simultaneously. The presence of Ciconiiformes birds in Darién suggests the possibility that the life cycle of the parasite may be sustained in this region. Further studies are needed to assess the prevalence of this and other parasites with zoonotic potential, both in Darién and in other provinces of Panama.

KEYWORDS

Darién, *Eustrongylides*, Nematoda, Panamá, Sardine.

RESUMEN

Astyanax panamensis es una especie de sardina con dieta omnívora y muchas veces utilizada como alimento de subsistencia en varias regiones del país. En este estudio, se da el primer reporte de larvas del género *Eustrongylides* parasitando a esta especie en el Darién. *Eustrongylides* sp. ha sido descrita en el lago Gatún en dos hospederos, sin embargo, no hay evidencia reciente de la distribución de este parásito en otras provincias de Panamá, lo que representa un riesgo debido a su potencial zoonótico. En este estudio se identificaron morfológicamente larvas de *Eustrongylides* sp., con un promedio de 4.3 mm de largo encontradas en la musculatura de los hospederos, el promedio de larvas por individuo fue de 1, sin embargo, se encontraron individuos parasitados con hasta 3 larvas a la vez. La presencia de aves Ciconiiformes en Darién indica la posibilidad de que el ciclo de vida se perpetúe en esta región. Se necesitan más estudios para evaluar la prevalencia de este y otros parásitos con potencial zoonótico, tanto en Darién como en las demás provincias de Panamá.

PALABRAS CLAVE

Darién, *Eustrongylides*, Nematoda, Panamá, Sardina.

INTRODUCTION

Among Characiformes, the genus *Astyanax* Baird & Girard, 1854 is characterized as one of the most diverse and widely distributed in the Americas (Lucena & Soares, 2016; Angulo et al., 2018). In Panama, four valid species of these sardines have been described: *A. anai*, *A. bimaculatus*, *A. orstedii*, and *A. panamensis* (Angulo et al., 2018; Gonzalez, 2021). The last one is a species that can reach up to 15 cm in length and inhabits various freshwater environments such as swamps, streams, rivers, and even reservoirs (Gonzalez, 2021). In many rural areas, it is used as a subsistence food resource.

One group of parasites that have been reported infecting *Astyanax* species are nematodes of the genus *Eustrongylides* Jägerskiöld, 1909 (Vieira-Menezes et al., 2017; Santacruz et al., 2023), which currently includes three valid species: *E. excisus*, *E. ignotus*, and *E. tubifex*. These species are distributed across all continents except in Arctic and sub-Arctic regions (Honcharov et al., 2022a). This genus of parasites has a wide range of intermediate and paratenic hosts, utilizing groups such as oligochaetes, fish, amphibians, reptiles, and

mammals to reach piscivorous birds, which serve as the definitive hosts (Honcharov et al., 2022b). These parasites, when accidentally ingested by humans, can cause a zoonotic disease known as eustrongylidiasis. This disease arises from the consumption of infected fish prepared raw, smoked, salted, or undercooked (Orihel & Ash, 1995; Eiras, 2024). It has been reported that there are a range of symptoms, including peritonitis due to larval perforation of the small intestine (Eberhard et al., 1989; Wittner et al., 1989), and cutaneous larval migration (Eberhard & Ruiz-Tiben, 2014).

Eustrongylidiasis is considered an underdiagnosed disease that primarily occurs in tropical and neotropical regions. This is largely due to limited awareness among healthcare professionals who may confuse its symptoms with other gastrointestinal diseases and the lack of studies on the parasite's presence across different countries and regions (Honcharov et al., 2022a; Morey et al., 2022).

In Panama, the genus *Eustrongylides* has been previously reported in the peacock bass *Cichla ocellaris* (Vasquez & Rogers, 1992) and in specimens of *Vieja maculicauda* (Roche et al., 2010), both from Lake Gatún. To date, it has not been reported in other areas of Panama, highlighting the need to expand knowledge on the distribution of this parasite.

This study reports the presence of this parasite in several individuals of the sardine species *A. panamensis*, collected from the Chucunaque River in the community of Yaviza, Darién Province.

MATERIALS AND METHODS

Study area

This study was conducted in the middle basin of the Chucunaque River, adjacent to the community of Yaviza (Fig. 1A), in the province of Darién, near coordinates 8° 9' 30" N; 77° 41' 34" W. The corregimiento of Yaviza is located in the district of Pinogana, approximately 220 km southeast of Panama City, and marks the end of the Pan-American Highway's overland route (Gabriel & Sherwood, 2022). This area lies near the Matusaragatí wetland, where the influence of tributary rivers such as the Chucunaque on the wetland's dynamics has been studied (Carol et al., 2022).

COLLECTION OF INDIVIDUALS

Between March 25 and 29, 2025, wildlife rescue and relocation activities were carried out as part of the “Yaviza-Pinogana Road Construction Project” in the province of Darién. Five sampling points were established in association with the community of Yaviza (Fig. 1A), on both riverbanks (Fig. 1B, C), with the objective of rescuing and relocating as many fish as possible prior to construction activities.

A total of 55 individuals of the species *A. panamensis*, were captured using six-foot cast nets with a mesh size of 1 cm in areas of medium depth, with throws made from a boat. Subsequently, individuals were measured using a tape measure and photographed. Upon observing the presence of cysts in the musculature of some fish (Fig. 2A), with a small incision we were able to see the parasite (Fig. 2B). Once the presence of these parasites was confirmed, only visibly affected individuals were collected. Specimens were fixed in 70% alcohol and sent to the Parasitology Laboratory of the Faculty of Veterinary Medicine for processing

Figure 1.

Study area. A) Map with sampling points along the Chucunaque River, adjacent to the community of Yaviza. B) Left riverbank: market area, product loading and unloading zone. C) Right riverbank: residential area.

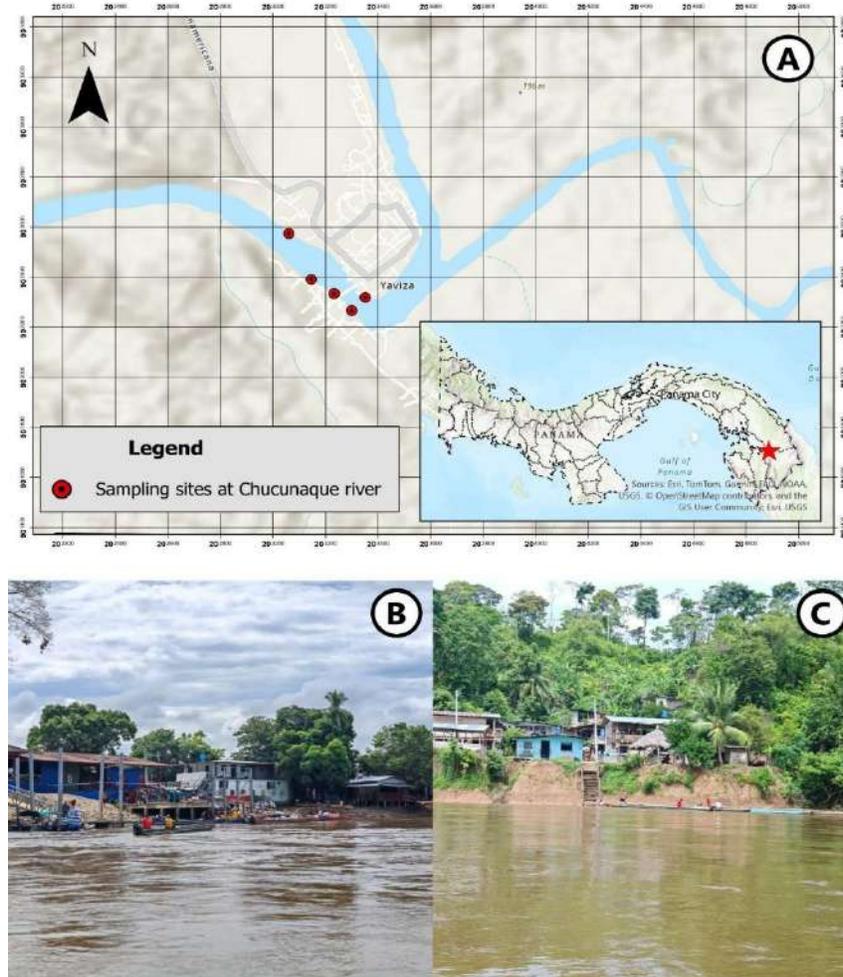
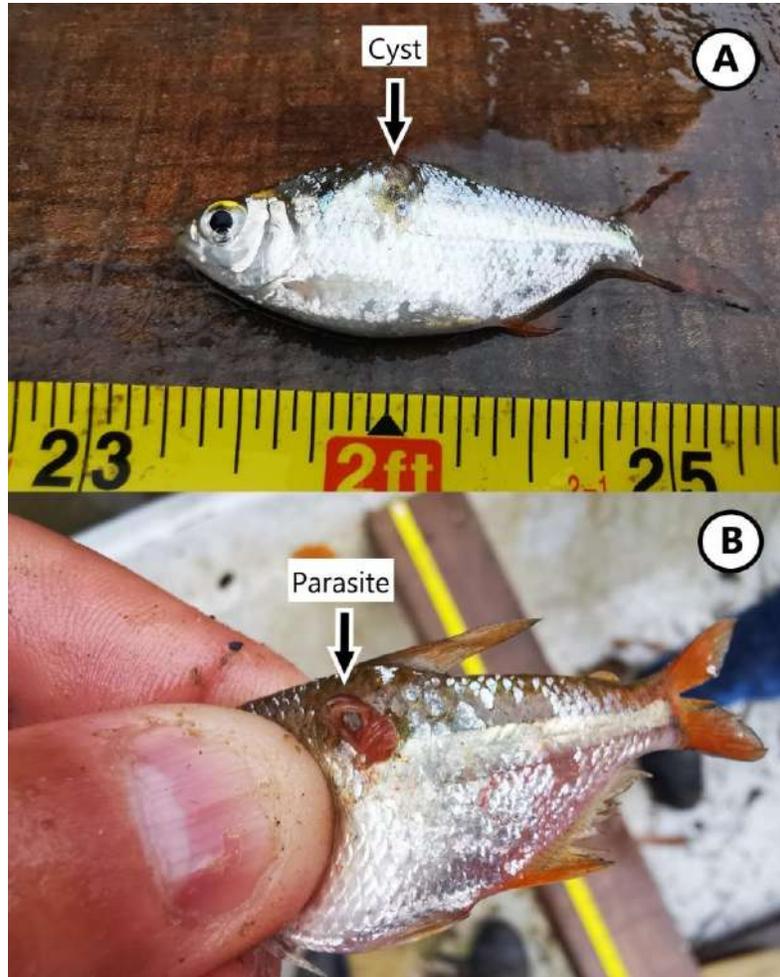


Figure 2.

Parasitized fish. A) Visible cyst formation in the musculature of the fish. B) Extraction of the parasite.



PROCESSING AND IDENTIFICATION OF PARASITES

Dissection of the specimens was conducted following standard protocols. The parasites found were measured in their entirety (mm) and placed in 2 mL Eppendorf tubes containing 95% ethanol for later identification. The posterior and cephalic sections were then separated for morphological identification. Both sections were cleared following the protocol of Seinhorst (1962), using a mixture of 99.5% glycerin and 95% ethanol, and allowed to evaporate over

24 hours. Subsequently, internal, and external structures were observed under a light microscope (Amscope, model MD827S30L with integrated 3-megapixel digital camera), using the dichotomous keys provided by Mazzone et al. (2019) and Rahmati-Holasoo et al. (2024) as references.

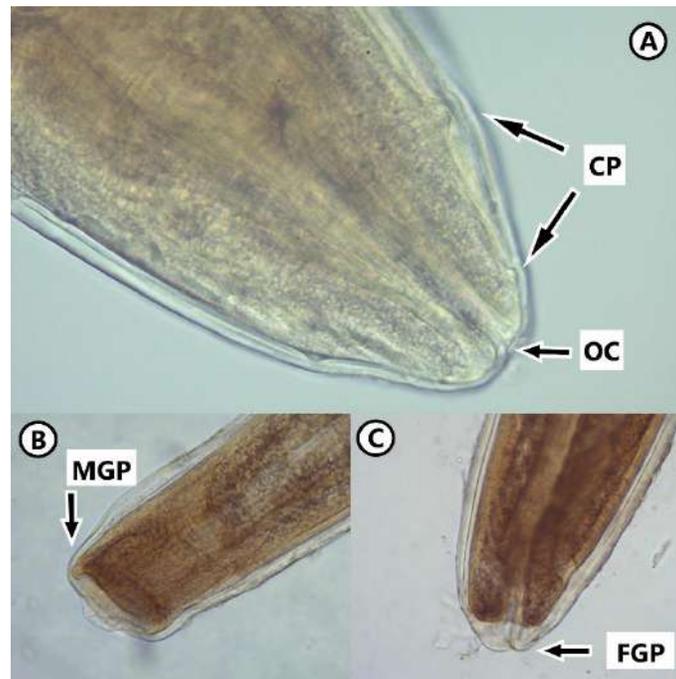
RESULTS AND DISCUSSION

Seven individuals of *A. panamensis* were examined, and a total of 10 larvae of *Eustrongylides* sp. were found in the musculature. These larvae exhibited an average length of 4.3 mm and a reddish coloration (Fig. 2B). Among the hosts analyzed, only two individuals were parasitized by more than one larva, with a maximum of three larvae observed.

Upon clearing, the cephalic end revealed a small oral cavity and cephalic papillae (Fig. 3A), structures characteristic of parasites belonging to the genus *Eustrongylides*. Additionally, structures corresponding to both male (Fig. 3B) and female (Fig. 3C) genital primordia were observed.

Figure 3.

Micrographs of *Eustrongylides* sp. larva. A. Cephalic end showing the small oral cavity (O.C.) and cephalic papillae (C.P.). B. Posterior end showing the male genital primordium (M.G.P.). C. Posterior end showing the female genital primordium (F.G.P.).



Fish of the genus *Astyanax* are considered omnivorous, and their diet has been observed to include oligochaetes (Vilella et al., 2002; Silva et al., 2014), which have been described as the primary intermediate hosts in the life cycle of *Eustrongylides* (Honcharov et al., 2022a), as well as other parasitic helminths (Arepbaev et al., 2022). This could explain the parasitism observed in this species. Additionally, the presence of piscivorous birds plays a significant role in this distribution, since many species of these birds serve as definitive hosts. It is known that birds from the orders Ciconiiformes, Anseriformes, Gaviiformes, and Pelecaniformes have been reported as hosts of these nematodes (Honcharov et al., 2022b). In Darién, birds belonging to these orders have been reported (Walschburger et al., 2008; Méndez-Carvajal et al., 2021), which could indicate the perpetuation of the parasite's life cycle within the region. This genus of nematodes has also been reported infecting other *Astyanax* species, such as *A. fasciatus* in Brazil (Vieira-Menezes et al., 2017), and *A. mexicanus*, infecting the mesenteric region of these fish in Mexico (Santacruz et al., 2023).

CONCLUSIONS

This study constitutes the first report of *Eustrongylides* sp. larvae infecting sardines of the species *A. panamensis* from the Chucunaque River, Darién Province. It expands and updates previous information about the hosts and distribution of this genus of parasites in the country. It is generally known that this genus of parasites infects a wide variety of animal groups, including fish, and that accidental consumption can lead to zoonosis. However, further studies on parasitic biodiversity in the region are needed to clarify their zoonotic potential and thereby generate information that can be used for the awareness of society and healthcare professionals.

ACKNOWLEDGMENTS

We thank the construction company Constructora Urbana S.A. (CUSA) for allowing us to use their information for this study as part of their environmental management. We also appreciate the rescue brigade of the project for their full collaboration during the sampling process, and Dr. Alexis Baules-Aguilar for the preparation of the map.

BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

Angulo, A. *et al.* (2018) "A new species of *Astyanax* (Characiformes: Characidae) from Costa Rica and Panama, with a key to the lower Central American species of the genus", *Journal of fish biology*, 92(6), pp. 1866–1887. <https://doi.org/10.1111/jfb.13626>.

- Arepbaev, I. *et al.* (2022) “Ecological and faunal characteristics of helminths of wetland birds in North-Western Uzbekistan”, *Biosystems diversity*, 30(4), pp. 380–387. <https://doi.org/10.15421/012237>.
- Carol, E. *et al.* (2022) “Origin and dynamics of surface water - groundwater flows that sustain the Matusagaratí Wetland, Panamá”, *Aquatic sciences*, 84(1). <https://doi.org/10.1007/s00027-021-00847-y>.
- Eberhard, M.L. *et al.* (1989) “Intestinal perforation caused by larval *Eustrongylides* (Nematoda: Dioctophymatoidae) in New Jersey”, *The American journal of tropical medicine and hygiene*, 40(6), pp. 648–650. <https://doi.org/10.4269/ajtmh.1989.40.648>.
- Eberhard, M.L. & Ruiz-Tiben, E. (2014) “Cutaneous emergence of *Eustrongylides* in two persons from South Sudan”, *The American journal of tropical medicine and hygiene*, 90(2), pp. 315–317. <https://doi.org/10.4269/ajtmh.13-0638>.
- Eiras, J.C. (2024) “Is it possible to eliminate or eradicate human fish-borne parasitic diseases? A sweet dream or a nightmare?”, *Current research in parasitology & vector-borne diseases*, 6(100203), p. 100203. <https://doi.org/10.1016/j.crpvbd.2024.100203>.
- Gabriel, R. & Sherwood, D. (2022) “Taxonomy, biogeography, and ecology of some theraphosid spiders of the Darién region with description of five new species (Araneae: Theraphosidae)”, *Revista ibérica de Aracnología*, 40, pp. 5–18.
- González, R.G. (2021) *Elementos de los peces dulceacuícolas de Panamá*. Panamá: Rigoberto González Gutiérrez.
- Guardone, L. *et al.* (2021) “First detection of *Eustrongylides excisus* (Nematoda: Dioctophymatidae) in big-scale sand smelt (*Atherina boyeri*) from the lake Massaciuccoli (Northwest Tuscany, Italy): implications for public health and seafood quality”, *Food control*, 120(107517), p. 107517. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107517>.
- Honcharov, S.L., Soroka, N.M., Halat, M.V., *et al.* (2022) “Distribution of the nematodes of the genus *Eustrongylides* (Nematoda, Dioctophymatidae) in the world”, *Regulatory mechanisms in biosystems*, 13(1), pp. 73–79. Disponible en: <https://doi.org/10.15421/022210>.

- Honcharov, S.L., Soroka, N.M., Galat, M.V., *et al.* (2022) “*Eustrongylides* (Nematoda: Dioctophymatidae): epizootology and special characteristics of the development biology”, *Helminthologia*, 59(2), pp. 127–142. <https://doi.org/10.2478/helm-2022-0013>.
- Lucena, C.A.S.D. & Soares, H.G. (2016) “Review of species of the *Astyanax bimaculatus* ‘caudal peduncle spot’ subgroup sensu Garutti & Langeani (Characiformes, Characidae) from the rio La Plata and rio São Francisco drainages and coastal systems of southern Brazil and Uruguay”, *Zootaxa*, 4072(1), pp. 101–125. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.4072.1.5>.
- Mazzone, A. *et al.* (2019) “Morphological and molecular characterization of larval and adult stages of *Eustrongylides excisus* (Nematoda: Dioctophymatoidea) with histopathological observations”, *The journal of parasitology*, 105(6), p. 882. <https://doi.org/10.1645/19-44>.
- Méndez-Carvajal, P.G. *et al.* (2021) “Biodiversity assessment at the southeastern side of Darien National Park, Panama”, *Mesoamericana*, (25), 22–36.
- Morey, G.A.M. *et al.* (2022) “Occurrence of *Eustrongylides* sp. (Nematoda: Dioctophymatidae) in fish species collected in the Peruvian Amazonia and its implications for public health”, *Acta parasitologica*, 67(3), pp. 1432–1439. <https://doi.org/10.1007/s11686-022-00574-w>.
- Orihel, T.C. & Ash, L.R. (1995) *Parasites in Human Tissues*. Chicago, IL, Estados Unidos de América: American Society of Clinical Pathologists Press.
- Rahmati-Holasoo, H. *et al.* (2024) “Histopathological, morphological, and molecular characterization of fish-borne zoonotic parasite *Eustrongylides excisus* infecting Northern pike (*Esox lucius*) in Iran”, *BMC veterinary research*, 20(1). <https://doi.org/10.1186/s12917-024-04146-0>.
- Roche, D.G. *et al.* (2010) “Higher parasite richness, abundance and impact in native versus introduced cichlid fishes”, *International journal for parasitology*, 40(13), pp. 1525–1530. <https://doi.org/10.1016/j.ijpara.2010.05.007>.
- Santacruz, A. *et al.* (2023) “Host-parasite interactions in perpetual darkness: Macroparasite diversity in the cavefish *Astyanax mexicanus*”, *Zoological research*, 44(4), pp. 782–792. <https://doi.org/10.24272/j.issn.2095-8137.2022.376>.

- Seinhorst, J.W. (1962) “On the killing, fixation and transferring to glycerin of nematodes”, *Nematologica*, 8(1), pp. 29–32. <https://doi.org/10.1163/187529262x00981>.
- Silva, M.R. *et al.* (2014) “Importance of allochthonous resources in the diet of *Astyanax aff. fasciatus* (Osteichthyes: Characidae) in streams: a longitudinal approach”, *Biota Neotropica*, 14(3). <https://doi.org/10.1590/1676-06032014001613>.
- Vasquez, O.E. & Rogers, W.A. (1992) “First report of larval *Eustrongylides ignotus* (Nematoda: Dioctophymatidae) in peacock bass in Gatun Lake, Republic of Panama”, *Journal of aquatic animal health*, 4(2), pp. 152–152. Disponible en: [https://doi.org/10.1577/1548-8667\(1992\)004<0152:frolei>2.3.co;2](https://doi.org/10.1577/1548-8667(1992)004<0152:frolei>2.3.co;2).
- Vieira-Menezes, F.G., Costa, D.P.C. & Brasil-Sato, M.C. (2017) “Nematodes of *Astyanax fasciatus* (Actinopterygii: Characidae) and their parasitic indices in the São Francisco River, Brazil”, *Revista brasileira de parasitologia veterinaria [Brazilian journal of veterinary parasitology]*, 26(1), pp. 10–16. <https://doi.org/10.1590/S1984-29612016074>.
- Vilella, F.S., Becker, F.G. & Hartz, S.M. (2002) “Diet of *Astyanax* species (teleostei, Characidae) in an Atlantic Forest River in southern Brazil”, *Brazilian archives of biology and technology*, 45(2), pp. 223–232. <https://doi.org/10.1590/s1516-89132002000200015>.
- Walschburger, T. *et al.* (2008) *Representatividad biológica, transformación antrópica del paisaje en el Complejo Ecorregional Chocó-Darién (CECD) y sus fragmentos más funcionales para la conservación*. En Análisis Ecorregional para la construcción de un Plan de Conservación de la Biodiversidad en el Complejo Ecorregional Chocó-Darién. WWF Colombia, Ecotropico y Cecoin
- Wittner, M. *et al.* (1989) “Eustrongylidiasis — A parasitic infection acquired by eating sushi”, *The New England journal of medicine*, 320(17), pp. 1124–1126. <https://doi.org/10.1056/nejm198904273201706>.



Sísmica de microtemores aplicada a la caracterización del subsuelo en el Campus Harmodio Arias Madrid

Ambient Noise Seismology for Subsurface Characterization at the Harmodio Arias Madrid Campus

Mayubell Alvarado-Valdes

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Física, Panamá. mayubell.alvarado-v@up.ac.pa <https://orcid.org/0009-0007-7017-956X>

Alberto Caballero

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Física, Panamá. alberto.caballero@up.ac.pa <https://orcid.org/0000-0001-8502-8288>

Bairon Pérez Ruiz

Universidad de Panamá, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ciencias de la Tierra, Panamá. bairon-e.perez-r@up.ac.pa <https://orcid.org/0009-0005-3602-8632>

José Luis Álvarez

Universidad de Panamá, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ciencias de la Tierra, Panamá. jose.alvarez03@up.ac.pa <https://orcid.org/0009-0001-7208-8780>

David Quintero Ramírez

Universidad de Panamá, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ciencias de la Tierra, Panamá. david-a.quintero-r@up.ac.pa <https://orcid.org/0009-0009-6324-8066>

Humberto Edward

Universidad de Panamá, Centro Regional Universitario de Coclé, Coclé humberto.edwardh@up.ac.pa <https://orcid.org/0000-0002-2658-2892>

Juan Cedeño

Universidad de Panamá, Laboratorio de Hidrología, Isotópica y Geofísica Aplicada, Panamá. juan.cedenoc@up.ac.pa <https://orcid.org/0000-0001-7511-8175>

Arkin Tapia

Universidad de Panamá, Instituto de Geociencias, Panamá. arkin.tapiae@up.ac.pa <https://orcid.org/0000-0003-2355-4615>

Fecha de recepción: 16 de septiembre de 2025
Fecha de aceptación: 12 de noviembre de 2025

DOI: <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v28n1.a8959>

RESUMEN

Se caracterizó el subsuelo somero del Campus Harmodio Arias Madrid (Ciudad de Panamá) mediante sísmica de microtemores (ReMi) para estimar la velocidad de onda de corte (V_s) y clasificar el tipo de suelo. Se ejecutaron seis perfiles con dos configuraciones: tendidos de 110 m (espaciamiento 10 m) y de 55 m (espaciamiento 5 m). La adquisición utilizó un sismógrafo multicanal DAQLink-III® (24 bits, 0–4 kHz) y geófonos verticales de 10 Hz, registrando 25 ventanas de 30 s por perfil con muestreo de 2 ms. El procesamiento en SeisOpt® ReMi™ (Vspect y Disper) incluyó preprocesamiento, construcción del espectro ρ -f, selección de la curva de dispersión y modelado iterativo por capas, con ajuste objetivo RMS < 10 m/s.

Los modelos 1D y mapas 2D (0–40 m) identifican tres unidades: (i) capa superficial blanda (rellenos/arcillas muy blandas), (ii) unidad intermedia arenoso-arcillosa y (iii) sustrato más competente (roca blanda/gravas). Las V_s promedio por perfil (~242–307 m/s) clasifican el sitio como suelo tipo D (IBC). Espacialmente, noreste y noroeste son más rígidos; el sureste es más blando y el suroeste muestra compactación con la profundidad. La proximidad al drenaje del río Curundú incrementa la vulnerabilidad. ReMi demostró ser idónea en entornos urbanos para delimitar espesores y variaciones laterales de V_s , aportando insumos para evaluación sismorresistente y planificación geotécnica.

PALABRAS CLAVE

Microtemores, velocidad de onda de corte, suelos urbanos, evaluación geotécnica.

ABSTRACT

The shallow subsurface of the Harmodio Arias Madrid Campus (Panama City) was characterized using microtremor seismic (ReMi) to estimate shear-wave velocity (V_s) and classify soil type. Six profiles were carried out with two configurations: 110 m spread (10 m spacing) and 55 m spreads (5 m spacing). Data acquisition employed a DAQLink-III® multichannel seismograph (24 bits, 0–4 kHz) and 10 Hz vertical geophones, recording 25 windows of 30 s per profile with a 2 ms sampling rate. Processing in SeisOpt® ReMi™ (Vspect and Disper) included preprocessing, construction of the ρ -f spectrum, dispersion curve picking, and iterative layered modeling, with a target RMS misfit < 10 m/s.

The 1D models and 2D maps (0–40 m) identified three units: (i) a soft surface layer (fills/very soft clays), (ii) an intermediate sandy-clayey unit, and (iii) a more competent substratum (soft rock/gravels). Average V_s values per profile (~242–307 m/s) classify the site as soil type D (IBC). Spatially, the northeast and northwest sectors are stiffer; the southeast is softer, and the southwest shows compaction with depth. Proximity to the Curundú River drainage increases site vulnerability. ReMi proved suitable in urban environments for delineating thicknesses and lateral variations of V_s , providing inputs for seismic-resistant evaluation and geotechnical planning.

KEYWORDS

Microtremors, shear wave velocity, urban soils, geotechnical assessment.

INTRODUCCIÓN

El conocimiento detallado de la constitución y comportamiento del terreno es un componente esencial en la planificación y ejecución de proyectos de ingeniería civil. La identificación de las características físicas y dinámicas del subsuelo no solo contribuye a evaluar la vulnerabilidad sísmica ante eventos de gran magnitud, sino que también respalda la toma de decisiones en planificación urbana y el diseño de estructuras en contextos de riesgo (Pulido Vásquez & Rodríguez Gutiérrez, 2015).

En entornos urbanos, el constante dinamismo de las actividades humanas genera un ruido sísmico ambiental dominado principalmente por ondas Rayleigh, lo que ofrece una oportunidad para el análisis espectral de ondas superficiales (Pinilla, 2012). Estas señales, generalmente consideradas indeseadas, se convierten en un recurso valioso para métodos de exploración geofísica que permiten caracterizar el subsuelo de manera no invasiva y a un costo relativamente bajo.

En este marco, la técnica de Refracción de Microtremores (ReMi), introducida por Louie (2001), se ha consolidado como una herramienta eficaz para estimar la velocidad de propagación de ondas de cizalla (V_s) en el subsuelo (Ortega Contreras & Pérez Pallares, 2020). Dichas velocidades poseen un alto valor geotécnico, ya que permiten caracterizar estratos con buena resolución vertical, incluso en escenarios complejos donde se presentan inversiones de velocidad (Granda Sanz et al., 2015; Ochoa Cornejo, 2007).

La versatilidad de ReMi se refleja en aplicaciones que abarcan desde la identificación de heterogeneidades laterales hasta la evaluación del potencial de licuefacción en suelos (Pancha et al., 2021). Además, su carácter no destructivo y el uso de equipos sísmicos convencionales facilitan su implementación en contextos donde los métodos invasivos resultan costosos o impracticables, como en áreas urbanas densamente construidas o en zonas de relleno (Rivera, Piedra, & Paripanca, 2016).

En este estudio se aplica la técnica ReMi para caracterizar las propiedades geotécnicas del subsuelo en el Campus Harmodio Arias Madrid de la Universidad de Panamá. El objetivo es identificar interfaces hasta la profundidad máxima investigada, clasificar las condiciones locales del terreno y aportar información geológica de valor en un área con escasos antecedentes.

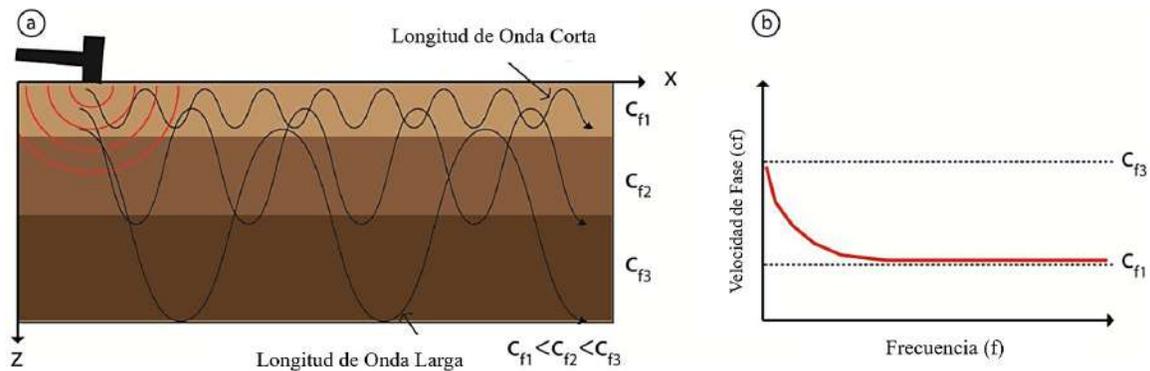
En síntesis, la sismica de microtemores representa una herramienta robusta para la caracterización de suelos en contextos urbanos, respaldando la planificación de obras civiles y la gestión de riesgos (Rivas Lucero, 2016; Louie, 2021). Su capacidad para alcanzar profundidades de decenas de metros, junto con su enfoque no invasivo, la consolidan como una técnica clave en la geofísica aplicada y en el análisis geotécnico moderno (Granda Sanz et al., 2015; Louie, 2021).

Características de las Ondas Superficiales Rayleigh

En entornos urbanos, el ruido sísmico ambiental está dominado por ondas Rayleigh, que concentran la mayor parte de la energía registrada y presentan una atenuación más lenta que las ondas corporales (Granda Sanz et al., 2015). Estas ondas poseen propiedades que las hacen especialmente útiles para la caracterización del subsuelo, entre ellas la disminución exponencial de la amplitud con la profundidad, la relación inversa entre frecuencia y longitud de onda, y la variación de su velocidad en función de las propiedades elásticas de los estratos (Dobrin & Savit, 1999; Pérez Santisteban, 2012).

Figura 1.

a) Propagación y dispersión de ondas Rayleigh en medios heterogéneos. b) Curva de dispersión de la velocidad de fase de las ondas Rayleigh (Adaptado de Pérez Cuevas, 2015).



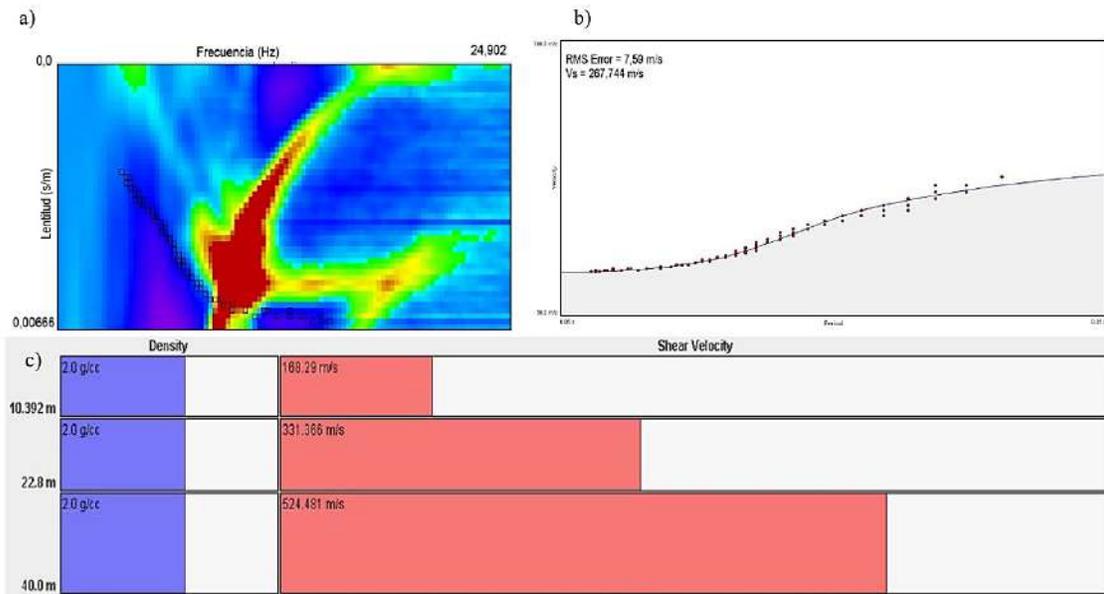
En medios estratificados, la propagación de ondas Rayleigh adquiere un carácter dispersivo, ya que la velocidad de fase depende de la frecuencia o de la longitud de onda. Las longitudes de onda más grandes penetran a mayores profundidades y son sensibles a las propiedades de capas profundas, mientras que las más cortas se limitan a describir las condiciones de los estratos superficiales (Xia et al., 1999). Este comportamiento dispersivo posibilita la construcción de curvas de dispersión que representan la variación de la velocidad de onda de corte (V_s) con la profundidad, constituyendo una herramienta esencial para la elaboración de perfiles sísmicos en terrenos heterogéneos (Khaheshi et al., 2010).

Curvas de Dispersión

La dispersión de las ondas Rayleigh permite analizar sus propiedades mediante un espectro de velocidad de fase en función de la frecuencia. Este espectro revela curvas características del suelo, proporcionando información clave sobre la distribución de las velocidades de onda de corte (V_s) según la profundidad (Fig. 2a).

Figura 2.

2a) El espectro de dispersión de ondas superficiales muestra la velocidad aparente (m/s) en función de la frecuencia (Hz), con una escala de colores que indica la intensidad de la energía. Los puntos seleccionados (picks) en el espectro definen la curva de dispersión. 2b) La inversión de la curva de dispersión muestra la variación de la velocidad de fase (m/s) en función del período (s), indicando el ajuste entre los datos experimentales y el modelo teórico. En el gráfico se presenta el error cuadrático medio (RMS) del ajuste y la velocidad promedio de onda de cortante (V_s) obtenida del modelo. 2c) Esquema estratigráfico del suelo hasta 40 m de profundidad.



Park et al. (1998) explican que las ondas Rayleigh se vuelven dispersivas cuando varían las propiedades del material cerca de la superficie, lo que altera su velocidad de propagación en función de la frecuencia. Además, Park et al. (1999) señalan que el suelo, al ser un medio atenuante, reduce la amplitud de estas ondas a medida que se alejan de su fuente, afectando su propagación.

A partir de los datos obtenidos, se genera un espectro p-f (velocidad de fase versus frecuencia), que facilita la construcción de una gráfica de periodos contra velocidad de fase de las ondas Rayleigh (Fig 2b)). Esta gráfica, según Lazcano (2007), permite obtener la curva de dispersión, con la cual se determinan los espesores de los estratos y las velocidades de onda de corte (Vs).

El análisis de dichas curvas de dispersión proporciona información clave sobre la variación de la velocidad de onda de corte en diferentes niveles del subsuelo (Fig. 2c)). Dado que la rigidez del suelo aumenta con la profundidad, las ondas de baja frecuencia permiten caracterizar los estratos más profundos, mientras que las de alta frecuencia describen las capas superficiales. En este contexto, el uso del criterio del período fundamental aplicado al espectro de velocidad de fase frente a frecuencia resulta esencial para estimar la profundidad de penetración asociada a cada par ordenado de la curva de dispersión.

CONTEXTO GEOLÓGICO

El campus se ubica en la región de Curundú, sobre el límite geológico que separa la Formación La Boca, compuesta por rocas sedimentarias del Mioceno inferior, y la Formación Panamá, en su facie volcánica del Oligoceno-Mioceno. En el área también afloran depósitos terciarios volcánicos y sedimentarios, conformados por tobas, ignimbritas y conglomerados.

Figura 3.

Esquema Geológico de la zona de estudio localizada dentro del recuadro rojo (Adaptado de “Mapa Geológico de la Zona del Canal” compilado por R.H. y J.L. Stewart, 1980).



Entre las unidades más relevantes se encuentran: la Formación La Boca, integrada por esquistos arcillosos, lutitas, areniscas y calizas; la Formación Las Cascadas, constituida por aglomerados y tobas suaves de grano fino; y la Formación Panamá, caracterizada por aglomerados andesíticos y depósitos volcánicos de corriente. Adicionalmente, se identifican cuerpos intrusivos y extrusivos de basalto y dacita (Fig. 3) (ETESA, 1999; URS Holdings, 2007).

La geología del sitio refleja un terreno previamente modificado con rellenos sobre manglares y pantanos, lo que alteró sus condiciones originales. Los suelos contienen altos porcentajes de arcillas principalmente montmorillonita e ilmenita junto con areniscas meteorizadas y limonitas. En general, predominan materiales de grano fino como arcillas, arenas arcillosas y cenagosas, caracterizados por su blandura y susceptibilidad a la intemperie (CAM.S.A., 1998).

Desde el punto de vista geomorfológico, el área corresponde a una terraza de inundación del río Curundú, bordeada por colinas volcánicas bajas como la del Campus Universitario Octavio Méndez Pereira y la Loma La Pava. El drenaje superficial, incluido el río Curundú, ha sido canalizado para reducir las inundaciones. En términos morfo-cronológicos, la actividad volcánica del Mioceno dio origen a la Formación Panamá, posteriormente modificada por procesos de meteorización, erosión, sedimentación y transgresiones marinas hasta el Holoceno. La zona, antes cubierta por manglares y ciénagas, fue transformada mediante rellenos antrópicos en sectores como Albrook y el Domo Universitario (CAPRA, 2015).

Finalmente, la Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Panamá clasifica estos suelos en las categorías 3 y 4, correspondientes a depósitos blandos limo-arcillosos y de relleno, lo que representa un factor crítico para la estabilidad y seguridad de futuras construcciones (CAPRA, 2015).

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción Técnica de la Instrumentación

Los geófonos son dispositivos que, en contacto directo con la superficie terrestre, convierten las oscilaciones sísmicas en señales eléctricas. En este estudio se emplearon geófonos con una frecuencia de resonancia de 10 Hz, los cuales registraron la componente vertical de la velocidad del movimiento del terreno (Fig. 4a). Para la adquisición de datos, se utilizó un cable sísmico multicanal que permite conectar hasta 12 geófonos con una separación máxima de 10 m, transmitiendo de manera eficiente la señal generada por cada dispositivo (Dobrin & Savit, 1999).

La información recolectada se procesó mediante un sismógrafo multicanal DAQLink-III®, equipado con una unidad de adquisición de 24 bits (144 dB). Este equipo es capaz de registrar entre 6 y 24 canales de manera simultánea, ofreciendo un ancho de banda operativo de 0 a 4 kHz (Fig. 4b). Estas características aseguran una adecuada resolución en la captura de las señales sísmicas, lo que resulta fundamental para la calidad y confiabilidad del análisis (Linares Montenegro, 2005).

Figura 4.

a) Implantación de geófono en el terreno y conectado al cable sísmico. b) El sismógrafo (DAQLink-III®) registra las señales adquiridas.

a)



b)



Descripción de los Perfiles

La disposición en campo consistió en seis perfiles, establecidos con separaciones de 10 m y 5 m, correspondientes a longitudes de 110 m y 55 m, respectivamente. Los perfiles fueron enumerados de acuerdo con la longitud del tendido, identificándose con la letra A para los trazos de 110 m (ejemplo: P1A) y con la letra B para los de 55 m (ejemplo: P1B). Los ensayos de muestreo se organizaron en una configuración lineal sobre la superficie, de los cuales cuatro perfiles se dispusieron de forma paralela a la cancha y dos de manera perpendicular a la misma (Fig. 5).

Figura 5.

Localización y disposición de los perfiles de ensayo sísmico en el Campus Harmodio Arias Madrid en coordenadas UTM 17P.

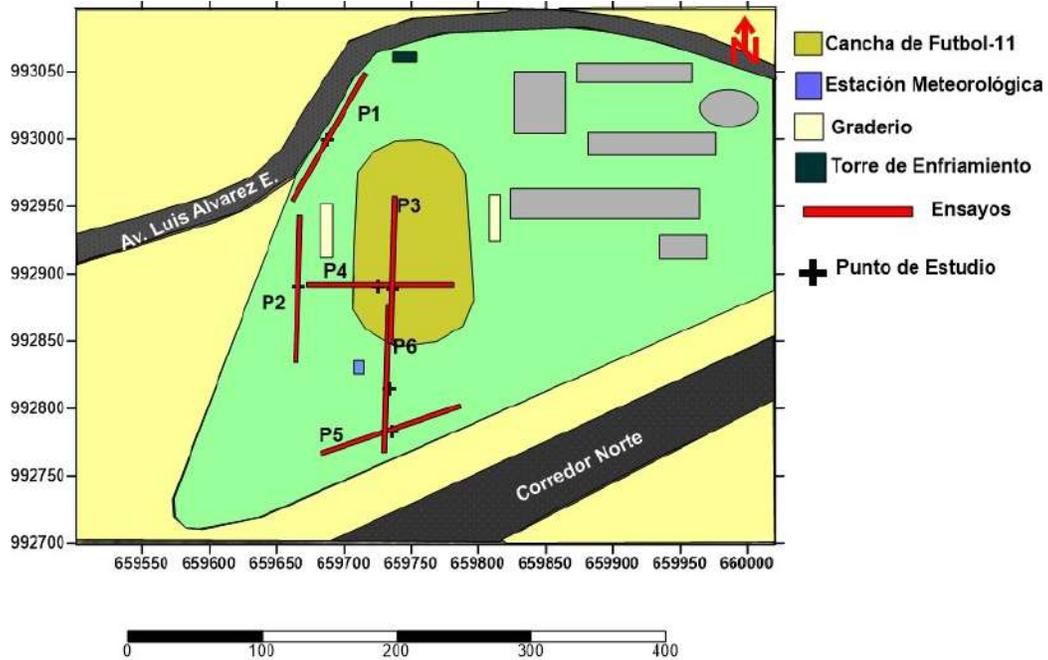


Tabla 1.

Nomenclaturas y orientación de perfiles.

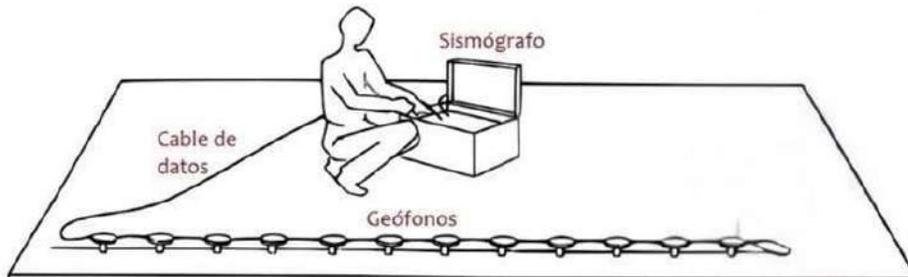
Perfiles	Dirección	Ubicación
P1	Orientado de noroeste a sureste.	Cercano a Av. Luis Álvarez E
P2	Orientado de norte a sur.	Paralelo al límite del predio
P3	Orientado de oeste a este.	Centro del campo, sobre la cancha
P4	Orientado de norte a sur.	Cercano al graderío
P5	Orientado de noreste a suroeste.	Próximo al Corredor Norte
P6	Orientado de norte a sur.	Intersecando la cancha de fútbol

Técnicas de Recolección de Datos

El registro de la información se realizó mediante un sismógrafo, el cual digitaliza las ondas propagadas en el terreno, muestrea la señal en intervalos fijos y almacena los valores de amplitud en cada punto (Fig. 6). La resolución de los registros depende de dos factores principales: el rango dinámico, que expresa la relación entre las amplitudes máxima y mínima detectables, y la frecuencia de muestreo, que determina el número de puntos registrados por unidad de tiempo o distancia (Pérez Santisteban, 2012).

Figura 6.

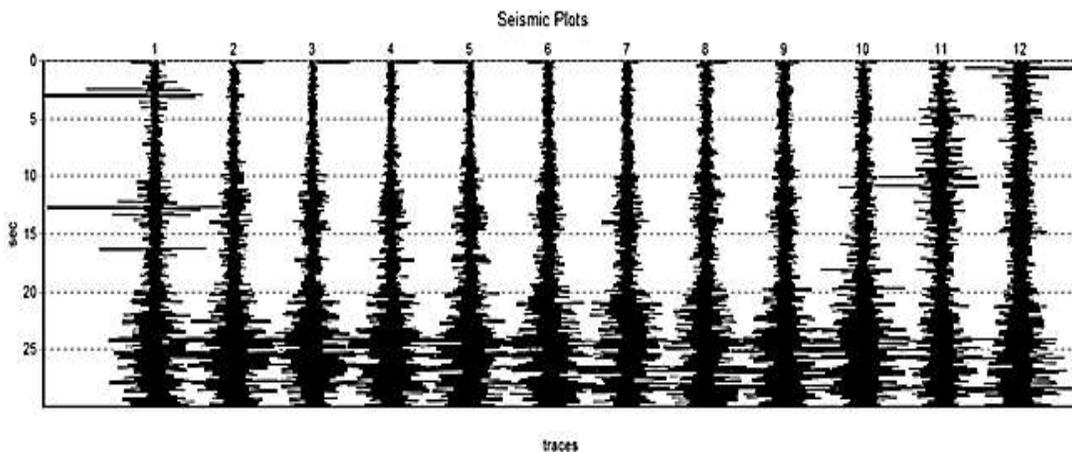
Montaje con geófonos y sismógrafo para registrar ondas para caracterizar el subsuelo (Adaptado de SEGOB, 2018).



Cada perfil incluyó 12 registros de 30 s con un muestreo de 2 ms (Louie, 2001), equivalente a 500 Hz de muestreo y un límite de 250 Hz según Nyquist (Pérez Santisteban, 2012).

Figura 7.

Registro de la traza sísmica almacenada en VibraScope® obtenida in situ en un arreglo de 12 sensores para una ventana de 30 segundos y un intervalo de muestreo de 2 ms.

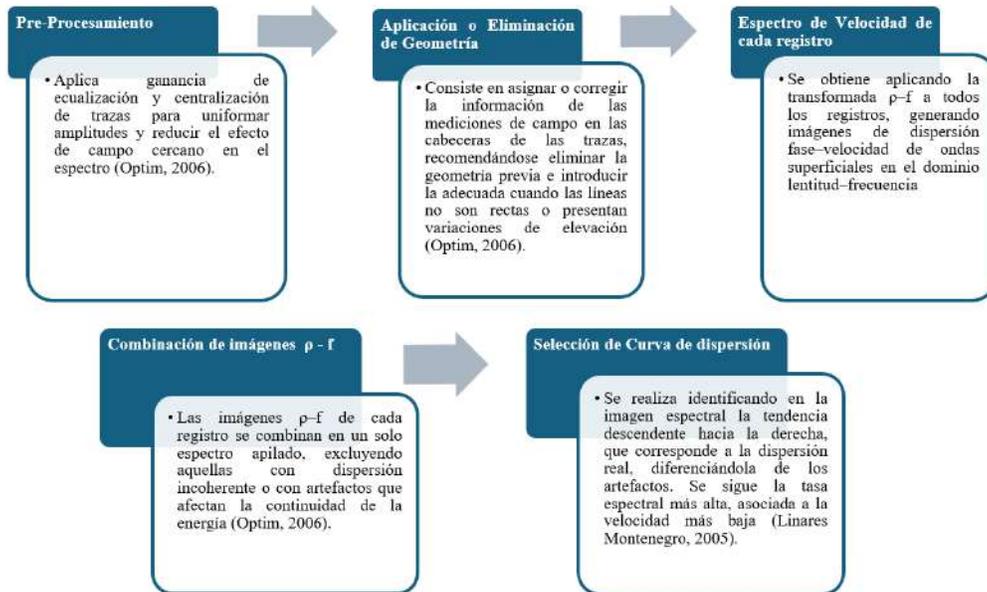


Procesamiento de Datos

La interpretación de los datos se realizó utilizando el programa SeisOpt® ReMi™, compuesto por dos módulos principales *ReMiVspect* y *ReMiDisper*.

Figura 8.

ReMiVspect convierte los registros sísmicos en un espectro de energía (frecuencia vs. lentitud de onda de cizalla), a partir del cual se seleccionan puntos para trazar la curva de dispersión.



La selección de puntos en el espectro p - f se basó en la continuidad y coherencia de la energía, considerando solo máximos bien definidos y descartando picos aislados. En frecuencias altas (>10 Hz), se eligieron zonas con amplitud superior al 60 % del máximo, y la lentitud se verificó según la pendiente del espectro y la coherencia del gradiente de velocidades, asegurando una tendencia física consistente con la dispersión de las ondas Rayleigh.

Posteriormente, el segundo módulo, *ReMiDisper*, ajusta dicha curva mediante un proceso de modelado que considera la variación de parámetros como la profundidad y las velocidades de las ondas S en cada estrato del subsuelo (Linares, 2005).

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Tabla 2.

Resumen de los resultados de los modelos de profundidades de capas, Vs y Vs Promedio.

Separación entre geófono 10,0 m				
Capa 1				
Perfiles	Espesor (m)	Vs (m/s)	Espesor Promedio (m)	Vs Promedio (m/s)
P1A	10,55	175,59	9,48	168,97
P2A	11,33	162,46		
P3A	10,40	170,77		
P4A	8,00	179,78		
P5A	6,20	156,94		
P6A	10,39	168,29		
Capa 2				
Perfiles	Espesor (m)	Vs (m/s)	Espesor Promedio (m)	Vs Promedio (m/s)
P1A	12,07	317,12	12,06	293,56
P2A	12,67	363,28		
P3A	12,20	319,40		
P4A	10,00	219,24		
P5A	13,00	210,93		
P6A	12,41	331,37		
Capa 3				
Perfiles	Espesor (m)	Vs (m/s)	Espesor Promedio (m)	Vs Promedio (m/s)
P1A	17,38	547,93	18,46	543,17
P2A	16,00	553,39		
P3A	17,40	519,13		
P4A	22,00	559,78		
P5A	20,80	554,29		
P6A	17,20	524,48		

Figura 9.

La curva de dispersión del P1A, tiene una velocidad promedio de 270, 929 m/s y el tipo de suelo es D.

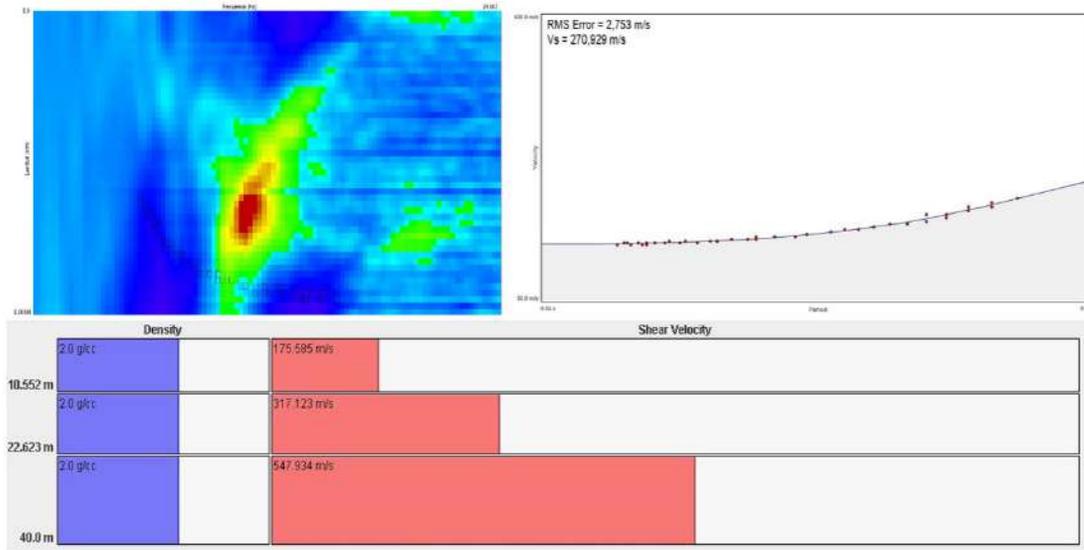


Figura 10.

La curva de dispersión del perfil 2A, tiene una velocidad promedio de 262,003 m/s y el tipo de suelo para este perfil es D.

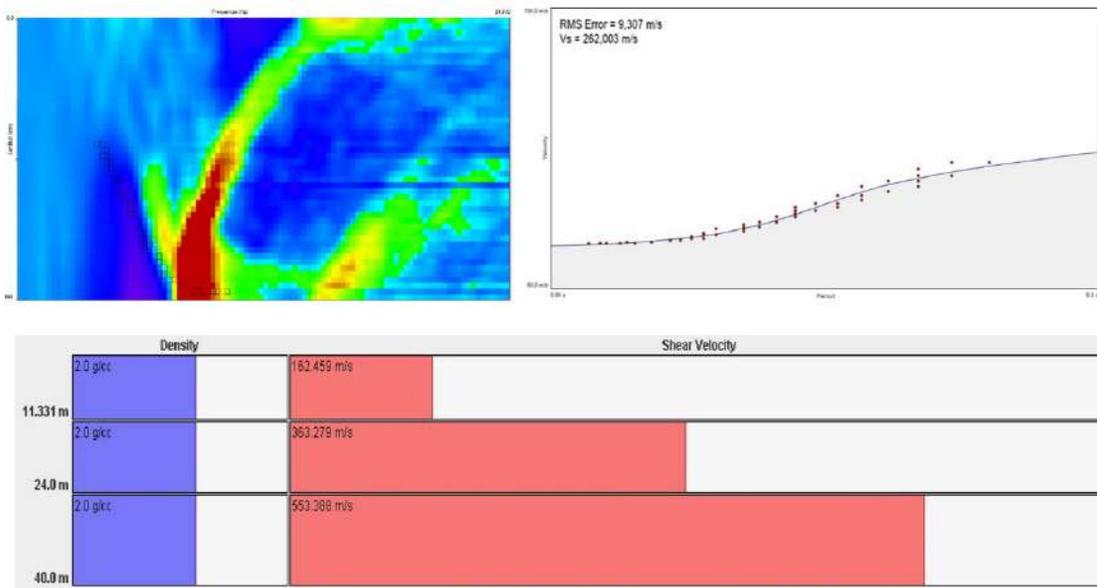


Figura 11.

La curva de dispersión del P3A tiene una velocidad promedio de 266,71 m/s y tipo de suelo D.

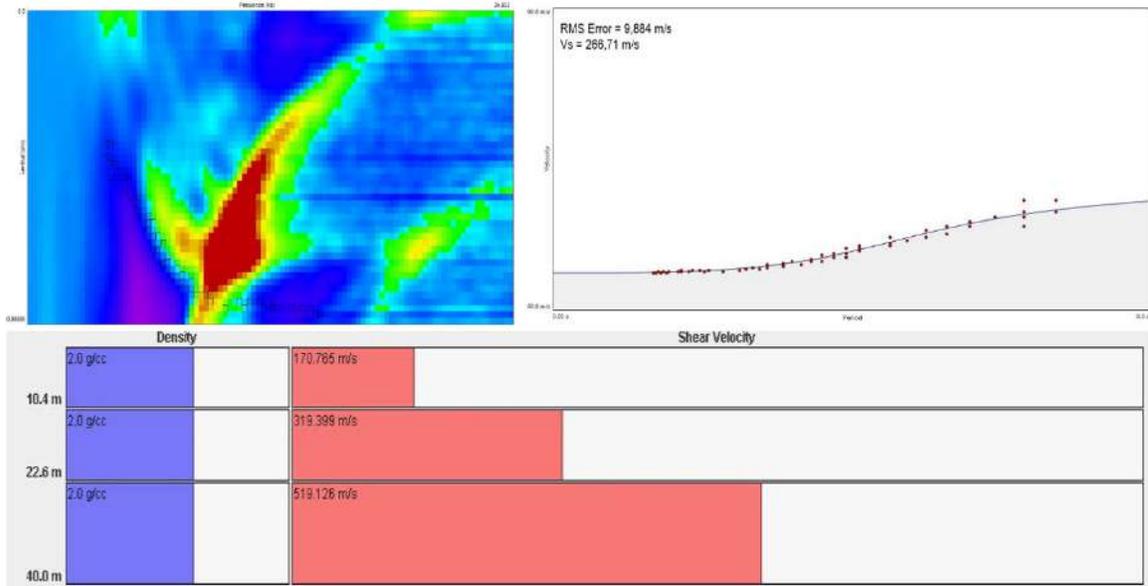


Figura 12.

La curva de dispersión del P4A posee una velocidad promedio (V_s) de 271, 153 y tipo de suelo D.

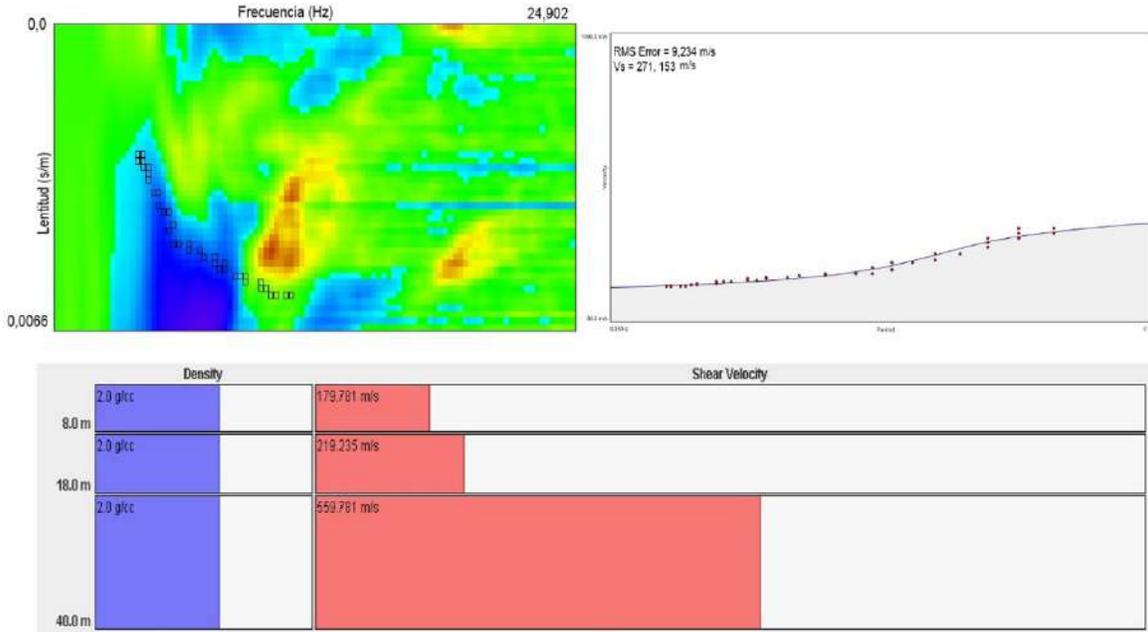


Figura 13.

La curva de dispersión de P5A tiene una velocidad promedio de 242,123 m/s y tipo de suelo D.

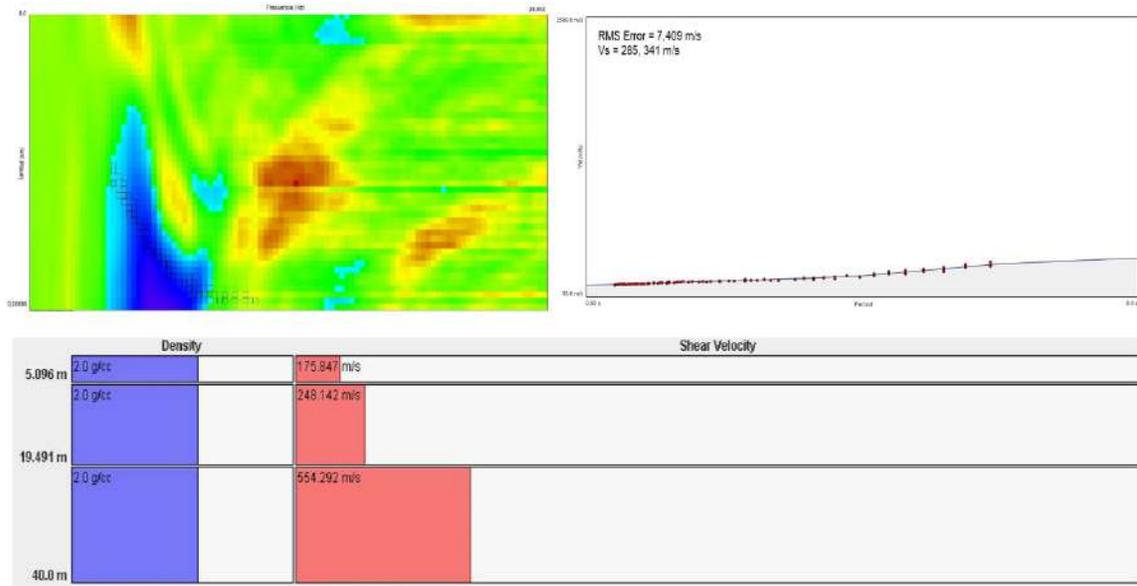


Figura 14.

La curva de dispersión del P6A tiene una velocidad promedio V_s de 267,744 m/s y tipo de suelo D.

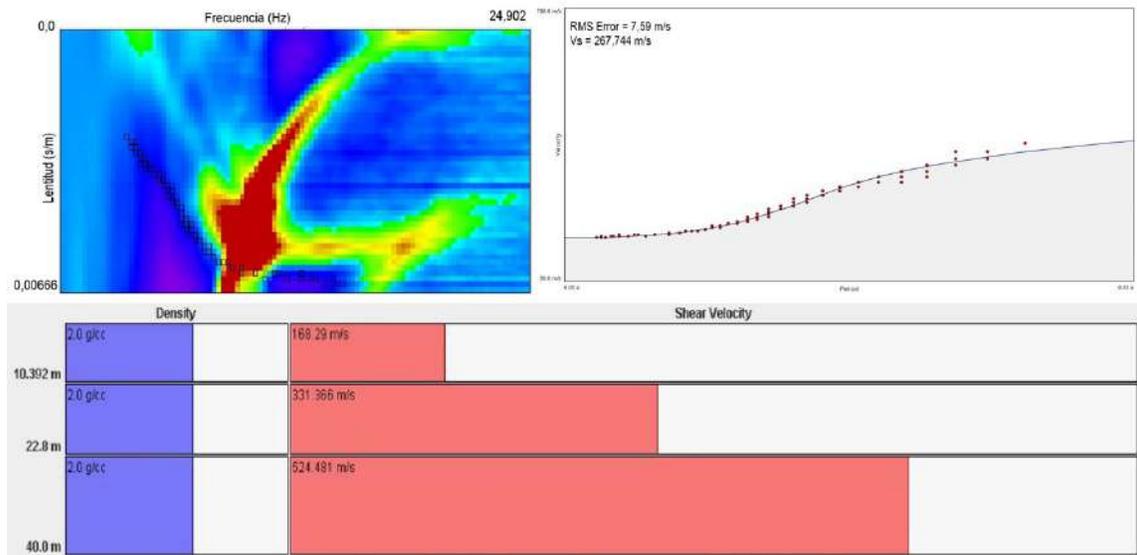


Tabla 3.*Resumen de los resultados de los modelos de profundidades de capas, Vs y Vs Promedio.*

Separación entre geófono 5,0 m				
Capa 1				
Perfiles	Espesor (m)	Vs (m/s)	Espesor Promedio (m)	Vs Promedio (m/s)
P1B	6,79	166,11	8,51	170,67
P2B	9,78	158,31		
P3B	11,40	179,78		
P4B	9,20	184,97		
P5B	5,10	175,85		
P6B	8,80	159,02		
Capa 2				
Perfiles	Espesor (m)	Vs (m/s)	Espesor Promedio (m)	Vs Promedio (m/s)
P1B	10,92	328,47	11,49	272,42
P2B	10,42	280,27		
P3B	10,60	253,50		
P4B	10,80	206,28		
P5B	14,40	248,14		
P6B	11,80	317,87		
Capa 3				
Perfiles	Espesor (m)	Vs (m/s)	Espesor Promedio (m)	Vs Promedio (m/s)
P1B	22,29	509,78	20,00	518,33
P2B	19,80	446,28		
P3B	18,00	510,98		
P4B	20,00	506,01		
P5B	20,51	554,29		
P6B	19,40	582,62		

Figura 15.

La curva de dispersión del PIB tiene una velocidad promedio de 307,3 m/s, el tipo de suelo que corresponde a D.

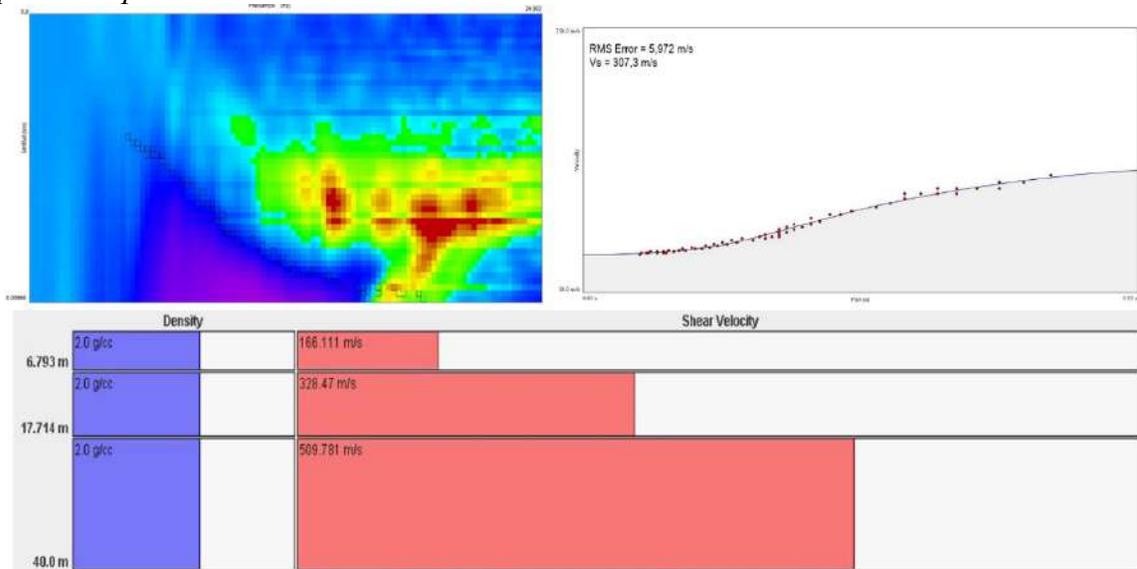


Figura 16.

La curva de dispersión del P2B posee valor de velocidad promedio de 249,85 m/s y el tipo de suelo es D.

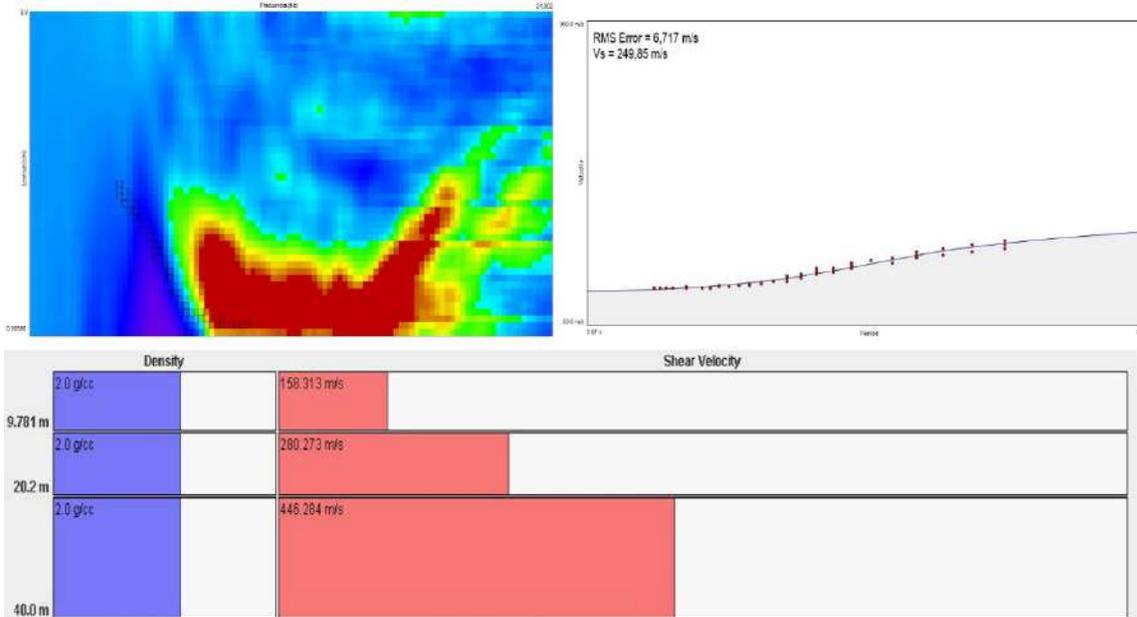


Figura 17.

La curva de dispersión del P3B tiene una velocidad promedio de 250,197 m/s, con un tipo de suelo D.

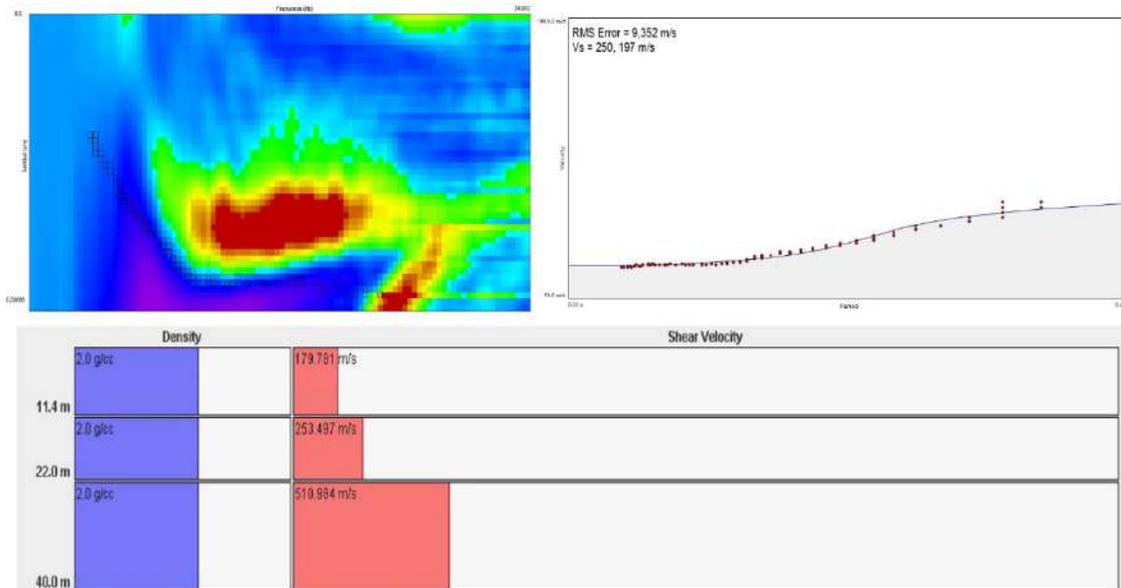


Figura 18.

La curva de dispersión para P4B presenta una velocidad promedio de 248,201 m/s y tipo de suelo D.

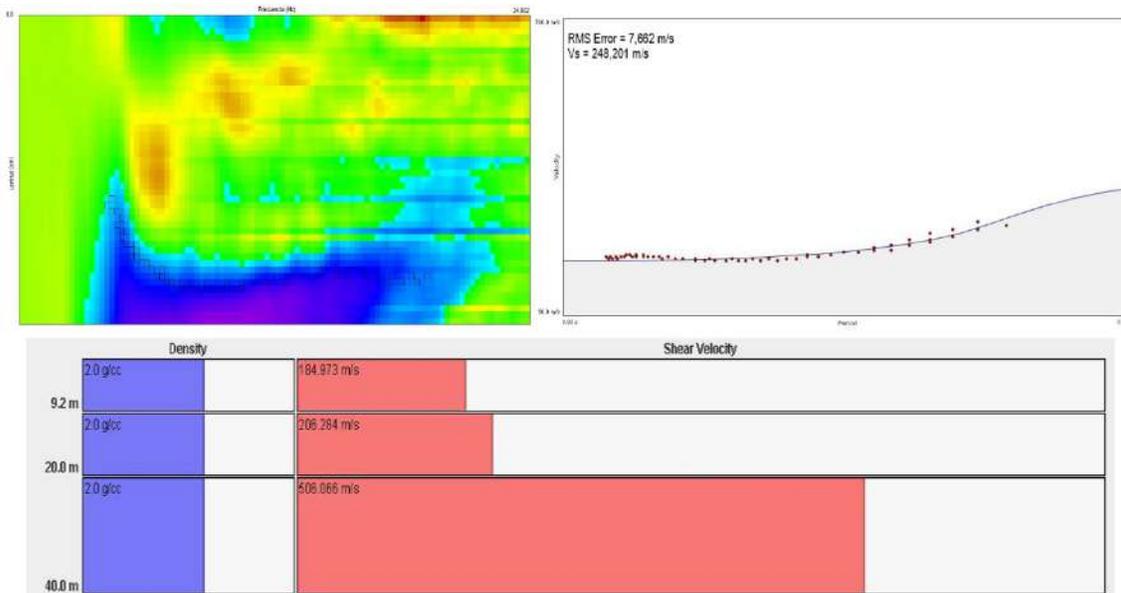


Figura 19.

La curva de dispersión P5B tiene una velocidad promedio 285,341 m/s, con tipo de suelo D.

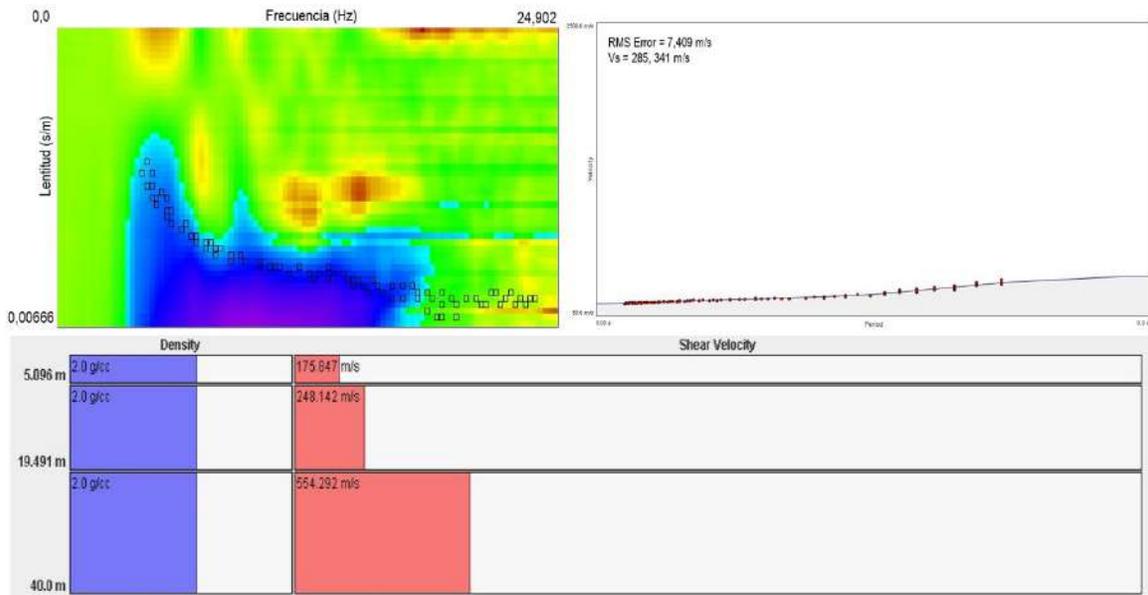


Figura 20.

La curva de dispersión del P6B posee una velocidad promedio V_s corresponde a 278,552 m/s y el tipo de suelo es D.

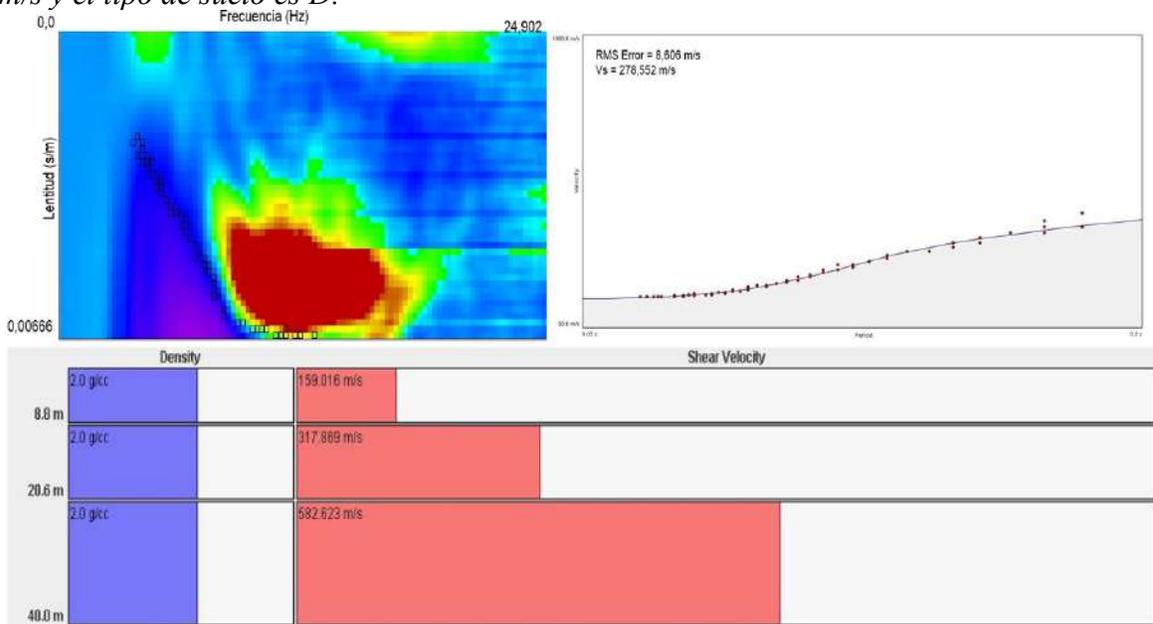


Figura 21.

En la primera capa, los materiales más blandos se concentran en el sur y sureste (P5, P6) y parte del noroeste (P1), mientras que los materiales relativamente más compactos y rígidos se localizan en el centro-norte y noreste (P3, P4 y cercanías de edificaciones).

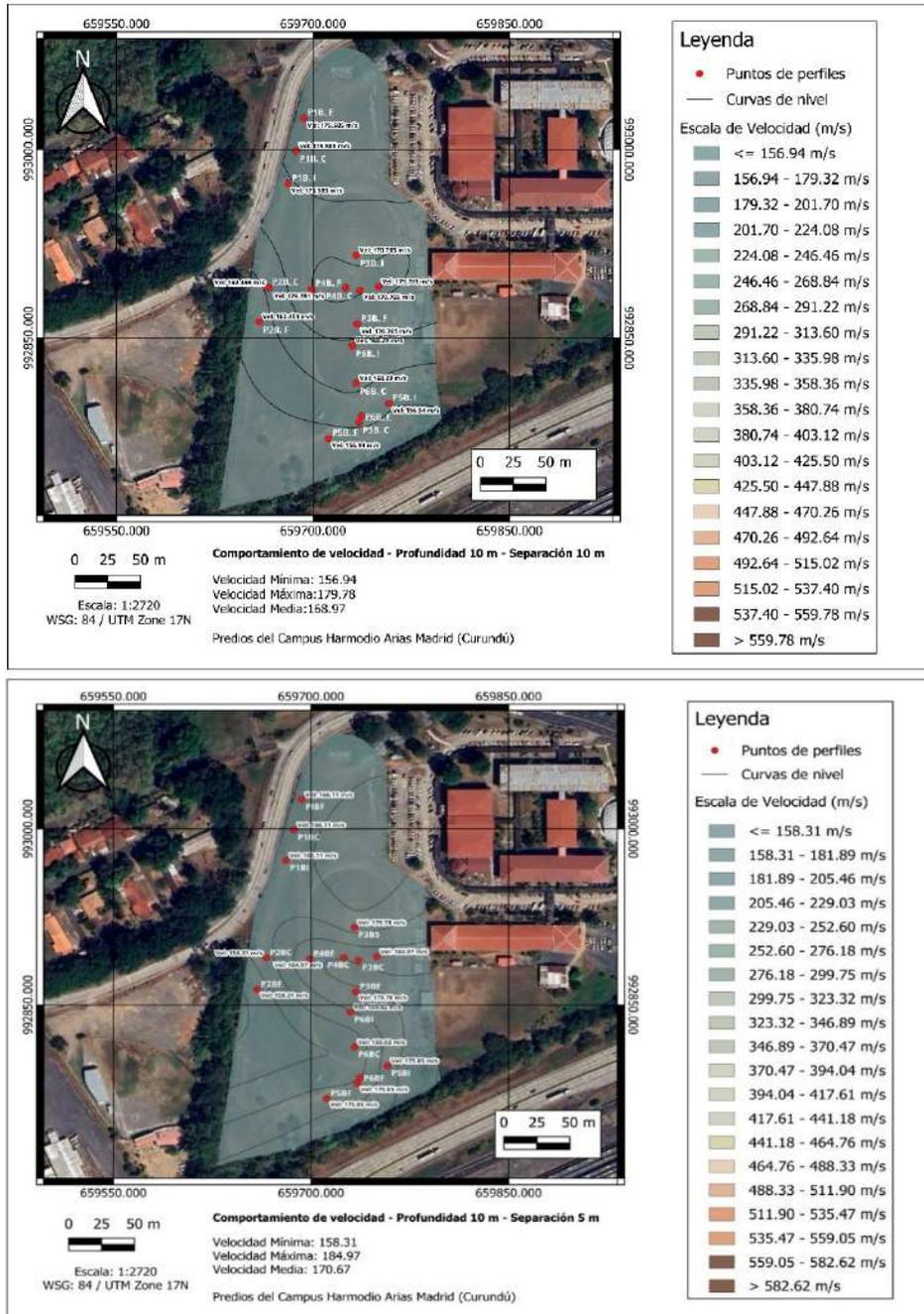


Figura 22.

En la capa de 10–20 m de profundidad, el sur y suroeste del campo (P5 y P6) continúan siendo más blandos y vulnerables, mientras que el norte y noreste (P1 y P2) presentan materiales más rígidos y compactos, indicando un mejor comportamiento geotécnico.

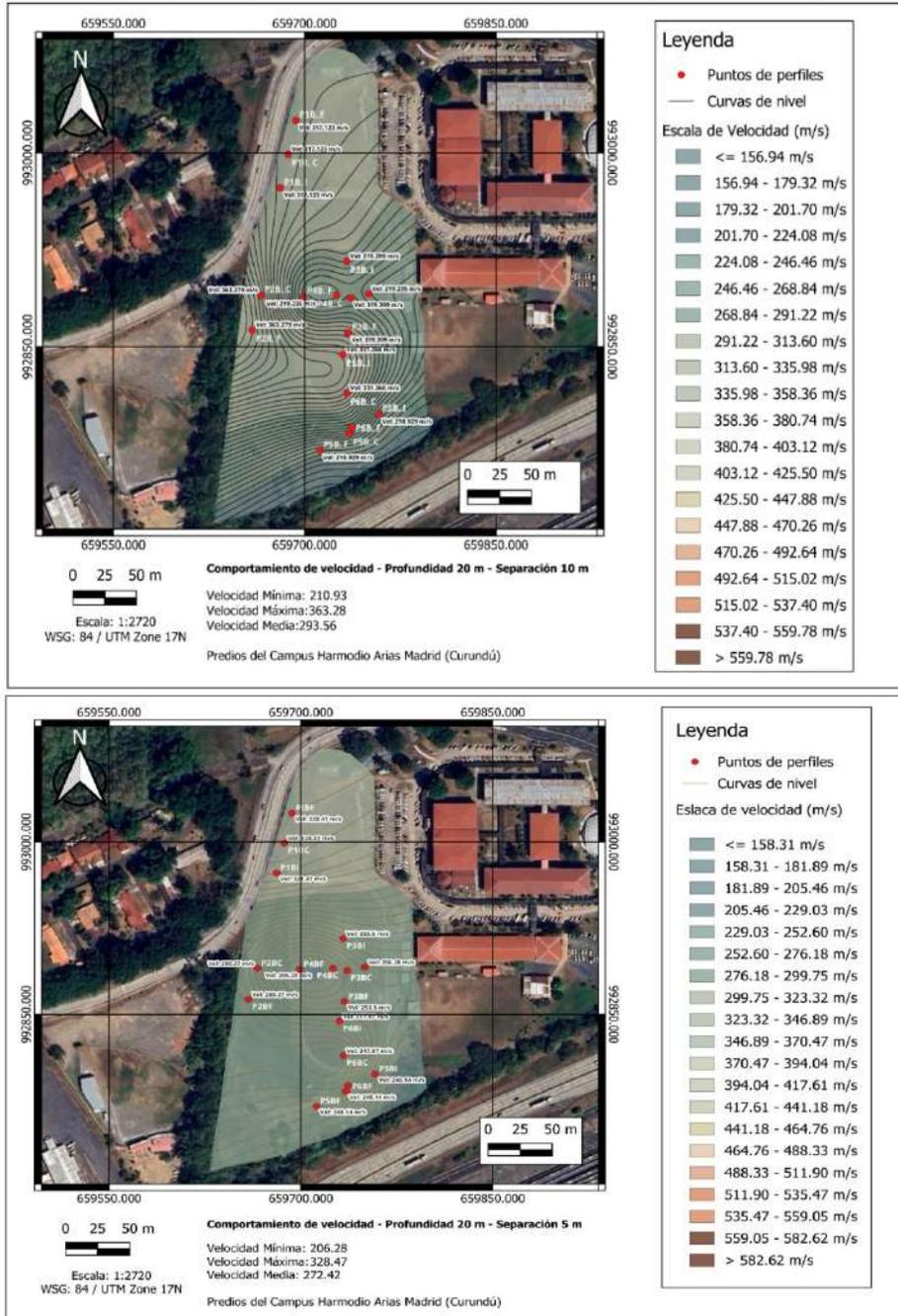


Figura 23.

El sur y sureste del campo (P5, P6) concentran los materiales más rígidos y compactos, actuando como el sustrato más competente del área. El centro (P3, P4) muestra rigidez intermedia, mientras que el noroeste (P1, P2) sigue siendo comparativamente menos compacto, reflejando mayor vulnerabilidad geotécnica por su relación con rellenos y drenajes. En la capa 3, ambas configuraciones coinciden en la tendencia general: el sur-sureste es el más rígido, el centro intermedio y el noroeste más blando. La diferencia es que el arreglo de 5 m resalta variaciones locales más extremas (máximos en el sur, mínimos en el noroeste), mientras que el de 10 m suaviza los contrastes y da un promedio más estable.

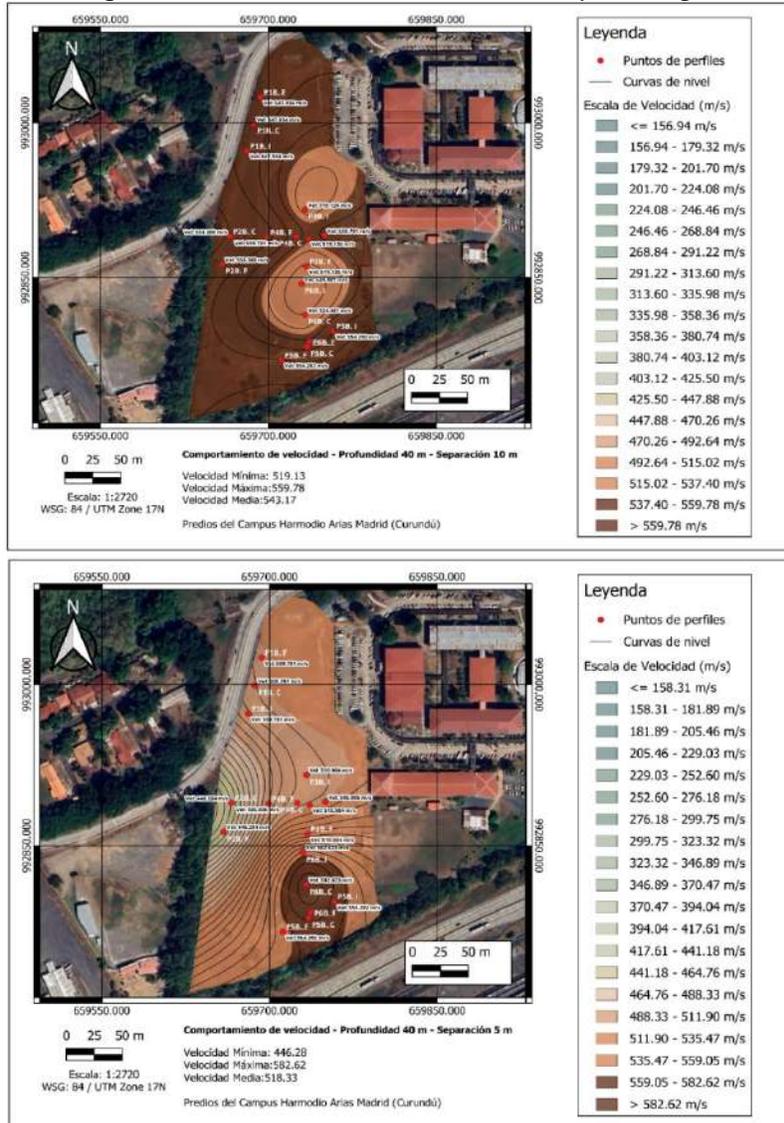
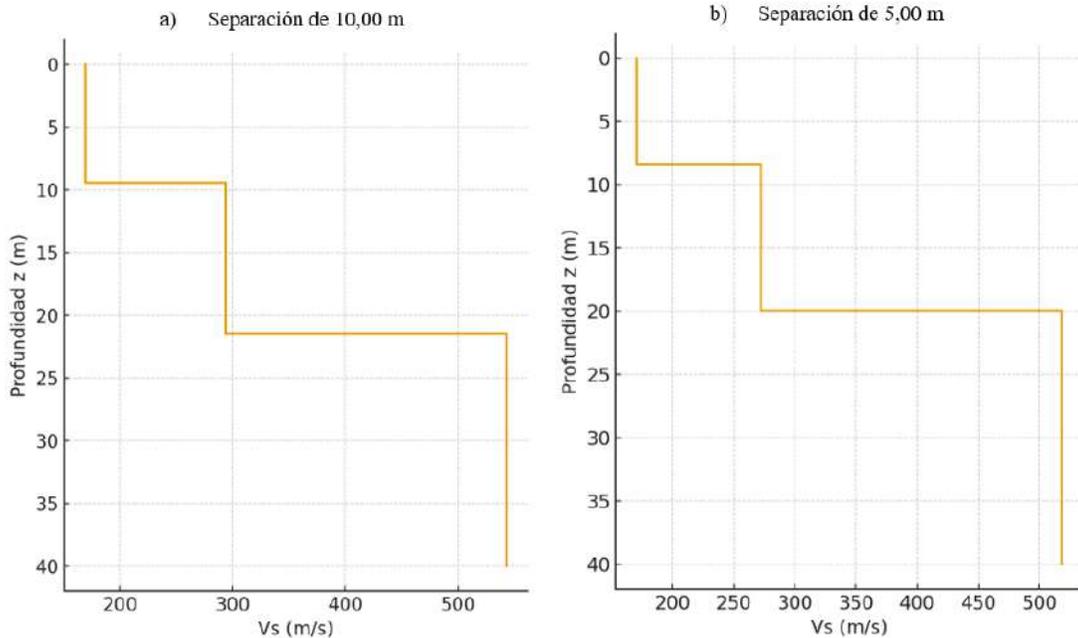


Figura 24.

Comparación de modelos de velocidad V_s en función de la profundidad obtenidos con separaciones de 10 m y 5 m.



La comparación de los modelos V_s obtenidos con separaciones de 10 m (P1A–P6A, longitud 110 m) y 5 m (P1B–P6B, longitud 55 m) permite evaluar la consistencia de los resultados y la influencia de la geometría del arreglo en la resolución del subsuelo.

Los espectros de dispersión de ondas superficiales evidencian una tendencia clara, con la energía concentrada entre 10 y 20 Hz y velocidades de 150 a 350 m/s, lo que corresponde a un estrato superficial de baja rigidez. A frecuencias menores (<10 Hz), la velocidad supera los 500 m/s, lo que indica la presencia de materiales más compactos y competentes en profundidad.

En la Capa 1, los espesores promedios son de 9,48 m para los perfiles a 10 m y 8,51 m para los perfiles a 5 m, con velocidades promedio de 168,97 m/s y 170,67 m/s, respectivamente. Estos valores son muy cercanos y reflejan una buena correspondencia entre ambas configuraciones, aunque los perfiles a 5 m tienden a mostrar mayor variabilidad local debido a la mejor resolución espacial.

En la Capa 2, se observa una ligera diferencia: el espesor promedio de los perfiles a 10 m es 12,06 m con $V_s \approx 293,56$ m/s, mientras que en los perfiles a 5 m el espesor promedio es 11,49

m con $V_s \approx 272,42$ m/s. Esto sugiere que el arreglo más cerrado capta una transición algo más gradual entre la segunda y tercera capa, reduciendo el valor medio de velocidad.

En la Capa 3, las diferencias son mínimas. El espesor promedio es 18,46 m con $V_s \approx 543,17$ m/s para los perfiles a 10 m, y 20,00 m con $V_s \approx 518,33$ m/s para los perfiles a 5 m. La correspondencia es consistente, aunque en algunos perfiles (por ejemplo, P6B) el arreglo de 5 m evidencia valores de V_s más elevados (hasta $\approx 582,62$ m/s), lo que refleja mayor sensibilidad a contrastes locales en profundidad.

En conjunto, ambos conjuntos de perfiles muestran una buena coherencia en la identificación de las tres capas principales, con variaciones atribuibles a la diferencia en la longitud y espaciamiento del arreglo. Los perfiles de 10 m (110 m de longitud total) permiten una mayor penetración y estabilidad en las velocidades promedio, mientras que los de 5 m (55 m de longitud total) ofrecen una resolución más detallada de variaciones locales. Esta comparación refuerza la validez de los resultados y confirma que el modelo de tres capas obtenido es robusto frente a cambios en la configuración de adquisición.

Tabla 4.

Velocidades promedio V_s para cada capa, su clasificación de tipo de suelo y material (ASCE, 2017).

Capa	Velocidad Promedio V_s (m/s)	Tipo de Suelo	Material
1	157 – 186	Suelo Blando	Relleno suelto, arcillas muy blandas y relleno antrópico.
2	210 – 370	Suelo Arenoso y Arcilloso	Arenas de consistentes, arcilla arenosa y arcilla sedimentaria.
3	480 – 585	Suelo Pedregoso	Roca blanda sedimentaria ígnea, arenisca, esquistos y gravilla.

Este estudio clasifica el suelo del área de investigación como tipo D según la norma IBC, con una velocidad promedio de 269,91 m/s. Esta categoría corresponde a depósitos de suelos blandos, definidos por velocidades de onda de corte (V_s) en el rango de 180 a 360 m/s. Esta condición concuerda con estudios previos en la ciudad de Panamá (Batista, 2016; CAPRA, 2015) y resalta la vulnerabilidad de la zona frente a eventos sísmicos, especialmente por la influencia de los rellenos antrópicos y la proximidad al drenaje del río Curundú.

La comparación entre los arreglos de 5 m y 10 m evidenció la robustez del modelo, al mismo tiempo que destacó la capacidad del arreglo corto para identificar variaciones locales y del arreglo largo para ofrecer estabilidad en los valores promedio. No obstante, se reconoce como limitación la profundidad investigada de 40 m, suficiente para la estimación del V_{s30} pero insuficiente para definir con precisión el comportamiento de estratos más profundos que podrían incidir en la respuesta sísmica regional.

En consecuencia, los resultados obtenidos constituyen un aporte relevante para la microzonificación sísmica del campus y representan una base técnica que puede ser fortalecida en investigaciones futuras mediante la integración de otros métodos no invasivos, como MASW o H/V, a fin de consolidar un marco geotécnico más completo que respalde el diseño de infraestructuras resilientes y la gestión del riesgo en entornos urbanos.

CONCLUSIONES

El análisis comparativo de los perfiles con separaciones de 10 m y 5 m confirma la existencia de un modelo de tres capas bien definido. Los estratos superficiales presentan velocidades bajas (≈ 170 m/s), seguidos por una capa intermedia de transición y una base rígida con valores superiores a 500 m/s. Ambos arreglos muestran resultados consistentes: el de 10 m ofrece mayor estabilidad en los valores promedio, mientras que el de 5 m resulta más sensible a variaciones locales. En conjunto, el suelo se clasifica como tipo D según la norma IBC, con una velocidad promedio de 269,91 m/s, lo que evidencia la presencia de depósitos de suelos blandos en el área de estudio.

El montaje experimental, sencillo y práctico, resultó adecuado para las condiciones del área de estudio, favoreciendo la cobertura de grandes extensiones y disminuyendo la incertidumbre geológica entre sondeos puntuales. Los registros adquiridos, con intervalos de muestreo largos y repetidos, garantizaron una alta resolución espectral. La disposición de arreglos de 110 m y 55 m, con separaciones de geófonos de 10 m y 5 m respectivamente, permitió alcanzar una profundidad de exploración de hasta 40 m, identificando con claridad las tres capas principales.

Se comprobó que la selección de puntos en la curva de dispersión influye directamente en la precisión del ajuste: una mayor densidad de puntos reduce el error, mientras que una menor densidad lo incrementa significativamente.

Los valores de Vs obtenidos (200–300 m/s en promedio) clasifican el terreno como suelo tipo D, asociado a rellenos antrópicos, depósitos aluviales y suelos finos blandos y arenosos. En detalle, la primera capa (≈ 170 m/s) corresponde a relleno superficial; la segunda capa (≈ 280 m/s) se asocia a arcillas; y la tercera capa (≈ 585 m/s) se vincula a roca blanda.

Finalmente, se resalta que el sector oeste del área de estudio presenta mayor vulnerabilidad geotécnica, al encontrarse adyacente al drenaje del río Curundú, condición que lo hace más susceptible a efectos dinámicos y de inestabilidad del terreno.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Laboratorio de Hidrología, Isotópica y Geofísica Aplicada por el apoyo brindado durante el desarrollo de este trabajo, facilitando el acceso a sus instalaciones, equipos y recursos técnicos. Su contribución fue fundamental para la realización de las mediciones, el procesamiento de datos y la obtención de resultados confiables, lo que permitió cumplir de manera satisfactoria con los objetivos de esta investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society of Civil Engineers (ASCE). Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7-16). Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2017. Sección 20.3, “Site Classification Procedure for Seismic Design”, Tabla 20.3-1.
- Aponte González, J. (2011). Tesis de Maestría *"Evaluación de Métodos No Convencionales de Caracterización Geotécnica"*. Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
- Batista, L. (2016). Tesis de Grado *"Estudio de las ondas superficiales para caracterización del terreno en zonas urbanas, mediante la sismica de microtemores (ReMi)"*. Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Universidad de Panamá, Panamá, Panamá.
- CAPRA. (marzo de 2015). *Modelación probabilista de riesgo sísmico para la ciudad de Panamá*. Portafolios de Educación y Salud. Panamá.
- Dobrin, M. B. y Savit, C. H. (1999). *Introduction to Geophysical Prospecting*. Estados Unidos de América: 4th Edición, Mc GRAW-HILL.

- Escalona Medina, A. K. (2016). *Determinación de la Vs30 a través del cálculo de razón espectral H/V* [Proyecto de título, Universidad del Bío-Bío]. Universidad del Bío-Bío.
- Granda Sanz, A., Granda París, T. y Madrid Contreras, A. (2005). *El método de la Sísmica Pasiva: una herramienta fiable para la caracterización geotécnica del terreno en zonas urbanas*. *International Geophysical Technology*, 78-84.
- Jaimes Villamizar, J. D. (2011). Tesis de Grado "*Métodos Geofísicos Aplicados a la Caracterización de Suelos: Estado del Arte*". Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander.
- Keller, G. (1986). *An Introduction to Geophysical Exploration*. Transactions American Geophysical Union.
- Khaheshi, B., Kasgin y Dariush M. (2010). *On the Efficiency of the Multi-Channel Analysis of Surface Wave Method for Shallow and Semideep Loose Soil Layers*. Ottawa, Canada.
- Lazcano, S. (2007). *Caracterización de suelos arenosos mediante análisis de ondas de superficie*. México, pp. 1-28.
- Lermo Samaniego, J. y Limaymanta Mendoza, F. M. (2007). *Uso de las funciones de transferencia empíricas (HVNR) obtenidas con microtemores para construir mapas con la clasificación de los terrenos de cimentación para diseño sísmico*. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica.
- Linares Montenegro, G. M. (2005). Trabajo de Grado "*Introducción y Aplicación del Método de Sísmica de Microtemores en Áreas Urbanas*". Sartenejas, Venezuela: Universidad Simón Bolívar.
- Louie, J. (2001). *Faster,better:Shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtemor arrays*. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 347-364.
- Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of Geophysics*. New York: Cambridge University Press.
- Muñoz Martín A. y Carbó Gorosabel A. (2006). *Resultados y experiencias de aplicación del método de Refracción por Microtemor (Sísmica Pasiva) para la investigación geofísica de las nuevas líneas de metro en Madrid (España)*. GEOGACETA, 40.

- Ochoa Cornejo, F. (2007). *Caracterización Geotécnica a través del uso de ondas Rayleigh*. Chile.
- Oliveras Cisternas, F. A. (2024). *Avances en la definición de indicadores de incertidumbre en el cálculo del Vs30 basado en métodos de ondas superficiales* [Memoria de título, Universidad de Chile]. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil.
- Optim. (2006). *User manual for SeisOpt ReMi Software. Computer Programs in Biomedicine*, 18(1-2).
- Ortega Contreras, B. H., & Pérez Pallares, J. S. (2020). *Métodos de exploración del subsuelo para la determinación del perfil de velocidad de onda cortante* [Trabajo de grado, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña]. Facultad de Ingeniería Civil.
- Pancha, A., Anderson, J. G., & Louie, J. N. (2021). *Multidisciplinary applications of refraction microtremor (ReMi) for site characterization: Mapping lateral heterogeneities and liquefaction potential*. *Seismological Research Letters*, 92(4), 2345-2357. <https://doi.org/10.1785/0220200356>
- Park, C.B., Miller, R.D. y Xia, J. (1999). *Multichannel analysis of surface waves*. *Geophysics* 64, pp. 800-808.
- Park, C., Miller, R. D., Xia, J. (1999). *Multichannel analysis of surface waves*.
- Paz Penagos, H., Uyuban, J., Narváez, A. y Ferro Escobar, R. (2016). *DESARROLLO Y PRUEBA DE UN SISTEMA DE RADIO TELEMETRÍA PARA ADQUISICIÓN SÍSMICA*. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 27, núm. 1, 2017 Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia. Obtenido de *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 27, núm. 1, 2017 Universidad Militar Nueva Granada.
- Pérez Cuevas, J. (2015). *Desarrollo e implementación de métodos avanzados de exploración sísmica activa y pasiva, y del método del gradiente topográfico en el análisis de microzonificación sísmica en el sureste de la Península Ibérica* [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cartagena]. Departamento de Ingeniería Minera, Geológica y Cartográfica.
- Pérez Santisteban, I. (2012). Tesis Doctoral "*Caracterización Geotécnica de los Suelos de Madrid Mediante la Técnica ReMi*". Madrid: Universidad Complutense de Madrid.

- Pinilla, C. (2012). Tesis de Grado "*Correlación entre el perfil de velocidad de propagación de ondas de corte y el espectro de respuesta en suelos*". Universidad de Chile, Chile.
- Pulido Vásquez, J. y Rodríguez Gutiérrez, M. (2015). Tesis "*Caracterización del Subsuelo utilizando el Método Geofísico de Refracción por Microtremores ReMi para Segmento de la Avenida Circunvalar y Parque Central Simón Bolívar*". Bogotá, Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Reynolds, J. M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd.
- Rivas Lucero, R. A. (2016). *Efecto en la curva de dispersión a través del método MASW, al realizar variaciones en el peso de la fuente activa y el tipo de placa* [Proyecto de título, Universidad del Bío-Bío]. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.
- Rivera, M.; Piedra, R. y Paripanca, Y. (2016). *Ensayos Geofísicos de Refracción Sísmica y de Medición de Ondas de Corte (MASW y MAM) para usos de cimentación en obras de edificaciones*. Revista CIVILIZATE, 50-55.
- Rix, G. (1988). *Experimental study of factors affecting the Spectral-Analysis-of-Surface-Waves method*. 315 pp. Austin: Universidad de Texas.
- Saito, M. (1979). *Computations of reflectivity and surface wave dispersion curves for layered media; I, Sound wave and SH wave*. Butsuri-Tanko 32, no. 5, pp. 15-26.
- San Martín Rosales, C. (2015). *Estudio de la eficiencia de diferentes configuraciones de geófonos para la utilización del método ESAC* [Proyecto de título, Universidad del Bío-Bío]. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.
- Secretaría de Gobernación [SEGOB]. (2018). *Guía básica de procesamiento de datos para distintos métodos aplicados en estudios de microzonificación sísmica*. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). <https://www.cenapred.gob.mx>
- Serna Vásquez, A. (2015). Tesis de Magister "*Evaluación de la resolución del método de análisis de dispersión de ondas superficiales MASW (multichannel analysis of surface waves) en suelos residuales*". (D. d. Universidad Nacional de Colombia, Ed.) Medellín, Colombia.

Stewart, R.H., Stewart, J.L. y Woodring, W. P. (1980). *Mapa Geológico del Canal de Panamá y sus Alrededores, República de Panamá. Panamá.*

Udias, A. y Mezcuca, J. (1997). *Fundamentos de Geofísica.* España: Alianza Editorial.

URS Holdings.Inc. (2007). *Geomorfología de la Ampliación del Canal. Estudio de Impacto Ambiental Categoría III, Proyecto de Ampliación del Canal de Panamá - Tercer Juego de Esclusas. Panamá.*

Xia, J.R., Miller, R. D. y Park, C.B. (1999). *Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves.* Geophysics 64, pp. 691-700.



COMUNICACION CORTA

Impacto de simuladores educativos basados en inteligencia artificial en el aprendizaje de ciencias computacionales

Impact of educational simulators based on artificial intelligence on computational science learning.

Ricardo M. Candanedo Yau

Universidad de Panamá, Centro Regional Universitario de Panamá Este, La Chorrera, Panamá.

ricardo.candanedo@up.c.pa

<https://orcid.org/0009-0002-5017-9830>

Fecha de recepción: 1 de octubre de 2025

Fecha de aceptación: 17 de noviembre de 2025

DOI: <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v28n1.a8960>

RESUMEN

La enseñanza de las ciencias computacionales ha enfrentado desafíos derivados de la naturaleza abstracta de conceptos como la inteligencia artificial (IA), la interacción persona-computador y los gráficos por computadora. Este estudio evaluó la eficacia de un simulador educativo de código abierto denominado AI-CodeCraft, diseñado para fomentar el aprendizaje activo y personalizado. Se empleó un diseño cuasiexperimental con 45 estudiantes distribuidos en un grupo experimental ($n = 30$) y un grupo control ($n = 15$), durante tres semanas de sesiones prácticas. Los resultados indicaron que el grupo experimental mejoró su rendimiento académico en un 22 %, frente al 8 % del grupo control ($t = 3.27$; $p < 0.01$). Además, el 78 % de los participantes reportó un incremento en la motivación y el 91 % valoró positivamente la retroalimentación adaptativa. Se identificaron limitaciones relacionadas con los requerimientos de hardware y la curva de aprendizaje del simulador. Estos hallazgos sugirieron que los simuladores de educación basados en inteligencia artificial (IA) y la simulación como estrategia de tecnología educativa pueden potenciar la comprensión conceptual y la motivación estudiantil, aunque su generalización depende de la infraestructura tecnológica disponible y de la duración de la intervención.

PALABRAS CLAVE

Aprendizaje activo, educación, inteligencia artificial, simulación, tecnología educativa.

ABSTRACT

Computer science education has faced challenges stemming from the abstract nature of concepts such as artificial intelligence (AI), human-computer interaction, and computer graphics. This study evaluated the effectiveness of an open-source educational simulator called AI-CodeCraft, designed to foster active and personalized learning. A quasi-experimental design was used with 45 students divided into an experimental group (n = 30) and a control group (n = 15) during three weeks of practical sessions. The results indicated that the experimental group improved their academic performance by 22%, compared to 8% in the control group (t = 3.27; p < 0.01). Furthermore, 78% of participants reported increased motivation, and 91% positively valued adaptive feedback. Limitations related to the hardware requirements and the simulator's learning curve were identified. These findings suggested that artificial intelligence (AI)-based educational simulators and simulation as an educational technology strategy can enhance conceptual understanding and student motivation, although their generalization depends on the available technological infrastructure and the duration of the intervention.

KEYWORDS

Active learning, artificial intelligence, education, educational technology, simulation.

INTRODUCCIÓN

La enseñanza de ciencias computacionales presenta dificultades pedagógicas debido a la complejidad de conceptos como inteligencia artificial (IA), interacción persona-computador (HCI) y gráficos por computadora, los cuales requieren razonamiento lógico, pensamiento crítico y resolución de problemas complejos (Alves & Leal, 2019; Russell & Norvig, 2020). Los métodos tradicionales, como clases magistrales y ejercicios estáticos, suelen ser insuficientes para fomentar comprensión profunda y motivación estudiantil.

Los simuladores educativos ofrecen entornos seguros para experimentar con modelos abstractos, manipular variables en tiempo real y visualizar procesos dinámicos. La incorporación de IA permite mejorar la enseñanza de las ciencias computacionales mediante la retroalimentación adaptativa y personalización de la dificultad (Alonso & Ruiz, 2022; Chen et al., 2020; Franklin et al., 2025; Gaitantzi & Kazanidis, 2025; Manorat et al., 2025). Asimismo, la integración de HCI y gráficos interactivos facilita la comprensión de algoritmos complejos, entrenamiento de redes neuronales y ajuste de hiperparámetros (Norman, 2019; Shneiderman et al., 2017).

Este estudio evaluó el impacto del simulador educativo de código abierto denominado AI-CodeCraft en el aprendizaje de ciencias computacionales, centrando el análisis en comprensión conceptual, motivación y diseño de interacción persona-computador.

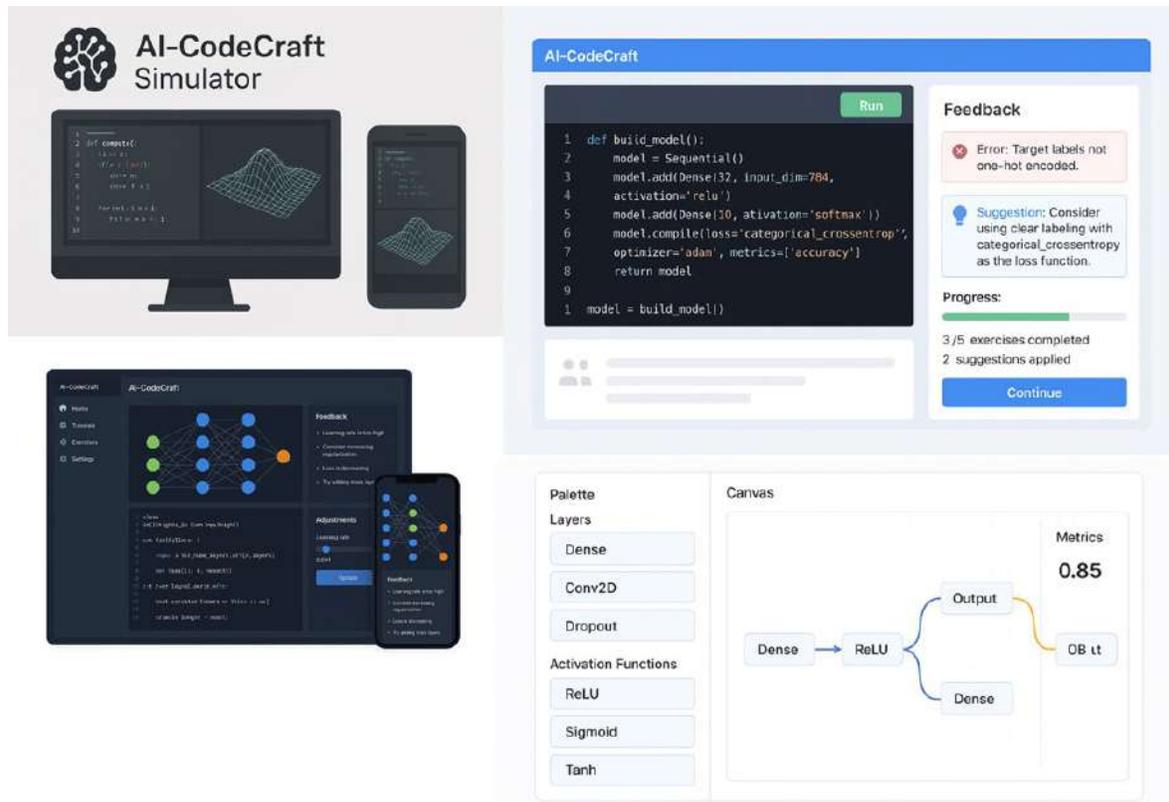
MATERIALES Y MÉTODOS

El simulador educativo denominado AI-CodeCraft (Figura 1) fue concebido como una plataforma de aprendizaje inmersiva y de código abierto, orientada a la visualización interactiva del entrenamiento de modelos de *machine learning*. Su arquitectura se estructuró en tres componentes interdependientes: una inteligencia artificial adaptativa, que proporcionó retroalimentación inmediata, ajustó progresivamente la complejidad de los ejercicios y generó recomendaciones personalizadas; un sistema de interacción persona-computador basado en una interfaz gráfica intuitiva, que incluyó elementos *drag-and-drop*, visualizaciones interactivas y ayudas contextuales; y un módulo de gráficos por computadora, que permitió la representación tridimensional de redes neuronales, la visualización de flujos de datos y la animación de procesos de propagación de errores y ajuste de pesos. La implementación técnica se realizó utilizando Python, con las bibliotecas TensorFlow y PyTorch, React para el desarrollo de la interfaz web, y Unity para la visualización tridimensional.

La investigación se llevó a cabo con 45 estudiantes entre ellos de tercer y cuarto año de la Licenciatura en Informática para la Gestión Educativa y Empresarial de la Universidad de Panamá, quienes fueron asignados aleatoriamente a un grupo experimental de 30 estudiantes (tercer año), que trabajó con el simulador educativo en sesiones prácticas, y a un grupo control de 15 estudiantes (cuarto año), que recibió instrucción tradicional mediante clases magistrales y ejercicios escritos. Para garantizar la comparabilidad inicial de ambos grupos, se aplicó una prueba diagnóstica previa y se realizaron análisis estadísticos de homogeneidad, incluyendo la prueba de Levene y la prueba t de Student para muestras independientes.

Figura 1.

Interfaz y visualización 3D de la evolución de pesos en una red neuronal del simulador educativo AI-CodeCraft en dispositivos de escritorio y móviles, módulo de retroalimentación adaptativa y construcción de modelos mediante drag-and-drop. Pantalla principal del simulador para escritorio y móvil. Muestra una red neuronal tridimensional con flujo de datos. Incluye un módulo de retroalimentación adaptativa en tiempo real y una interfaz de arrastrar y soltar para construir modelos de machine learning (capas, nodos y conexiones).

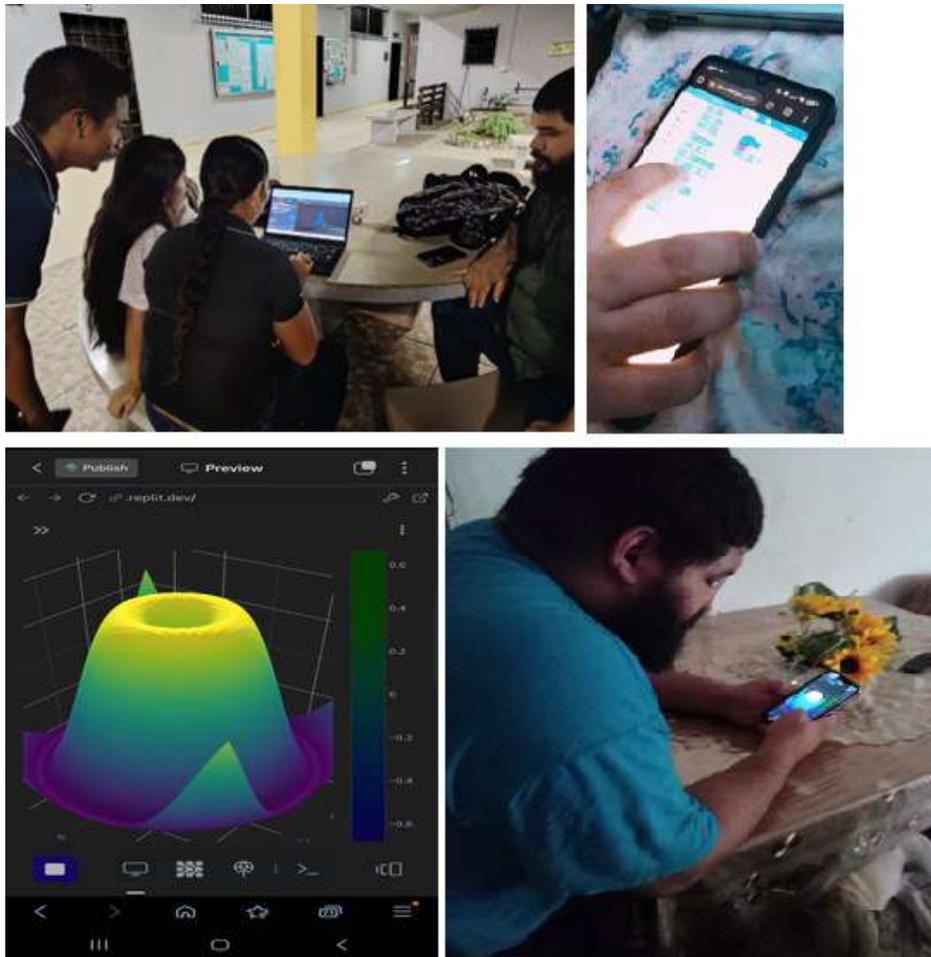


La intervención se desarrolló en tres fases consecutivas. La primera, correspondiente a la inducción, consistió en la presentación del simulador educativo, acompañada de un manual de apoyo a las actividades y una sesión práctica de orientación. La segunda fase, relativa a la intervención propiamente dicha, incluyó la exploración de algoritmos de *machine learning*, la modificación de hiperparámetros y la resolución de ejercicios prácticos; en paralelo, el grupo control trabajó los mismos contenidos mediante métodos pedagógicos tradicionales (Figura 2). Finalmente, en la fase de evaluación, ambos grupos completaron pruebas de conocimiento y encuestas de percepción, mientras que en el caso del grupo experimental se registraron métricas de interacción generadas automáticamente por el simulador.

Los instrumentos utilizados para la recolección de datos incluyeron pruebas de conocimiento, diseñadas para evaluar la comprensión conceptual y las habilidades prácticas; encuestas de percepción basadas en escalas Likert y en una adaptación del *System Usability Scale (SUS)* para valorar motivación, satisfacción y usabilidad; métricas del simulador, como tiempo de uso, intentos por ejercicio, progresión en los niveles de dificultad y frecuencia de uso de las visualizaciones tridimensionales; y entrevistas semiestructuradas y grupos focales, que permitieron obtener información cualitativa sobre la experiencia de aprendizaje, los beneficios percibidos y los desafíos identificados por los estudiantes.

Figura 2.

Evidencias visuales de la intervención estudiantil en el uso del simulador AI-CodeCraft: interacción colaborativa, ejecución de actividades y resultados gráficos en 3D



El análisis de los datos se realizó mediante estadística descriptiva e inferencial para los datos cuantitativos, incluyendo pruebas t de Student para muestras independientes y análisis de varianza unidireccional (ANOVA) con un nivel de significación de $p < 0,05$. Los datos cualitativos fueron sometidos a análisis temático, identificando categorías emergentes y patrones recurrentes. El estudio contó con el consentimiento informado de todos los participantes y con la aprobación del comité docente del Centro Regional Universitario de Panamá Este de la Universidad de Panamá.

RESULTADOS

Los hallazgos del estudio con 45 estudiantes evidenciaron un impacto positivo del simulador AI-CodeCraft en la enseñanza de contenidos avanzados de ciencias computacionales. La interfaz principal del simulador, optimizada para computadoras y dispositivos móviles, combina código, visualizaciones gráficas y retroalimentación automatizada, facilitando la comprensión de conceptos abstractos y fomentando la motivación del estudiantado.

El análisis de las pruebas de conocimiento pre y post intervención mostró un incremento promedio del 22% en el rendimiento académico del grupo experimental, mientras que el grupo control experimentó un aumento del 8%, (ver Tabla 1). Esta diferencia resultó estadísticamente significativa ($t=3,27$; $p<0,01$), lo que confirma la efectividad del simulador para mejorar la comprensión de conceptos de machine learning, especialmente en áreas como algoritmos de búsqueda, clasificación y ajuste de hiperparámetros de redes neuronales.

Tabla 1.

Resultados de las pruebas de conocimiento pre y post-intervención por grupo

Grupo	N	Promedio Pre-test ± SD	Promedio Post- test ± SD	Incremento (%)	Valor p
Experimental (simulador)	30	62.4 ± 8.1	84.5 ± 7.3	+22%	<0,01
Control (tradicional)	15	63.1 ± 7.5	71.1 ± 6.8	+8%	<0,05

Nota. El grupo experimental mostró un incremento significativamente mayor que el grupo control. SD = desviación estándar. Los valores p corresponden a la prueba t para muestras independientes.

En cuanto a la percepción de la experiencia de uso (Tabla 2), el 87% de los estudiantes consideró la interfaz “intuitiva y fácil de manejar” y un 91% valoró la retroalimentación adaptativa como “muy útil” para corregir errores en tiempo real. Los elementos más apreciados incluyeron el sistema drag-and-drop para construir modelos, la visualización en tiempo real de métricas de rendimiento y la interacción directa con parámetros configurables.

Asimismo, un 78% de los estudiantes reportó mayor motivación frente a los métodos tradicionales, un resultado respaldado por las métricas de interacción: un promedio de 42,5 minutos de uso por sesión, 3,2 intentos por ejercicio y un alto uso de las visualizaciones 3D (76%). Los errores más frecuentes se relacionaron con el ajuste de hiperparámetros, evidenciando la complejidad del tema y el valor del simulador como herramienta de práctica iterativa.

Tabla 2.

Percepciones de los estudiantes sobre el simulador AI-CodeCraft

Dimensión evaluada	N	% de respuestas positivas (4–5)
Usabilidad de la interfaz	30	87%
Retroalimentación adaptativa	30	91%
Motivación para el aprendizaje	30	78%
Claridad de las visualizaciones gráficas	30	85%

Nota. Los estudiantes valoraron positivamente la facilidad de uso y la retroalimentación adaptativa. N = número de participantes del grupo experimental.

Entre las limitaciones reportadas (Tabla 3), se encuentran los requerimientos de hardware avanzado (36%), la curva inicial de aprendizaje de la interfaz (29%), dificultades con la manipulación del espacio 3D (22%) y problemas de conectividad (13%). Estos factores sugieren la necesidad de optimizar el rendimiento gráfico, ofrecer versiones más ligeras o basadas en la nube y brindar capacitación inicial para mejorar la accesibilidad del simulador.

Tabla 3.

Métricas de interacción del grupo experimental

Métrica observada	Promedio ± SD	Observaciones adicionales
Tiempo de uso por sesión (min)	42.5 ± 10.3	Incluye exploración de todos los módulos
Número de intentos por ejercicio	3.2 ± 1.1	Repetición de ejercicios evidencia aprendizaje iterativo
Funcionalidad más usada	76%	Visualizaciones 3D
Errores frecuentes identificados	—	Ajuste de hiperparámetros

Nota. Los datos muestran interacción activa con el simulador y experimentación iterativa.

Tabla 4.*Dificultades reportadas por los estudiantes en el uso del simulador*

Tipo de dificultad	N afectados	% de estudiantes afectados
Requerimientos de hardware altos	11	36%
Curva de aprendizaje inicial	9	29%
Dificultades con interfaz 3D	7	22%
Problemas de conectividad	4	13%

Nota. Aunque las dificultades fueron menores, resaltan la necesidad de optimizar la accesibilidad y ofrecer capacitación inicial. N = número de estudiantes del grupo experimental.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos confirman que los simuladores educativos basados en inteligencia artificial constituyen una estrategia pedagógica innovadora y eficaz para la enseñanza de ciencias computacionales. La mejora significativa en el rendimiento académico del grupo experimental y los altos niveles de motivación y satisfacción reportados sugieren que la integración de inteligencia artificial, principios de interacción persona-computador y gráficos por computadora supera la eficacia de los métodos pedagógicos tradicionales (Figura 5). Este enfoque es particularmente efectivo para la comprensión de conceptos abstractos y dinámicos, como el entrenamiento de redes neuronales, donde la visualización y la experimentación activa son fundamentales. La interacción directa y adaptativa con el simulador permite internalizar conceptos complejos, convirtiendo la teoría en experiencias comprensibles, mientras que la valoración positiva de la interfaz y la retroalimentación inmediata confirma que un diseño centrado en el usuario incrementa significativamente el *engagement* y promueve aprendizaje activo.

Tabla 5.*Herramientas que cubren funcionalidades similares a AI-CodeCraft.*

Función	Herramienta / Proyecto	Qué hace	Limitaciones	Plataforma soportada
Editor visual drag-and-drop de redes neuronales	Fabrik	Permite importar, editar y compartir redes usando interfaz gráfica drag-and-drop	No ofrece visualización 3D ni retroalimentación adaptativa avanzada	Web
Visualización interactiva de redes neuronales	TorchExplorer	Inspección interactiva de módulos, histogramas y gradientes	Enfocado en análisis y depuración, no simulación 3D	Desktop
Visualización de modelos (interactiva)	Netron	Explora gráficamente estructura de redes, capas, pesos y configuraciones	No realiza animaciones dinámicas ni retroalimentación adaptativa	Web/Desktop
Plataforma drag-and-drop + diseño visual de modelos	Deep Learning Studio	Interfaz gráfica para diseñar modelos con arrastrar y soltar	Limitado a 2D, no visualización 3D ni feedback adaptativo	Desktop/Web
Herramientas de visualización educativa	TensorFlow Playground	Simula redes simples, permite ajustar parámetros y observar cambios visuales	Limitado en escala y sin visualización 3D ni feedback adaptativo	Web
Herramienta de visualización minimalista	nn_vis	Visualización de conexiones, pesos y flujo de datos en Python/OpenGL	Simple, no incluye retroalimentación adaptativa ni multiplataforma	Desktop

Nota. Elaboración Propia. Ninguna herramienta integra todas las características de AI CodeCraft (visualización 3D, retroalimentación adaptativa y diseño drag-and-drop).

El incremento del 22 % en las calificaciones del grupo experimental frente al 8 % del grupo control evidencia que la manipulación de variables y la observación de sus efectos en tiempo real facilitan una comprensión más profunda de los procesos complejos. Desde la perspectiva

pedagógica, AI-CodeCraft funciona como un tutor virtual inteligente, ofreciendo andamiaje adaptativo que fomenta autonomía, aprendizaje profundo y pensamiento crítico. La integración de metodologías basadas en problemas dentro del entorno simulado refuerza la comprensión causal de los fenómenos computacionales y potencia la capacidad de resolución de problemas.

En términos tecnológicos, la optimización de gráficos y recursos computacionales es fundamental para garantizar accesibilidad y fluidez en distintos dispositivos. Además, el desarrollo de versiones multiplataforma o en la nube y la incorporación de algoritmos más sofisticados permitirá personalizar aún más las rutas de aprendizaje según estilos cognitivos individuales, ampliando el alcance y la efectividad de estas herramientas. No obstante, el estudio presenta limitaciones relacionadas con la duración corta de la intervención, el tamaño y la representatividad de la muestra, así como la dependencia tecnológica. Estas restricciones evidencian la necesidad de futuras investigaciones con muestras más amplias, estudios longitudinales, evaluaciones interculturales y el desarrollo de simuladores más accesibles y multiplataforma, que incorporen mayor inmersión mediante realidad aumentada o virtual.

CONCLUSIONES

El presente estudio evidencia que los simuladores educativos basados en inteligencia artificial representan una estrategia pedagógica eficaz e innovadora para la enseñanza de ciencias computacionales. La mejora significativa del rendimiento académico del grupo experimental, junto con altos niveles de motivación y satisfacción, demuestra que la integración de inteligencia artificial, principios de interacción persona-computador y gráficos avanzados supera la efectividad de los métodos tradicionales. El incremento del rendimiento académico, la valoración positiva de la retroalimentación adaptativa y la facilidad de uso de la interfaz indican que la interacción personalizada y en tiempo real con el simulador facilita la comprensión conceptual de procesos complejos. Además, el simulador funciona como un tutor virtual inteligente, promoviendo aprendizaje activo, autonomía y pensamiento crítico.

El simulador educativo de código abierto denominado AI-CodeCraft mejoró significativamente el rendimiento académico (+22%) y la motivación del grupo experimental, funcionando como tutor virtual inteligente que promueve aprendizaje activo y pensamiento crítico. Se recomienda optimizar gráficos 3D, garantizar compatibilidad con dispositivos menos potentes y desarrollar versiones multiplataforma o en la nube, incorporando algoritmos avanzados que permitan personalizar las rutas de aprendizaje según estilos cognitivos individuales. Asimismo, futuras investigaciones deberían incluir estudios longitudinales, muestras más amplias y evaluaciones interculturales para consolidar la validez, generalización y efectividad de los simuladores educativos basados en inteligencia artificial (IA).

AGRADECIMIENTOS

Agradezco, en primer lugar, a Dios misericordioso por concederme la vida, la salud y la fortaleza que me permiten levantarme cada día para perseguir mis metas; sin su guía constante, la realización de este trabajo no habría sido posible. Mi gratitud se extiende profundamente a mis familiares y seres queridos, cuyo apoyo incondicional y motivación constante fueron esenciales para dedicar el tiempo necesario a completar este ensayo científico con éxito. Finalmente, deseo expresar mi reconocimiento al grupo de estudiantes que participaron activamente en la investigación. Su compromiso fue fundamental para obtener los resultados del estudio, ya que algunos se dedicaron a utilizar intensamente el simulador, de igual forma a los otros estudiantes, conformando el grupo control, que recibieron instrucción sobre los mismos contenidos a través de métodos tradicionales, como clases teóricas expositivas y ejercicios escritos o de programación básica, sin interactuar con la herramienta.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, J., & Ruiz, M. (2022). Sistemas adaptativos en la educación superior: Un enfoque desde la inteligencia artificial. *Revista Iberoamericana de Tecnología Educativa*, 15(2), 45–61. <https://doi.org/10.1234/rjte.2022.15.2.45>
- Alves, G. A., & Leal, D. (2019). The use of simulators in computer science education: A systematic mapping study. *Journal of Universal Computer Science*, 25(2), 177–198. <https://doi.org/10.3217/jucs-025-02-0177>
- Bruner, J. S. (1966). *Toward a theory of instruction*. Harvard University Press.
- Chen, L., Chen, P., & Lin, Z. (2020). Artificial intelligence in education: A review. *Education Technology & Society*, 23(3), 1–13. <https://www.j-ets.net/ETS>
- Franklin D, Denny P, Gonzalez-Maldonado DA, & Tran M. (2025). *Generative AI in Computer Science Education: Challenges and Opportunities*. Cambridge University Press.
- Gaitantzi, A., & Kazanidis, I. (2025). The Role of Artificial Intelligence in Computer Science Education: A Systematic Review with a Focus on Database Instruction. *Applied Sciences*, 15(7), 3960. <https://doi.org/10.3390/app15073960>

Manorat, P., Tuarob, S., & Pongpaichet, S. (2025) Artificial intelligence in computer programming education: A systematic literature review, *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 8, ISSN 2666-920X, <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2025.100403>.

Norman, D. (2019). *The design of everyday things* (Rev. ed.). Basic Books.

Russell, S. J., & Norvig, P. (2020). *Artificial intelligence: A modern approach* (4th ed.). Pearson.

Shneiderman, B., Plaisant, C., Cohen, M., Jacobs, S., Elmqvist, N., & Diakopoulos, N. (2017). *Designing the user interface: Strategies for effective human-computer interaction* (6th ed.). Pearson.



Parameters Characterization of Exoplanet WASP-10b Using Two Transit Surveys

Caracterización de los parámetros del exoplaneta WASP-10b mediante dos sondeos de tránsito

Franklin Simón Vásquez Guardia

Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”, Italia.

franklinsimon.vasquezguardia@studenti.unipd.it

<https://orcid.org/0000-0002-1413-6617>

Fecha de recepción: 13 de octubre de 2025

Fecha de aceptación: 20 de noviembre de 2025

DOI: <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v28n1.a8961>

ABSTRACT

The transit method, with over 4000 confirmed exoplanets to date, remains one of the most prolific and robust techniques in the field. This study focuses on the WASP-10 system, a K5-type star located 92 parsecs from Earth, which hosts the confirmed exoplanet WASP-10b. We present a detailed analysis of data from the TESS and TASTE surveys to characterize the planetary parameters of WASP-10b and compare them with values reported in the literature. Although both surveys employ the transit method, their observational strategies and data reduction pipelines differ substantially. Consequently, the datasets were processed independently and subsequently analyzed using a Markov Chain Monte Carlo (MCMC) framework to determine the orbital and physical parameters that best reproduce the observed light curves.

KEYWORDS

Differential photometry, detrending, Bayesian statistics, photometric observations (TESS, TASTE), data analysis, WASP-10b.

RESUMEN

El método de detección de exoplanetas mediante tránsitos, con más de 4000 exoplanetas confirmados por esta técnica hasta la fecha, es una de las más robustas y eficientes en el campo. En este trabajo se estudia el sistema estelar WASP-10, una estrella tipo K5 situada a 92 parsecs de la Tierra, donde se ha reportado el exoplaneta

WASP-10b. Se discute el proceso de extracción y procesamiento de datos de los sondeos TESS y TASTE, realizados sobre el sistema WASP-10, para caracterizar los parámetros del exoplaneta WASP-10b y comparar los resultados con la literatura existente. Mientras que ambos sondeos emplean el método de tránsito, sus enfoques y procedimientos difieren significativamente; por ello, los datos se procesaron por separado y luego se analizaron mediante un cálculo de Markov Chain Monte Carlo (MCMC) para obtener los parámetros orbitales y planetarios más compatibles con los modelos derivados.

PALABRAS CLAVE

Fotometría diferencial, eliminación de tendencias, estadística bayesiana, observaciones fotométricas TESS y TASTE, análisis de datos, WASP-10b.

INTRODUCTION

The search for exoplanets addresses one of humanity's most fundamental questions: the existence of other worlds like our own, but among other stars. Dating back to the IVth century, Epicurus and Democritus proposed there must be other worlds aside from our own; however, no solid proof could be provided due to the technological limitations of their time. It was not until 1995 when Didier Queloz and Michel Mayor (Mayor and Queloz 1995) put forth the most convincing evidence of an exoplanet orbiting another star that a new scientific revolution began, a revolution that, in the 29 years since their discovery, has yielded an astounding number of almost 6000 exoplanets at the date of this publication.

At present, many techniques have been developed to aid in the search for exoplanets with varying configurations of equipment and requirements for different targets and goals; however, one of the most successful techniques has been the transit method, with over 4000 out of 6000 exoplanets having been first reported by this method as of this date.

The transit method consists of quantifying a star's luminosity over time and measuring dips in the luminosity of the star due to an exoplanet crossing in front of it. If an exoplanet's orbit around its host star aligns in such a way that relative to us it obscures some of the star's light, we can measure and quantify the dip in the luminosity output or flux and extrapolate certain parameters about the planet such as its size relative to the size of its host star, the inclination of the orbit, its semi-major axis relative to its host-star size, and, if more than one transit is observed, the period length can be obtained as well.

Our object of interest is the WASP-10 system, a K5 star 300 light-years away (≈ 92 pc) from Earth, where an exoplanet WASP-10b was first reported by (Christian et al. 2009). Our objective is to characterize the exoplanet parameters utilizing the transit method with data from TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite) and TASTE (The Asiago Search for Transit Timing Variations of Exoplanets; Nascimbeni et al. 2011) surveys and compare them with the reported literature about WASP-10b.

Both datasets allow us to estimate planetary parameters for the exoplanet candidate by extracting information from the data each survey recorded. These estimated parameters are later input into a Markov Chain Monte Carlo (MCMC) calculation to statistically obtain orbital and planetary parameters that best fit the models generated from both surveys.

The data from TESS and TASTE were processed separately since the data reduction process is different in both cases. For TASTE, the data reduction had to be done manually; that is, the acquisition of properly calibrated science frames must be performed beforehand by performing BIAS, FLAT and SCIENCE frame corrections; then differential photometry was performed on the target star as well as normalization and polynomial fitting for the light-curve model to be generated. For TESS, the data could be downloaded pre-processed, requiring only a fitting for the light curve, which is available to download directly as well.

INSTRUMENTATION

The TASTE survey data were obtained at the Asiago Astrophysical Observatory, located on Mount Ekar in northern Italy at an altitude of 1 366 m. The imaging instrument used at the 1.82 m Cassegrain telescope is the AFOSC (Asiago Faint Object Spectrograph and Camera), a focal-reducer camera equipped with a 2048×2048 E2V CCD that provides an $8.5' \times 8.5'$ field of view, a fast read-out mode, and a quantum efficiency exceeding 90 % around the R band. The observations of WASP-10 analyzed in this work were performed during the night of 28–29 October 2022, starting at 21:07:24 UTC and ending at 01:21:20 UTC, covering approximately 4.23 h of continuous monitoring. This interval includes the complete transit event and a sufficient out-of-transit baseline for reliable normalization. The raw and calibration frames (bias, flats, and science images) were provided by the TASTE collaboration at the Asiago Astrophysical Observatory (Nascimbeni et al. 2011; TASTE Collaboration 2022).

Complementary space-based data were obtained from the Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS), a NASA mission operating in a highly elliptical 13.7-day orbit around Earth. TESS is designed to monitor bright G-, K-, and M-type stars for planetary transits and has, to date, confirmed more than 1,500 exoplanets. The satellite observes the sky in 27-day sectors using four identical wide-field cameras, each equipped with a 4096×4096 back-illuminated CCD detector and providing a $24^\circ \times 24^\circ$ field of view, resulting in a combined coverage of $96^\circ \times 24^\circ$ per pointing. Our dataset corresponds to Sector 56 (orbits 119–120), observed from 2022-09-02 18:07:08 UTC to 2022-09-30 15:25:39 UTC, providing 27.89 days of nearly continuous science data. This sector includes nine observed transits of the exoplanet candidate WASP-10 b.

Before assessing any analysis of our derived parameters, we first ensured that the data reduction process was performed correctly. In the following sections, we describe the procedures used to extract and process both the TASTE and TESS datasets. The data analysis was performed using Python 3.9, utilizing NumPy (Harris et al. 2020), Astropy (Astropy Collaboration 2022), and Matplotlib (Hunter 2007).

DATA PROCESSING

TASTE data reduction

The initial step in reducing the TASTE dataset was to produce calibrated science frames, where the differential photometry would be performed. To achieve this, several corrections were required beforehand.

The images obtained from modern telescopes are the result of photons passing through the optical system and being converted into an electric charge proportional to the number of photons detected by the CCD. This charge, expressed in ADU (analog-to-digital units), is proportional to the photon flux received. Since the photon flux follows a Poisson distribution, it is preferable to convert ADUs into photoelectrons (e^-) at the start of the reduction. Thus, each FITS file's pixel values were multiplied by the GAIN value specified in the header.

Bias Correction

To properly obtain useful scientific images from TASTE, several processing steps must be applied to remove all possible sources of noise. The first of these is the readout noise (RON), which is an intrinsic electronic noise generated by the current that powers the CCD electronics, particularly at the amplifier stage. This type of noise sets a physical limit on the CCD's performance, since it cannot be eliminated without turning off the electronics. To quantify and correct the signal offset introduced by this noise, we apply the BIAS frame correction.

The BIAS frame represents the baseline electronic current detected by the CCD while it is powered on but not exposed to light. Even in the absence of incoming photons, the CCD records a small number of electrons due to the operation of its electronics.

The exposure time of a BIAS frame is set to zero in order to measure only this electronic noise component. However, once the CCD is exposed to photons, additional types of noise appear, which must later be corrected through the FLAT field correction.

To correct for the electronic noise, we first created a single BIAS frame to subtract from all scientific images, thereby removing the base current from the data. This was done by computing the median of all individual BIAS frames. The median was chosen over the mean for its robustness against outliers, yielding a more reliable representation of the BIAS signal, denoted as \tilde{B} .

Since mathematical operations are involved in computing the median BIAS, error propagation must be considered. The associated uncertainty of a single BIAS frame can be obtained in two ways:

- From the readout noise value declared in the header of the FITS file.
- By computing the standard deviation of a single BIAS frame.

Alternatively, by approximating the median to the mean, the propagation of errors can also be computed using the standard error propagation formula:

$$\sigma_{\tilde{B}} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (1/N)^2 \sigma_i^2} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$$

Thus, the uncertainty associated with the median BIAS can be evaluated by any of the following methods:

- Dividing the readout noise declared in the header by the square root of N frames.
- Computing the standard deviation of the median BIAS frame and dividing by \sqrt{N} .
- Taking the standard deviation of the median BIAS frame directly.
- Calculating the standard deviation per pixel across all frames, dividing each by \sqrt{N} , and taking the median of the resulting values.

For this study, we selected the first method, taking the readout noise from the header and dividing it by \sqrt{N} , since it yielded the lowest associated error and differed from the other methods by less than 30%. This approach effectively corrects small inhomogeneities in the BIAS structure, resulting in a more uniform frame that can be reliably subtracted from the SCIENCE images.

Flat-Field Correction

Flat-field frames quantify the pixel-to-pixel sensitivity of the detector. Even under uniform illumination, each pixel responds differently due to small variations in quantum efficiency or dust contamination in the optical path. To correct this, the telescope pupil was illuminated uniformly (for example, by the twilight sky), and multiple flat-field exposures were taken. Each FLAT frame was first debiased by subtracting \tilde{B} :

$$F_r = F - \tilde{B}$$

The propagated uncertainty per FLAT frame is:

$$\sigma_{F_r} = \sqrt{\text{RON}^2 + \sigma_{\tilde{B}}^2 + |F - \tilde{B}|}$$

That is, the squared sum of: the RON reported in the header of the FLAT frames, the error associated with the median bias, and the photon noise due to the Poisson distribution of arriving photons, which is the square root of the signal.

A normalization factor f_{norm} was then computed for each frame by taking the median of a 50×50 -pixel region near the center. Each debiased flat was divided by its corresponding normalization factor:

$$\hat{F}_r = \frac{F_r}{f_{\text{norm}}}$$

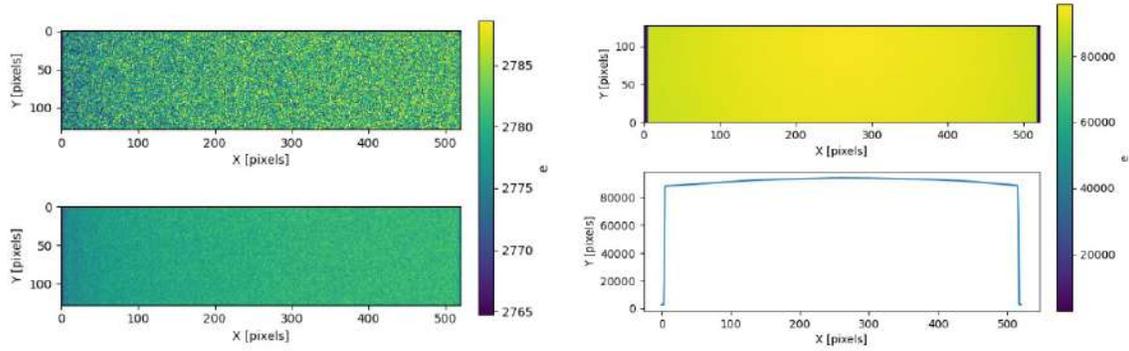
Finally, the median normalized flat $\tilde{\hat{F}}_r$ was obtained, with error propagation according to:

$$\sigma_{\tilde{\hat{F}}_r} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\sigma_{F_{r_i}}}{f_{\text{square}_i}} \right)^2}$$

This produced a final median flat with all corrections applied, as seen in Figure 1, which illustrates the bias and flat-field calibration process. This produced a final median flat with all corrections applied.

Figure 1.

Calibration frames used in the data reduction process. Left: Example of a raw bias frame (top) and the resulting median-combined master bias (bottom). Right: Example of a raw flat-field frame (top) and its median-combined profile (bottom), showing the illumination gradient across the detector.



Science frames correction

Having generated the median BIAS and FLAT frames, we corrected the science frames. Each science frame S was first debiased as:

$$S_{db} = S - \tilde{B}$$

with error:

$$\sigma_{S_{db}} = \sqrt{RON^2 + \sigma_{\tilde{B}}^2 + S_{db}}$$

Then each S_{db} frame was divided by the normalized median flat \tilde{F}_r to obtain the corrected science frame as:

$$S_{cr} = \frac{S_{db}}{\tilde{F}_r}$$

And whose error propagation is given by

$$\sigma_{S_{corr}} = S_{corr} \sqrt{\left(\frac{\sigma_{S_{db}}}{S_{db}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\tilde{F}_r}}{\tilde{F}_r}\right)^2}$$

A time correction was also applied: each FITS timestamp in Julian Date (JD) was converted to Barycentric Julian Date (BJD) and then Barycentric Dynamical Time (TDB) to account for relativistic and positional effects using Astropy.

Photocenter computation

Next, the host star WASP-10 was identified by comparing one science frame with the SIMBAD catalogue (Wenger et al., 2000) at coordinates $23^{\text{h}}15^{\text{m}}58.33^{\text{s}}$ RA and $+31^{\circ}27'45.9''$ DEC. After locating the target, its photocenter was computed as the flux-weighted centroid of its pixels. A circular aperture was defined around the star with a radius sufficient to contain its flux and some background; the average distance to the flux center was used to determine precise centroid coordinates.

A second larger ring defined an annulus used to estimate the median sky background ϕ_{sky} and its error:

$$\sigma_{\phi_{\text{sky}}} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum \sigma_{S_{\text{corr}}}^2}$$

The sky background was then subtracted from the science frames:

$$S_{\text{syncr}} = S_{\text{cr}} - \phi_{\text{sky}}$$

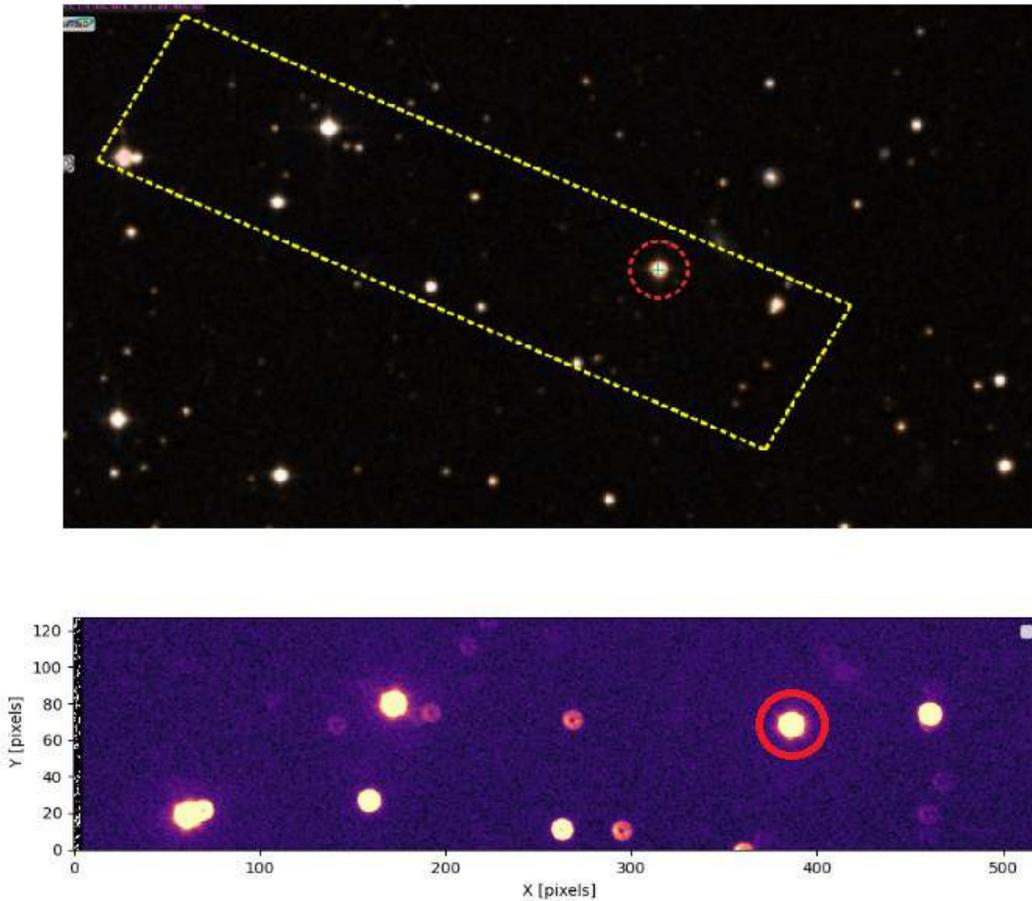
with propagated error:

$$\sigma_{S_{\text{sky-corr}}} = \sqrt{\sigma_{\phi_{\text{sky}}}^2 + \sigma_{S_{\text{corr}}}^2}$$

This procedure resulted in the final set of calibrated, sky-corrected science frames, as seen in Figure 2.

Figure 2.

Top: Sky field around WASP-10 obtained from the DSS survey and retrieved from SIMBAD, showing the TASTE observation frame (yellow dashed box) and the target star (red dashed circle). Bottom: Corresponding TASTE image of the same region, with the target star highlighted in red.



Aperture photometry

Since the Transit method consists on being able to detect a star's decrease in luminosity when a planet crosses in front of it, we must utilize a technique with which we can very precisely quantify and analyze the flux of the star across time as received on the CCD before, during and after the transit; to do so we perform aperture photometry.

Aperture photometry is a technique utilized to study the flux of photons emitted by a source across time as observed by the detector, a perimeter of pixels or "aperture" is selected in the

science frame as a boundary, where the pixels that fall inside the aperture correspond to the ones where the the flux of the source is being measured across multiple frames, the perimeter can have different shapes, however in our case a radial symmetry, or ring was selected as the aperture.

The ring perimeter is a different one from the ones used for the photocenter calculation and the sky background subtraction as each serves different purposes, in the case of the aperture photometry, the aperture ring size is smaller than the previous cases, as our objective with aperture photometry is to quantify the change in flux on the pixels of the CCD which receive the photons from the source, the aperture size should only include flux from the source and not background sky and is centered on the computed photocenter of the studied source. The total flux of the star ϕ_i and its associated uncertainty σ_{ϕ_i} for each timestamp were calculated as:

$$\phi_i = \sum_{d < R_{ap}} S_{\text{sky-corr}}$$

$$\sigma_{\phi_i} = \sqrt{\sum_{d < R_{ap}} \sigma_{S_{\text{sky-corr}_i}}^2}$$

Differential photometry

We must also take into account that the dip in the star's flux may be caused by phenomena unrelated to the planetary transit. To remove the influence of such effects in our data analysis, we performed differential photometry on the TASTE dataset.

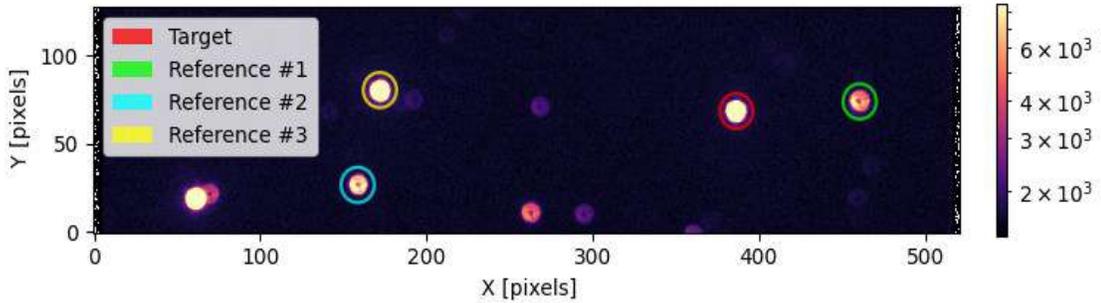
In differential photometry ($\Delta\phi$), aperture photometry is carried out not only on the target star but also on one or more reference stars. The flux of the target is then compared to the combined flux of the reference stars across all frames. By doing so, we can track the target's brightness variations relative to the references over the same timestamps. Since the transit signal appears only in the target star, while other environmental effects such as atmospheric variations or instrumental drift affect all stars equally, this comparison allows us to remove first-order systematic trends. These include the influence of the Moon illuminating the sky, thin passing clouds, or changes in airmass during the observation. The process also helps to normalize the target's flux, producing a cleaner light curve.

Ideally, the chosen reference stars should have a brightness similar to that of the target and be located in regions of the CCD free from nearby sources that could contaminate their flux. The selection of reference stars was performed by adjusting the color scale of one of the SCIENCE frames, where the color scale represents the relative flux intensity across the image. We visually selected stars of comparable brightness to WASP-10, ensuring that their

surroundings were free of contaminating flux. The target and selected reference stars on the science frame are shown in Figure 3.

Figure 3.

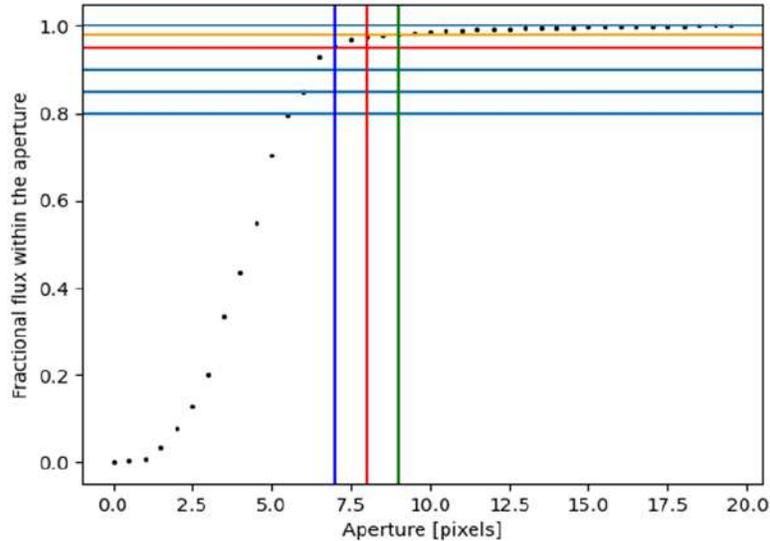
Identification of the target (WASP-10) and the three reference stars used for differential photometry. Each aperture is marked with a colored circle corresponding to its designation in the legend. The color scale represents the recorded flux in photoelectrons.



The size of the aperture used for the differential photometry was determined by plotting the flux of the target star in a distribution as a function of radius (the size of the aperture in pixels) where three aperture sizes were selected, those of 7, 8 and 9 pixels of radius, for a relative flux of 95%, 98% and 99% of the target's flux passing through each aperture size respectively seen here in Figure 4.

Figure 4.

Fractional flux enclosed within circular apertures of increasing radius. The vertical colored lines mark the fractional flux that falls inside different aperture values.



The differential photometry itself was computed by dividing the flux of a given aperture for the target star over the sum of the fluxes of the reference stars as:

The differential flux $\Delta\phi$ was then calculated as:

$$\Delta\phi = \frac{\phi_{target}}{(\phi_1 + \phi_2 + \phi_3)}$$

Where the combined uncertainty from target and reference stars was computed as:

$$\sigma_{\phi_{refs}} = \sqrt{\sigma_{\phi_1}^2 + \sigma_{\phi_2}^2 + \sigma_{\phi_3}^2}$$

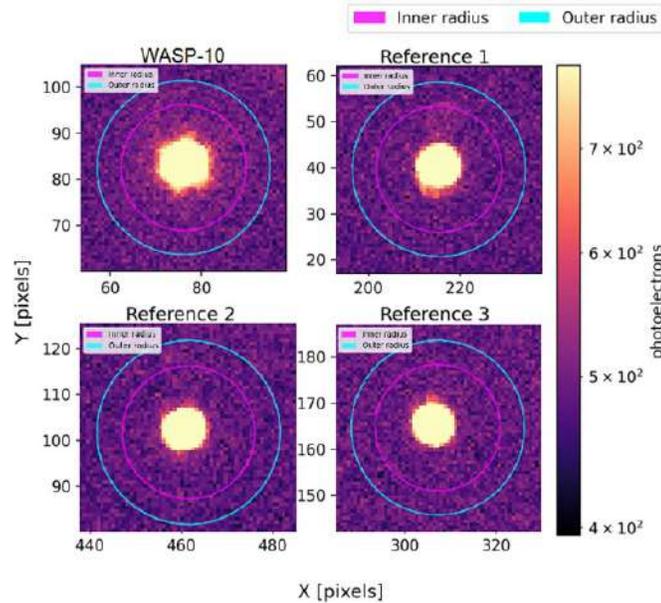
So the associated error of the differential photometry is therefore:

$$\sigma_{\Delta\phi} = \Delta\phi \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\phi_{target}}}{\phi_{target}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\phi_{refs}}}{\phi_1 + \phi_2 + \phi_3}\right)^2}$$

Multiple differential photometry runs were tested, varying aperture size and reference-star combinations; the best result corresponded to a 7-pixel aperture with all three reference stars, which yielded the smallest standard deviation as shown in figure 5.

Figure 5.

Aperture photometry masks for the target (WASP-10) and three reference stars. The magenta and cyan circles represent the inner and outer radii used to define the source and background annuli, respectively. The color scale indicates the recorded flux in photoelectrons



Finally, the differential fluxes were normalized by fitting a first-degree polynomial p_1 to the out-of-transit points and dividing the fluxes by p_1 :

$$\widehat{\Delta\phi} = \frac{\Delta\phi}{p_1}$$

with propagated error:

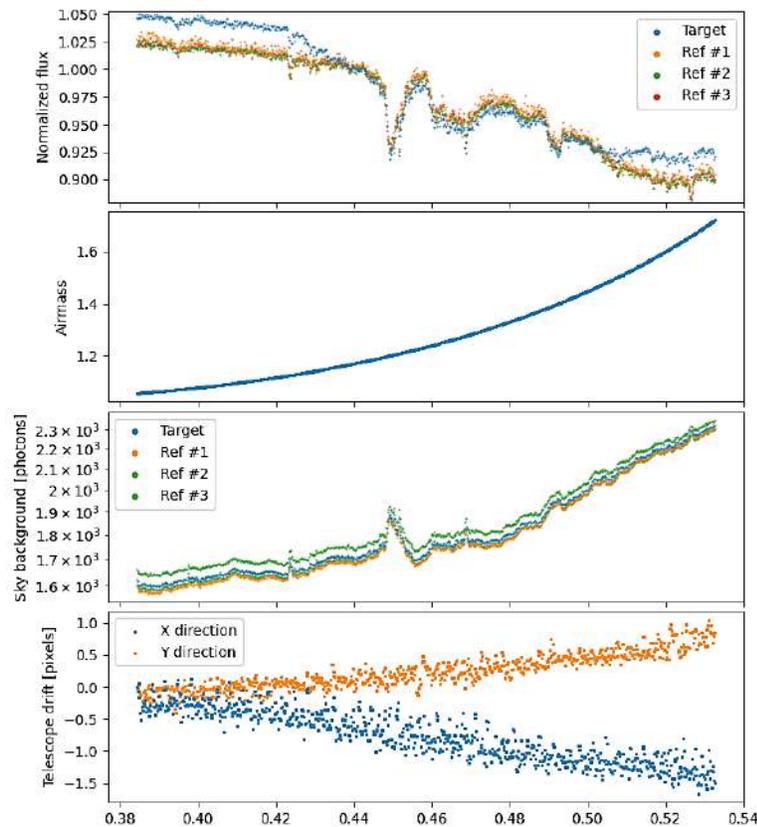
$$\sigma_{\widehat{\Delta\phi}} = \frac{\sigma_{\Delta\phi}}{p_1}$$

The resulting normalized light curve, top panel on Figure 6, represents the transit of WASP-10b from the TASTE dataset.

The sky conditions during the night of observation for the transit on the TASTE dataset can be seen in three lower panels on Figure 6 as measured by the aperture photometry performed on each star.

Figure 6.

Photometric and observational parameters from the TASTE dataset. The first panel shows the normalized flux for the target and three reference stars. The second panel displays the evolution of airmass during the observation. The third panel shows the sky background level for each source, while the fourth panel presents the telescope drift in the X and Y directions.



TESS Data Processing

For the TESS data reduction, Target Pixel Files (TPF) were used rather than Full-Frame Images (FFIs). These TPFs are small cutouts of the CCD that focus on a specific region of interest and include a precomputed light curve (LCF) derived from the same data. Both file types are provided in FITS format.

The dataset was downloaded from the Barbara A. Mikulski Archive for Space Telescopes (MAST). Some initial preprocessing had already been performed by the Science Processing Operations Center (SPOC) at NASA Ames Research Center. This included BIAS and FLAT corrections, background subtraction, time conversion to Barycentric Julian Date in Barycentric Dynamical Time (BJD TDB), Simple Aperture Photometry (SAP), and Pre-search Data Conditioning SAP (PDCSAP).

The SAP flux corresponds to the sum of the pixel values within a defined aperture, while PDCSAP further removes long-term instrumental trends using Co-trending Basis Vectors. Each observation is accompanied by a set of quality flags encoded as a bitmask in the FITS header, identifying conditions such as cosmic-ray events or data discontinuities (TESS Instrument Handbook).

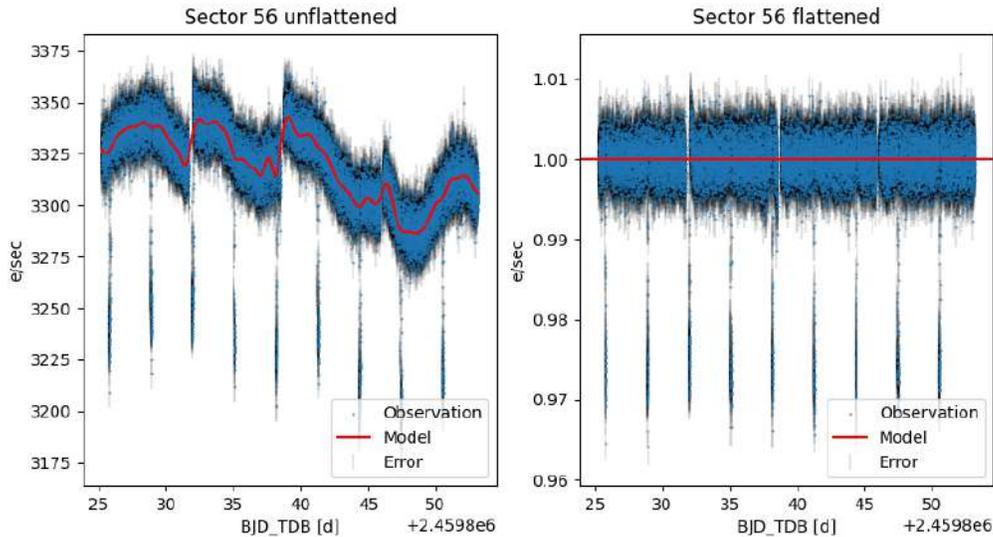
Although TESS data are not affected by atmospheric interference, instrumental and orbital effects can still cause small variations in the recorded flux. To remove these residual trends, we applied a detrending procedure using the WOTAN library (Hippke et al., 2019). A Huber-spline fit was computed for the out-of-transit points, effectively flattening the baseline without introducing additional noise:

$$\sigma_{\text{TESS flattened}} = \frac{\sigma_{\text{TESS}}}{\text{TESS huberspline}}$$

Each flux measurement was then divided by its corresponding spline-fit value, producing a flattened light curve in which the planetary transits appear as distinct decreases in flux. A manual mask was applied to isolate the in-transit and out-of-transit regions, as shown in Figure 7.

Figure 7.

Light curves from TESS Sector 56 before and after flattening. The left panel shows the unflattened light curve with clear long-term trends, while the right panel displays the same data after flattening with the applied model (red line). Blue points represent the observations, and vertical bars show the measurement errors.



Limb Darkening

After completing the processing of both the TASTE and TESS datasets, a final correction was applied to the models to account for the limb darkening effect.

Limb darkening occurs because the temperature in a star's atmosphere decreases outward from the center. Light emitted near the stellar limb originates from cooler, shallower layers, making the edge of the stellar disk appear dimmer than the center. This effect must be included in transit modeling, as it influences the apparent fraction of stellar flux blocked by the planet depending on its transit path across the star.

To determine the limb-darkening coefficients, we used the Python Limb Darkening Toolkit (LDTk) (Parviainen & Aigrain, 2015). The toolkit interpolates stellar atmosphere models to estimate the coefficients from known stellar parameters and filter transmission curves.

For WASP-10, the adopted stellar parameters from the Exoplanet Follow-Up Observing Program (ExoFOP) were:

- Effective temperature $T_{\text{exe}} = 4713.98$ K
- Surface gravity $\log g = 4.5649$
- Metallicity $Z = 0.0428$

The filter passbands were taken from the FITS headers:

- TASTE: r-Sloan
- TESS: SDSS r full transmission Filter transmission data were retrieved from the SVO Filter Profile Service (Rodrigo et al., 2012).

LDTk generated thousands of synthetic limb-darkening profiles per filter; their means were adopted as the coefficients, and their standard deviations as uncertainties.

With these coefficients, we modeled the transits using the BATMAN package (Kreidberg, 2015), which computes analytical light curves for arbitrary limb-darkening laws. BATMAN was used to extract planetary parameters from the TESS and TASTE light curves.

LIKELIHOOD OF MODEL AND FITTING

A Bayesian framework was employed to evaluate the model fit to the data. Bayesian inference combines the prior $P(x)$, representing previously known information, and the likelihood $\mathcal{L}(x)$, representing the probability of observing the data given a model, to produce the posterior probability $P(x | D)$:

$$P(x | D) = \frac{\mathcal{L}(x) P(x)}{P(D)}$$

Our transit model $m(\theta)$ depends on 14 parameters ($\theta_1 - \theta_{14}$), listed in Table 1, including the orbital parameters, limb-darkening coefficients for each filter, polynomial trend coefficients, and jitter terms.

The priors $P(\theta)$ correspond to initial estimates of these parameters based on either:

- previously published literature values for WASP-10b (e.g., orbital period, inclination, semi-major axis, radius ratio).

- theoretical expectations (i.e., ranges of limb-darkening coefficients derived from stellar atmosphere models).
- fixed calibration parameters (e.g., polynomial coefficients for baseline normalization).

These priors define the initial parameter space that the algorithm explores, effectively constraining the model to physically reasonable values.

Assuming Gaussian uncertainties and uncorrelated data points, the likelihood function is expressed as

$$\mathcal{L}(\theta) \equiv P(y | \theta) = \prod_{i=1}^N \mathcal{L}_i = \prod_{i=1}^N \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_i} \exp \left[-\frac{(y_i - m_i)^2}{2\sigma_i^2} \right] \right)$$

Simplifying via the chi-square sum:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(y_i - m_i)^2}{\sigma_i^2}$$

and taking logarithms:

$$\ln L = -\frac{1}{2} \left[N \ln(2\pi) + \chi^2 + \sum_{i=1}^N \ln(\sigma_i^2) \right]$$

The logarithmic prior depends on the limb-darkening parameters:

$$\ln P(\theta) = \ln u_{1_{\text{TESS}}} + \ln u_{2_{\text{TESS}}} + \ln u_{1_{\text{TASTE}}} + \ln u_{2_{\text{TASTE}}}$$

Finally, the posterior probability is:

$$\ln P(\theta | y) = \ln \mathcal{L} + \ln P(\theta) - \ln P(y)$$

Table 1.
Prior Parameters Used in the MCMC Sampler

θ	Parameter	Value	Units
θ_1	Inferior conjunction	$2459825.800375 \pm 0.000204$	JD
θ_2	Orbital period	3.0927616 ± 0.0000112	days
θ_3	Scaled planet radius	0.15918 ± 0.00050	R_p / R_\star
θ_4	Scaled semi-major axis	11.65 ± 0.09	a / R_\star
θ_5	Orbital inclination	88.49 ± 0.22	deg
θ_{6-9}	Limb-darkening coefficients (TESS/TASTE)	see text	—
θ_{10-12}	Polynomial trend coefficients	—	—
θ_{13-14}	Jitter terms (TESS/TASTE)	—	—

MARKOV CHAIN MONTE CARLO (MCMC) SAMPLER

The logarithm of the posterior probability, $\ln P(\theta|D)$, was sampled using a Markov-Chain-Monte-Carlo (MCMC) sampler (Foreman-Mackey et al., 2013). This sampler generates chains of uncorrelated random numbers, which we can use to pool independent samples for each of our parameters.

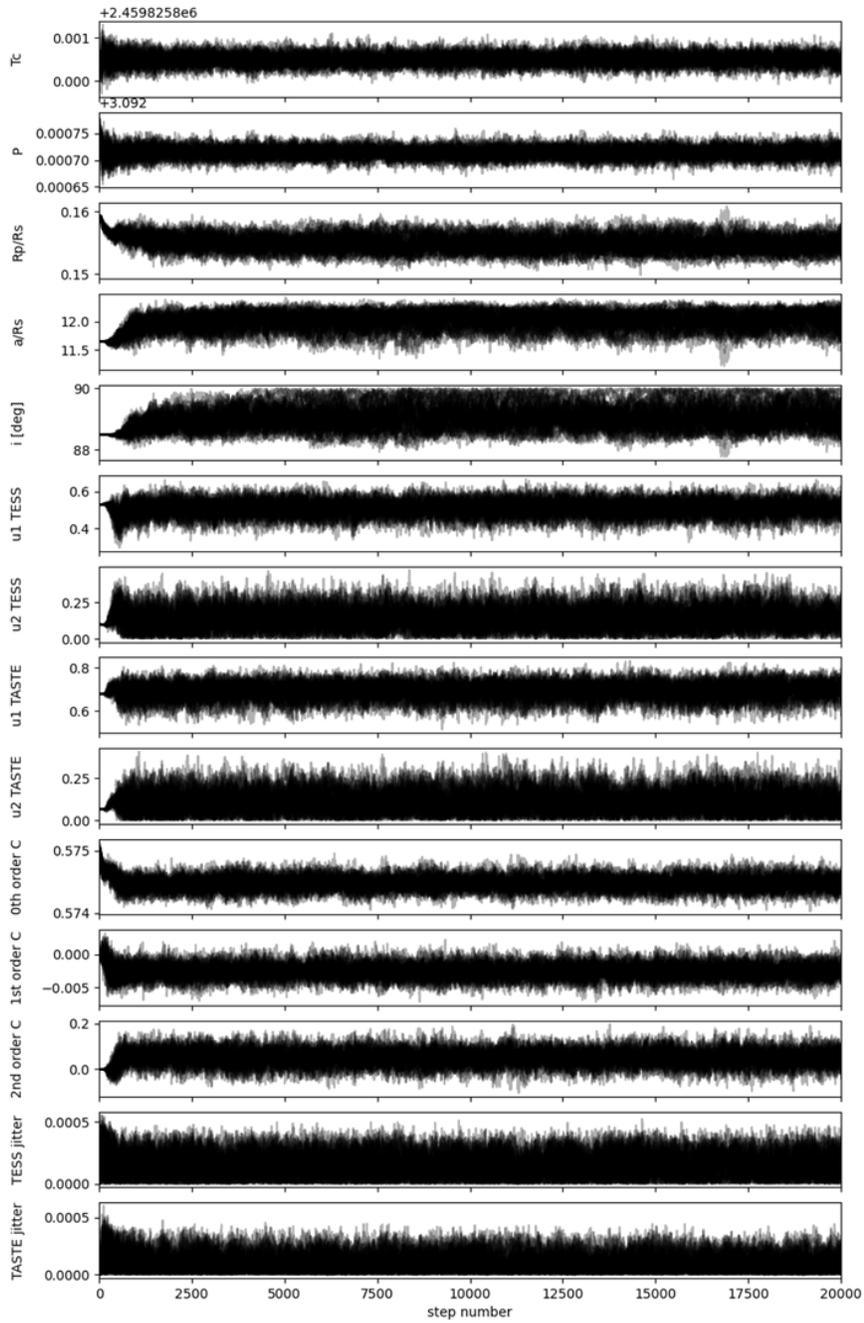
Given that we have known parameters θ , we can assume that there is a combination of them that maximizes the likelihood $\ln \mathcal{L}$ of obtaining said values as results. The goal then was to find the set of parameters θ that maximizes the value of $\ln \mathcal{L}$.

Thus, given that $\ln \mathcal{L}$ and $P(\theta)$ both depend on θ , but $P(y)$ does not, $\ln \mathcal{L}$ and $P(\theta)$ will both change with each new iteration of the sampler.

With the MCMC sampler, we generated 50 walkers over 20,000 steps in the 12 dimensions of our parameter space, plus 2 more parameters corresponding to corrective terms for both TESS and TASTE datasets, as seen in Figure 8. We also implemented the multiprocessing library (McKerns et al., 2012) to speed up the process by running various samplers simultaneously.

Figure 8.

Over the span of 20 000 iterations, the plot shows the parameter space traversed by the sampler as it converges for each parameter.



RESULTS

The MCMC sampling yielded posterior distributions for all model parameters, summarized in Table 2. These values represent the most probable estimates given the observational data and prior information. The joint and marginal posterior distributions are shown in Figure 9, where the shape of each contour indicates the degree of correlation between parameters. Elongated or skewed contours correspond to stronger correlations, while more circular contours suggest largely independent parameters.

Using the median values from the posterior distributions, we generated synthetic transit light curves for both the TESS and TASTE datasets. The resulting models, together with their residuals, are presented in Figure 10. The models show excellent agreement with the data, with residuals showing no significant structure, indicating that the adopted model accurately captures the observed transit profiles.

The correlations visible in the corner plot (Figure 9) are physically meaningful. For instance, the orbital inclination and scaled semi-major axis a , show a noticeable correlation with the planet-to-star radius ratio, R_p/R_* . This relationship arises because variations in inclination change the planet's projected path across the stellar disk, altering the apparent transit depth due to limb darkening. Similarly, changes in the semi-major axis affect the transit duration, which in turn influences how the model constrains the planetary radius.

Overall, the recovered parameters are consistent with previously published values for WASP-10 b, confirming the reliability of our reduction and modeling procedure.

A quantitative comparison between the parameters derived in this work and those reported in previous studies is presented in Table 3, showing good agreement within the quoted uncertainties.

Figure 9.

Corner plot showing the relation between different parameters. Skewed contours indicate stronger correlations between the parameters involved, while more circular or homogeneous contours indicate weak or no correlation.

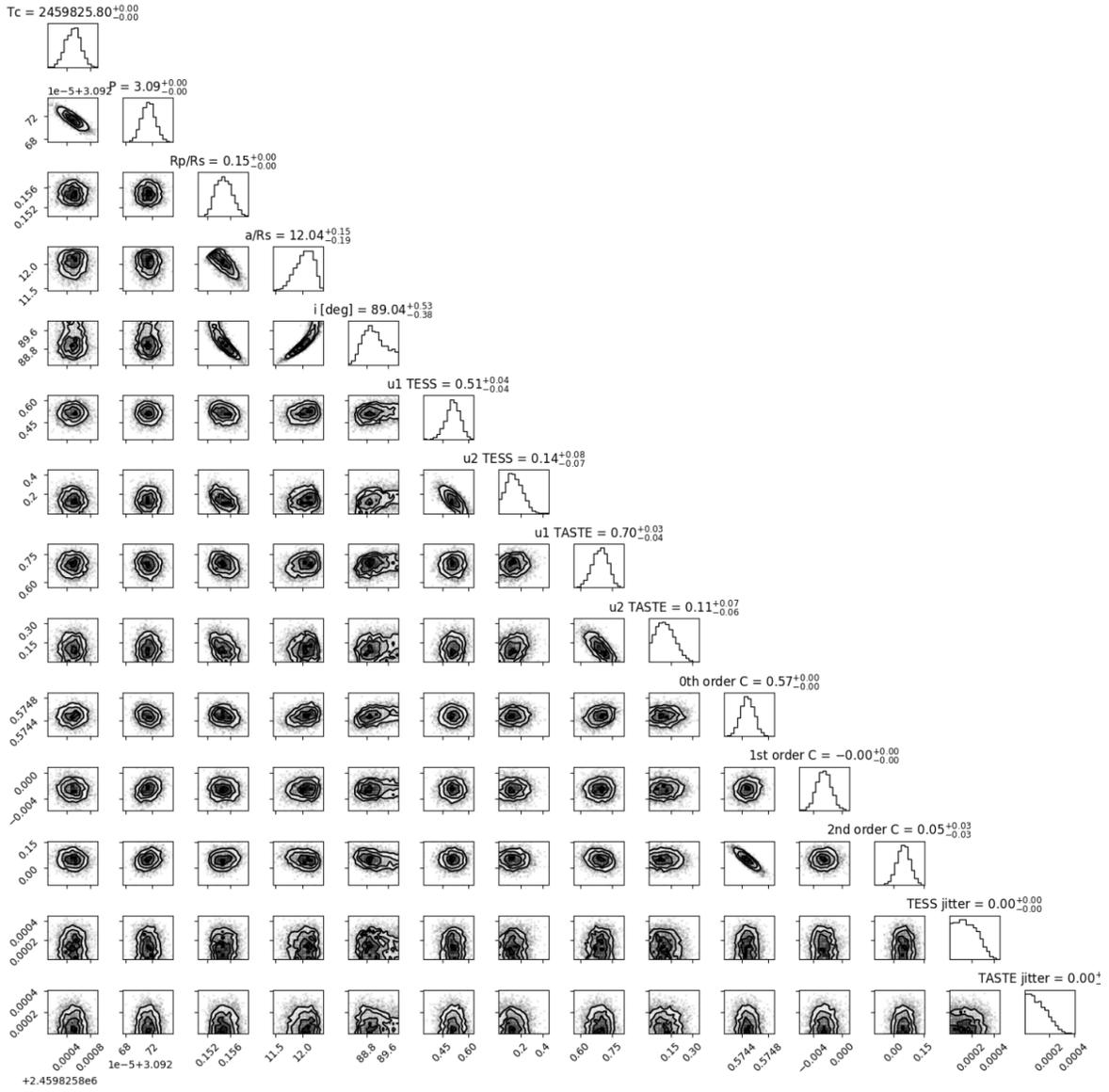


Table 2.
Posterior Parameter Estimates from the MCMC Analysis

$\theta_{\#}$	Parameter	Value	Units
θ_1	Inferior conjunction	$2459685.39781 \pm 0.00009$	JD
θ_2	Orbital period	3.2130546 ± 0.0000008	days
θ_3	Scaled planet radius	0.1389 ± 0.0010	R_p / R_{\star}
θ_4	Scaled semi-major axis	11.38 ± 0.21	a / R_{\star}
θ_5	Orbital inclination	88.28 ± 0.30	deg
θ_{6-9}	Limb-darkening coefficients (TESS/TASTE)	see text	—
θ_{10-12}	Polynomial trend coefficients	—	—
θ_{13-14}	Jitter	—	—

Figure 10.
Final TESS and TASTE transit models derived from MCMC best-fit parameters, with residuals.

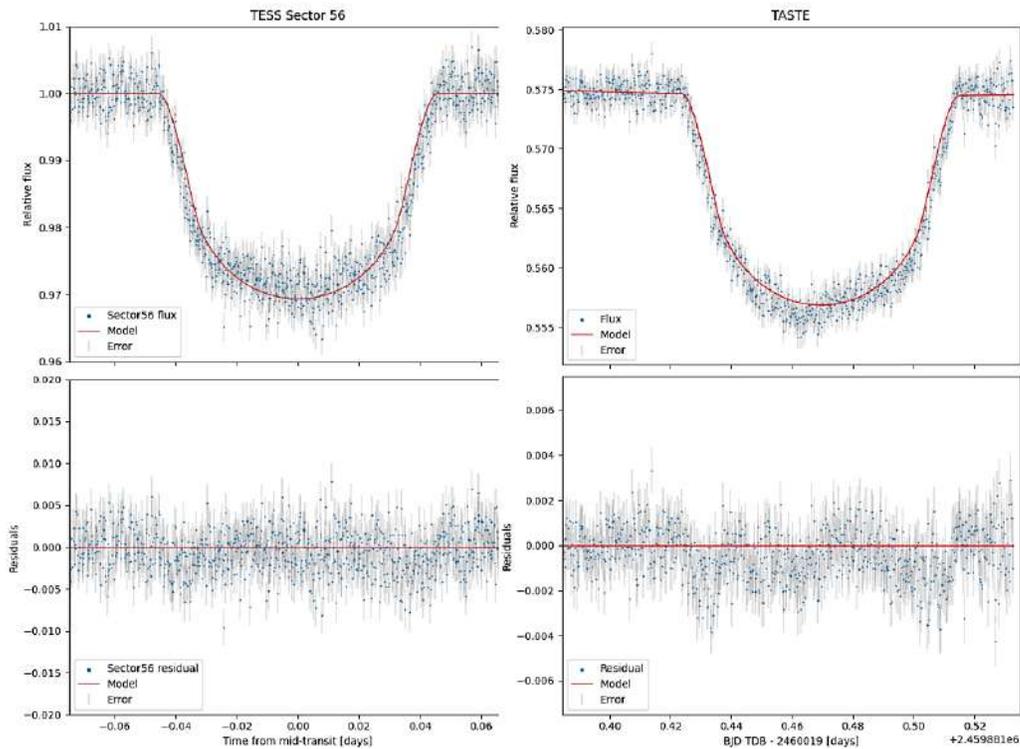


Table 3.*Comparison of Derived Parameters with Literature Parameters.*

Source	Inferior Conjunction (JD)	Period (days)	R_p / R_\star	a / R_\star	i (deg)
Johnson et al. (2009)	$2454664.03729 \pm 0.00008$	3.09276 ± 0.00001	0.1592 ± 0.0011	11.65 ± 0.13	88.49 ± 0.17
Sada et al. (2016)	$2454664.03804 \pm 0.00006$	3.09273 ± 0.00000	0.1605 ± 0.0012	11.55 ± 0.18	88.26 ± 0.26
Kokori et al. (2023)	$2456253.70052 \pm 0.00008$	3.09273 ± 0.00000	0.1592 ± 0.0011	11.65 ± 0.13	88.49 ± 0.22
This work	$2459685.39781 \pm 0.00009$	3.21305 ± 0.00000	0.1389 ± 0.0010	11.38 ± 0.21	88.28 ± 0.30

DISCUSSION

The TASTE photometry presented significant challenges due to the intentional defocusing of the telescope, a technique used to prevent CCD saturation. This defocusing increased the required aperture size and made the selection of reference stars more sensitive to sky background variations, as seen in Figure 6. Despite these complications, stable flux ratios were achieved after several iterations of aperture and reference-star optimization, ensuring consistent differential photometry results.

The TESS observations, although limited to a single sector comprising nine transits, provided sufficient phase coverage to obtain a reliable orbital period for WASP-10 b. Acquiring data from additional sectors would allow for greater statistical robustness and tighter constraints on the derived planetary parameters.

The MCMC results are in good agreement with previously published values for WASP-10 b (Johnson et al. 2009; Sada et al. 2016; Kokori et al. 2023), as summarized in Table 3. This consistency confirms the validity of the reduction and modeling procedures applied to both datasets.

The correlations observed in the corner plot (Figure 9) are physically meaningful. Parameters such as the orbital inclination, semi-major axis, and scaled planet radius exhibit clear interdependencies. For instance, grazing transits with lower inclinations intersect the outer,

dimmer stellar regions affected by limb darkening, resulting in shallower apparent transit depths. These relationships reinforce the physical consistency of the fitted parameters and validate the robustness of the MCMC modeling approach.

CONCLUSIONS

The combination of data from multiple surveys enhances the precision and reliability of derived exoplanetary parameters. Despite the differing observational conditions of ground-based (TASTE) and space-based (TESS) instruments, both datasets provide complementary information that strengthens the overall analysis.

The TESS observations supply multiple transits, enabling robust determination of the orbital period and global transit parameters, while the TASTE data capture atmospheric and instrumental effects present under terrestrial conditions. This combination allows cross-validation of the light-curve morphology and consistency of the extracted parameters between independent observing platforms.

The use of MCMC sampling proved especially valuable as a rigorous statistical framework, yielding posterior distributions that quantify both parameter uncertainties and correlations. This method provided a comprehensive assessment of the model's reliability and confirmed the physical consistency of the results.

Future work combining these datasets with spectroscopic and radial-velocity observations would enable tighter constraints on the planet's mass and could probe atmospheric composition, extending the analysis beyond the scope of the present study.

ACKNOWLEDGMENTS

Particular thanks go to the TASTE collaboration and the Department of Physics and Astronomy "Galileo Galilei" of the University of Padova for providing access to the ground-based observations obtained with the 1.82 m Copernico Telescope at the Asiago Astrophysical Observatory as part of the TASTE program. These data were made available for educational purposes. Appreciation is also extended to the Universidad de Panamá and the editorial board of *Tecnociencia* for supporting the dissemination of this work.

BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

- Astropy Collaboration, Price-Whelan, A.M., Lim, P.L., et al. (2022). The Astropy Project: Latest Major Release (v5.0) of the Core Package. *Astron. J.* 935(2): 167. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac7c74>
- Christian, D.J., Gibson, N.P., Simpson, E.K., et al. (2009). WASP-10 b: a 3 MJ gas-giant planet transiting a late-type K star. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 392(4): 1585–1590. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2008.14164.x>
- Foreman-Mackey, D., Hogg, D.W., Lang, D. & Goodman, J. (2013). emcee: The MCMC Hammer. *Publ. Astron. Soc. Pac.* 125(925): 306–312. <https://doi.org/10.1086/670067>
- Harris, C.R., Millman, K.J., van der Walt, S.J., et al. (2020). Array programming with NumPy. *Nature* 585(7825): 357–362. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>
- Hippke, M., David, T.J., Mulders, G.D. & Heller, R. (2019). Wōtan: Comprehensive time-series detrending in Python. *Astron. J.* 158(4): 143. <https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab3984>
- Hunter, J.D. (2007). Matplotlib: A 2D graphics environment. *Comput. Sci. Eng.* 9(3): 90–95. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>
- Johnson, J.A., Winn, J.N., Cabrera, N.E. & Carter, J.A. (2009). A smaller radius for the transiting exoplanet WASP-10 b. *Astrophys. J.* 692(2): L100–L104. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/692/2/L100>
- Kokori, A., Tsiaras, A., Edwards, B., et al. (2023). ExoClock Project III: 450 new exoplanet ephemerides.... *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 265(1): 4. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/ac9da4>
- Kreidberg, L. (2015). batman: Basic Transit Model Calculation in Python. *Publ. Astron. Soc. Pac.* 127(957): 1161–1165. <https://doi.org/10.1086/683602>
- Mayor, M., & Queloz, D. (1995). A Jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature* 378(6555): 355–359. <https://doi.org/10.1038/378355a0>
- McKerns, M.M., Strand, L., Sullivan, T., Fang, A., & Aivazis, M.A.G. (2012). Building a Framework for Predictive Science. *arXiv:1202.1056*. <https://arxiv.org/abs/1202.1056>

- Nascimbeni, V., Piotto, G., Bedin, L.R., & Damasso, M. (2011). TASTE: Overview and improved parameters for HAT-P-3 b and HAT-P-14 b. *Astron. Astrophys.* 527: A85. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201015199>
- TASTE Collaboration. (2022). *The Asiago Search for Transit Timing Variations of Exoplanets (TASTE)*. Department of Physics and Astronomy “Galileo Galilei,” University of Padova, Italy. Data provided by the TASTE team at the Asiago Astrophysical Observatory. Available at: <https://groups.dfa.unipd.it/ESPG/taste.html> (accessed 25 Oct 2025).
- Parviainen, H., & Aigrain, S. (2015). LDTk: Limb Darkening Toolkit. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 453(4): 3821–3826. <https://doi.org/10.1093/mnras/stv1857>
- Ricker, G.R., Winn, J.N., Vanderspek, R., et al. (2015). Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS). *J. Astron. Telesc. Instrum. Syst.* 1(1): 014003. <https://doi.org/10.1117/1.JATIS.1.1.014003>
- Rodrigo, C., Solano, E., & Bayo, A. (2012). SVO Filter Profile Service, Version 1.0. *IVOA Working Draft*, 15 Oct 2012. <https://doi.org/10.5479/ADS/bib/2012ivoa.rept.1015R>
- Sada, P.V., & Ramón-Fox, F.G. (2016). Exoplanet transits registered at the Universidad de Monterrey Observatory I. *Publ. Astron. Soc. Pac.* 128(960): 024402. <https://doi.org/10.1088/1538-3873/128/960/024402>
- Wenger, M., Ochsenbein, F., Egret, D., et al. (2000). The SIMBAD astronomical database. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 143(1): 9–22. <https://doi.org/10.1051/aas:2000332>