



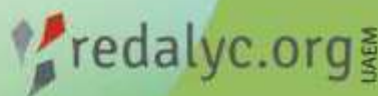
ISSN L 2710-7647

VOL. 36, N° 2, julio - diciembre 2026

SCIENTIA

REVISTA DE
INVESTIGACIÓN DE LA
UNIVERSIDAD DE PANAMÁ

Ciencias Naturales y Exactas, Ciencias de la Tierra
y Ciencias Computacionales





**REVISTA DE INVESTIGACIÓN DE LA
UNIVERSIDAD DE PANAMÁ**

VOL.36, N° 2

JULIO-DICIEMBRE 2026



**AUTORIDADES DE LA
UNIVERSIDAD DE PANAMÁ**

Dr. Eduardo Flores Castro
Rector

Dr. José Emilio Moreno
Vicerrector Académico

Dr. Jaime Javier Gutiérrez
Vicerrector de Investigación y Postgrado

Mgter. Arnold Muñoz
Vicerrector Administrativo

Mgter. Mayanin Rodríguez
Vicerrectora de Asuntos Estudiantiles

Mgter. Ricardo Him
Vicerrector de Extensión

Mgter. Ricardo A. Parker
Secretario General

Mgter. José Luis Solís
Director General de los Centros Regionales Universitarios

COMITÉ EDITORIAL/EDITORIAL COMITE**EDITOR EN JEFE/EDITOR-IN-CHIEF****Jaime A. Rivera Solís**

Universidad de Panamá, Geomorfologo Ccambio, COIBA. Centro de Capacitación, Investigación y Monitoreo de Biodiversidad., Centro Regional Universitario - Veraguas, Panamá.

jaime.rivera@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0002-8265-7836>

EDITORES EMÉRITOS/EMERITUS EDITORS**Alfredo Lanuza-Garay**

Universidad de Panamá, Centro Regional Universitario - Colón, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Zoología, Panamá.

alfredo.lanusa@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0003-0480-5490>

Alfredo Figueroa Navarro

Universidad de Panamá, Departamento de Sociología, Panamá.

<https://orcid.org/0000-0002-0982-1249>

Héctor Barrios

Universidad de Panamá, Programa Centroamericano de Maestría en Entomología, Panamá.

hector.barriosv@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0002-0542-1731>

EDITORES CIENTÍFICOS/SCIENTIFIC EDITORS**Orlando O. Ortiz**

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

orlando.ortiz@up.ac.pa

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

EDITORES ASOCIADOS/ASSOCIATED EDITORS**Alessio Papini**

Università degli Studi di Firenze (UNIFI), Italia.

Alessio.papini@unifi.it

<https://orcid.org/0000-0001-7904-0336>

Arianna Michelle Hernández Sánchez

Instituto Politécnico Nacional, Centro de Desarrollo de Productos Bióticos-IPN, México.

ariannamhs@outlook.com

<https://orcid.org/0000-0001-9045-3537>

Coral Jazvel Pacheco Figueroa



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, DACBIOL, México.

coral.pacheco@ujat.mx

<https://orcid.org/0000-0001-5281-9251>

Eloisa Adriana Guerra Hernández

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, México.

eloisaaguerrah@gmail.com, eagh@unam.mx

<https://orcid.org/0000-0003-3710-0884>

Félix Rodríguez

Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales (STRI), Panamá.

rodriguezf@si.edu

<https://orcid.org/0000-0002-6015-7945>

Jean Michel Maes

Museo Entomológico de León, Nicaragua.

jmmaes@bio-nica.info

<https://orcid.org/0000-0002-5425-3439>

Luc Legal

Laboratoire Ecologie Fonctionnelle et Environnement, Université Paul Sabatier, Francia/México.

luc.legal@univ-tlse3.fr

<https://orcid.org/0000-0003-0424-2931>

Nathalia Tejedor Flores

Universidad Tecnológica de Panamá (UTP), Panamá.

nathalia.tejedor@utp.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0002-0154-1955>

Romina D'Almeida

CONICET, Instituto Superior de Investigaciones Biológicas, Argentina.

rominadalmeida@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-5075-6381>

Yehudi Rodríguez

Universidad Marítima Internacional de Panamá (UMIP), Panamá.

nafisay@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-6947-9046>

Yostin Aniño

Universidad de Panamá, Museo de Invertebrados G. B. Fairchild, Panamá.

yostin0660@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-8870-8155>

Yves Basset

Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales (STRI), Panamá.

bassety@si.edu

<https://orcid.org/0000-0002-1942-5717>

EDITORA ASOCIADA/ ASSOCIATE EDITOR

Damaris V. Tejedor De León



Universidad de Panamá. Vicerrectoría de Investigación y Postgrado. Oficina de Publicaciones Académicas y Científicas. Panamá

damaris.tejedor@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0002-4350-196X>

SECRETARIA TÉCNICA/ TECHNICAL SECRETARY

Nellys Muñoz Núñez

Universidad de Panamá, Centro Regional Universitario de Veraguas, Facultad de Enfermería, Panamá

nellys.munoz@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0002-2756-2068>

Zaira Delgado

Universidad de Panamá. Vicerrectoría de Investigación y Postgrado. Oficina de Publicaciones Académicas y Científicas. Panamá

zaira.delgado@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0002-0634-714X>

SOPORTE TÉCNICO/TECHNICAL SUPPORT

Edgar Pérez

Universidad de Panamá. Vicerrectoría de Investigación y Postgrado. Oficina de Publicaciones Académicas y Científicas. Panamá

edgar.perezr@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0002-0466-001X>

INDICE

EDITORIAL	8
Variation in antipredator responses of the fiddler crab <i>Uca heteropleura</i> (Brachyura: Ocypodidae) at El Agallito beach, Panama.....	9
Diversidad enteroparásitaria en afluentes del río La Villa y detección de <i>cryptosporidium spp.</i> de importancia sanitaria.....	34
Exploración preliminar de polillas Sphingidae y Saturniidae en dos áreas de Nicaragua con distintas configuraciones vegetales.....	56
Efecto de la densidad de siembra en dos híbridos de melón (<i>Cucumis melo</i> L.), en Guararé, Panamá	82
Gestión de riesgos en ingeniería de software: seguridad y calidad, ejes fundamentales en ciencias computacionales	111
Benceno: 200 años de ciencia, símbolo y transformación	135

EDITORIAL

La revista SCIENTIA tiene por objeto publicar resultados de investigaciones originales e inéditas, en ciencias naturales y exactas, ciencias de la Tierra, y ciencias computacionales. Editada por la Vicerrectoría de Investigación y Postgrado de la Universidad de Panamá, busca acrecentar y contribuir con el avance del conocimiento científico y tecnológico a nivel nacional e internacional.

Esta segunda entrega 2026 ofrece a la comunidad científica cinco (5) artículos científicos inéditos y un (1) ensayo, producto del trabajo investigativo y del compromiso académico de los investigadores. De primera mano se destaca el artículo que evaluó la variación en los comportamientos antipredatorios y reproductivos de machos de *Uca heteropleura* en playa El Agallito, Panamá (abril-julio, 2025). Se registraron 616 individuos con ancho medio del caparazón de 15.9 ± 4.1 mm. Los resultados indican que el comportamiento y el esfuerzo reproductivo están modulados por la talla y la fase lunar, permitiendo a los cangrejos equilibrar estratégicamente la toma de riesgos y la reproducción. Además, esta entrega incluye una importante investigación que tuvo por objetivo evaluar la calidad de la matriz de agua superficial en afluentes del Río La Villa en Los Santos, mediante la cuantificación parasitaria de los organismos de vida libre en dicha matriz, con un enfoque en recuperación del género *Cryptosporidium* spp. Los resultados mostraron una diversidad parasitaria amplia los cuales se dividieron en grupos para un mejor estudio dando diferencias significativas entre los géneros. También, contiene una investigación cuyo objetivo fue analizar la composición, abundancia y similitud de las comunidades de las polillas de las familias *Sphingidae* y *Saturniidae* en dos áreas con distintas configuraciones vegetales. En Nueva Segovia (Nicaragua) se logró registrar 156 individuos y 54 especies mientras que en Estelí fueron 72 individuos y 50 especies. Los resultados indican que la configuración de la cobertura vegetal influye en la estructura de las comunidades de polillas y respaldan el uso de *Sphingidae* y *Saturniidae* como indicadores ecológicos en paisajes productivos y de transición. Se integra una pesquisa de alta relevancia, la cual tuvo por objetivo evaluar el efecto de tres distancias de siembra (15, 30 y 45 cm) en dos híbridos de melón (*Cucumis melo* L.) comerciales (Bobby F1 y Caribbean Gold). Los resultados demuestran que, el espaciamiento de 15 cm representa la alternativa más eficiente para maximizar producción por área, aunque la respuesta morfológica específica debe considerarse al formular recomendaciones técnicas. Otra investigación tuvo por objetivo analizar la integración de prácticas orientadas a la prevención de incidentes en el desarrollo de sistemas informáticos, y los resultados evidenciaron que la aplicación sistemática de metodologías formales se asocia con la reducción de fallos operativos. Finalmente, se incluye un ensayo que tiene como objetivo conmemorar los 200 años del descubrimiento del benceno, siendo posible demostrar que el benceno ha sido fundamental para el desarrollo de conceptos como resonancia, aromaticidad y deslocalización electrónica.

Agradecemos a cada uno de los autores por haber elegido la revista SCIENTIA para publicar el resultado de sus investigaciones, así como a la Oficina de Publicaciones Científica y Académicas, de la Vicerrectoría de Investigación y Postgrado de la Universidad de Panamá por el apoyo brindado, reafirmando el compromiso con la difusión de la ciencia en nuestro país.

Dr. Jaime A. Rivera Solís
Director – Editor

Variation in antipredator responses of the fiddler crab *Uca heteropleura* (Brachyura: Ocypodidae) at El Agallito beach, Panama

Variación en las respuestas antipredatorias del cangrejo violinista *Uca heteropleura* (Brachyura: Ocypodidae) en playa El Agallito, Panamá

Roberto C. Lombardo

Centro de Capacitación, Investigación y Monitoreo de la Biodiversidad
Sistema Nacional de Investigación, Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e
Innovación, Panamá

<https://orcid.org/0000-0002-0279-8621>

Autor de correspondencia: roberto.lombardo@up.ac.pa

Madelein Aparicio

Universidad de Panamá, Departamento de Biología Marina, Centro Regional
Universitario de Veraguas

<https://orcid.org/0009-0000-9356-2149>

madelein.aparicio@up.ac.pa

Lázaro Guerra

Universidad de Panamá, Departamento de Biología Marina, Centro Regional
Universitario de Veraguas

<https://orcid.org/0009-0005-4733-1872>

lazaro.guerra@up.ac.pa

Recepción: 2/04/26

Aceptación: 10/05/26

DOI <https://doi.org/10.48204/j.scientia.v32n2.a9647>

Abstract

A population of *Uca heteropleura* was studied to examine variation in male antipredator and reproductive behaviors across contrasting lunar phases at El Agallito Beach, Panama (April–July 2025). Crab responses to simulated avian predator fly-bys were quantified using a bird model passed over 5 m² quadrats. Habituation was assessed with repeated exposures (three passes), while single-pass trials evaluated baseline escape responses. Focal individuals were measured (carapace width-length and major chela height-length), and waving frequency and reemergence time were recorded as proxies of reproductive effort and risk-taking, respectively. A total of 616 individuals were recorded with a mean carapace width of 15.9 ± 4.1 mm. Repeated predator exposure significantly reduced escape responses, indicating rapid habituation. In single-pass trials, surface activity and waving frequency were significantly higher during full and new moons compared to quarter moons. Waving

frequency showed a weak but significant negative relationship with body size. Escape probability declined with increasing carapace width, with larger individuals less likely to flee and more likely to remain on the surface. Similarly, non-responsive individuals were significantly larger than those that escaped. Reemergence time was shorter during full and new moons, suggesting higher risk tolerance under peak reproductive conditions. These results indicate that antipredator behavior, signaling effort, and risk-taking are modulated by both body size and lunar phase. This coupling of individual state and environmental context highlights the dynamic nature of risk-taking behavior, where crabs continuously adjust their responses to balance predation risk against reproductive and foraging benefits.

Keywords: Spring tide, predator, escape, burrow, semilunar cycle

Resumen

La variación en los comportamientos antipredatorios y reproductivos de machos de *Uca heteropleura* fue estudiada durante fases lunares contrastantes en playa El Agallito, Panamá (abril–julio, 2025). Las respuestas ante depredadores aviares simulados se cuantificaron mediante el paso de un modelo de ave sobre cuadrantes de 5 m². La habituación se evaluó con exposiciones repetidas, mientras que ensayos de un solo pase del modelo midieron las respuestas de escape basales. En individuos focales se midió el caparazón y la que la mayor, registrando la frecuencia de movimientos de esta y el tiempo de reemergencia como indicadores de esfuerzo reproductivo y tolerancia al riesgo de depredación. Se registraron 616 individuos con ancho medio del caparazón de 15.9 ± 4.1 mm. La exposición repetida al modelo redujo los escapes, evidenciando habituación. En ensayos de un solo pase, la actividad en superficie y la frecuencia de movimiento de quela fueron significativamente mayores durante luna llena y nueva en comparación con fases de cuarto. Dicha frecuencia mostró una relación negativa con la talla, y la probabilidad de escape disminuyó con el aumento del ancho del caparazón. El tiempo de reemergencia fue más corto durante luna llena y nueva, sugiriendo mayor tolerancia al riesgo de depredación en picos de actividad reproductiva. Los resultados indican que el comportamiento y el esfuerzo reproductivo están modulados por la talla y la fase lunar, permitiendo a los cangrejos equilibrar estratégicamente la toma de riesgos y la reproducción.

Palabras clave: Marea viva, depredador, escape, madriguera, ciclo semilunar

Introduction

Animal boldness is generally defined as the tendency of an individual to take risks when facing novel or potentially dangerous situations (Sih et al., 2004; Ward et al., 2004). Under predation pressure, risk-taking behavior can directly affect escape success and survival, with important consequences for population structure and dynamics. At the same time, excessive risk avoidance may limit access to critical resources such as food, mates, or breeding territories (Lima & Dill, 1990). These opposing selective pressures create a trade-off between survival and future reproductive success, providing a framework for the evolution of risk-taking strategies that maximize fitness under variable ecological conditions (Réale et al., 2010; Gruber et al., 2019). Risk-taking behavior is closely linked to reproductive state, with individuals increasing exposure to predation when reproductive

opportunities are high (Magnhagen & Löf, 2006).

Uca heteropleura (Smith, 1870) is a common fiddler crab inhabiting open intertidal mudflats in the Pacific coast of Panama, where males display a conspicuous repertoire of courtship behaviors including claw waving, body lifting and leg movements (Crane, 1975; Lombardo, 2025b; Fig. 1D). At El Agallito Beach (Herrera Province, Panama), *U. heteropleura* occurs alongside a diverse assemblage of avian predators that forage visually on surface-active crabs (Backwell et al., 1998; Hugie, 2004; Lombardo, 2025a). Predators primarily detect fiddler crabs visually, from above or at low angles, making overhead movement and rapid fly-bys salient cues of predation risk for crabs (Backwell et al., 1998; Hugie, 2004). This ecological context is therefore well suited for examining trade-offs between male survival and reproductive investment, as conspicuous courtship displays may enhance mating success while simultaneously increasing visibility to predators (Backwell & Passmore, 1996; Reaney & Backwell, 2007).

Previous studies have shown that boldness and antipredator responses in fiddler crabs are highly context dependent, influenced by factors such as body size, local density, and social environment, and are closely tied to trade-offs between reproductive and survival behaviors (Backwell & Passmore, 1996; Reaney & Backwell, 2007; Lombardo, 2025a). For example, *Gelasimus vomeris* as well as *Uca princeps* have been shown to make graded escape decisions based on perceived predation risk, including whether to retreat and how long to remain inside burrows, indicating that antipredator responses reflect active risk assessment rather than fixed reaction patterns (Hemmi, 2005a; Hugie, 2004). Body size and claw morphology may further mediate these decisions, as costs and benefits of risk-taking under predation pressure might be experienced differently between large and small crabs (Backwell & Passmore, 1996; Reaney & Backwell, 2007).

The reproductive activity of various fiddler crab species is synchronized with

lunar cycles (Table 1) driven by tidal amplitude, with peaks in courtship and surface activity occurring near new and full moons, when spring tides prevail (Christy, 1978; Morgan, 1996; Kerr, 2015). Accordingly, antipredator behavior may vary with lunar phase, consistent with theoretical expectations of trade-offs between predator avoidance and reproductive activity (Lima & Dill, 1990; Gruber et al., 2019). Such variation could be evaluated using escape decisions and time to reemerge from burrows following predator exposure, two commonly used indicators of perceived predation risk in fiddler crabs (Hemmi, 2005a; Hugie, 2004).

In contrast, during lunar phases associated with lower tidal amplitudes, such as quarter moons (neap tides), reproductive activity may be reduced or less synchronized (Christy, 1978; but see Kim et al., 2004). During these periods, the potential benefits of risk-taking could be lower, and individuals may adopt conservative strategies, characterized by a greater likelihood of retreat and longer reemergence times following perceived predation risk (Lima & Dill, 1990; Gruber et al., 2019).

The general objective of this study was to examine how male *U. heteropleura* balance reproductive activity and antipredator behavior across contrasting lunar phases by quantifying their responses to simulated avian predator fly-bys. To address this objective, we pursued two specific objectives: to assess changes in surface activity before and after predator exposure as an indicator of reproductive and above-ground activity, and to evaluate individual retreat decisions and reemergence time as indicators of antipredator and risk-taking behavior. Based on the trade-off between predation risk and reproductive investment, we predicted that (1) surface activity prior to predator exposure would differ across lunar phases, and that the proportional reduction in surface activity following predator fly-bys would vary with lunar phase; and (2) individual males would differ in their likelihood of retreat and in their time to reemerge following predator exposure across lunar phases. Together, these predictions allow evaluation of how antipredator behavior,

recovery dynamics, and reproductive activity are integrated in an ecological context.

Table 1

Summary of reproductive timing and cycle type in fiddler crab species across latitudinal gradients.

Species	Region	Reproductive timing relative to spring tides	Reproductive cycle	Source
<i>Leptuca pugilator</i>	Atlantic, USA	Mating ~ 4–5 days before; larval release ~7 days after.	Semilunar	Christy (1978)
<i>Minuca pugnax</i>	Atlantic, USA	Mating ~4–5 days after.	Semimonthly	Greenspan (1982)
<i>Austruca annulipes</i>	Mideast, Kuwait	Activity and emergence vary with lunar phase and tidal amplitude.	Semilunar	Al-Musawi & Wagner (2012)
<i>Leptuca terpsichores</i> <i>Leptuca deichmanni</i>	Panama, Pacific	Larval release synchronized with spring tides; timing shifts with temperature.	Semilunar	Kerr et al. (2014)

Note: *Reproductive timing is expressed relative to spring tides (periods of maximum tidal amplitude during new and full moons). Semimonthly cycles indicate activity occurring twice per lunar month, whereas semilunar cycles reflect synchronization with the spring–neap tidal cycle.*

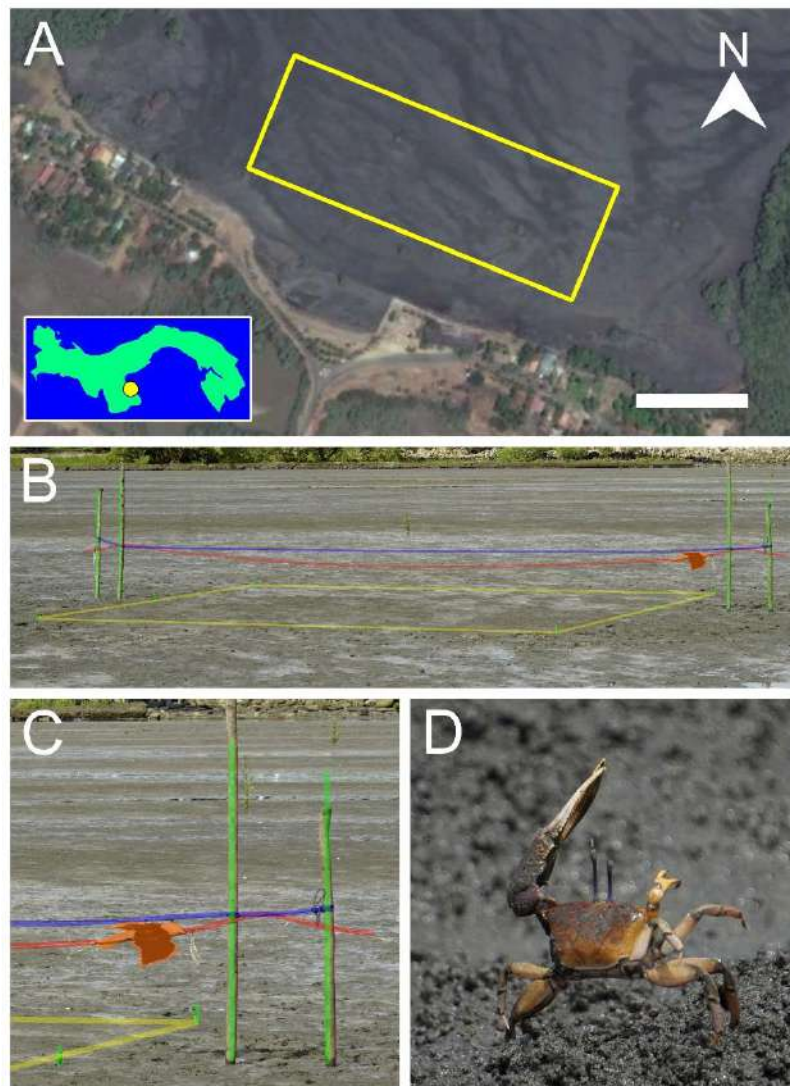
Materials and methods

Study site & sampling

Fieldwork was conducted at El Agallito Beach (8°00'13.2" N; 80°24'11.2" W), Llano Bonito, Chitré District, Herrera Province, on the Gulf of Parita (Fig. 1A). The site was selected for its accessibility and the high detectability of *U. heteropleura* during low tide, allowing direct behavioral observations.

Figure 1

*Sampling setup for trials evaluating the response of *Uca heteropleura* males to a simulated avian predator at El Agallito Beach, Pacific coast of Panama.*



Note: (A) Study site with general area of quadrat location in yellow (scale = 100 m). (B) Panoramic view of the 5 m² sampling quadrat (2.25 × 2.25 m), outlined in yellow; supporting stakes and poles are shown in green. (C) Bird model (orange) suspended

from the main line (blue), controlled by red guide lines for movement across the quadrat. (D) Waving male *U. heteropleura* during courtship.

The site is an intertidal flat (sandy-muddy), with tidal recession reaching up to 1.6 km (Delgado, 1998). Vegetation on the edges includes mangrove species such as *Avicennia germinans*, *Rhizophora mangle*, *Laguncularia racemosa* and *Conocarpus erectus* (Tejada et al., 2022). The climate is tropical savanna (Köppen, 1936), with temperatures ranging 24–30°C and annual precipitation ~1,250 mm (IMHPA, 2024; Beck et al., 2018). Rainfall peaks in September, while the dry season extends from January to March (Delgado, 1998).

Sampling was conducted during five field trips between May and July 2025, strategically distributed across lunar phases: two during full or new moons and three during quarter phases. Sampling dates were treated as independent replicates within each lunar phase category. This design enabled the evaluation of antipredatory behavior under contrasting lunar conditions (Table 2).

Table 2

*Sampling schedule during 2025 at El Agallito Beach, Pacific coast of Panama. Observations of *Uca heteropleura* activity were conducted during diurnal low tides. Tidal amplitude is presented in centimeters.*

Sampling	Date	Lunar phase	Tidal amplitude
1	April 13	Full moon	15–448
2	May 17	1 st quarter - Waxing half moon	61–451
3	June 7	3 rd quarter - Waning half moon	110–405
4	June 17	3 rd quarter - Waning half moon	421–439
5	July 22	New moon	64–442

Predation stimulus

Multiple quadrats were established per sampling date to test for habituation

and single-pass behavioral trials, as repeated exposure to stimulus or disturbance can lead to habituation and reduced antipredator responses in prey species (Jennions et al., 2003). Separating habituation from single-pass trials ensured that behavioral responses measured in the latter were not confounded by prior exposure to the stimulus.

At each sampling date, 5 m² quadrats were randomly established within the activity area of crabs during low tide (Fig. 1B). To stimulate crabs on the surface, an approaching predatory bird was simulated using a silhouette model consisting of a wooden body (20 cm) and plastic wings (70 cm) (Fig. 1C). The bird model was mounted on a 6 m nylon line stretched between two 1.8 m posts positioned 2.5 m outside the quadrat. Two auxiliary lines allowed controlled movement of the model back and forth across the quadrat, simulating low flight ~30 cm above the substrate. Observers remained 5 m from the quadrat to minimize disturbance, and observations were conducted using binoculars (7 × 50 mm).

Habituation test

After establishing the experimental setup, initial counts of surface-active crabs were conducted within each quadrat (n = 32). To evaluate whether male *U. heteropleura* habituated to repeated predator exposure, we fitted a general linear model with three consecutive bird model passes as a fixed factor and quadrat as a random blocking factor to account for non-independence among repeated observations within quadrats. The response variable was the number of non-responsive crabs on the surface after each bird model pass. Model assumptions were evaluated by inspecting residual plots for normality and homoscedasticity. When the effect of simulated predator exposure was significant, pairwise comparisons were performed using the HSD Tukey test.

Single-pass trials

A set of 37 quadrats was set in a similar fashion as above, and one pass of the predator bird model was then applied to evaluate antipredator responses. For each pass, the number of *U. heteropleura* individuals was recorded pre- and post-stimulus, classifying individuals as escape (retreated into burrow) or non-responsive (remained on the surface after bird model exposure). Variation in the number of individuals among sampling trips was assessed using a chi-square goodness-of-fit test, whereas comparisons between lunar phase categories were performed using independent two-sample *t*-tests. Analyses of crab abundance were conducted at the quadrat level, pooling observations within lunar phase categories (full and new moon vs. quarter phases). Differences in abundance between lunar phases, both prior to and after predator model passes, were assessed using independent two-sample *t*-tests. Differences in carapace width between behavioral categories (escape vs. non-responsive), as well as variation in the size of non-responsive individuals across lunar phases, were also evaluated using the same approach. Additionally, a binary logistic regression was used to examine the relationship between antipredator response (escape = 1, non-responsive = 0) and body size, with carapace width as predictor. The combined use of these approaches allowed assessment of both the predictive effect of body size on response probability (logistic regression) and direct comparisons of size between groups (*t*-tests).

Latency to reemergence was used as a proxy for risk-taking behavior, and it was defined as the time elapsed from burrow entry to reemergence at the surface following exposure to the bird predator model. Focal individuals were randomly selected during trials, including both behavioral categories. These crabs were captured manually and measured for carapace width and length (CW, CL) and major chela length and height (ChL, ChH) to examine size-dependent variation in risk-taking behavior. The effect of lunar phase (full and new moon vs. quarter phases) on latency was tested using an independent two-sample *t*-test. Focal individuals that did not reemerge within the observation period (90 seconds) following the stimulus

were classified as non-reemerged.

In addition, chela-waving rates (movements min^{-1}) were recorded for randomly selected individuals, during each sampling date, outside quadrats to avoid disturbance effects associated with the experimental setup. These focal individuals were subsequently measured to evaluate relationships among signaling effort, body size, and lunar phase. Waving was also compared between lunar phases using independent two-sample *t*-tests.

Prior to analysis, data from single bird model passes were evaluated for normality and homogeneity of variances. Chi-square tests were performed on raw counts, while density values are presented for descriptive purposes. All analyses were conducted using a significance level of $\alpha = 0.05$. Model assumptions were assessed by evaluating normality and homogeneity of variances, and by inspection of residual plots for regression models. Data were curated in Microsoft Excel and subsequently analyzed in Minitab 19.

Results

Between April and July 2025, a total of 616 individuals were quantified on the surface of quadrats at El Agallito Beach. Mean carapace width was 15.9 ± 4.1 mm, whereas descriptive biometric measurements across sampling dates are summarized in Table 3. The fitted general linear model revealed a significant effect from bird model repeated exposure on crab response ($F_{2,62} = 9.60$, $p < 0.001$), and explained a substantial proportion of variance in the response variable ($R^2 = 0.729$).

Table 3

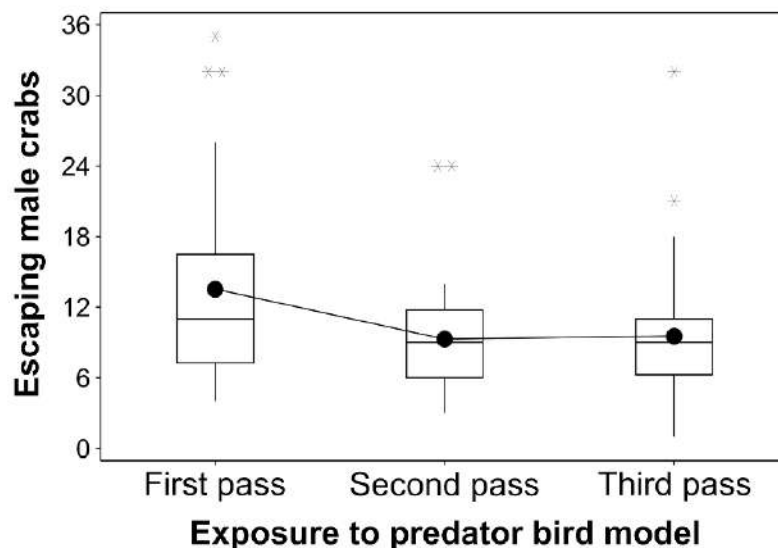
Male Uca heteropleura density and morphometrics at El Agallito Beach. Density is expressed as the number of individuals per square meter, while carapace width and length (CW, CL) and major claw height and length (ChH, ChL) are given in millimeters.

Date	Density	CW	CL	ChH	ChL
○ Full moon - April 13	14.5	17.5 ± 2.3	12.2 ± 2.5	12.0 ± 3.1	25.4 ± 6.4
● 1 st quarter - May 17	6.2	17.1 ± 3.1	12.4 ± 2.3	9.9 ± 2.2	23.3 ± 5.8
● 3 rd quarter - June 7	2.2	14.4 ± 3.1	9.3 ± 1.9	7.4 ± 2.0	15.8 ± 5.8
● 3 rd quarter - June 17	6.9	14.2 ± 2.1	10.3 ± 1.6	9.8 ± 2.6	18.0 ± 7.7
● New moon - July 22	11.2	17.9 ± 6.2	9.7 ± 4.1	8.4 ± 3.9	18.8 ± 9.9

Quadrat also contributed significantly to variation in the response ($F_{31,62} = 4.76$, $p < 0.001$). The mean number of crabs that escaped decreased after the first simulated predator exposure (1st: 13.53 ± 8.23 ; 2nd: 9.28 ± 4.91 ; 3rd: 9.53 ± 6.03). Tukey *post hoc* comparisons indicated that the number of escaping crabs after the first pass of the predator bird model, differed significantly from both the second ($t = -3.90$, $p = 0.001$) and third passes ($t = -3.67$, $p = 0.001$), whereas no difference was detected between second and third ($t = 0.23$, $p = 0.971$; Fig. 2).

Figure 2

Habituation following three successive bird predator model exposures in Uca heteropleura males from El Agallito Beach, Panama Pacific.

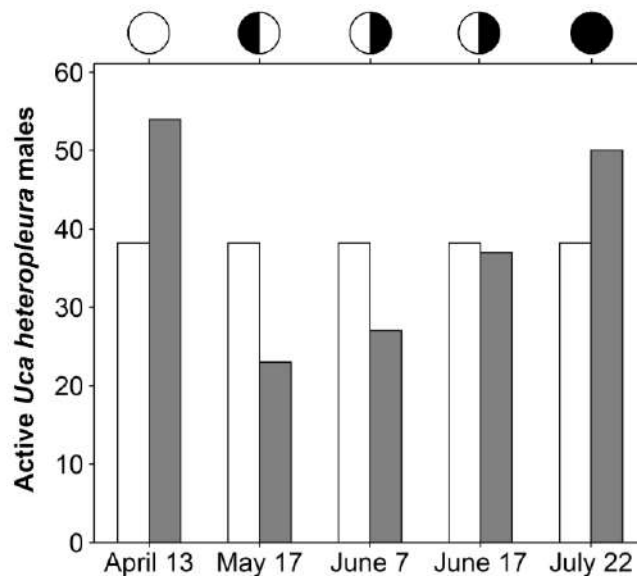


In single-pass trials, mean density across all sampling dates was 8.2 ± 4.7

indiv. m², while the number of active individuals among sampling dates varied significantly ($\chi^2 = 19.55$, $df = 4$, $p = 0.001$). To further evaluate these patterns, subgroup comparisons were conducted. No significant differences were detected between crab counts during full and new moon phases ($\chi^2 = 0.15$, $df = 1$, $p = 0.69$), both of which exhibited higher abundances of surface-active crabs (Fig. 3). Likewise, no significant differences were observed among crab counts during quarter moons (May–June; $\chi^2 = 3.58$, $df = 2$, $p = 0.16$).

Figure 3

Number of active Uca heteropleura males across sampling dates at El Agallito Beach, Pacific coast of Panama. Differences were assessed using a chi-square test.



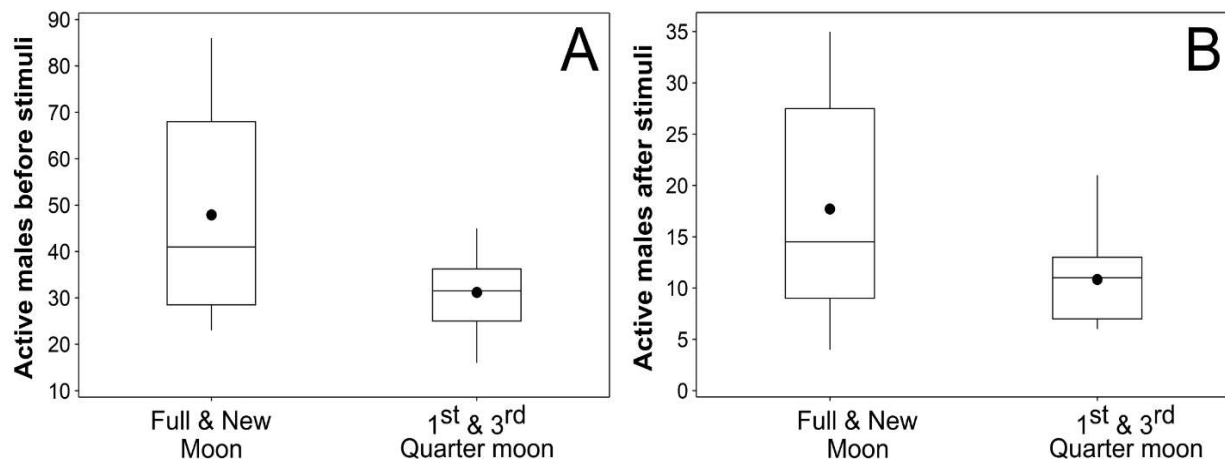
Note: White bars represent expected counts and gray bars denote observed individuals counts on the surface during each sampling date. Upper x-axis indicates the corresponding moon phase.

Baseline surface activity, measured prior to bird predator model trials, showed significant crab count differences between lunar phases ($t = 3.37$, $df = 33$, $p = 0.002$), with greater surface activity during full and new moon relative to quarter moons (Fig.

4A). A similar pattern was detected after predator stimuli ($t = -2.79$, $df = 24$, $p = 0.010$), with higher activity during full and new moon phases (Fig. 4B). Major claw waving frequency also differed significantly between lunar phases ($t = 5.07$, $df = 67$, $p < 0.001$), with higher waving rates recorded during full and new moon phases. Major claw waving frequency showed a slight but significant decrease with increasing carapace width (Linear regression; $F_{1,377} = 7.99$, $p = 0.005$; $R^2 = 0.02$). Carapace width differed significantly among sampling dates (Welch's ANOVA; $F_{4,22.97} = 29.66$, $p < 0.001$). Games-Howell *post hoc* comparisons indicated that individuals sampled during quarter moon dates were significantly smaller than those from full or new moon, while no difference was detected between full and new moon dates (Table 4). Crabs from third quarter moon (June 7) were also significantly smaller than those from first quarter (May 17). In contrast, individuals from new moon (July 22) were significantly larger than those from quarter moon dates (May-June).

Figure 4

Uca heteropleura male response to bird model predator stimulus form single-pass trials at El Agallito Beach, panamanian Pacific.



Note: (A) Crabs on the surface across moon phases before trials. (B) Corresponding counts by moon phase after predator model exposure.

Table 4

Pairwise comparisons of carapace width among sampling dates using the Games-Howell post hoc test following Welch's ANOVA.

Pairwise comparison	Difference of means	95% C.I.	t	p
May 17 ● vs. ○ April 13	-5.11	(-7.06, -3.16)	-7.49	< 0.001
June 7 ● vs. ○ April 13	-8.21	(-10.60, -5.82)	-10.20	< 0.001
June 17 ● vs. ○ April 13	-7.69	(-12.03, -3.36)	-6.25	0.002
July 22 ● vs. ○ April 13	0.35	(-4.63, 5.33)	0.21	1.000
June 7 ● vs. ● May 17	-3.10	(-5.33, -0.87)	-4.19	0.004
June 17 ● vs. ● May 17	-2.58	(-6.92, 1.76)	-2.17	0.295
July 22 ● vs. ● May 17	5.46	(0.53, 10.38)	3.37	0.026
June 17 ● vs. ● June 7	0.51	(-3.86, 4.88)	0.41	0.993
July 22 ● vs. ● June 7	8.55	(3.52, 13.59)	5.11	0.001
July 22 ● vs. ● June 17	8.04	(2.28, 13.80)	4.20	0.004

Note: Mean differences and 95% confidence intervals (C.I.) are reported in millimeters. Significant comparisons are indicated in bold.

The probability of escape in response to the predator stimulus decreased significantly with increasing carapace width (Binary logistic regression; $\beta = -0.2976$, $X^2 = 16.61$, $p < 0.001$). The odds ratio derived from the model ($e^{-0.2976} = 0.742$) indicated that the odds of escape ($1 - 0.742$) decreased by approximately 26% per 1 mm increase in carapace width (Fig. 5).

Carapace width differed significantly between crabs that escaped into their burrow (13.67 ± 2.16 mm) and non-responsive individuals (16.46 ± 3.35 mm), with non-responsive crabs being larger ($t = -3.93$, $df = 68$, $p < 0.001$; Fig. 6A). Non-responsive individuals recorded during the quarter moon (17.50 ± 3.11 mm) were larger ($t = -4.19$, $df = 38$, $p < 0.001$; Fig. 6B) than those measured during full and new moons (13.35 ± 1.65 mm).

Figure 5

Male Uca heteropleura escape probability following single-pass bird predator model stimulus at El Agallito Beach, Panama Pacific.

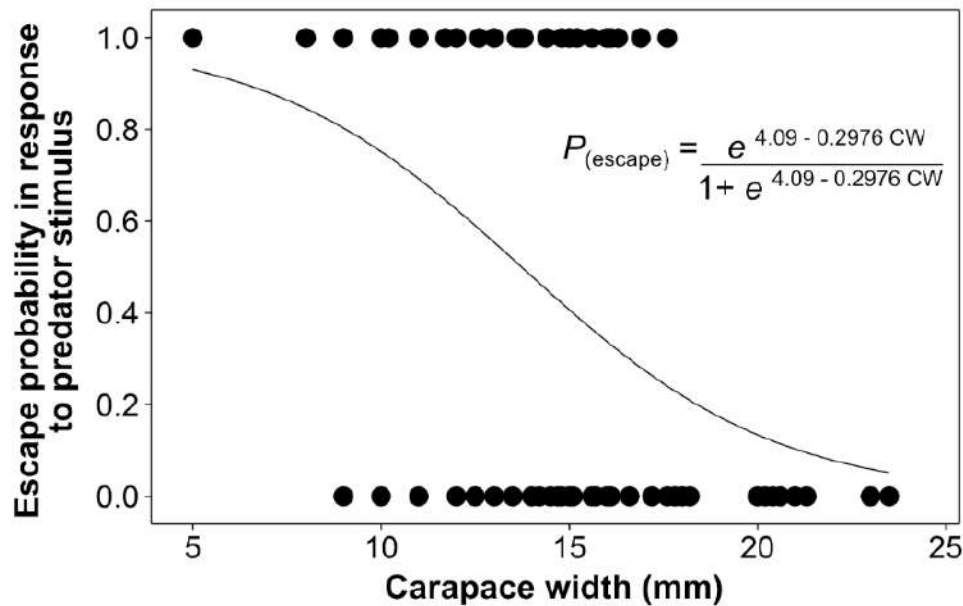
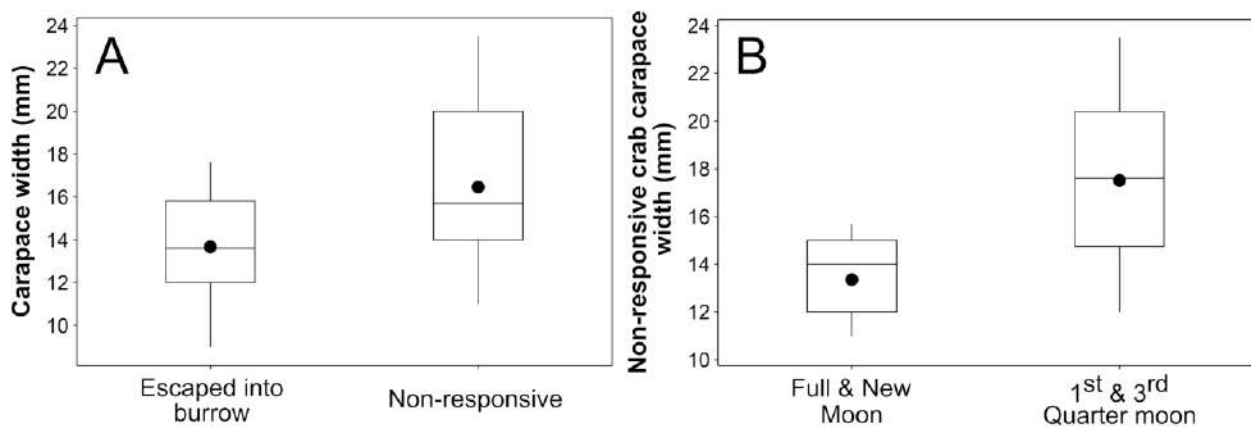


Figure 6

Carapace width in relation to simulated predator stimulus in Uca heteropleura males from El Agallito Beach, panamanian Pacific.

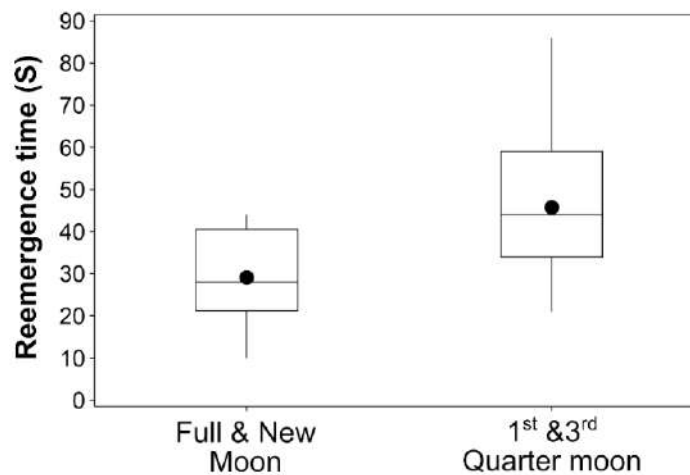


Note: (A) Carapace width comparison between responsive and non-responsive individuals. (B) Carapace width distribution of non-responsive individuals across moon phases.

The reemergence time of crabs after exposure to the bird model (single-pass trials) varied with lunar phase. During full and new moons, crabs reemerged more rapidly (29.10 ± 11.14 s) from their burrows, whereas during quarter moons (45.73 ± 18.28 s), emergence time was significantly longer ($t = -2.57$, $df = 23$, $p = 0.017$; Fig. 7).

Figure 7

*Reemergence time following simulated predator exposure in *Uca heteropleura* males from El Agallito Beach, Panama Pacific.*



Discussion

Fiddler crabs can assess predation risk and modulate multistage escape decisions accordingly (Hemmi, 2005a). In the present study, repeated exposure to the predator bird model significantly reduced the escape response in *U. heteropleura* males. This decline is consistent with habituation, a fundamental form of behavioral plasticity that allows animals to filter non-threatening stimuli and avoid energetic and opportunity costs (Rankin et al., 2009; Blumstein, 2016). Similar patterns have been documented in *Gelasimus vomeris* (Hemmi, 2005b; Hemmi & Merkle, 2009), while comparable forms of short- and long-term habituation have also been described in other brachyuran crabs such as *Neohelice granulata* (Maldonado et al., 1997; Tomsic et al., 2009), suggesting that this plasticity represents a conserved

mechanism underlying antipredator response. In this context, habituation in *U. heteropleura* may reduce the costs of lost feeding and mating opportunities associated with repeated, unnecessary retreats.

By separating habituation and single-pass trials, we were able to establish baseline antipredator responses independent of repeated exposure. In single-pass trials, surface activity varied significantly across lunar phases, with consistently higher numbers of active males during full and new moon. Importantly, this pattern was observed both before and after predator bird model presentations, indicating that the response to the model was consistent across quadrats.

Full and new moons correspond to spring tides, which are associated with increased tidal amplitude and are widely linked to enhanced foraging and reproductive opportunities in fiddler crabs (Christy, 1978; Morgan, 1996; Kim et al., 2004). Thus, elevated activity during these periods likely reflects increased reproductive effort, as males allocate more time to courtship and territory defense when mating opportunities are maximized (Backwell & Passmore, 1996; Reaney & Backwell, 2007). In contrast, reduced activity during quarter moon phases (neap tides) may reflect a more conservative strategy in which individuals limit exposure when ecological returns are lower, consistent with general predictions of risk-reward trade-offs in antipredator decision-making (Lima & Dill, 1990).

Differences in body size across lunar phases further suggest that temporal variation in activity is not random but structured by individual size. Males active during spring tides were significantly larger on average than those observed during quarter moons. Given the strong relationship between body size, competitive ability, and mating success in fiddler crabs (Reaney & Backwell, 2007; Backwell & Passmore, 1996), this pattern may indicate that larger, competitively dominant males preferentially emerge during periods of heightened reproductive opportunity.

In species such as *Austruca mjoebergi*, larger males achieve higher mating success through enhanced signaling performance and female preference (Reaney & Backwell, 2007), while in *Austruca annulipes*, female choice is strongly influenced by both male size and burrow characteristics (Backwell & Passmore, 1996). Alternatively, the observed pattern may reflect size-dependent access to optimal territories, as larger males are more successful in acquiring and defending high-quality burrows that enhance mating success (Backwell et al., 2000; Backwell & Passmore, 1996). In contrast, the presence of smaller individuals during quarter moon sampling dates may reflect either reduced competitive ability or a shift toward lower-risk temporal niches when dominant individuals are less active.

Lombardo (2025b) documented size-dependent activity linked to reproductive effort (waving) and temporal allocation in *U. heteropleura*; though, responses to predator stimuli were not evaluated. However, in the present study, escape responses were strongly influenced by individual size, with larger males escaping less frequently and showing a lower propensity to retreat in response to the simulated predator. This suggests that risk-taking may be size-dependent in this system. Similar state-dependent patterns have been documented in fiddler crabs, where males adjust surface activity and courtship effort in relation to reproductive opportunity and competitive ability (Backwell & Passmore, 1996).

More broadly, escape behavior in fiddler crabs is highly flexible and context-dependent, varying with environmental conditions, perceived risk, and individual state (Hemmi, 2005a, 2005b; Hemmi & Merkle, 2009). However, the influence of body size on risk-taking may not be universal across fiddler crab species or behavioral contexts. For example, in *Leptuca pugilator*, some measures of boldness such as reemergence latency are unrelated to body size, while others vary with sex and behavioral context (Pratt et al., 2005; Decker & Griffen, 2012). These findings suggest that size-dependent risk-taking should be interpreted as a context-specific outcome shaped by the interaction between individual state, ecological conditions,

and the particular behavioral metric considered (DeJaegher, 2025), consistent with state-dependent risk models (Magnhagen & Löf, 2006).

A complementary pattern emerged when considering signaling behavior alongside antipredator responses. In *U. heteropleura*, waving frequency increased under spring tides but showed a weak yet significant negative relationship with body size, indicating that smaller males contributed disproportionately to the observed high-frequency signaling. A similar pattern was reported by Lombardo (2025b), where elevated waving rates during new moon phases were driven primarily by smaller males, while larger males showed no clear relationship between size and waving frequency. Together, these results suggest that size-dependent reproductive strategies involve differential allocation among signaling effort, competitive behavior, and risk exposure.

Smaller males, typically at a disadvantage in direct contests, may compensate by increasing courtship signaling intensity to enhance their attractiveness to females, particularly under conditions of high competition or late reproductive opportunity (Milner et al., 2011; Lombardo, 2025b). In contrast, larger males appear to rely more heavily on territorial defense, prolonged surface activity, and persistence in courtship once initiated, reflecting their advantage in male-male competition and burrow ownership (Hayes et al., 2013; Backwell, 2019). Importantly, the exaggerated major claw, which can represent a substantial proportion of body mass (Crane, 1975), may impose biomechanical or energetic constraints on display performance, potentially limiting the maximum frequency or efficiency of waving in larger males. As a result, large males may prioritize display persistence, spatial dominance, and sustained visibility, whereas smaller males adopt a strategy based on elevated signaling effort to offset reduced competitive ability (Dennenmoser & Christy, 2013; Backwell, 2019).

This behavioral divergence is consistent with the broader framework of

semilunar reproductive synchrony in fiddler crabs, where peaks in male courtship activity are tightly aligned with female receptivity and tidal cycles (Christy, 1978; Greenspan, 1982; Morgan, 1996). Male signaling effort is known to increase during periods of maximal mating opportunity and can be modulated by ecological factors such as food availability and environmental conditions (Kim & Choe, 2003; Kim et al., 2004). In particular, Murai & Backwell (2005) showed that males of *Austruca perplexa* adjust their courtship investment across the mating period, with peak mating occurring immediately before new and full moons and males reducing courtship duration as female receptivity increases.

Additionally, synchronous courtship and coordinated signaling behavior have been documented across multiple fiddler crab species, reinforcing the idea that reproductive effort is both temporally structured and socially mediated (Backwell et al., 1998; Backwell, 2019). Within this context, the presence of large, relatively inactive *U. heteropleura* males during quarter moon phases, despite reduced overall activity, may reflect alternative reproductive tactics (Morgan, 1996), such as early territory establishment or prolonged occupancy, rather than increased signaling effort. Future studies may examine this activity pattern to determine the actual nature of large male activity during quarter moon (neap tides) and how it correlates to reproductive investment. Overall, these findings indicate that risk-taking, signaling, and activity represent partially decoupled behavioral axes, and that reproductive strategies in fiddler crabs may emerge from a dynamic balance between individual state and temporally structured ecological opportunities (Lima & Dill, 1990).

Finally, variation in reemergence time supports predictions from optimal hiding theory (Jennions et al., 2003), which proposes that individuals balance predation risk against the costs of lost opportunities. During neap tides, when feeding and reproductive opportunities are reduced, crabs tended to remain longer in their burrows following disturbance, consistent with a more risk-averse strategy. In contrast, during spring tides, individuals reemerged more rapidly, suggesting a

higher risk-taking behavior when ecological opportunities are temporally concentrated.

Conclusions

Taken together, our results indicate that antipredator behavior in *U. heteropleura* is shaped by the interaction between predictable environmental cycles and individual state (size). At the population level, activity and signaling seem to peak during spring tides, when reproductive opportunities may be higher, leading to increased exposure to predators and elevated risk-taking. At the individual level, body size modulates how that risk is expressed, with larger males consistently adopting bolder strategies. The persistence of higher activity levels before and after predator exposure during full and new moon further suggests that these patterns reflect stable behavioral responses rather than transient effects of disturbance. This coupling of environmental context and individual state highlights the dynamic nature of risk-taking behavior, where crabs continuously adjust their responses to balance predation risk against reproductive and foraging benefits.

Acknowledgements

We thank the anonymous reviewers for their comments to improve earlier versions of the manuscript as well as students of the 2025 marine ecology course from the Centro Regional Universitario de Veraguas for their help in the field. This work was supported in part by membership into the Sistema Nacional de Investigación (SNI) from Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (Senacyt).

References

Al-Musawi, A. A., & Wagner, R. H. (2012). Lunar cycle effects on the behavior of fiddler crabs (*Uca* spp.). *Biological Rhythm Research*, 43(4), 1–14.

<https://doi.org/10.1080/09291016.2011.633185>

- Backwell, P. R. Y., O'Hara, P. D., & Christy, J. H. (1998). Prey availability and selective foraging in shorebirds. *Animal Behaviour*, 55(6), 1659–1667. <https://doi.org/10.1006/anbe.1997.0713>
- Backwell, P. R. Y., & Passmore, N. I. (1996). Time constraints and multiple choice criteria in the sampling behavior and mate choice of the fiddler crab *Uca annulipes*. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 38, 407–416. <https://doi.org/10.1007/s002650050260>
- Backwell, P. R. Y., Jennions, M. D., Christy, J. H., & Passmore, N. I. (2000). Dishonest signaling in a fiddler crab. *Proceedings of the Royal Society B*, 267, 719–724. <https://doi.org/10.1098/rspb.2000.1062>
- Backwell, P. R. Y. (2019). Synchronous waving in fiddler crabs: a review. *Current Zoology*, 65(1), 83–88. <https://doi.org/10.1093/cz/zoy053>
- Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, 5. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>
- Blumstein, D. T. (2016). Habituation and sensitization: New thoughts about old ideas. *Animal Behaviour*, 120, 255–262. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2016.05.012>
- Christy, J. H. (1978). Adaptive significance of reproductive cycles in the fiddler crab *Uca pugilator*: A hypothesis. *Science*, 199(4332), 453–455. <https://doi.org/10.1126/science.199.4332.453>
- Crane, J. (1975). *Fiddler crabs of the world*. Princeton University Press.
- Greenspan, B. N. (1982). Semi-monthly reproductive cycles in male and female fiddler crabs, *Uca pugnax*. *Animal Behaviour*, 30(4), 1084–1092. [https://doi.org/10.1016/S0003-3472\(82\)80198-X](https://doi.org/10.1016/S0003-3472(82)80198-X)
- Decker, R. A., & Griffen, B. D. (2012). Correlating context-specific boldness and physiological condition of female sand fiddler crabs (*Uca pugilator*). *Journal of Ethology*, 30(3), 403–412. <https://doi.org/10.1007/s10164-012-0338-9>
- DeJaegher, E., Quijón, P. A., & Ramey-Balci, P. A. (2025). Measuring boldness in decapod crustaceans: An overview of methodological approaches and potential caveats. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 13, 1651164. <https://doi.org/10.3389/fevo.2025.1651164>

- Delgado, F. S. (1998). Geography, physical oceanography, and climate of Panama (pp. 19–24). In R. J. G. Morrison, R. W. Butler, & F. S. Delgado (Eds.), *Atlas of Nearctic shorebirds and other waterbirds of the coast of Panama* (Special Publication, pp. 1–113). Canadian Wildlife Service.
- Dennenmoser, S., & Christy, J. H. (2013). The design of a beautiful weapon: Compensation for opposing sexual selection on a trait with two functions. *Evolution*, 67(4), 1181–1188. <https://doi.org/10.1111/evo.12018>
- Gruber, J., Kahn, A., & Backwell, P. R. Y. (2019). Risks and rewards: Balancing costs and benefits of predator avoidance in a fiddler crab. *Animal Behaviour*, 158, 9–13. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2019.09.014>
- Hayes, C. L., Booksmythe, I., Jennions, M. D., & Backwell, P. R. Y. (2013). Does male reproductive effort increase with age? Courtship in fiddler crabs. *Biology Letters*, 9, 20121078. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2012.1078>
- Hemmi, J. M. (2005a). Predator avoidance in fiddler crabs: 1. Escape decisions in relation to the risk of predation. *Animal Behaviour*, 69(3), 603–614. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2004.06.018>
- Hemmi, J. M. (2005b). Predator avoidance in fiddler crabs: 2. The visual cues. *Journal of Experimental Biology*, 208(10), 1889–1903. <https://doi.org/10.1016/J.ANBEHAV.2004.06.019>
- Hemmi, J. M., & Merkle, T. (2009). High stimulus specificity characterizes anti-predator habituation under natural conditions. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 276(1677), 4381–4388. <https://doi.org/10.1098/rspb.2009.1452>
- Hugie, D. M. (2004). A waiting game between the black-bellied plover and its fiddler crab prey. *Animal Behaviour*, 67(5), 823–831. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2003.03.023>
- Jennions, M. D., Backwell, P. R. Y., Murai, M., & Christy, J. H. (2003). Hiding behaviour in fiddler crabs: How long should prey hide in response to a potential predator? *Animal Behaviour*, 66(2), 251–257. <https://doi.org/10.1006/anbe.2003.2190>
- Kerr, K. A., Christy, J. H., Joly-Lopez, Z., Luque, J., Collin, R., & Guichard, F. (2014). Reproducing on time when temperature varies: Shifts in the timing of courtship by fiddler crabs. *PLOS ONE*, 9(5), e97593. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097593>
- Kerr, A. M. (2015). Temperature mediates reproductive timing in a fiddler crab:

- Implications for larval release synchrony. *Journal of Crustacean Biology*, 35(2), 185–193. <https://doi.org/10.1163/1937240X-00002334>
- Kim, T. W., & Choe, J. C. (2003). The effect of food availability on the semilunar courtship rhythm in the fiddler crab *Uca lactea* (de Haan) (Brachyura: Ocypodidae). *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 54(3), 210–217. <https://doi.org/10.1007/s00265-003-0614-3>
- Kim, T.-W., Kim, K.-W., Srygley, R. B., & Choe, J. C. (2004). Semilunar courtship rhythm of the fiddler crab *Uca lactea* in a habitat with great tidal variation. *Journal of Ethology*, 22(1), 63–68. <https://doi.org/10.1007/s10164-003-0100-4>
- Köppen, W. (1936). Das geographische System der Klimate. In W. Köppen & R. Geiger (Eds.), *Handbuch der Klimatologie* (1st ed., pp. 1–44). Verlag von Gebrüder Borntraeger.
- Lima, S. L., & Dill, L. M. (1990). Behavioral decisions made under the risk of predation: A review and prospectus. *Canadian Journal of Zoology*, 68(4), 619–640. <https://doi.org/10.1139/z90-092>
- Lombardo González, R. C. (2025a). Phenotypic effects on male risk-taking behavior in *Leptuca beebei* from field experiments at Playa El Agallito, Chitré, Panama. *Revista Científica Vida Natural*, 2(2). <https://doi.org/10.59722/rcvn.v2i2.806>
- Lombardo González, R. C. (2025b). Lunar phase effects on spatial distribution, male size and claw waving in the fiddler crab *Uca heteropleura* at El Agallito Beach, Panama. *Scientia*, 35(2), 28–51. <https://doi.org/10.48204/j.scientia.v35n2.a7699>
- Magnhagen, C., & Löf, M. (2006). Risk-taking in relation to reproductive investments and future reproductive opportunities: A review. *Behavioral Ecology*, 17(2), 289–295. <https://doi.org/10.1093/beheco/arj029>
- Maldonado, H., Romano, A., & Tomsic, D. (1997). Long-term habituation (LTH) in the crab *Chasmagnathus*: A model for behavioral and mechanistic studies of memory. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, 30(7), 813–826. <https://doi.org/10.1590/S0100-879X1997000700001>
- Milner, R. N. C., Jennions, M. D., & Backwell, P. R. Y. (2011). Keeping up appearances: male fiddler crabs wave faster in a crowd. *Biology Letters*, 8(2), 176–178. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2011.0926>
- Morgan, S. G. (1996). Plasticity in reproductive timing by crabs in response to tidal cycles. *Marine Ecology Progress Series*, 141, 57–66.

<https://doi.org/10.3354/meps141057>

- Pratt, A. E., McLain, D. K., & Berry, A. S. (2005). Variation in the boldness of courting sand fiddler crabs (*Uca pugilator*). *Ethology*, 111(1), 63–76. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0310.2004.01047.x>
- Rankin, C. H., Abrams, T., Barry, R. J., Bhatnagar, S., Clayton, D. F., Colombo, J., Coppola, G., Geyer, M. A., Glanzman, D. L., Marsland, S., McSweeney, F. K., Wilson, D. A., Wu, C.-F., & Thompson, R. F. (2009). Habituation revisited: An updated and revised description of the behavioral characteristics of habituation. *Neurobiology of Learning and Memory*, 92(2), 135–138. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2008.09.012>
- Réale, D., Dingemanse, N. J., Kazem, A. J. N., & Wright, J. (2010). Evolutionary and ecological approaches to the study of personality. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 365(1560), 3937–3946. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0222>
- Réale, D., Reader, S. M., Sol, D., McDougall, P. T., & Dingemanse, N. J. (2007). Integrating animal temperament within ecology and evolution. *Biological Reviews*, 82(2), 291–318. <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.2007.00010.x>
- Reaney, L. T., & Backwell, P. R. Y. (2007). Risk-taking behavior predicts aggression and mating success in a fiddler crab. *Behavioral Ecology*, 18(3), 521–525. <https://doi.org/10.1093/beheco/arm014>
- Sih, A., Bell, A., & Johnson, J. C. (2004). Behavioral syndromes: An ecological and evolutionary overview. *Trends in Ecology & Evolution*, 19(7), 372–378. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2004.04.009>
- Tejada, K., González, A., Carty, E., & Camarena, F. (2023). Abundancia y diversidad de aves playeras en la playa El Agallito, distrito de Chitré, provincia de Herrera. *Tecnociencia*, 25(1), 41–62. <https://revistas.up.ac.pa/index.php/tecnociencia/article/view/3432>
- Tomsic, D., Berón de Astrada, M., Sztarker, J., & Maldonado, H. (2009). Behavioral and neuronal attributes of short- and long-term habituation in the crab *Chasmagnathus*. *Neurobiology of Learning and Memory*, 92(2), 176–182. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2009.01.004>
- Ward, A. J. W., Thomas, P., Hart, P. J. B., & Krause, J. (2004). Correlates of boldness in three-spined sticklebacks (*Gasterosteus aculeatus*). *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 55, 561–568. <https://doi.org/10.1007/s00265-003-0739-4>

Diversidad enteroparasitaria en afluentes del río La Villa y detección de *cryptosporidium* spp. de importancia sanitaria

Enteroparasitic diversity in tributaries of the La Villa river and detection of *cryptosporidium* spp. of sanitary importance

Julio César Mora Quintero

Universidad de Panamá, Centro Regional Universitario de Azuero
Instituto de Investigaciones Científicas y Servicios de Alta Tecnología de Panamá
<https://orcid.org/0009-0006-5564-522X>

Autor de correspondencia: julio1900mora@gmail.com

Lorena Michelle Coronado Vásquez

Investigadora Postdoctoral, Instituto de Investigaciones Científicas y Servicios de
Alta Tecnología de Panamá (INDICASAT AIP)
Instituto de Investigaciones Científicas y Servicios de Alta Tecnología de Panamá
<https://orcid.org/0000-0001-6755-3118>
lcoronado@indicasat.org.pa

Alexis De La Cruz Lombardo

Investigador Postdoctoral y Catedrático, Universidad de Panamá
Centro Regional Universitario de Azuero, Panamá
<https://orcid.org/0000-0002-1938-6535>
alexisdelac26@gmail.com

Recepción: 19/04/26

Aceptado: 17/05/26

DOI <https://doi.org/10.48204/j.scientia.v36n2.a9750>

Resumen

El objetivo principal de esta investigación fue evaluar la calidad de la matriz de agua superficial en afluentes del Río La Villa en Los Santos, mediante la cuantificación parasitaria de los organismos de vida libre en dicha matriz, con un enfoque en recuperación del género *Cryptosporidium* spp. mediante pruebas moleculares como PCR, se utilizó el protocolo 1623 para recuperación de *Cryptosporidium* spp. y *Giardia* spp. de EPA como estándar para la captación de la mayor cantidad de formas

parasitarias posibles, los resultados mostraron una diversidad parasitaria amplia los cuales se dividieron en grupos para un mejor estudio dando diferencias significativas entre los géneros, al observar ooquistes del género *Cryptosporidium* spp. mediante tinción específica se optó por realizar pruebas PCR para confirmar la presencia de este parasito de importancia sanitaria en la región, estadísticamente los datos nos dicen que la hipótesis nula se rechaza y las medias de los grupos no son iguales y dichas medias se dividieron en 3 grupos los cuales son: significativos, intermedios y no significativos para su mejor comprensión con dichos resultados se abrieron investigaciones sobre este parasito de interés sanitario y su relación a parámetros fisicoquímicos en distintas matrices de agua.

Palabras Claves: Agua superficial, calidad del agua, medio ambiente, parasitología.

The primary objective of this study was to evaluate the quality of the surface water matrix in tributaries of the La Villa River, located in Los Santos, through the parasitic quantification of free-living organisms present in this matrix, particular emphasis was placed on the recovery of *Cryptosporidium* spp. using molecular techniques such as polymerase chain reaction (PCR). The EPA Method 1623 protocol was employed as the standard procedure for the recovery of *Cryptosporidium* spp. and *Giardia* spp., aiming to maximize the detection of parasitic forms. The results revealed a broad parasitic diversity, which was subsequently categorized into groups to facilitate analysis, demonstrating significant differences among genera. Upon the microscopic observation of *Cryptosporidium* spp. oocysts using specific staining techniques, PCR assays were conducted to confirm the presence of this pathogen of public health importance in the region. Statistical analysis indicated rejection of the null hypothesis, confirming that group means were not equal. These means were further classified into three categories—significant, intermediate, and non-significant—for improved interpretation. Based on these findings, further investigations were initiated to explore the relationship between this parasite of sanitary relevance and physicochemical parameters across different water matrices.

Keywords: Surface water, water quality, environment, parasitology.

Introducción

Las parasitosis intestinales constituyen uno de los principales problemas de salud pública en el mundo. Su morbilidad está ligada a la pobreza, la inadecuada higiene personal, la falta de servicios sanitarios, el inadecuado suministro de agua y la contaminación fecal; afecta principalmente a niños en países en desarrollo (Gonzales et al., 2018). El acceso a servicios de agua, saneamiento e higiene sin riesgos es un derecho humano que podría evitar que muchas personas sufran enfermedades gastrointestinales. Se calcula que las enfermedades diarreicas causan alrededor de 1,5 millones de fallecimientos cada año (Murray et al., 2013).

En el mundo, los patógenos presentes en el agua contaminada provocan dolor intenso, discapacidad e incluso la muerte. Estas enfermedades comunes relacionadas con parásitos presentes en el agua no tratadas (PANT) incluyen



giardiasis, esquistosomiasis, toxoplasmosis, equinococosis, amebiosis y criptosporidiosis (Gonzales et al., 2018; Hader et al., 2015)

A pesar del reconocimiento de la existencia de los parásitos desde la época de los egipcios, los parásitos intestinales continúan latentes con el correr de los años, lo cual provoca consecuencias en la salud del ser humano. Según Morales (2016), se estima que más de un cuarto de la población del mundo presenta parásitos, la más afectada por esto es la población infantil de bajos recursos (Espinosa et al., 2011).

La transmisión de enfermedades de origen hídrico está relacionada con la contaminación de origen fecal en aguas residuales y potables. Estas enfermedades son causadas por la presencia de parásitos, los cuales tienen una alta incidencia en la población infantil (Castillo y Fernández, 2020). *Giardia lamblia* y *Cryptosporidium* spp. se han seleccionado como organismos indicadores de contaminación de origen parasitario y su análisis es útil para evaluar la calidad del agua y determinar el riesgo sanitario (Manjarrez et al., 2019).

Los ooquistes de protozoarios y huevos de helmintos causan afecciones intestinales siendo el agua el vehículo más importante para diseminarlos. Las plantas potabilizadoras no han eliminado el riesgo de determinadas enfermedades, más bien han aumentado en muchos países. En Panamá, se desconoce si las medidas de calidad en el control de aguas son suficientes para prevenir estos contaminantes (Castillo et al., 2020)

El control de la transmisión por el agua plantea retos importantes, porque la mayoría de los agentes patógenos producen quistes, ooquistes o huevos que son extremadamente resistentes a procesos de desinfección, y en algunos casos a los de filtración, y considerando que los ooquistes son un potencial riesgo de transmisión para enfermedades zoonóticas (OMS, 2006; Kumar., 2016).

Diversas investigaciones en aguas de consumo humano concuerdan que existe una mayor frecuencia de protozoarios que de helmintos, con una alta prevalencia de *Cryptosporidium* spp y *Giardia* spp. (Gallego et al., 2012). La existencia de estos protozoarios en reservas de aguas abiertas y suministros de aguas tratadas es debido a su alta resistencia en el ambiente a través de sus formas quísticas u ooquistes (Guillén et al., 2013; Juárez y Sandoval, 2016), además de géneros parasitarios que pueden ser transmitidos a través de aguas contaminadas, tenemos protozoarios como *Entamoeba* spp., *Balantidium* spp., y *Toxoplasma gondii* (única especie descrita para este género) (Winiecka-Krusnel et. al; 2009; Borchardt et al., 2009).

El clima tropical de la región hace que Panamá sea un área endémica e ideal para que se den infecciones por protozoos tales como: *Cryptosporidium parvum*, *Giardia lamblia* y *Cyclospora cayetanensis*. Estas infecciones son muy fáciles de adquirir, porque estos organismos se encuentran en gran porcentaje en el ambiente y son difíciles de erradicar, debido a que tienen formas de resistencia conocidas como quistes y ooquistes, que les permiten sobrevivir a situaciones adversas y vivir en el ambiente en condiciones adecuadas de temperaturas y humedad, por más de un año (Guillén, 2016).

Anteriormente se han realizado estudios relacionados a las parasitosis en niños de la población panameña y analizado su relación con aguas, suelos y hortalizas como fuente potencial de enteroparásitos, sus resultados se han comparado con los obtenidos en la investigación de los argentinos Zonta et al., (2007), donde investigaron la misma problemática con poblaciones de su región en la cual tienen resultados similares, al igual panameños han investigado la fuente de posibles parásitos ambientales de aire y agua en otras partes más rurales de la extensión territorial como las comarcas cercanas al río Chagres donde la prevalencia del parasitismo es del 90 % según sus resultados (Arosemena et al.,

2013) y comparado con otras zonas rurales de Panamá donde también se alcanza un 66 % de positividad: Santa María en la provincia de Herrera, Coclesito y Escobal en la provincia de Colón, Guararé en la provincia de Los Santos, Boquete y Volcán en la provincia de Chiriquí (Rodríguez, 2013).

Según Gonzales et al. (2018) Panamá, como país tropical y con muchas personas que viven en condiciones de pobreza rural, no se escapa de esta realidad, pues las condiciones ambientales tales como las temperaturas cálidas, altos niveles de humedad ambiental, lluvias casi todo el año, alta cobertura vegetal que protege de la radiación en muchas zonas rurales, una amplia cantidad de vectores mecánicos y reservorios animales domésticos y silvestres, pueden favorecer la permanencia y dispersión de los parásitos en el ambiente; incluye los cuerpos de aguas que sirven de consumo y de fuente de irrigación a los cultivos.

Con lo anteriormente mencionado esta investigación tiene como finalidad evaluar la calidad de la matriz de agua superficial en algunas zonas del afluente del Rio La Villa en Los Santos, mediante la cuantificación parasitaria de los organismos de vida libre en dicha matriz, enfocándonos principalmente en confirmar la presencia del parásito *Cryptosporidium* spp. en la zona debido al aumento de la turbidez y mineralización del afluente en las últimas décadas, con ello se busca concientizar a la población panameña en especial a la región de Azuero la importancia del recurso hídrico con el que contamos mientras contribuimos a la divulgación científica del país al analizar o estudiar la presencia de este parásito protozoario que ha ganado relevancia en el sector sanitario en las últimas décadas.

Material y métodos

Colecta de las muestras

Se realizaron muestreos en distintos puntos del río La Villa mediante la técnica para recuperación de *Cryptosporidium* spp. 1623 propuesta por la agencia

de protección ambiental de Estados Unidos (EPA).

El consiste en la filtración de grandes volúmenes de agua para la captación de ooquistes en mayores proporciones, estas filtraciones se realizaron mediante un sistema de bombeo a combustible el cual constaba con filtros de acetato de celulosa de 1 μ de los cuales se recuperarían las formas parasitarias, el volumen final filtrado en cada muestreo fue de 1 000 L equivalentes a un total de 1 m³ por filtro, estos filtros fueron colocados en bolsas herméticas con una solución conservante de tween 80 + PBS al 0, 1 % para evitar la degradación en las formas parasitarias durante el traslado al laboratorio en hieleras.

Procesamiento de las muestras

Una vez las muestras se encuentran en el laboratorio se realizan cortes verticales con navajas estériles para poder desprender con mayor facilidad las tiras de acetato de celulosa del filtro, se depositan en frascos o nuevas bolsas rotuladas con las coordenadas de muestreo y parte del líquido en el que se transportó la muestra cuidando que las tiras se mantengan siempre sumergidas, se agitan los recipientes vigorosamente para desprender las formas parasitarias de las porosidades de las tiras de acetato.

Las muestras se depositan en tubos falcon de 15 mL, para centrifugar de 10 minutos a 3 500 RPM, luego se descarta, hasta que queden 2 mL de la muestra original para realizar lavados del pellet, y estos se realizan con 8 mL de solución saturada de NaCl dando un volumen final de 10 mL, se homogeniza la muestra con vortex y repetimos la centrifugación 10 minutos a 3 500 RPM. Después se rescata la parte superficial de la muestra para tinciones frescas con yodo en busca de huevos de helmintos, descartamos el sobrenadante restante hasta quedarnos con 2 mL de muestra para seguir con un segundo lavado con solución sheather centrifugando una última vez 10 minutos a 3 500 RPM, y se recuperan muestras de la superficie de los tubos para aplicar la tinción ácido resistente Zielh Neelsen en busca de protozoarios del género apicomplexa.

Para la recuperación de helmintos se realizó una tinción directa con yodolugol del líquido sobrante en las bolsas que contenían los filtros de acetato de celulosa; además, se realizó una filtración con discos de papel Wittman para separar el sedimento de la muestra, el cual se colocó en tubos falcon de 15 mL para centrifugar y realizar las pruebas de Willys Molloy. La misma consiste en la flotación de huevos y quistes de helmintos en una solución saturada de NaCl y la técnica de Sheather y esta posee un principio similar a la anterior técnica al sustituir la solución saturada de NaCl por una de sacarosa.

Cabe resaltar que dichas identificaciones son presuntivas identificadas de la mano de Atlas parasitológicos de la Organización Panamericana de la Salud 2020 y el libro de Parasitología tropical de Botero y Restrepo, a excepción del caso de *Cryptosporidium spp*, el cual se identificó con tinción específica y técnica molecular.

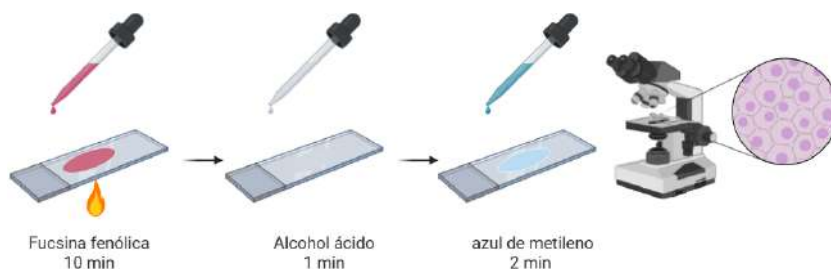
Tinción Ziehl Neelsen

Es la tinción encargada confirmar la presencia de las formas ooquíticas del género *Cryptosporidium spp*. Fue la tinción ácido resistente Ziehl Neelsen debido a su especificidad con las formas de vida que constan con pared lipídica gruesa, en el diagrama mostrado en la imagen # 1 se muestran los pasos a seguir en dicha tinción. Una vez fijado el frotis en la placa se vierte generosamente el compuesto de la fucsina fenólica la cual debe ser activada con calor, la placa se flamea con la ayuda de un mechero hasta empezar a emitir gases, luego de este proceso se toma el tiempo de tinción el cual es de 10 min en esta fase.

El siguiente paso es añadir el decolorante en este caso es el alcohol ácido, este se aplica generosamente en todo el frotis y se deja actuar por 1 min para luego enjuagar, por último, el tinte de contraste el cual es el azul de metileno este se deja actuar por 2 min se enjuaga la placa para dejarla secar y observar la presencia- ausencia de los ooquistes en el aumento 100 X.

Figura 1

Tinción Ziehl Neels



Ensayo molecular

La metodología propuesta en esta fase de la investigación fue proporcionada por las investigaciones de diagnóstico molecular de Rochelle et al.,1997 y Osorio, 2019 a las cuales se le aplicaron alteraciones para la obtención de resultados satisfactorios.

La información recomienda realizar una PCR anidada para la detección molecular de *Cryptosporidium* spp, no obstante, hubo discrepancias a la hora de comparar la metodología estandarizada con los primeros resultados obtenidos, por lo cual se optó a utilizar una PCR convencional con ambos pares de primers y comparar la eficacia de ambos, los primers y sus especificaciones se muestran en la tabla 1.

Tabla 1

Descripción de primers utilizados

Primer forward	Secuencia	Primer reverse	Secuencia	Región de interés
cphsp2386F	5'-3' (CTGTTGCTTATGGTGC TGCTG)	cphsp2672R	5'-3' (CCTCTTGGTG CTGGTGGAAT A)	18Rs
HSP70Cryp F	5'-3' (ATGACATCATCTGAAG GTCC)	HSP70CripR	5'-3' (TTAGTCGACC TCTTCAACAG)	18Rs

Extracción de ADN

Se utilizó el protocolo de extracción de ADN en cultivo celular del kit de tejido de Macherey-Nagel nuleospin el consta de los siguientes pasos:

- Al concentrado de nuestras muestras en un medio líquido se le agregan 200 μ L de Buffer T1 más 25 μ L de proteínasa K y 200 μ L de buffer B3.
- Una vez añadidos todos los reactivos, se homogeniza la muestra con vórtex y se deja incubar de 10 a 15 minutos a una temperatura de 70 °C.
- Posterior a la incubación se le agregan 210 μ L de etanol puro a la muestra, esta se homogeniza y pasa a la columna de extracción.
- Centrifugamos la columna de extracción a 11 000 G durante 1 minuto, descartamos el sobrenadante y depositamos en un tubo nuevo para centrifugar una última vez a 11 000 G durante un minuto.
- Posterior a la de extracción de ADN se mide pureza y cantidad de ADN en el equipo nanodrop.

Preparación del Máster mix

Los reactivos, cantidades y concentraciones utilizados para la preparación del máster mix fueron proporcionados por las investigaciones de Rochelle et al.,1997 y Osorio, 2019 acoplados a los protocolos establecidos en los laboratorios de INDICASAT-AIP, dicha información se visualiza en la tabla 2

Tabla 2

Reactivos utilizados para la preparación de máster mix

Reactivo	Concentración	Volumen μ
Primer F	10 μ M	1 μ L
Primer R	10 μ M	1 μ L
H2O		8, 5 μ L
ADN	13, 2 ng	2 μ L
dNTP	200 μ M	0, 4 μ L
Taq. polimerasa	1.0 unidades	0, 2 μ L
Tampon 5X phusion HF	1X	0, 4 μ L
DMSO	3 %	0, 6 μ L

Termociclaje

En esta fase se realizaron adaptaciones a los protocolos preestablecidos en las investigaciones ya mencionadas en la etapa de annealing de la muestra realizando una gradiente a varias temperaturas obteniendo como mejor resultado la temperatura de 59 ° C, el perfil térmico se muestra en la tabla 3

Tabla 3

Perfil térmico de muestras

Ciclo	Temperatura	Tiempo
1	94 °C	5 minutos
2	94 °C	20 segundos
3	59 °C	45 segundos
4	72 °C	1 minuto
5	40 ciclos desde el paso 2	
6	72 °C	7 minutos
7	4 °C	∞

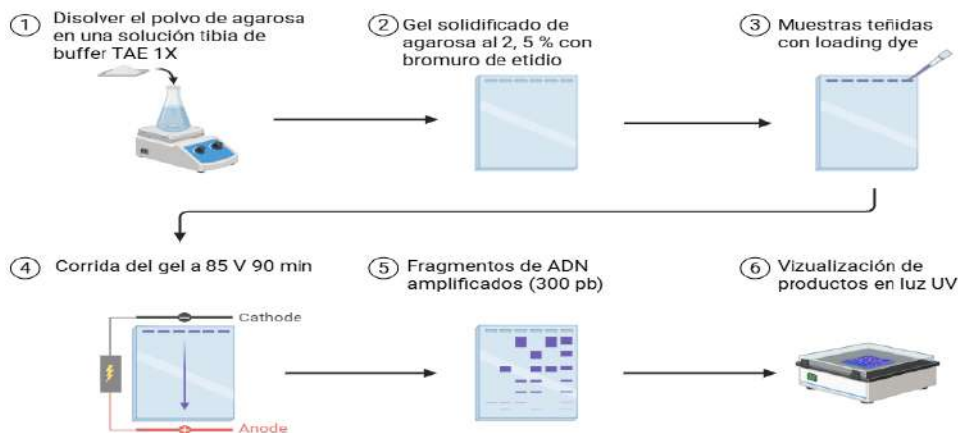
Electroforesis

La metodología empleada en esta fase se detalla claramente en la figura 2

Figura 2

Preparación y corrido del gel de agarosa.

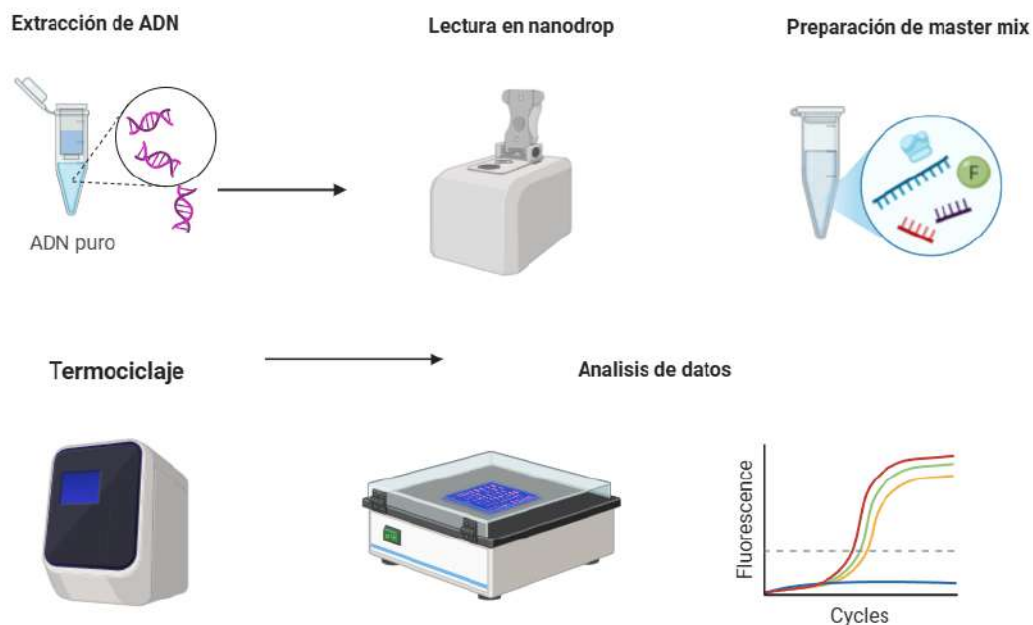
Electroforesis del gel agarosa al 2, 5 %



- El primer paso por realizar en esta fase fue la elaboración del gel de agarosa al 2, 5 % disolviendo 2, 5 g de agarosa en 100 mL de buffer TAE el cual es teñido con bromuro de etidio una vez disuelta la agarosa.
- Una vez realizado el gel teñimos nuestras muestras termocicladas con 4 μ L de loading dye. para obtener un volumen final de 10 μ L.
- El corrido del gel de agarosa se realizó a 85 V durante 90 min.
- Posterior al corrido de gel se visualizan los productos en un transiluminador.

Figura 3

Protocolo simplificado de PCR



Resultados

Los datos crudos obtenidos arrojan una gran diversidad de formas parasitarias las cuales se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 4

Datos crudos

Formas parasitarias	Puntos de muestreo				
	P1	P2	P3	P4	P5
<i>Schistosoma Hamaetobium</i>	27	14	18	12	8
<i>Chilomastix Mesnili</i>	19	7	9	8	6
<i>Sarcoptes Scabei</i>	6	12	7	17	13
<i>Ripicephalus</i>	7	3	5	11	12
<i>Diatomeas</i>	32	28	33	23	17
<i>Enterobius</i>	21	13	11	17	19
<i>Cryptosporidium spp.</i>	7	3	9	12	8

A estos datos crudos se les la prueba Shapiro-Wilk para verificar el valor p y la normalidad de los datos teniendo como resultado lo siguiente:

Tabla 5

Resultados de la prueba Shapiro-Wilk

Parásito	W	p-value
<i>Schistosoma Hamaetobium</i>	0,949	0,7297
<i>Chilomastix Mesnili</i>	0,751	0,0305
<i>Sarcoptes Scabei</i>	0,936	0,6354
<i>Ripicephalus</i>	0,932	0,6135
<i>Diatomeas</i>	0,926	0,5663
<i>Enterobius</i>	0,952	0,7540
<i>Cryptosporidium spp.</i>	0,976	0,9144

Los resultados de esta prueba indican que los datos de por lo menos seis de los puntos de muestreos presentan datos normales dentro del rango aceptado del valor ($p > 0.05$) siendo el caso de *C. Menslini* el único que presenta un valor fuera del rango aceptado para considerarse normal; debido a esto, se recomienda aplicar la prueba Kruskal-Wallis como alternativa no paramétrica del ANOVA con la finalidad de mostrar la homogeneidad de los datos. Los resultados arrojaron que estos datos rechazan la hipótesis nula de igualdad entre los grupos indicando una dispersión amplia entre *C. Menslini* y los demás parásitos estudiados.

ANOVA One-Way

Los resultados obtenidos con esta prueba nos indican que el valor de p es mucho menor que 0.05, por lo tanto, muestran diferencias significativas entre los grupos analizados, lo que indica que las medias no son iguales y que el factor estudiado influye de manera importante en la variable dependiente. Además, las pruebas complementarias, como Levene y Welch, respaldan la validez del análisis al mostrar que las conclusiones se mantienen, aún bajo diferentes supuestos. En conjunto, estos resultados permiten afirmar que el factor evaluado produce un impacto real, consistente y estadísticamente significativo.

El ANOVA mostró diferencias altamente significativas entre los grupos ($F = 9.583$, $p < 0.001$). La homogeneidad de varianzas se cumple ($p > 0.05$), por lo que el modelo es válido. El tamaño del efecto fue grande ($\omega^2 = 0.59$), indicando que el 59 % de la variación total se debe a diferencias reales entre los grupos. El Bayes factor ($BF = 772.1$) proporciona evidencia decisiva a favor de diferencias entre grupos. En conjunto, los resultados indican que al menos un grupo difiere significativamente de los demás. Se recomienda aplicar la prueba post-hoc de Tukey para identificar cuáles grupos son significativamente diferentes entre sí.

- Rechaza la hipótesis nula (H_0):

Las medias de los grupos NO son iguales.

- Acepta la hipótesis alternativa (H_1)

Al menos un grupo difiere significativamente en su valor medio.

Análisis de Tukey

El análisis post-hoc Tukey confirmó específicamente entre qué grupos ocurrieron las diferencias detectadas por el ANOVA. Las comparaciones por pares mostraron que algunos grupos presentan medias significativamente distintas entre sí, lo que indica que el efecto del factor no es uniforme y varía dependiendo del nivel evaluado. Estas diferencias permiten identificar con precisión qué grupos contribuyen al efecto global significativo del ANOVA y ofrecen una visión más detallada de cómo se comporta la variable analizada entre los distintos tratamientos.

A. **Grupos con diferencias SIGNIFICATIVAS ($p < 0.05$):** indica que el grupo de las diatomeas es el que marca la diferencia. Es significativamente más alto que todos los demás grupos, excepto *Enterobius*.

B. **Grupo “intermedio”:** *Enterobius* no significativamente menor que Diatomeas, aunque Diatomeas tiene media mucho mayor. Esto significa que *Enterobius* está en el nivel medio, sin diferencias extremas.

C. **Comparaciones NO significativas ($p > 0.05$):** no muestran diferencias estadísticas, es decir, sus medias son parecidas ninguno de estos pares mostró diferencia estadística.

Discusión

Como control negativo para esta investigación se realizó la misma metodología con agua proveniente de la red de distribución de La Villa de Los Santos en la cual se encontraron organismos de vida libre como diatomeas,

levaduras y parásitos ciertamente en menor concentración, pero al igual sigue siendo una problemática según lo establecido en la regla de DGNTI-COPANIT 23-395-99 la cual dice que la presencia incluso en pequeñas concentraciones indican contaminación perjudicial para la salud del ser humano, lo cual la hace no apta para consumo. Resaltado esto, la comparación de los datos obtenidos en esta investigación con la literatura consultada con investigaciones realizadas en Panamá específicamente el río Chagres nos muestra que, aunque el 100 % de las muestras colectadas muestren resultados positivos en cuanto formas parasitarias el río La Villa cuenta con menor concentración y distintas especies a las investigaciones realizadas por Juárez y Sandoval 2021 quienes además compararon investigaciones previas en dicha cuenca hidrográfica a través del tiempo.

Si bien no hay investigaciones previas de enteroparásitos en la región de Azuero, es importante realizar estudios de monitoreo estacional ya que se observó un incremento significativo en los porcentajes de formas parasitarias en las aguas estudiadas, lo que nos indica un mal manejo de recursos del área agroganadera de la zona, como también el uso de letrinas cercanas a las afluentes estudiadas.

Además de los análisis parasitológicos se documentaron parámetros fisicoquímicos que fueron comparados con los rangos aceptados dentro del decreto No 75 de 4 de junio de 2008 norma primaria de calidad ambiental y niveles de calidad para las aguas continentales de uso recreativo con y sin contacto directo la cual arrojó resultados dentro de lo establecido.

Los resultados obtenidos muestran una mayor diversidad parasitaria en protozoarios de carácter entérico en comparación con la diversidad de helmintos en las fuentes hídricas estudiadas. Este hallazgo concuerda con la literatura consultada, como la investigación de Arosemena et al. (2018), quien reportó una mayor diversidad de protozoarios entéricos en los afluentes del río Chagres, registrando una abundancia del 74,2 %. En dicho estudio se destacaron formas

quísticas de amebas como *Blastocystis hominis* y *Giardia intestinalis*.

Sin embargo, los resultados de esta investigación difieren, ya que el parásito más reportado fue *Schistosoma haematobium*. En cuanto a helmintos, las investigaciones previas en la zona señalan a *Ascaris lumbricoides* como el más frecuente, mientras que en este estudio los más observados fueron *Enterobius vermicularis*. Estos helmintos presentan una morfología similar en el estadio larvario, pero difieren en su estado inmaduro, lo que permitió confirmar que en realidad se trataba de huevos de *Enterobius*.

En la fase molecular de detección del género *Cryptosporidium spp.* se esperaba alcanzar la identificación de la especie *C. parvum* mediante una PCR anidada. El protocolo planteado por Rochelle et al. (1997), modificado por Osorio (2019), presentó varias dificultades, por lo que se optó por utilizar una PCR convencional. Con este método se logró la detección a nivel de género, obteniéndose resultados satisfactorios, ya que las muestras resultaron positivas al amplificar el gen 18S rRNA y HSP70 del parásito *Cryptosporidium spp.* Estos hallazgos difieren de los reportados por Carrasco y Rojas (2024), quienes no obtuvieron resultados positivos en muestras recolectadas durante la temporada lluviosa y seca en la bahía de Panamá. Esta discrepancia podría deberse a variaciones en las matrices de agua estudiadas, al método de extracción empleado o a la cantidad de ooquistes por mililitro requerida en las muestras.

Durante la fase molecular se lograron resultados preliminares en términos de confirmación de muestras positivas para *Cryptosporidium spp.* mediante la reacción en cadena de la polimerasa (PCR).

Se utilizó la muestra del sitio 4, la cual durante la examinación microscópica mostró una mayor cantidad de quistes. Los resultados preliminares de la técnica de PCR fueron satisfactorios en cuanto a la extracción y calidad del ADN, con un valor de 13,2 ng/μL y una pureza A260/A230 de 1.82, dentro de los límites aceptables

para considerar el ADN lo suficientemente puro para utilizar con esta técnica.

Los cebadores empleados derivaron del protocolo descrito por Rochelle et al. (1997), modificado por Osorio (2019), quienes utilizaron distintos pares de cebadores: así, uno que amplifica el gen **HSP70** presente en el género *Cryptosporidium spp.* y otro que amplifica tanto el género como la especie *C. parvum*.

En las pruebas realizadas se probaron distintas temperaturas de annealing haciendo un gradiente para estandarizar la PCR con su mejor temperatura. En el carril 1 podemos ver el control negativo donde no amplificó nada, del carril 2 al 5 vemos la muestra de agua del sitio 4 y en el carril 6, la escalera de peso molecular.

Tabla 6

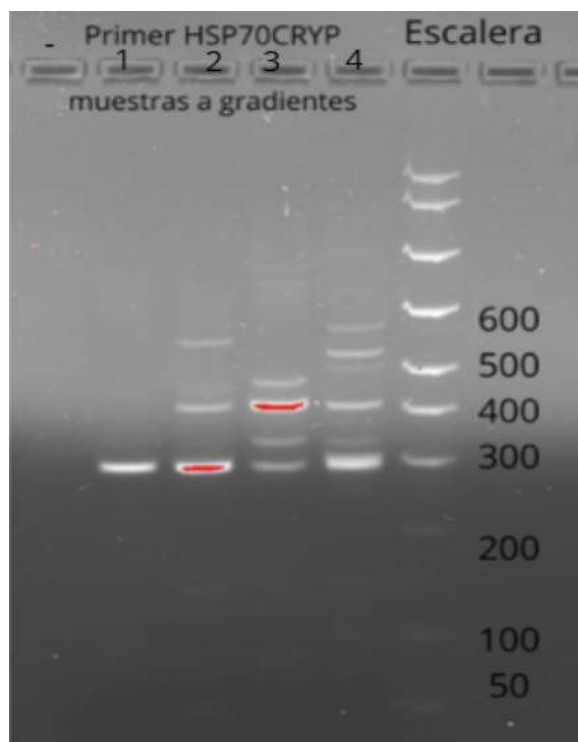
Deposición de muestras en el gel de agarosa

CARRIL	TEMPERATURA
-	Control negativo
#1	59° C
#2	58.1° C
#3	56.9° C
#4	56 ° C
#5	Escalera de peso molecular

El tamaño del amplicón esperado para una muestra positiva es de 307 a 311 pares de bases según la literatura citada. Por lo que se puede concluir que la mejor temperatura es de 59 y que la muestra probada es, en efecto, positiva para *Cryptosporidium spp.*

Figura 4

Resultados de pruebas PCR



Conclusión

Se confirmó la presencia de una alta diversidad de protozoarios entéricos en comparación con los helmintos en los distintos puntos de muestreo de la zona baja del río La Villa. Esta tendencia coincide parcialmente con estudios previos realizados en otras regiones del país, aunque en este caso es con *Schistosoma haematobium* y *Enterobius vermicularis*.

El análisis microscópico permitió identificar diferencias en la frecuencia de parásitos entre los puntos evaluados, indicando que algunos sitios presentan mayor carga parasitaria que otros. El análisis estadístico (One-Way ANOVA y Tukey) demostró diferencias significativas entre los grupos, verificando que la presencia de enteroparásitos varía según el sitio muestreado.

La fase molecular permitió confirmar la presencia del género *Cryptosporidium* spp., en al menos una de las muestras procesadas. A pesar de las dificultades encontradas con el protocolo de PCR anidada, el uso de PCR convencional permitió obtener un amplicón en el rango esperado (307–311 pb), validando así una muestra positiva.

Los resultados evidencian que los afluentes estudiados presentan riesgo potencial para la salud pública, especialmente al ser utilizados para actividades recreativas. La presencia confirmada de *Cryptosporidium* spp., organismo altamente resistente y con elevada carga infecciosa, refuerza la necesidad de monitoreo constante, tratamiento adecuado del agua y educación en higiene para reducir la transmisión de enfermedades entéricas.

En esta investigación se demostró que la mayor incidencia de parásitos en afluentes del río La Villa son microorganismos de naturaleza patógena de contaminantes fecales como lo son el género *Enterobius* spp. y las larvas de tipo *Strongyloides*, esto debido a la mala utilización o manejo de recursos de la población que utilizan estas aguas para recreación sin medidas básicas de higiene como también la alta tasa de actividades agropecuarias muy cercanas a los caudales de las aguas de la vertiente del río La Villa.

La taxonomía parasitaria de esta zona es bastante amplia teniendo diversos grupos de géneros y especies de protozoarios, helmintos, ácaros y organismos de vida libre como algas y diátomeas, demostrando que los parásitos más habituales en las zonas altas son enteroparásitos del género de los *Enterobius spp* los cuales son patógenos; pero tienen una baja resistencia a métodos desinfección básicos. En cuanto a la comparación con el último punto de muestreo en la zona baja los parásitos patógenos más habituales en este punto de muestreo son protozoarios, los cuales sí son más resistentes a métodos de desinfección básicos debido a que

cerca a estos puntos de muestreo se encontraron tuberías de desinfección con vaciado a los afluentes y aun así se encontraron estas formas parasitarias.

La correlación que poseen estas formas parasitarias con el sitio de muestreo se basa en las distintas actividades que se pudieran observar a lo largo del cauce utilizado para los muestreos de esta investigación los cuales van desde agricultura y sembrado de cultivos a la actividad agropecuaria como cría de ganado vacuno y porcino además de recreación.

Agradecimiento

A las doctoras Carmenza Spadafora, a la Licenciada Laura Pineda y a todo el centro de biología celular y molecular de enfermedades CBCMe de INDICASAT-AIP por toda la ayuda brindada en la fase experimental de esta investigación y en mi estancia por sus laboratorios de alta tecnología, a la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación SENACYT por su ayuda como financiador de esta investigación en los laboratorios de INDICASAT-AIP en Ciudad del Saber.

Referencia bibliográfica

- Aladro-Lubel, M. A., & Olvera-Bautista, F. (2016). Los protozoarios ciliados como bioindicadores de la calidad del agua en sistemas acuáticos. *Revista Latinoamericana de Microbiología*, 58(2), 74-83.
<https://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumen.cgi?IDARTICULO=67290>
- Arosemena, V., Castillo, C., & Guerra, G. (2018). Detección de enteroparásitosis humana y fuentes de contaminación ambiental en el río Chagres, Panamá. *Revista Venezolana De Salud Pública*, 2(2), 35-44. Recuperado a partir de <https://revistas.uclave.org/index.php/rvsp/article/view/1470>
- Borchardt MA, Bradbury KR, Alexander EC Jr, Kolberg RJ, Alexander SC, Archer JR, Braatz LA, Forest BM, Green JA, Spencer SK. Norovirus outbreak caused by a new septic system in a dolomite aquifer. *Ground Water*. 2011 Jan-Feb;49(1):85-97. doi: 10.1111/j.1745-6584.2010.00686.x

- Carrasco, Jacob y Rojas, Nelson (2024) Detección molecular de protozoos parásitos (*Cryptosporidium parvum*, *Cyclospora cayetanensis*, *Giardia intestinalis*) en muestras de agua y aire, provenientes de la bahía de Panamá durante la estación seca y lluviosa. Otra thesis, Universidad de Panamá. <http://up-rid.up.ac.pa/id/eprint/9370>
- Espinosa Morales, Madeline, Alazales Javiqué, Mercedes, & García Socarrás, Ada Margarita. (2011). Parasitosis intestinal, su relación con factores ambientales en niños del sector "Altos de Milagro", Maracaibo. *Revista Cubana de Medicina General Integral*, 27(3), 396-405. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-21252011000300010&lng=es&tlng=es
- Gallego, S., Santín, M., Y Caccio, S. M. (2012). Molecular characterization of *Cryptosporidium* spp. *Parasitology Research*, 111(2), 635–645. <https://doi.org/10.1007/s00436-012-2882-3>
- González, K. L., Rivas, R. E. y Sandoval, N. (2018). Aguas, suelos y hortalizas como fuente potencial de enteroparásitos en niños de la escuela Majara, Capira, Tecnociencia, 20(1), pp. 5–26. Disponible en: <https://revistas.up.ac.pa/index.php/tecnociencia/article/view/73>
- Guillén, N., Ramos, R., Y Olivo, C. (2013). Evaluación microbiológica de aguas destinadas al consumo humano. *Revista Cubana de Salud Pública*, 39(2), 256–267. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-34662013000200007
- Häder DP, Williamson CE, Wängberg SÅ, Rautio M, Rose KC, Gao K, Helbling EW, Sinha RP, Worrest R. Effects of UV radiation on aquatic ecosystems and interactions with other environmental factors. *Photochem Photobiol Sci*. 2015 Jan;14(1):108-26. doi: 10.1039/c4pp90035a. PMID: 25388554
- Juárez, R., Y Sandoval, N. (2021). Identificación de enteroparásitos en aguas residuales del río Chagres. *Revista Biológica de Panamá*, 10(1), 21–30. <https://revistas.up.ac.pa/index.php/biologica>
- Kumar, T. (2016). Waterborne parasitic diseases. *Journal of Parasitic Diseases*, 40(3), 667–678. DOI:10.1007/978-1-4419-0851-3_877
- Morales del Pino, J. R. (2016). Parasitosis intestinal en preescolares y escolares atendidos en el centro médico EsSalud de Celendín, Cajamarca. *Horizonte Médico (Lima)*, 16(3), 35–41. <https://doi.org/10.24265/horizmed.2016.v16n3.06>
- Murray, C. J., Ortblad, K. F., Guinovart, C., Lim, S. S., Wolock, T. M., Roberts, D. A., Dansereau, E. A., Graetz, N., Barber, R. M., Brown, J. C., Wang, H., Duber,



- H. C., Naghavi, M., Y Dicker, D. (2014). Global, regional, and national incidence and mortality for HIV, tuberculosis, and malaria during 1990–2013: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2013. *The Lancet*. 10.1016/S0140-6736(14)60844-8
- Organización Mundial de la Salud. (2006). *Guidelines for drinking-water quality* (3rd ed.). World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/43428>
- Osorio Delgado, L. (2019). *Detección molecular de Giardia, Blastocystis, Toxoplasma y Cryptosporidium* (Tesis de maestría). Universidad Nacional. <https://repositorio.una.ac.cr/>
- Rochelle, P. A., De Leon, R., Stewart, M. H., Wolfe, R. L., Y McLaughlin, J. B. (1997). Comparison of PCR, microscopy, and immunoassay. *Applied and Environmental Microbiology*, 63(5), 2029–2037. <https://doi.org/10.1128/aem.63.5.2029-2037.1997>
- Rodríguez, C. (2013). *Parásitos intestinales en poblaciones infantiles de Panamá* (Tesis de licenciatura). Universidad de Panamá. <http://up-rid.up.ac.pa/>
- Román, A. D., & Alfonso, J. (2021). Calidad microbiológica del agua de consumo humano y su impacto en la salud pública. *Revista Científica en Ciencias de la Salud*, 3(1), 45-54. <https://doi.org/10.53732/rccsalud/03.01.2021.45>
- Solano, L., Acuña, D., & Rivero-Rodríguez, Z. (2018). Calidad parasitológica del agua y prevalencia de enteroparasitosis en una comunidad indígena venezolana. *Revista Panamericana de Salud Pública*, 42, e129. <https://doi.org/10.26633/RPSP.2018.129>
- Winiecka-Krusnel, J., Linder, E., Y Pehrson, P. O. (2009). Free-living amoebae as vectors. *Parasitology Research*, 104(3), 697–705. <https://doi.org/10.1007/s00436-008-1247-4>
- Zonta, M. L., Navone, G. T., Y Oyhenart, E. E. (2007). Parasitosis intestinales en niños argentinos. *Parasitología Latinoamericana*, 62(1), 54–60. 10.4067/S0717-77122007000100009

Exploración preliminar de polillas Sphingidae y Saturniidae en dos áreas de Nicaragua con distintas configuraciones vegetales

A preliminary survey of Sphingidae and Saturniidae in two Nicaraguan regions with contrasting vegetation structures

Jaime Navarrete-Rivas

Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua. Colectivo de investigación Bio-Nica
<https://orcid.org/0000-0003-3848-7056>
jjnavarrete-rivas@gmail.com

Joxual J. Araque Pérez

Universidad de San Carlos de Guatemala, Colectivo de investigación Bio-Nica
<https://orcid.org/0000-0001-6703-2988>
Autor de correspondencia: bio.araque@gmail.com

Wener Armando Ochoa Orozco

Universidad de San Carlos, Guatemala, Facultad de Agronomía
<https://orcid.org/0000-0003-4984-2877>
wenerochoa@gmail.com

Recibido: 27/12 /25

Aceptado: 11/03/26

DOI <https://doi.org/10.48204/j.scientia.v36n2.a9100>

Resumen

Las familias Sphingidae y Saturniidae participan en polinización nocturna y transferencia trófica en ecosistemas tropicales, pero en Nicaragua persisten vacíos sobre su respuesta a la fragmentación del hábitat. Se evaluaron comunidades de ambas familias en dos paisajes del norte de Nicaragua: Finca Cerro Jesús (Jalapa, Nueva Segovia), con mayor continuidad forestal, y Finca Rosita (El Zacatón, Estelí), inserta en una matriz agroproductiva fragmentada. Se utilizó trampas de luz durante cuatro noches (23–26 de mayo de 2025). La cobertura vegetal se caracterizó mediante clasificación Random Forest de imágenes Sentinel-2 L2A (Kappa global = 0,91). Se registraron 228 individuos pertenecientes a 71 especies: 156 individuos y 54 especies en Nueva Segovia versus 72 y 50 en Estelí. La rarefacción estandarizada a N = 72 reveló mayor riqueza en Estelí (50 especies) que en Nueva Segovia (39). El índice de similitud de Sørensen fue 0,60, con 33 especies compartidas, 21 exclusivas de Nueva Segovia y 17 de Estelí. Las curvas rango-abundancia muestran mayor dominancia de pocas especies en el paisaje fragmentado, mientras que el sitio con mayor cobertura arbórea mostró abundancias más equilibradas. Los ensamblajes fragmentados estuvieron dominados por especies generalistas tolerantes a perturbación, mientras que los de mayor continuidad forestal albergaron especialistas de bosque. Estos resultados respaldan el uso de ambas



familias como bioindicadores a nivel de paisaje subrayando la necesidad de conservar parches boscosos en contextos de expansión agrícola y pérdida de cobertura forestal.

Palabras claves: Sphingidae; Saturniidae; Polillas; estructura del paisaje; bosques montanos; fragmentación.

Abstract

The families Sphingidae and Saturniidae participate in nocturnal pollination and trophic energy transfer in tropical ecosystems, yet knowledge gaps persist in Nicaragua regarding their response to habitat fragmentation. Communities of both families were evaluated in two landscapes of northern Nicaragua: Finca Cerro Jesús (Jalapa, Nueva Segovia), with greater forest continuity, and Finca Rosita (El Zacatón, Estelí), embedded in a fragmented agroproductive matrix. Light traps were used during four nights (23–26 May 2025). Land cover was characterized using Random Forest classification of Sentinel-2 L2A imagery (overall Kappa = 0.91). A total of 228 individuals belonging to 71 species were recorded: 156 individuals and 54 species in Nueva Segovia versus 72 and 50 in Estelí. Individual-based rarefaction standardized to $N = 72$ revealed higher richness in Estelí (50 species) than in Nueva Segovia (39). The Sørensen similarity index was 0.60, with 33 shared species, 21 exclusive to Nueva Segovia and 17 to Estelí. Rank–abundance curves showed greater dominance by few species in the fragmented landscape, whereas the site with greater tree cover displayed more balanced abundances. Assemblages in fragmented landscapes were dominated by disturbance-tolerant generalist species, whereas those in more continuous forest harbored forest specialists. These results support the use of both families as landscape-level bioindicators, underscoring the need to conserve forest patches in contexts of agricultural expansion and forest cover loss.

Keywords: Sphingidae; Saturniidae; moths; landscape structure; montane forests; fragmentation.

Introducción

La presente investigación se realizó en la parte norte montañosa de Nicaragua, los departamentos de Estelí como Nueva Segovia están determinados por serranías, laderas y mesetas que genera microclimas que son de suma importancia ecológicas para el país por sus remanentes de bosques: en Estelí, existen áreas que conservan formaciones de pino–encino/robleal cuyo manejo oficial prioriza su conservación (Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales [MARENA], 2022), la estructura y biomasa de estos bosques varían con el gradiente altitudinal, reflejado en un sistema forestal montano y heterogéneo; para Nueva Segovia la Serranía de Dipilto–Jalapa es un macizo montañoso donde la topografía controla el clima local (gradientes altitudinales y efectos de ladera), sustentando ambientes forestales para la biodiversidad, es reconocida oficialmente como área clave de conservación en el norte del país. (Siles et al., 2017).

Las polillas dentro de las familias Sphingidae y Saturniidae son uno de los

grupos más números en los ecosistemas tropicales, estas familias participan en procesos de polinización nocturna, la capacidad de especialización y la transferencia de energía en diferentes niveles tróficos, ambas familias son susceptibles a responder de manera sensible los cambios en las estructuras, redes, formas y configuración del paisaje. Por estas características diversos estudios han propuesto a Sphingidae y Saturniidae como grupos para evaluar la integridad ecológica, porque poseen muchas especies dentro de estas familias como bioindicadores, ante los efectos de fragmentación o perturbación de hábitat en paisajes tropicales (Rabl et al., 2020).

Además, en los últimos años en Mesoamérica, la transformación acelerada del paisaje está asociada a la expansión agrícola y a la ganadería fomentando mosaicos de bosques donde remanentes forestales coexisten con charrales, sistemas agroforestales y áreas de cultivo intensivo (Lara-Pérez et al., 2017). En este sentido la composición para Nicaragua es similar el caso donde las comunidades de polillas suelen estar dominada por especies generalistas y altamente móviles, capaces de utilizar una amplia gama de plantas hospederas y de persistir en ambientes perturbados, mientras que las especies denominadas como especialistas muestran una mayor dependencia de la continuidad del dosel y de condiciones micro climáticas estables (Lara-Pérez et al., 2017; Araque y Navarrete, 2025).

A pesar de la contribución ecológica de las polillas, el conocimiento sobre la distribución y estructura comunitaria de Sphingidae y Saturniidae en Nicaragua sigue siendo limitado. Los trabajos disponibles se han concentrado principalmente en inventarios taxonómicos o estudios realizados en áreas protegidas y bosques conservados, mientras que los paisajes productivos y las zonas de transición agroforestal permanecen subrepresentados (Maes et al., 2001; Maes, 2007; Araque y Navarrete, 2025). La carencia de información dificulta la comprensión de cómo las distintas configuraciones de cobertura vegetal influyen en la persistencia de

especies sensibles y en la dominancia de taxones tolerantes a la perturbación.

Para este tipo de escenario no es tan descabellado el uso de sensores remotos como una herramienta para caracterizar la estructura del paisaje y vincularla con patrones de biodiversidad. Particularmente imágenes de Sentinel-2 han demostrado una alta eficiencia para la discriminación de coberturas del suelo en regiones tropicales heterogéneas (Araque-Pérez, 2023). Esto debido a su resolución espacial (10 m por pixel), frecuencia temporal y acceso abierto, incluso bajo condiciones de alta nubosidad, muy características de Centroamérica (Venter et al., 2023; Gao et al., 2024). La integración de esta información espacial con datos de campo permite reducir los sesgos asociados a la interpretación ecológica de los ensamblajes observados.

Sobre este contexto, el presente estudio tiene como objetivo realizar una exploración preliminar de la composición, abundancia y similitud de las comunidades de polillas Sphingidae y Saturniidae en dos áreas del norte de Nicaragua con configuraciones vegetales contrastantes. Mediante muestreos estandarizados con trampas de luz, análisis de coberturas vegetales derivados de imágenes Sentinel-2 y la aplicación de métricas de diversidad y similitud, la intención es aportar información básica que contribuya a comprender la relación entre estructura del paisaje y ensamblajes de Lepidóptera en sistemas productivos y de transición, así como establecer un marco de referencia para futuros estudios de monitoreo y conservación usando imágenes satelitales.

Materiales y Métodos

Área de estudio:

La zona de estudio se localiza en la región Norcentral de Nicaragua, que abarca una extensión aproximada de 21,125 km² y comprende principalmente los departamentos de Estelí, Nueva Segovia y Madriz (Salas, 1993). Según el mismo autor, esta región se caracteriza por un clima templado, con una temperatura media



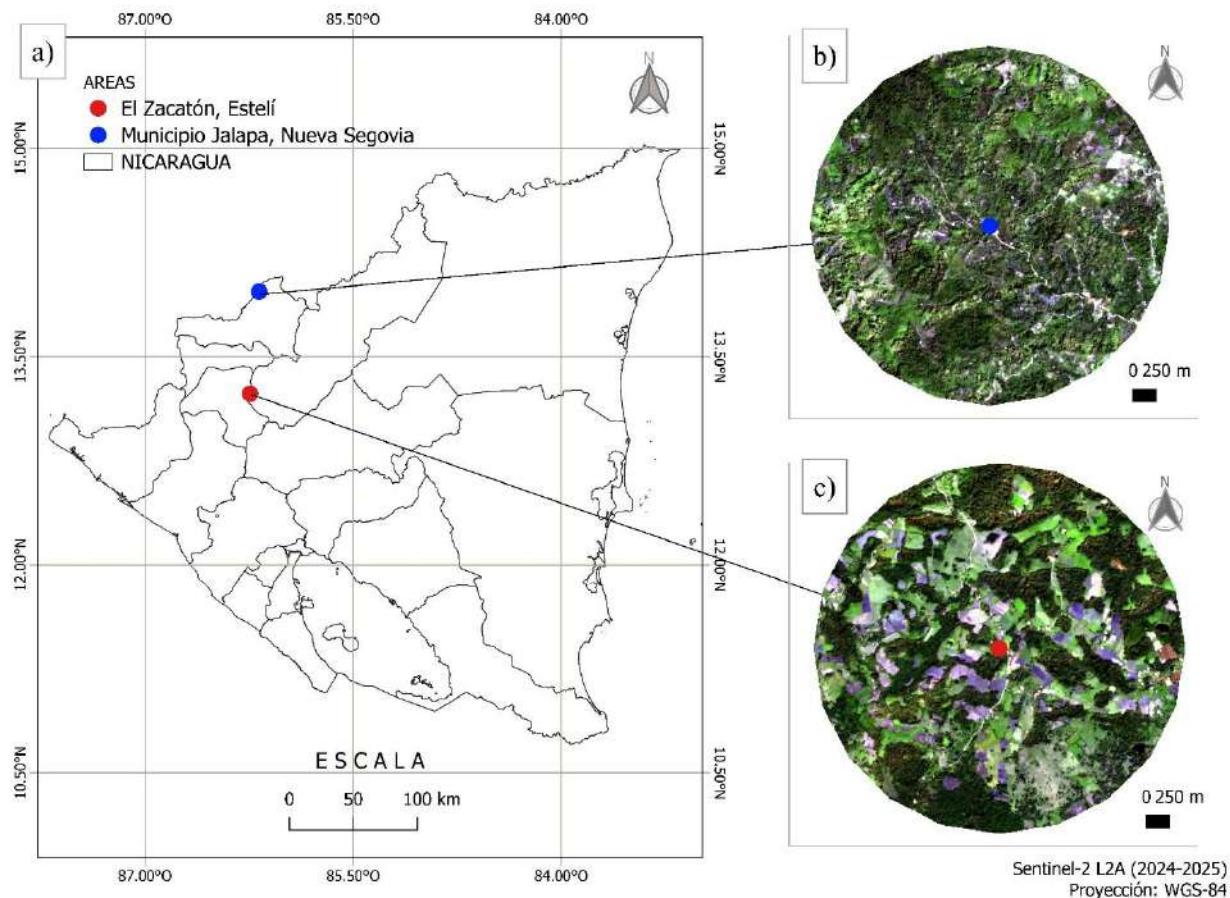
anual inferior a 24 °C y altitudes que oscilan entre los 1,000 y 2,107 m s.n.m., condiciones que favorecen la coexistencia de ecosistemas montanos y zonas agrícolas.

El departamento de Estelí se extiende entre los 12° 45' y 13° 25' de latitud norte, y los 86° 02' y 86° 45' de longitud oeste (Instituto Nacional de Estadísticas y Censo [INEC], 2001). Dentro de este territorio se encuentra la Finca Rosita, donde las actividades económicas predominantes corresponden a la ganadería y el cultivo de hortalizas. Esta finca representa una fracción significativa del 53 % de los pastizales y del 9 % de los cultivos temporales o perennes del municipio (INEC, 2001). La finca ha optado por conservar parches de bosques con el propósito de restaurar la biodiversidad y asegurar la estabilidad hídrica de los tributarios locales, integrando la producción agropecuaria con objetivos de conservación (Figura 1).

Por otro lado, Nueva Segovia se localiza en el extremo noroccidental del país, entre los 13° 10' N y 86° 03' O. En este territorio se encuentra la Finca Cerro Jesús (Figura 1), situada en la frontera con Honduras. Esta finca forma parte del 27 % de los cultivos anuales y perennes del municipio de Jalapa, dedicados principalmente al cultivo de café (INEC, 2001). Aunque gran parte de su superficie ha sido transformada por el monocultivo cafetalero, se mantiene un extenso parche de bosque nuboso que se extiende más allá de la frontera hondureña, conformando una porción relevante del 25 % de la cobertura forestal municipal.

Figura 1

Áreas de estudio y cobertura vegetal en las zonas de muestreo



Nota: a) Mapa de localización en Nicaragua que indica los sitios donde se recolectaron las especies de polillas: municipio de Jalapa, Nueva Segovia (punto azul – Finca Cerro Jesús) y comunidad El Zacatón, Estelí (punto rojo – Finca Rosita). Panel b y c) Cobertura vegetal Nueva Segovia y Estelí obtenida a partir de imágenes Sentinel-2 L2A (2024–2025). La cobertura vegetal corresponde a un acumulado anual.

Colecta de especímenes: Se siguieron las recomendaciones de Summerville et al. (2006), se trabajó durante dos noches en cada uno de los sitios (cuatro noches en total), procurando que la actividad coincidiera con la fase de luna nueva (23 al 26 de mayo del año 2025), se inició el muestreo a partir de las 8 p.m. y se culminó al amanecer (4 a.m.). Para la colecta de especímenes se utilizó una

trampa de luz, colocada de manera horizontal (McFarland, 1966), se dispuso de un generador de corriente para la alimentación de un bombillo de luz blanca de vapores de mercurio de 165 W (Figura 2), asimilándose al método empleado por Cruz-Flores (2015).

Figura 2.

Trampa de luz utilizada para la colecta de polillas (*Lepidoptera*) en los sitios de muestreo de Estelí y Nueva Segovia, Nicaragua.



Identificación de especies: La identificación de los individuos se realizó con base en los trabajos de Maes et al. (2001), Chacón y Montero (2007), Tórrez et al. (2007), Maes (2007) y el Catálogo en línea de lepidópteros (Bio-Nica, 2025). Las fotografías de los especímenes se subieron a la base de datos iNaturalist.org para su doble verificación, lo que permitió que miembros expertos de la comunidad revisaran y corrigieran los nombres científicos de algunas especies. Las fotografías se tomaron con una cámara Canon EOS Rebel T7, un objetivo Laowa de 100 mm.



Recopilación de imágenes para clasificación: para construir mosaicos óptimos con mínima interferencia de nubes, se identificó automáticamente el mes con menor cobertura nubosa mediante análisis de probabilidad de nubes para cada área de interés (AOI), utilizando la colección *Sentinel-2 Cloud Probability* (s2cloudless) en base a los trabajos de Gao et al., 2024. Este procedimiento permitió aplicar un enmascarado adaptativo por probabilidad de nube, conservando únicamente píxeles con baja probabilidad ($\leq 40\%$), y generar un “compositing” por mediana mensual, libre de nubes las bandas claves (B2, B3, B4, B8, B11, B12), (Rodríguez-Puerta et al., 2024). La estrategia se seleccionó debido a las altas frecuencias de nubosidad de Jalapa y Estelí, lo que la hace más adecuada para la clasificación supervisada. La ejecución del proceso de limpieza y descarga se efectuó mediante Google Earth Engine (GEE, <https://earthengine.google.com>), (Figura 1).

Procesado de datos para la clasificación: Se emplearon imágenes Sentinel-2 L2A corregidas atmosféricamente para generar una base de Regiones de Interés (ROI) que incluyó las clases Bosque, Charral, Suelo desnudo y *Cultivos* en las regiones de Jalapa y Estelí (Nicaragua) porque estas clases se encuentran en las áreas de estudio. Las ROI se organizaron en *Class* y *SubClass* para el entrenamiento y la obtención de los resultados del modelo. La clasificación supervisada se realizó mediante el algoritmo *Random Forest* implementado en el complemento *Dzetsaka* de QGIS (Karasiak, 2016; Peralta, 2025).

Posteriormente, se aplicó un filtrado del ráster clasificado para eliminar píxeles aislados o no corregidos, utilizando herramientas ráster y filtrado con la opción conectividad de 8 vecinos (Figura 3 y 4). La validación se efectuó mediante comparación (*cross-validation*) entre la imagen original sin clasificar y el ráster clasificado y depurado, empleando el módulo *r.kappa* de GRASS GIS (GRASS, 2024), para calcular el coeficiente Kappa y obtener las métricas de precisión del modelo. Los rangos de los mapas tienen un AOI de dos kilómetros de radio.

Procesado de datos para las especies: La similitud en la composición de especies entre los sitios de muestreo (β = Diversidad beta) fue evaluada mediante el índice de Sørensen (*Cs*), con base en la presencia o ausencia de especies (Koleff et al., 2003). El cálculo fue realizado utilizando una matriz de incidencia construida a partir de los registros



de Estelí y Nueva Segovia, considerando la presencia (1) o ausencia (0) de cada taxón. El valor del índice fue determinado mediante la ecuación $Cs=2a/(2a+b+c)$, donde a representa el número de especies compartidas y b y c las exclusivas de cada sitio (Koleff et al., 2003). Los valores obtenidos fueron interpretados, tomando como referencia que valores próximos a 1 reflejan una mayor similitud en la composición específica entre sitios, mientras que valores cercanos a 0 indican una menor coincidencia (Koleff et al., 2003).

La riqueza rarefaccionada se estimó mediante la función *rarefy* del paquete *vegan*, la incertidumbre se cuantificó mediante bootstrap no paramétrico. La estructura de la comunidad se evaluó mediante curvas rango–abundancia, ordenando las especies de cada localidad desde la más abundante hasta la más rara y expresando las abundancias relativas en escala logarítmica ($\log_{10}$). Todos los cálculos y gráficos fueron ejecutados en el lenguaje de Programación R (R-Core team, 2025) utilizando los paquetes *vegan*, *BiodiversityR* y *VennDiagram* (Chen y Boutros, 2011; Oksanen et al., 2025). El tipo de estudio es exploratorio, con la hipótesis, H1: Los sitios con mayor continuidad forestal presentan mayor abundancia de especialistas. H2: Las áreas fragmentadas presentan mayor proporción de especies generalistas.

Resultados

Configuraciones vegetales en las áreas de estudio

La evaluación de la clasificación para Jalapa-Nueva Segovia (Figura 3), mostro valores Kappa superiores a 0.86 en todas las categorías. La categoría 1 (Bosque) presentó la mayor concordancia (Kappa = 0.96) y los menores errores de comisión y omisión (2.58 % y 4.92 %, respectivamente), mientras que la categoría 2 (Suelo desnudo) tuvo el valor de Kappa más bajo (0.86), asociado a un mayor error de comisión (10.52 %).

Tabla 1.

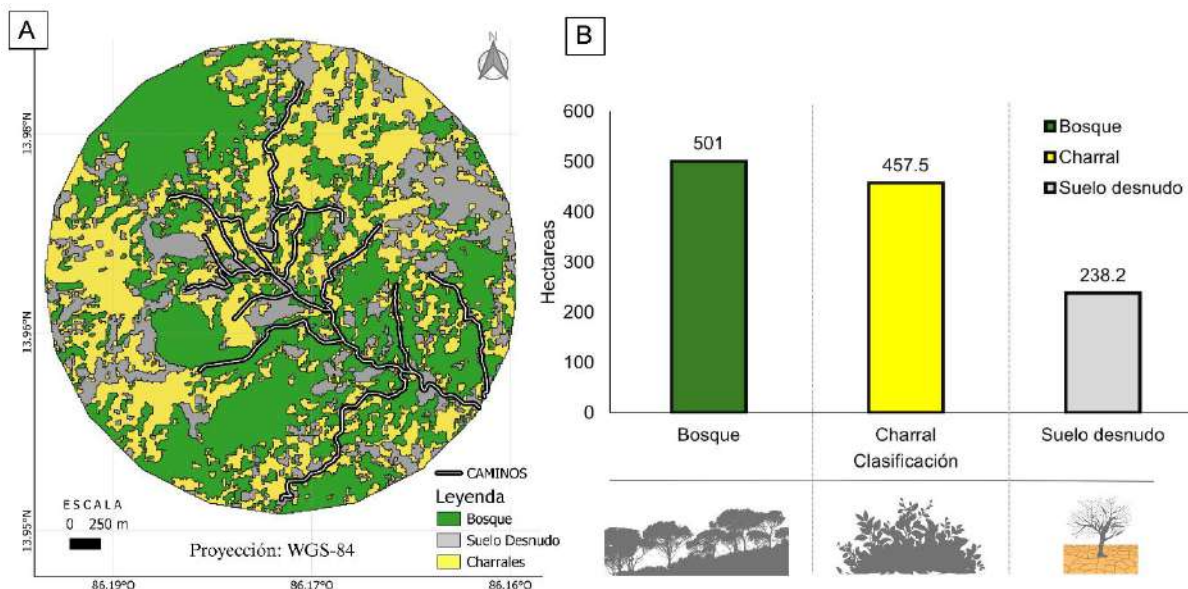
Resultados de la validación para Jalapa, utilizando el coeficiente Kappa.

Categoría	% Comisión	% Omisión	Kappa estimada
1-Bosque	2.59	4.92	0.96
2-Suelo desnudo	10.52	4.70	0.87
3- Charrales	5.91	6.63	0.90

Nota. La precisión total según el índice Kappa global es de: 0.91 entre el mapa de Sentinel 2 descargado y la clasificación por random forest

Figura 3

Clasificación supervisada de coberturas para Jalapa-Nueva Segovia (Nicaragua); a) Mapa de distribución espacial de bosque, charral y suelo desnudo. b) Superficie estimada de cada cobertura (hectáreas) derivada de la clasificación.



Fuente: obtenida mediante *Random Forest* a partir de imágenes Sentinel-2 L2A.

Los resultados de clasificación para Estelí (Figura 4), muestran valores de Kappa superiores a 0.87 en todas las categorías. La clase *Charrales* presentó la mayor concordancia (Kappa = 0.97). La clase 1: Cultivos obtuvo un Kappa de 0.94, con

bajos errores de comisión (3.81 %) y omisión (2.73 %), reflejando una adecuada diferenciación espectral. En contraste, la clase Bosque registró el menor valor (0.87), asociado a un error de comisión de 5.79 % y un error de omisión de 1.17 %. El coeficiente Kappa global fue de 0.91 alta concordancia entre la imagen Sentinel-2 y la clasificación generada mediante *Random Forest*.

Tabla 2.

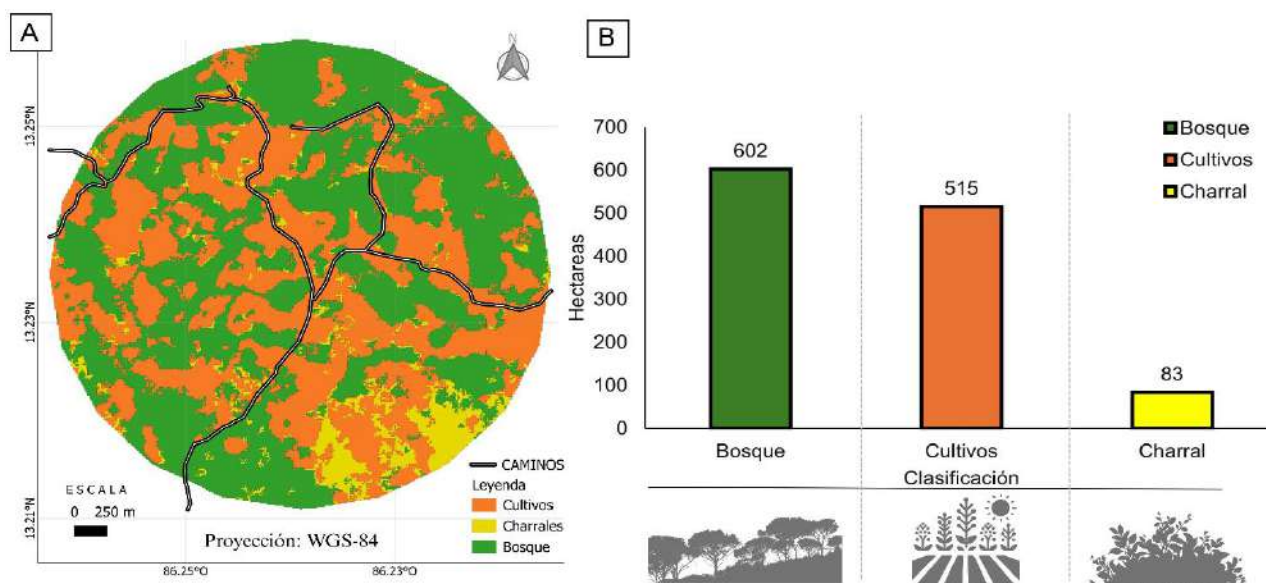
Resultados de la validación para Estelí, utilizando el coeficiente Kappa.

Categoría	% Comisión	% Omisión	Kappa estimada
1- Cultivos	3.81	2.73	0.94
2- Charral	2.63	30.54	0.97
3- Bosque	5.79	1.17	0.87

Nota. La precisión total según el índice Kappa global es de: 0.91 entre el mapa de Sentinel 2 descargado y la clasificación por random forest

Figura 4

Clasificación supervisada de coberturas para Estelí (Nicaragua) obtenida mediante *Random Forest* a partir de imágenes Sentinel-2 L2A.



Nota: a) Mapa de distribución espacial de bosque, cultivos y charral. b) Superficie

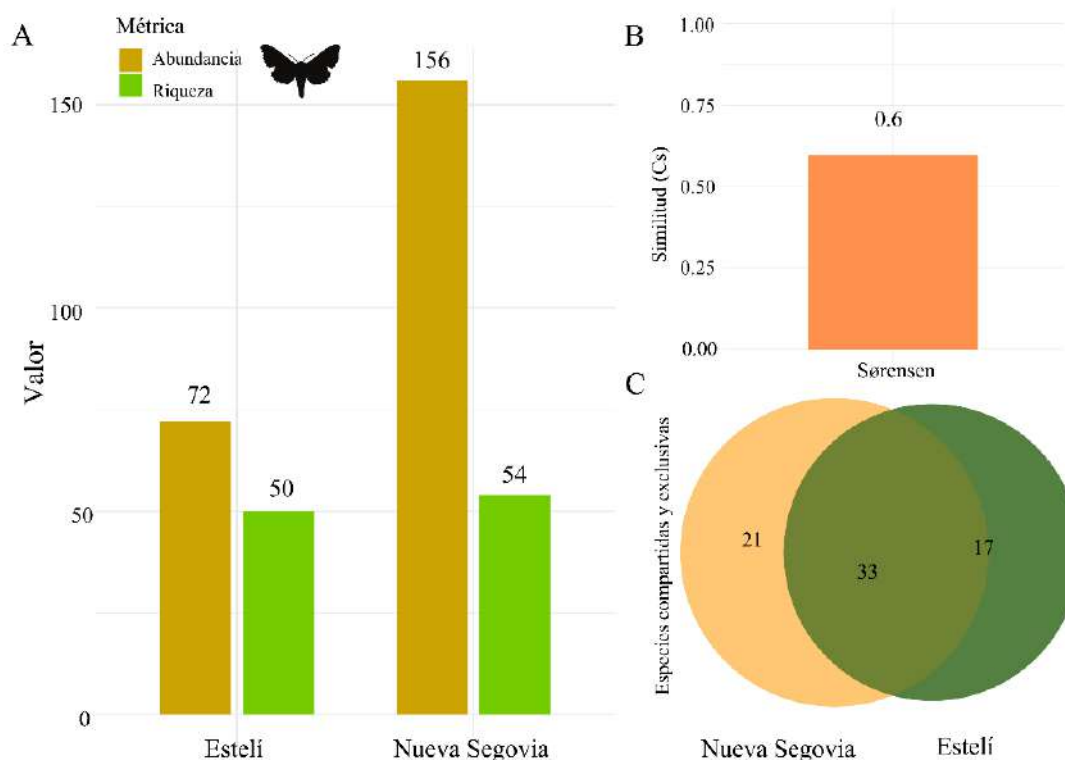
estimada de cada cobertura (hectáreas) derivada de la clasificación.

Especies y abundancia encontrada

En la Figura 5, se presentan los resultados de abundancia, riqueza y similitud de las comunidades de polillas registradas en Estelí y Nueva Segovia. Se registro mayor abundancia de individuos en Nueva Segovia ($n = 156$) en comparación con Estelí ($n = 72$). En contraste, la riqueza específica fue observada con valores similares entre localidades (50 especies en Estelí y 54 en Nueva Segovia). El índice de Sørensen ($C_s = 0.6$) fue interpretado como indicativo de una similitud intermedia en la composición faunística. En el diagrama de Venn se evidencia la existencia de 33 especies compartidas, 21 exclusivas de Nueva Segovia y 17 de Estelí.

Figura 5

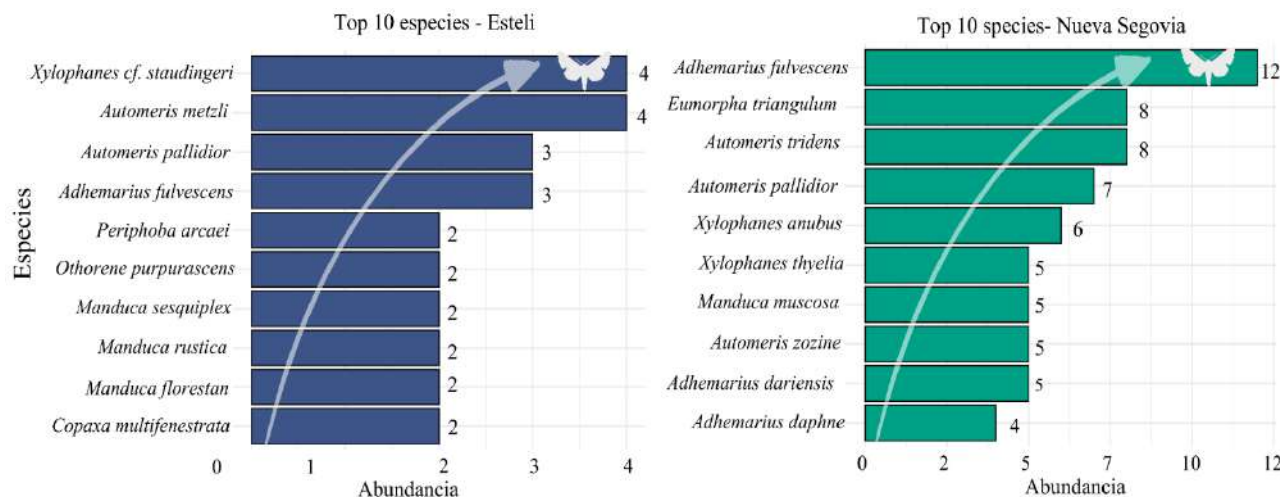
Comparación de la abundancia, riqueza y similitud de especies de polillas (Lepidoptera) registradas en los sitios de Estelí y Nueva Segovia.



Nota: (a) Abundancia y riqueza específica; (b) índice de similitud de Sørensen (C_s); (c) diagrama de Venn de especies compartidas y exclusivas entre localidades.

Figura 6

Comparación de la abundancia de las 10 especies más representativas de polillas registradas en Estelí y Nueva Segovia



En Nueva Segovia (Figura 6), el conjunto de especies sugiere una comunidad con especies núcleo bien establecidas. Se destaca *Adhemarius fulvescens* (Closs, 1911), siendo la fracción más alta de los registros y representa entre el 10-12 % del total de individuos colectados en esta zona. Le siguen *Automeris tridens* (Herrich-Schäffer, 1855) y *Eumorphia triangulum* (Rothschild & Jordan, 1903), cercanos al 6-8 %. Prosiguiendo con *Automeris pallidior* (Draudt, 1929), *Xylophanes thyelia* (Linnaeus, 1758) y *Xylophanes anubus* (Cramer, 1777) (alrededor del 4-6 %), mientras que el resto de especies se distribuye en abundancias bajas, generalmente inferiores al 3 % individualmente (Tabla 3).

En contraste en la Tabla 3, se encuentra que en Estelí presenta una estructura diferente, caracterizada por una menor abundancia total por especie siendo de las más representativa *Xylophanes cf. staudingeri*, que concentra aproximadamente el 10-12 % de los registros del área, seguida por *Automeris metzli* (Sallé, 1853), con una proporción cercana al 8-10 %. *Manduca florestan* (Stoll, 1782), *Manduca rustica* (Fabricius, 1775), *Othorene purpurascens* (Schaus, 1905) y *Periphoba arcae* (Druce, 1886), con valores aproximados del 4-6 %. Se observa una comunidad más equitativa, aunque con menor número total de individuos,

posiblemente asociada a zonas con una mayor influencia antrópica (Figura 6).

Tabla 3.

Identificación de especies colectadas en cada lugar del estudio.

Especies Colectadas	Lugar/ Zona	
	Nueva Segovia	Estelí
<i>Adeloneivaia bouisduvalii</i> (Doumet, 1859)	0	1
<i>Adhemarius daphne</i> (Boisduval, 1875)	4	0
<i>Adhemarius dariensis</i> (Rothschild & Jordan, 1916)	5	0
<i>Adhemarius fulvescens</i> (Closs, 1911)	12	3
<i>Adhemarius gannascus</i> (Stoll, 1790)	0	1
<i>Agrius cingulata</i> (Fabricius, 1775)	4	0
<i>Arsenura armida</i> (Cramer, 1780)	2	1
<i>Automeris metzli</i> (Sallé, 1853)	0	4
<i>Automeris hamata</i> (Schaus, 1906)	1	0
<i>Automeris pallidior</i> (Draudt, 1929)	7	3
<i>Automeris tridens</i> (Herrich-Schäffer, 1855)	8	1
<i>Automeris zozine</i> (Druce, 1886)	5	0
<i>Automeris zugana</i> (Druce, 1886)	4	1
<i>Caio championi</i> (Druce, 1886)	1	1
<i>Callionima falcifera</i> (Gehlen, 1943)	1	0
<i>Cautethia spuria</i> (Boisduval, 1875)	1	0
<i>Citheronia bellavista</i> (Draudt, 1930)	1	1
<i>Cocytius lucifer</i> (Rothschild & Jordan, 1903)	0	1
<i>Copaxa multifenestrata</i> (Herrich-Schäffer, 1858)	3	2
<i>Copaxa sp</i>	0	1
<i>Copaxa rufinans</i> (Schaus, 1906)	2	0
<i>Copaxa escalantei</i> (Lemaire, 1971)	1	0
<i>Dirphia avia</i> (Cramer, 1780)	1	0
<i>Dirphiopsis flora</i> (Schaus, 1911)	2	1
<i>Eacles imperialis</i> (Drury, 1773)	3	1

<i>Eacles ormondei</i> (Schaus, 1889)	0	1
<i>Erinnyis crameri</i> (Schaus, 1898)	2	0
<i>Eumorpha megaeacus</i> (Hübner, 1819)	0	1
<i>Eumorpha obliquus</i> (Rothschild & Jordan, 1903)	2	0
<i>Eumorpha satellitia</i> (Linnaeus, 1771)	3	2
<i>Eumorpha triangulum</i> (Rothschild & Jordan, 1903)	8	1
<i>Eumorpha vitis</i> (Linnaeus, 1758)	1	0
<i>Hylesia aeneides</i> (Druce, 1897)	0	1
<i>Hylesia</i> sp.	0	1
<i>Hyperchiria nausica</i> (Cramer, 1779)	2	0
<i>Lintneria merops</i> (Boisduval, 1870)	1	0
<i>Manduca dilucida</i> (Edwards, 1887)	0	1
<i>Manduca florestan</i> (Stoll, 1782)	1	2
<i>Manduca lefeburii</i> (Guérin-Ménéville, 1844)	0	1
<i>Manduca muscosa</i> (Rothschild & Jordan, 1903)	5	1
<i>Manduca occulta</i> (Rothschild & Jordan, 1903)	4	1
<i>Manduca ochus</i> (Klug, 1836)	0	1
<i>Manduca pellenia</i> (Herrich-Schäffer, 1854)	1	1
<i>Manduca rustica</i> (Fabricius, 1775)	3	2
<i>Manduca schausi</i> (Clark, 1919)	4	1
<i>Manduca sesquiple</i> (Boisduval, 1870)	2	2
<i>Molippa nibasa</i> (Maassen & Weyding, 1885)	1	0
<i>Othorene purpurascens</i> (Schaus, 1905)	1	2
<i>Pachylioides resumens</i> (Walker, 1856)	1	0
<i>Paradirphia semirosea</i> (Walker, 1855)	0	2
<i>Periphoba arcae</i> (Druce, 1886)	1	2
<i>Protambulyx strigilis</i> (Linnaeus, 1771)	2	1
<i>Pseudodirphia menander</i> (Druce, 1886)	0	2
<i>Pseudodirphia regia</i> (Draudt, 1930)	0	1
<i>Pseudosphinx tetrio</i> (Linnaeus, 1771)	1	0
<i>Ptiloscola dargei</i> (Lemaire, 1971)	1	0

<i>Rothschildia lebeau</i> (Guérin-Méneville, 1868)	3	1
<i>Rothschildia orizaba</i> (Westwood, 1853)	1	1
<i>Syssphinx molina</i> (Cramer, 1781)	4	1
<i>Syssphinx quadrilineata</i> (Grote & Robinson, 1867)	3	1
<i>Xylophaens cf. loelia</i> (Druce, 1878)	4	1
<i>Xylophanes anubus</i> (Cramer, 1777)	6	2
<i>Xylophanes ceratomioides</i> (Grote & Robinson, 1866)	2	2
<i>Xylophanes cf. staudingeri</i> (Rotschild, 1894)	3	4
<i>Xylophanes crotonis</i> (Walker, 1856)	0	2
<i>Xylophanes cthulhu</i> (Haxaire & Vaglia, 2008)	3	0
<i>Xylophanes neoptolemus</i> (Cramer 1780)	3	0
<i>Xylophanes pluto</i> (Fabricius, 1777)	2	1
<i>Xylophanes porcus</i> (Hübner, 1823)	2	1
<i>Xylophanes tersa</i> (Linnaeus, 1771)	0	1
<i>Xylophanes thyelia</i> (Linnaeus, 1758)	5	1

Nota. Especímenes colectados en ambas zonas de estudio, se identifica por nombre científico y número de individuos colectados.

La diversidad difirió entre localidades al considerar simultáneamente riqueza, estructura de dominancia y recambio taxonómico. Tras estandarizar el esfuerzo de muestreo mediante rarefacción por individuos ($q = 0$) a un tamaño común ($N = 72$). Estelí presentó una mayor riqueza de especies que Nueva Segovia (Figura 7), lo que indica que la diferencia observada se debe a variación real en la composición taxonómica por paisaje.

Por esa razón se observa que las curvas rango/abundancia las estructuras de dominancia contrastantes entre localidades (Figura 7). En Estelí, se observó una pendiente más pronunciada, con pocas especies dominantes y un alto número de

especies raras, mientras que en Nueva Segovia la distribución fue más extendida, muestra una comunidad menos rica, pero con una asignación de abundancias más homogénea. Estas diferencias sugieren procesos de ensamblaje distintos entre sitios, potencialmente asociados a el grado de perturbación de hábitat.

Figura 7

Comparativa de diversidad entre localidades, (A) Riqueza de especies rarefaccionada por individuos ($q = 0$) obtenidos por bootstrap. (B) Curvas rango–abundancia expresando (C) Recambio de especies compartidas y exclusivas.

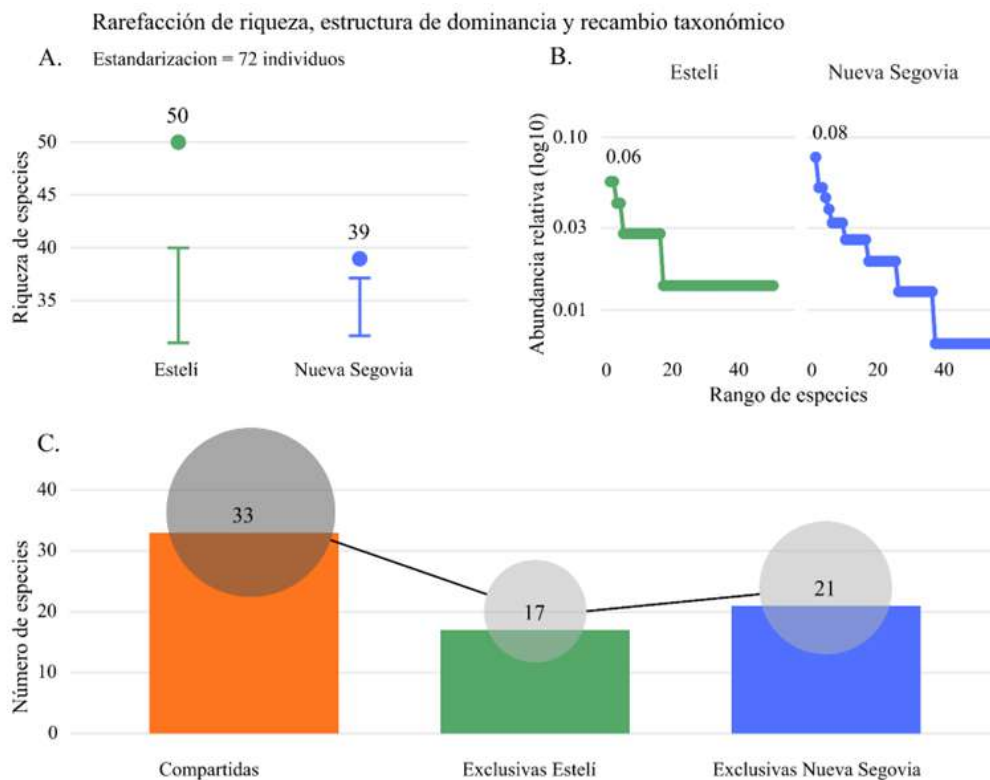
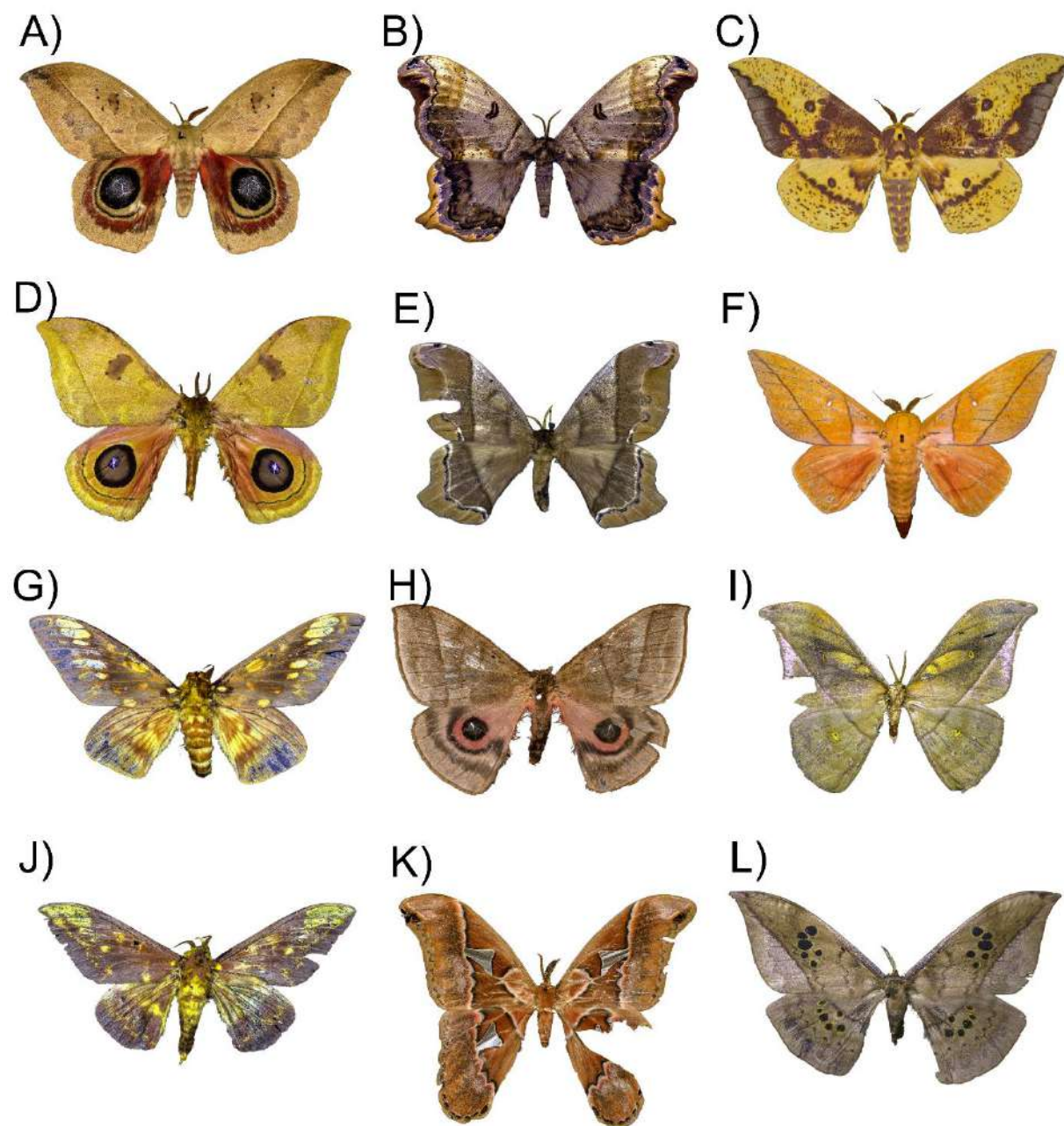


Figura 8

Fotografías de especies de la familia Saturniidae colectadas en el estudio.

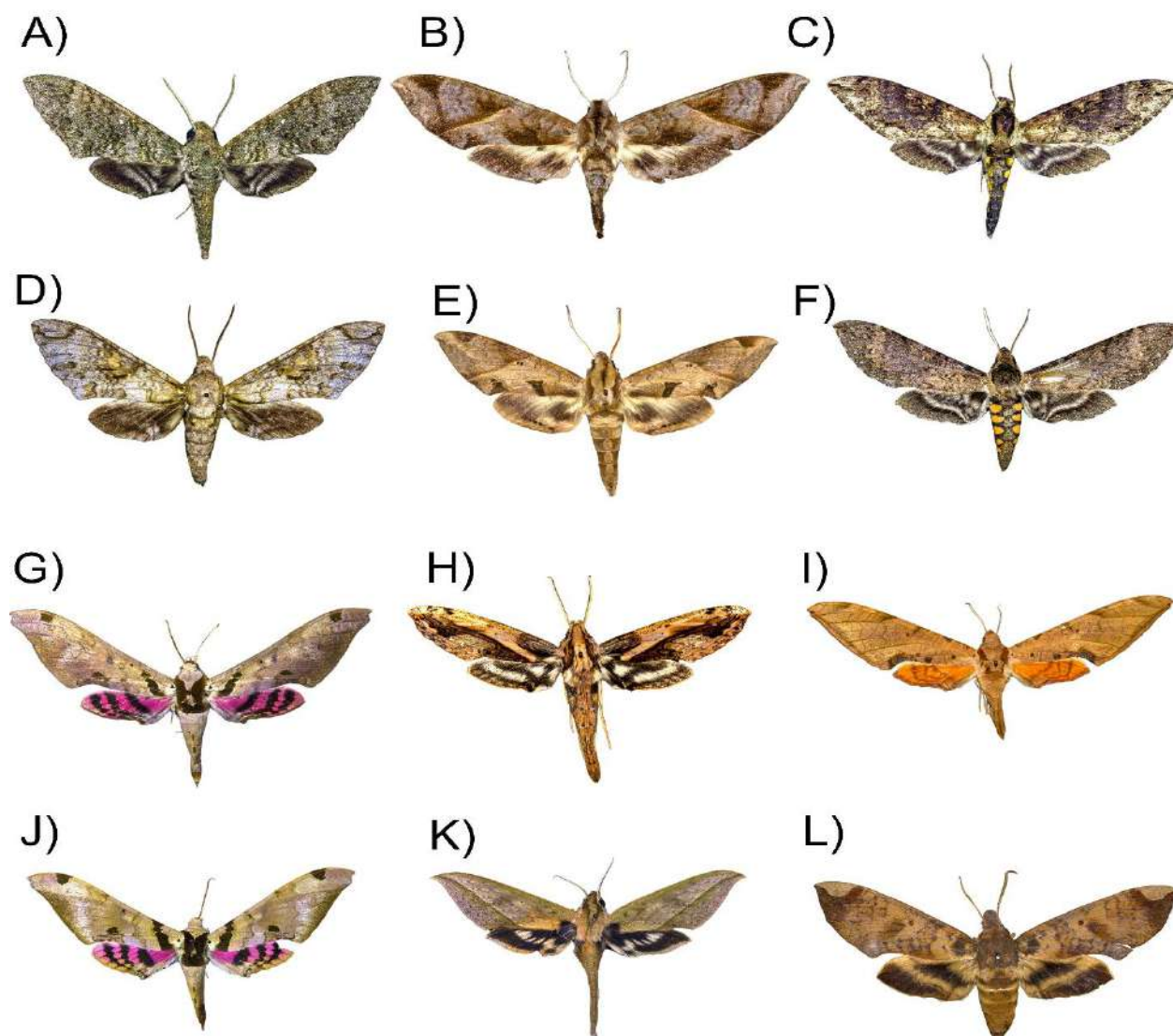


Nota: Especies descritas como **a)** *Automeris metzli* (Salle, 1853); **b)** *Caio championi* (Druce, 1886); **c)** *Eacles imperialis* (Rothschild, 1907); **d)** *Automeris tridens* (Herrich-Schaeffer, 1855); **e)** *Arsenura armida* (Cramer, 1779); **f)** *Othorene purpurascens* (Schaus, 1905); **g)** *Citheronia Bellavista* (Draudt, 1930); **h)** *Automeris palliodor*

(Draudt, 1929); **i)** *Copaxa rufinans* (Schaus, 1906); **j)** *Citheronioides colarris* (Rothschild, 1907); **k)** *Rothschildia Orizaba* (Westwood, 1853); **l)** *Copaxa multifenestrata* (Herrich-Schaeffer, 1858).

Figura 9

Fotografías de especies de la familia Sphingidae colectadas en el estudio.



Nota: Especies descritas como **a)** *Manduca muscosa* (Rothschild & Jordan, 1903); **b)** *Eumorpha triangulum* (Rothschild & Jordan, 1903); **c)** *Manduca pelenia*

(Herrich-Schaeffer, 1854); **d)** *Manduca florestan* (Stoll, 1782); **e)** *Eumorpha satellitia* (Cramer, 1775); **f)** *Manduca diffisa* (Butler, 1871); **g)** *Adehemarius fulvescens* (Clos, 1911); **h)** *Xylophanes ceratomioides* (Grote & Robinson, 1866); **i)** *Protambulyx strigilis* (Linnaeus, 1771); **j)** *Adhemarius gannascus* (Stoll, 1790); **k)** *Xylophanes anubus* (Cramer, 1777); **l)** *Pachylia ficus* (Linnaeus, 1758).

DISCUSIÓN

Este es el primer estudio para Nicaragua donde se aborda mapeo digital y asociada a cobertura vegetal. La clasificación realizada mediante Random Forest es útil al identificar coberturas dominantes hasta en un 90% (Bosque, Charral, Cultivos y Suelo desnudo) y relacionarlas con los patrones de composición de especies en Estelí y Nueva Segovia. La ventaja es que permitió verificar el hábitat de las polillas y no solo basarse en observaciones de campo, su precisión para cartografiar coberturas forestales y gradientes de perturbación en regiones tropicales puede alcanzar valores superiores al 85 % mediante algoritmos como *Random Forest* (Venter et al., 2023).

En su aplicación ha permitido evaluar la influencia de la fragmentación del paisaje sobre la riqueza de *Lepidoptera* (Araque y Navarrete, 2025). Aun así, debe reconocerse que la resolución media de Sentinel-2 limita la detección de parches muy pequeños o con mezcla espectral compleja es decir zonas de bosques no pueden ser capturadas, otras opciones son sensores de mayor resolución como PlanetScope o WorldView-3 dan mayor precisión en la clasificación sin embargo no son de acceso gratis (Li et al., 2023). Por otro lado, Sentinel-2 debido a su acceso gratuito, cobertura global y compatibilidad con plataformas abiertas como QGIS y Google Earth Engine, se considera una opción costo-efectiva y científicamente válida para vincular la estructura del paisaje con la diversidad y distribución de *Lepidoptera*, en base a correcciones de imágenes satelitales.

Contrastando ambos lugares (Estelí y Nueva Segovia), el bosque constituye el componente de cobertura predominante en ambas áreas de estudio, aunque con proporciones diferentes. En Jalapa, el bosque es más heterogéneo. En Estelí, posee una matriz más continua, sin embargo, Estelí presenta extensiones mayores de

cultivos en contraste con Nueva Segovia donde no existe extensión agrícola marcada. Por esta razón se observan mayores números y abundancias de especies en Nueva Segovia (156 individuos y 54 especies).

En el paisaje fragmentado de Estelí (Figura 4), los ensambles de polillas estuvieron conformados principalmente por especies generalistas y tolerantes a la perturbación, entre ellas *Xylophanes cf. staudingeri*, *Automeris metzli* y *Manduca rustica* (Figura 5). Estas especies se han registrados en mosaicos agroforestales y zonas de borde en Nicaragua y Costa Rica, mostrando adaptaciones a la apertura del dosel y a la variación micro climática (Maes, 2007; Tórrez et al., 2007). En los paisajes agrícolas nicaragüenses la composición de Saturniidae y Sphingidae está dominada por especies con amplio rango de hospederos y alta movilidad, capaces de persistir en hábitats secundarios o parcialmente degradados, o buscar zonas de refugio (Araque y Navarrete, 2025).

Por el contrario, en Nueva Segovia (Figura 3), el paisaje es más continuo en transición hacia la regeneración natural, donde los parches de bosque mantienen una conectividad funcional que permite la presencia de especies especialistas de hábitat forestal: *Adhemarius fulvescens*, *Eumorpha triangulum* y *Automeris tridens*. En Nicaragua muchas especies de polillas responden positivamente a la integridad del dosel y a la humedad ambiental (Araque & Navarrete, 2025). Investigaciones recientes confirman que los rasgos funcionales de las polillas y el rango trófico o la movilidad determinan su persistencia en paisajes fragmentados, siendo los especialistas los más sensibles a la pérdida de hábitat (Karger et al., 2013; Rabl et al., 2020)

Las comunidades registradas en Estelí reflejan mayor dominancia de especies generalistas adaptadas a mosaicos agroforestales, tal como ocurre en diferentes gradientes agrícolas (Lara-Pérez et al., 2017). El valor del índice de Sørensen ($C_s = 0.6$) indica una comunidad parcialmente compartida, donde se

mantienen especies generalistas adaptadas a la perturbación. Este tipo de cambio es esperable en el paisaje, al coexistir con charrales sugiere procesos de sucesión secundaria que actúan como zonas de amortiguamiento y refugio para especies de sotobosque, reforzando la conectividad entre fragmentos. Las mariposas realizan desplazamientos locales desde zonas más secas hacia áreas más húmedas. Estos movimientos suelen pasar desapercibidos dentro del bosque, donde las condiciones son más estables; sin embargo, al eliminar parte de la cobertura forestal, dichos desplazamientos se vuelven evidentes y más fácilmente observables (Saldivar, 2025).

Al estandarizar la riqueza mediante rarefacción, se observa que las diferencias entre sitios no se explican por el esfuerzo de muestreo, sino por variaciones reales en la estructura de los ensambles de Sphingidae y Saturniidae. Este enfoque ha demostrado ser útil para discriminar cambios estructurales asociados al paisaje más allá del número de individuos colectados (Uhl et al., 2021). Asimismo, las diferencias en dominancia y equidad sugieren comunidades con estructuras de abundancia contrastantes en otras taxas como las de las hormigas, persiste que las respuestas a la heterogeneidad y alteración del hábitat, las especies se ven modulada por la configuración del paisaje (Cuautle et al., 2025). Lo que indican que la diversidad observada está influenciada por la fragmentación y a la dinámica de especies dominantes y raras también en Polillas.

Conclusión

Durante el estudio la abundancia y estructura de las comunidades de Saturniidae y Sphingidae varían entre paisajes con diferente configuración de cobertura vegetal. Aunque la riqueza estandarizada por rarefacción fue comparable entre sitios, las diferencias en abundancia total, dominancia y número de especies exclusivas indican que la continuidad del hábitat influye en la conformación de los ensamblajes de polillas nocturnas.

El índice de Sørensen mostró un recambio taxonómico, con un conjunto de especies compartidas y un número considerable de especies exclusivas por localidad. Los cambios en el paisaje no solo afectan la abundancia, sino que modifican la identidad taxonómica de los ensamblajes, sugiriendo que los agroecosistemas no reemplazan completamente la composición faunística asociada a ambientes forestales. El uso de imágenes Sentinel-2 permitió asociar las diferencias en cobertura arbórea con la estructura de las comunidades de polillas, donde mayores niveles de fragmentación se vinculan con ensamblajes dominados por especies generalistas.

Debido a que las familias Saturniidae y Sphingidae desempeñan funciones ecológicas relevantes, como polinización y soporte trófico, las variaciones espaciales detectadas podrían anticipar cambios ecológicos más amplios asociados a la deforestación y la conversión agrícola. En este contexto, los resultados subrayan la necesidad de conservar parches boscosos conectados y promover paisajes productivos que integren cobertura arbórea funcional. Finalmente, el estudio posiciona a estas familias como indicadores útiles de integridad paisajística y establece una base para futuras investigaciones que incorporen enfoques funcionales y análisis temporales del cambio de uso del suelo.

Referencias bibliográficas

- Araque, J. J., y Navarrete-Rivas, J. (2025). Saturniidae and Sphingidae moths in the transitional premontane forests of Quizaltepe, San Lorenzo, Boaco, Nicaragua. *Revista Nicaragüense de Entomología*, 367, 1–22. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14613299>
- Araque Pérez, J. (2023). Contribución para el conocimiento en la distribución de fauna terrestre de Nicaragua. *Revista Nicaragüense de Biodiversidad*, 93, 1-45.
- Bio-Nica. (2024). *Familias del orden Lepidóptero de Nicaragua*. <http://www.bio-nica.info/Ento/Lepido/lepidoptera.htm>
- Cuautle, M., Castillo-Guevara, C., Juárez-Juárez, B., y Lara, C. (2025). Effects of

- anthropogenic disturbance and seasonality on alpha diversity of ant-plant interaction networks in Mexican temperate forests. *Community Ecology*, 26, 143–162. <https://doi.org/10.1007/s42974-024-00222-5>
- Chacón, I., y Montero, J. (2007). *Butterflies and moths of Costa Rica (Order Lepidoptera)*. Santo Domingo de Heredia: Editorial INBio
- Chen, H., y Boutros, P. C. (2011). VennDiagram: A package for the generation of highly customizable Venn and Euler diagrams in R. *BMC Bioinformatics*, 12, 35. <https://doi.org/10.1186/1471-2105-12-35>
- Cruz Flores, D. D., y Barro Cañamero, A. (2015). Diversidad de los ensamblajes de esfíngidos (*Lepidoptera: Sphingidae*) de un bosque siempreverde mesófilo, Sierra del Rosario, Cuba. *Cuban Journal of Biological Sciences / Revista Cubana de Ciencias Biológicas*, 4(1).
- Gao, X., Chi, H., Huang, J., Han, Y., Li, Y., y Ling, F. (2024). Comparison of cloud-mask algorithms and machine-learning methods using Sentinel-2 imagery for mapping paddy rice in Jiangnan Plain. *Remote Sensing*, 16(7), 1305. <https://doi.org/10.3390/rs16071305>
- GRASS Development Team. (2024). *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS GIS) Software, Version 8.4*. Open-Source Geospatial Foundation. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5176030>
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censo (INEC), (2001). *III CENSO NACIONAL AGROPECUARIO*. CENAGRO
<https://www.inide.gob.ni/Estadisticas/cenagro3>
- Karasiak, N. (2016). *Dzetsaka QGIS Classification Plugin*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2552284>
- Karger, D. N., Abrahamczyk, S., y Kessler, M. (2013). Abundance and species richness of hawkmoths (*Lepidoptera: Sphingidae*) in the fragmented landscape of Santa Cruz (Bolivia). *Ecología en Bolivia*, 48(1), 46–51. https://www.scielo.org.bo/pdf/reb/v48n1/v48n1_a05.pdf
- Koleff, P., Gaston, K. J., y Lennon, J. J. (2003). Measuring beta diversity for presence-absence data. *Journal of Animal Ecology*, 72(3), 367–382. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2656.2003.00710.x>
- Lara-Pérez, L. A., Campos-Domínguez, J., Díaz-Fleischer, F., Adame-García, J., y Andrade-Torres, A. (2017). Species richness and abundance of *Saturniidae* (*Lepidoptera*) in a tropical semi-deciduous forest of Veracruz, Mexico and the influence of climatic variables. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88(1).

<https://doi.org/10.1016/j.rmb.2016.10.020>

Li, R., Gao, X., Shi, F., & Zhang, H. (2023). *Scale effect of land cover classification from multi-resolution satellite remote sensing data*. *Sensors*, 23(13), 6136. <https://doi.org/10.3390/s23136136>

Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales (MARENA). (2022). *Plan de manejo de la Reserva Natural Tisey–La Estanzuela* (PDF). Gobierno de Nicaragua.

Maes, J. M. (2007). *Identificación y clasificación de insectos en la Reserva Natural Datanlí–El Diablo, Nicaragua*. Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales (MARENA).

Maes, J. M., Schmit, P., Laguerre, M., y Conlan, C. (2001). Saturniidae / Sphingidae de Nicaragua. *Revista Nicaragüense de Entomología*, 55/58, 1–4. CD ROM.

McFarland, N. (1966). A moth sheet for attracting and retaining live specimen without the use of a trap or tent-enclosure. *Journal of Research on the Lepidoptera*, 5(1), 29–36.

Oksanen, J., Simpson, G. L., Blanchet, F. G., Kindt, R., Legendre, P., Minchin, P. R., O'Hara, R. B., Solymos, P., Stevens, M. H. H., Szoecs, E., Wagner, H., Barbour, M., Bedward, M., Bolker, B., Borcard, D., Borman, T., Carvalho, G., Chirico, M., De Cáceres, M., Weedon, J. (2025). *vegan: Community Ecology Package* (Version 2.8-0) [R package]. <https://vegandevs.github.io/vegan/>

Peralta, J. M. (2025). Assessing the accuracy of Random Forest in mapping urban green cover in Baguio City using Sentinel-2 imagery and spectral indices. *Journal of Information Systems Engineering and Management*, 10(30s), 1–12. <https://doi.org/10.52783/jisem.v10i30s.4859>

R-Core Team. (2025). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>

Rabl, D., Alonso-Rodríguez, A. M., Brehm, G., y Fiedler, K. (2020). Trait variation in moths mirrors small-scaled ecological gradients in a tropical forest landscape. *Insects*, 11(9), 612. <https://doi.org/10.3390/insects11090612>

Rodríguez-Puerta, F., Lucas, M., y McNally, S. (2024). Five-year evaluation of Sentinel-2 cloud-free mosaic generation under varied cloud cover conditions in Hawai'i. *Remote Sensing*, 16(24), 4791. <https://doi.org/10.3390/rs16244791>

Salas E, J. (1993). *Árboles de Nicaragua*. Instituto Nicaragüense de Recursos

Naturales y del Ambiente, IRENA.

- Saldivar, I. (2025). *Historia natural del bosque tropical seco de Nicaragua*. Revista Nicaragüense de Biodiversidad, 116, 1–217. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15046809>
- Siles G., P; Talavera A., P; Andino R, F; Alaniz, L; Ortiz G, W. (2017). Composición florística, estructura y biomasa de los bosques de pino-encino en la reserva Santa Rosa, Tisey, Estelí, Nicaragua. *Revista de Biología Tropical* 65(2): 763-775.
- Summerville, K. S., Conoan, C. J., & Steichen, R. M. (2006). Species traits as predictors of Lepidopteran composition in restored and remnant tallgrass prairies. *Ecological Applications*, 16(3), 891–900.
- Tórrez, M., Arana, S. y Maes, J. M. (2007). Especies de las familias Saturniidae, Sphingidae, Papilionidae, Pieridae, Nymphalidae (Lepidoptera), Scarabaeidae (Coleoptera) y su potencial uso como indicadores de perturbación en la Reserva Biológica Indio Maíz. *Revista Nicaragüense de Entomología*, 67, 1–36.
- Venter, Z. S., Roos, R. E., Nowell, M. S., Rusch, G. M., Kvifte, G. M., y Sydenham, M. A. K. (2023). Comparing global Sentinel-2 land cover maps for regional species distribution modeling. *Remote Sensing*, 15(7), 1749. <https://doi.org/10.3390/rs15071749>

Efecto de la densidad de siembra en dos híbridos de melón (*Cucumis melo* L.), en Guararé, Panamá

Effect of plant density on two melon (*Cucumis melo* L.) HYBRIDS in Guararé, Panama

Franklin Eduardo Wilcox Cuervo

Universidad de Panamá, CRULS, Centro Regional Universitario Los Santos,
Facultad de Ciencias Agropecuarias, Departamento de Fitotecnia, Panamá

<https://orcid.org/0000-0001-8617-3137>

Autor de correspondencia: franklin.wilcox@up.ac.pa

Heimy Cedeño Alonzo

Universidad de Panamá, CRULS, Centro Regional Universitario Los Santos,
Facultad de Ciencias Agropecuarias, Estudiante

<https://orcid.org/0009-0008-7405-5342>

heimy.cedeno@up.ac.pa

Janeth Del Carmen Urriola

Universidad de Panamá, CRULS, Centro Regional Universitario Los Santos,
Facultad de Ciencias Agropecuarias, Departamento de Fitotecnia, Panamá

<https://orcid.org/0000-0001-8004-7041>

janeth.urriola@up.ac.pa

José Nazario Rivera Robles

Universidad de Panamá, CRULS, Centro Regional Universitario Los Santos,
Facultad de Ciencias Agropecuarias, Departamento de Suelos y Aguas, Panamá

<https://orcid.org/0000-0002-7767-747X>

jose.rivera@up.ac.pa

Recibido: 02/03/26

Aceptado: 20/04/26

DOI <https://doi.org/10.48204/j.scientia.v36n2.a9462>

Resumen

La densidad de siembra es un factor determinante en la productividad y calidad hortofrutícola, particularmente bajo condiciones tropicales donde la competencia intraespecífica puede modular la expresión fenotípica de los híbridos. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de tres distancias de siembra (15, 30 y 45 cm) en dos híbridos de melón (*Cucumis melo* L.) comerciales (Bobby F1 y Caribbean Gold) establecidos en un diseño de bloques completos al azar con arreglo factorial 3 x 2 con 3 repeticiones. Se analizaron número de frutos, diámetro, longitud, peso de fruto

y rendimiento (kg/ha). Los resultados evidenciaron interacción significativa Distancia $\times$ Híbrido para número de frutos, diámetro, longitud y peso, indicando respuestas diferenciales entre genotipos frente a la competencia poblacional. El espaciamiento de 15 cm favoreció mayores valores de diámetro y peso de fruto en Caribbean Gold, mientras que Bobby F1 mostró mejor desempeño relativo en densidades intermedias para algunos componentes del rendimiento. El rendimiento por hectárea fue afectado únicamente por la distancia de siembra ($p \leq 0.05$), registrándose el valor más alto en 15 cm, lo que confirma que la mayor densidad poblacional optimizó la productividad por unidad de superficie sin comprometer la calidad comercial. Se concluye que la optimización del rendimiento en sistemas tropicales intensivos depende de la integración entre densidad de siembra y selección de híbrido. El espaciamiento de 15 cm representa la alternativa más eficiente para maximizar producción por área, aunque la respuesta morfológica específica debe considerarse al formular recomendaciones técnicas.

Palabras clave: Cultivo, horticultura, producción agrícola, fruta, medición.

Abstract

Planting density is a key determinant of horticultural productivity and fruit quality, particularly under tropical conditions where intraspecific competition can modulate the phenotypic expression of hybrids. The objective of this study was to evaluate the effect of three planting distances (15, 30, and 45 cm) on two commercial melon hybrids (*Cucumis melo* L.), Bobby F1 and Caribbean Gold, established in a randomized complete block design with a 3×2 factorial arrangement and three replications. The variables analyzed included number of fruits, fruit diameter, fruit length, fruit weight, and yield (kg/ha). The results revealed a significant Distance $\times$ Hybrid interaction for number of fruits, diameter, length, and weight, indicating differential genotypic responses to plant population competition. The 15 cm spacing promoted higher fruit diameter and weight in Caribbean Gold, whereas Bobby F1 exhibited relatively better performance at intermediate densities for certain yield components. Yield per hectare was affected exclusively by planting distance ($p \leq 0.05$), with the highest value recorded at 15 cm, confirming that increased plant population optimized productivity per unit area without compromising commercial fruit quality. It is concluded that yield optimization in intensive tropical production systems depends on the integration of planting density and hybrid selection. A 15 cm spacing represents the most efficient alternative to maximize yield per unit area; however, hybrid-specific morphological responses should be considered when developing technical recommendations.

Keywords: Crop, Horticulture, Agricultural production, Fruit, Measurement.

Introducción

La cucurbitácea *Cucumis melo* L. ocupa un lugar destacado dentro de los cultivos hortícolas de exportación en regiones tropicales y subtropicales, donde la articulación entre ciclos productivos cortos y ventanas de demanda internacional ha impulsado la adopción de tecnologías de manejo intensivo. Los registros más recientes de FAOSTAT (2023) ubican la producción mundial por encima de los 28 millones de toneladas, concentrada en China como principal actor global, seguida de Turquía, India y España. Esta distribución evidencia la dependencia del comercio mundial respecto a polos tecnológicos que concentran tanto el desarrollo de germoplasma comercial como la infraestructura logística de postcosecha.

En sistemas hortícolas de alta intensidad bajo riego localizado, la configuración espacial de siembra es uno de los factores de mayor incidencia sobre la arquitectura del dosel y la dinámica de partición de asimilados (Díaz, 2019). La densidad poblacional determina el grado de interceptación de radiación fotosintéticamente activa por planta y regula la asignación de biomasa entre estructuras vegetativas y reproductivas, condicionando tanto el número de frutos establecidos como el peso individual al momento de cosecha (Nerson, 2009). La intensificación poblacional activa mecanismos de competencia intraespecífica por luz, agua y nutrientes que, más allá de un umbral crítico, deprimen el calibre del fruto aun cuando el rendimiento por unidad de superficie continúe incrementándose (Díaz & Monge, 2017).

A escala radicular, el incremento en densidad modifica la geometría del bulbo húmedo en sistemas de riego por goteo, reduciendo el volumen de suelo accesible por planta y afectando la eficiencia hídrica individual (Kirnak et al., 2016); el manejo integrado de riego junto con otras prácticas culturales ha mostrado efectos significativos sobre el rendimiento y los atributos cualitativos del fruto (Buczkowska et al., 2023; Cozzolino et al., 2023), lo que refuerza que la densidad de siembra debe analizarse como componente de un sistema agronómico y no como variable aislada.

La evidencia experimental en cucurbitáceas indica que la intensificación poblacional puede desacoplar el rendimiento agregado por superficie de la calidad individual del fruto (Ban et al., 2006), aunque este desacoplamiento opera como función de la interacción genotipo-densidad, donde la constitución genética del material modula la expresión fenotípica ante gradientes crecientes de competencia (Napolitano et al., 2020). Bajo condiciones de alta presión poblacional, los individuos ajustan atributos morfológicos y fisiológicos para maximizar la captación de recursos disponibles, fenómeno formalizado como plasticidad fenotípica, reconfigurando rasgos como área foliar, acumulación de biomasa y tasa de crecimiento relativo

(López et al., 2019; Neugschwandtner et al., 2024). Ensayos comparativos en híbridos comerciales de melón han registrado variabilidad significativa entre genotipos en fenología, número de frutos y productividad total al evaluarlos bajo entornos contrastantes (Adiredjo et al., 2024), lo que subraya la pertinencia de analizar la respuesta de materiales específicos a distintas configuraciones de densidad en lugar de extrapolar resultados de forma genérica.

La fisiología reproductiva de *Cucumis melo* L. integra una cadena de procesos como diferenciación floral, polinización y establecimiento del fruto, cuya eficiencia determina el potencial de cosecha. La viabilidad polínica y la receptividad del estigma en antesis son sensibles a temperatura y radiación, de modo que perturbaciones en estas variables comprometen directamente la tasa de cuajado (Sanabria et al., 2025; Humphrey, 2017). La comprensión de estos mecanismos resulta relevante para anticipar cómo la densidad de siembra modula la floración efectiva y el cuajado final en condiciones de manejo intensivo.

En el contexto panameño, el melón constituye un rubro con dinamismo comercial sostenido; durante el cierre agrícola 2022-2023 la producción nacional alcanzó 1,407.50 toneladas, con destino predominantemente interno (85.7%) y una fracción exportable del 14.3% (MIDA, 2024), concentrada en los distritos de Macaracas, Tonosí, Los Santos y Guararé. La contracción observada en los volúmenes productivos recientes expone la necesidad de investigación experimental local que ajuste parámetros agronómicos clave, entre ellos la densidad de siembra en las condiciones edafoclimáticas de la región y con los híbridos disponibles comercialmente, toda vez que la variabilidad genética modula sustancialmente la respuesta productiva ante gradientes de competencia intraespecífica y genotipos distintos pueden expresar niveles diferenciados de plasticidad ante presión poblacional (Montero et al., 2021; Alvarado et al., 2018). Esta brecha es particularmente crítica para la evaluación simultánea de densidad de siembra y material genético sobre variables fenológicas y componentes del

rendimiento bajo campo abierto con riego por goteo, limitando la elaboración de recomendaciones técnicas sustentadas en evidencia propia de las condiciones locales de Azuero.

Con base en lo expuesto, el presente estudio tuvo como objetivo general evaluar el efecto de tres distancias de siembra (15, 30 y 45 cm) y dos híbridos comerciales de melón (*Cucumis melo* L., Bobby F1 y Caribbean Gold) sobre variables fenológicas y componentes del rendimiento bajo condiciones de campo abierto con riego localizado en el corregimiento de Montero, distrito de Guararé, provincia de Los Santos, Panamá. De forma específica, se buscó: (1) determinar el efecto individual de cada distanciamiento sobre los días a floración, días a cosecha, número de frutos por planta, diámetro, longitud, peso individual y rendimiento por hectárea; (2) identificar la existencia de interacción distanciamiento × híbrido en las variables evaluadas; y (3) establecer la configuración espacial óptima para maximizar simultáneamente el rendimiento por hectárea y la precocidad del ciclo productivo según el material genético utilizado. Se planteó la hipótesis de que el distanciamiento de siembra y el genotipo ejercen efectos significativos sobre las variables fenológicas y los componentes del rendimiento, y que existe interacción significativa entre ambos factores, de modo que la respuesta productiva de cada híbrido difiere según la configuración espacial evaluada.

Materiales y Métodos:

Sitio experimental:

El experimento se realizó durante la estación seca del año 2025 en la localidad de El Montero, distrito de Guararé, provincia de Los Santos, República de Panamá (7.8094° N, 80.3046° O), a una altitud entre 25 y 50 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) La zona presenta clima tropical de sabana (Aw según Köppen), con estación seca bien definida de diciembre a abril. La temperatura media anual es de aproximadamente 27 grados centígrados (°C) y la precipitación anual oscila entre 1,100 y 1,400 milímetros (mm) (Rivera, 2011; Rivera, 2023; Wilcox y Rivera,

2023) (Figura 1).

Figura 1



Fuente: Rivera (2026).

Material vegetal

Se evaluaron dos híbridos comerciales de melón (*Cucumis melo* L.) tipo amarillo:

- **Bobby F1** (Seminis Vegetable Seeds, EE. UU.).
- **Caribbean Gold** (Hazera Seeds, Países Bajos).

Diseño experimental y tratamientos

El ensayo se estableció bajo un arreglo factorial 2×3 en un Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA) con tres repeticiones.

Factor A: Híbrido (2 niveles)

- H_1 : Bobby F1
- H_2 : Caribbean Gold

Factor B: Distancia de siembra (3 niveles)

- D_1 : 0.15 metros (m)
- D_2 : 0.30 m
- D_3 : 0.45 m

La distancia entre hileras fue de 1.80 m para todos los tratamientos. Las densidades poblacionales correspondientes fueron aproximadamente:

- 37,037 plantas/ hectárea (ha) (0.15 m)
- 18,518 plantas/ha (0.30 m)
- 12,345 plantas ha (0.45 m)

Cada unidad experimental tuvo un área de 24 metros cuadrados (m^2), con una parcela útil de $18 m^2$ para evaluación, con el fin de evitar efectos de borde. El área total del experimento fue de $777.6 m^2$.

Manejo agronómico

Preparación del suelo: Se realizó subsolado en áreas con presencia de compactación, seguido de arado profundo 30 días antes del trasplante. Posteriormente, se efectuaron dos pases de rastra para lograr adecuada mullidez del suelo (González et al., 2013).

Producción de plántulas y trasplante: Las plántulas se produjeron en bandejas de poliestireno de 128 cavidades y se trasplantaron en estado de dos hojas verdaderas. El trasplante se efectuó cuando el suelo se encontraba cercano a capacidad de campo.

Sistema de riego: Se instaló un sistema de riego por goteo con cinta de polietileno de 16 mm de diámetro, emisores cada 20 centímetros (cm) y gasto nominal de 1.0 litros por hora (L /h) (Rivulis Irrigation, Israel). El riego se programó en función de la evapotranspiración del cultivo y las condiciones climáticas locales.

Fertilización: Se aplicó superfosfato triple (0-46-0) a razón de 300 kilogramos por hectárea (kg/ha) (Yara International, Noruega) como fertilización de base. El nitrógeno, potasio, calcio y magnesio se suministraron mediante fertirriego en dosis totales de 120 kg N ha, 200 kg K_2O ha, 80 kg Ca ha y 60 kg Mg ha durante el ciclo del cultivo (González et al., 2013).

Manejo fitosanitario: El manejo de plagas y enfermedades se realizó bajo principios de manejo integrado. Las aplicaciones se efectuaron con base en monitoreo de campo y umbrales económicos de daño. Se emplearon, entre otros, los siguientes productos comerciales:

- Imidacloprid 350 gramos por litro (g/L) SC (Bayer CropScience, Alemania).
- Mancozeb 800 gramos por kilogramo (g/kg) WP (UPL Ltd., India).
- Metalaxil-M 480 g/L (Syngenta, Suiza).

Las aplicaciones se realizaron conforme a las recomendaciones del fabricante.

Cosecha: La cosecha se inicia entre los 50 y 53 días después de trasplante en un período de tres semanas de cosecha (González et al., 2013).

Variables evaluadas

Número de frutos:

Se contabilizó el número total de frutos cosechados por planta y se calculó el promedio por unidad experimental (Rodríguez, 2020).

Diámetro del fruto (cm):

Se midió el diámetro ecuatorial de diez frutos comerciales por parcela utilizando un calibrador digital (Mitutoyo Corp., Japón; precisión ± 0.01 cm).

Peso de fruto (kg): Se determinó mediante balanza digital (Ohaus Corporation, EE. UU.; precisión ± 1 g). Se calculó el peso promedio por parcela.

Rendimiento total (Kg/ha): Se obtuvo a partir del peso total de frutos cosechados en la parcela útil y se extrapoló a rendimiento por hectárea.

Análisis estadístico

Los datos se sometieron a análisis de varianza (ANOVA) para un arreglo factorial en DBCA, bajo el siguiente modelo estadístico:

$$Y_{ijk} = \mu + B_i + H_j + D_k + (H \times D)_{jk} + \varepsilon_{ijk}$$

donde:

- μ = media general
- B_i = efecto de bloque
- H_j = efecto de híbrido
- D_k = efecto de distancia de siembra
- $H \times D$ = interacción
- ε_{ijk} = error experimental

Se verificaron los supuestos de normalidad (prueba de Shapiro–Wilk) y homogeneidad de varianzas (prueba de Levene). Cuando se detectaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$), las medias se compararon mediante la prueba de Tukey (HSD).

El análisis estadístico se realizó con **IBM SPSS Statistics versión 22.0** (IBM Corp., Armonk, NY, EE. UU.).

Resultados

Días a floración:

La variable días a floración presentó una media general de 16.0 días (CV = 10.9%). El análisis de varianza (Tabla 1) no detectó diferencias significativas para bloques, distanciamiento ni híbrido como efectos principales ($p > 0.05$). La interacción distanciamiento $\times$ híbrido (A $\times$ B) fue el único término significativo ($p \leq 0.05$), con SC = 24.00 y CM = 12.00, indicando que la respuesta fenológica de cada híbrido dependió del distanciamiento de siembra.

Tabla 1.
Análisis de varianza para días a floración.

Fuente de variación	GL	SC	CM	F cal	F _{0.05}	Sig.
Bloques	2	0.00	0.00	—	4.46	ns
Distanciamiento (A)	2	12.00	6.00	—	4.46	ns
Híbrido (B)	1	0.00	0.00	—	5.32	ns
A $\times$ B	2	24.00	12.00	*	4.46	*
Error	10	0.00	0.00	—	—	—
Total	17	36.00	—	—	—	—

Nota: a. R al cuadrado = 1.00

Dada la significancia de la interacción, los efectos simples se compararon mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$; DMS = 4.65 días). Los resultados (Tabla 2)

evidencian un patrón cruzado: H1 registró su mayor precocidad en D1 (14.0 días) y su mayor tardanza en D2 (18.0 días), mientras que H2 mostró la tendencia opuesta (14.0 días en D2; 18.0 días en D3). Las combinaciones D1×H1 y D2×H2 conformaron el grupo más precoz (grupo B, 14.0 días), D2×H1 y D3×H2 el más tardío (grupo A, 18.0 días), y D1×H2 y D3×H1 una posición estadísticamente intermedia (grupo AB, 16.0 días).

Tabla 2

Medias de días a floración por efecto simple ($D \times H$) y agrupación de Tukey ($\alpha = 0.05$).

Combinación ($D \times H$)	Distanciamiento	Media (días)	Tukey ($\alpha = 0.05$)
D2 $\times$ H1	D2	18.0	A
D3 $\times$ H2	D3	18.0	A
D1 $\times$ H2	D1	16.0	AB
D3 $\times$ H1	D3	16.0	AB
D1 $\times$ H1	D1	14.0	B
D2 $\times$ H2	D2	14.0	B

Nota: Medias con la misma letra no difieren significativamente (Tukey, $\alpha = 0.05$). DMS = 4.65 días.

Días a cosecha:

Para la variable días a cosecha, el análisis de varianza (Tabla 3) indicó que el modelo explicó el 82.5% de la variación total de los datos ($R^2 = 0.825$; R^2 ajustada = 0.702). Los bloques y el híbrido no presentaron efecto significativo ($p = 0.591$ y $p = 0.176$, respectivamente), ni tampoco la interacción distanciamiento $\times$ híbrido ($p = 0.327$). El distanciamiento de siembra fue el único factor con efecto significativo sobre los días a cosecha ($F_{2,10} = 20.697$; $p < 0.001$).

Tabla 3

Análisis de varianzas para la variable número de frutos.

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Cuadrático promedio	F	Sig.
Modelo corregido	24.996 ^a	7	3.571	6.733	0.004
Interceptación	59353.906	1	59353.906	111916.002	0.000
BLOQUE	0.588	2	0.294	0.555	0.591
Distancia	21.953	2	10.976	20.697	0.000
Híbrido	1.125	1	1.125	2.121	0.176
Distancia * Híbrido	1.330	2	0.665	1.254	0.327
Error	5.303	10	0.530		
Total	59384.206	18			
Total corregido	30.300	17			

Nota: a. R al cuadrado = 0.825 (R al cuadrado ajustada = 0.702)

La comparación de medias mediante la prueba HSD de Tukey ($\alpha = 0.01$; CME = 0.530; Tabla 4) identificó dos subconjuntos homogéneos. El distanciamiento de 45 cm registró la mayor cantidad de días a cosecha (58.80 días), siendo significativamente superior al de 15 cm (56.10 días; diferencia = 2.703 días; $p < 0.001$). El distanciamiento de 30 cm (57.37 días) ocupó una posición estadísticamente intermedia, sin diferir significativamente de ninguno de los otros dos tratamientos.

Tabla 4

<i>Prueba de subconjuntos de Tukey</i>			
		Subconjunto	
Distancia	N	1	2
15 cm	6	56.100	
30 cm	6	57.367	57.367
45 cm	6		58.803
Sig.		0.032	0.017

Numero de frutos:

El análisis de varianza mostró que el modelo fue significativo para el número de frutos ($p = 0.006$), explicando el 80.9% de la variabilidad total observada ($R^2 = 0.809$; R^2 ajustado = 0.675). La distancia de siembra no presentó efecto principal significativo ($p = 0.702$), el híbrido sí mostró diferencias estadísticas ($p = 0.012$), al igual la interacción Distancia $\times$ Híbrido evidenció diferencia significativa ($p = 0.001$) (Tabla 5).

Tabla 5

Análisis de varianzas para la variable número de frutos.

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Cuadrático promedio	F	Sig.
Modelo corregido	1387.722 ^a	7	198.246	6.034	0.006
Interceptación	32342.722	1	32342.722	984.391	0.000
BLOQUE	4.778	2	2.389	0.073	0.930
Distancia	24.111	2	12.056	0.367	0.702
Híbrido	312.500	1	312.500	9.511	0.012
Distancia * Híbrido	1046.333	2	523.167	15.923	0.001
Error	328.556	10	32.856		
Total	34059.000	18			
Total corregido	1716.278	17			

Nota: a. R al cuadrado = 0.809 (R al cuadrado ajustada = 0.675)

Debido a la significancia de la interacción, se analizaron los efectos simples mediante medias marginales estimadas con ajuste de Bonferroni ($\alpha = 0.05$). A nivel general, Caribbean Gold presentó un mayor número promedio de frutos (46.556) en comparación con Bobby F1 (38.222), con una diferencia significativa de 8.333 frutos ($p = 0.006$) (Tabla 6).

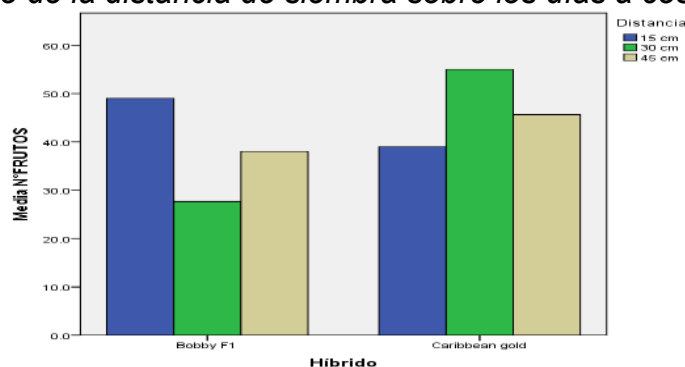
Tabla 6
Efecto simple de medias marginales estimadas.

Híbrido	Media	Diferencia de medias (I-J)	Sig. ^b	Intervalo de confianza al 99%	
				Límite inferior	Límite superior
Bobby F1	38.222	-8.333*	0.006	32.856	43.589
Caribbean gold	46.556	8.333*	0.006	41.189	51.922

El análisis desagregado por distancia (Tabla 7), reveló un patrón diferencial claro. A 15 cm, Bobby F1 registró mayor número de frutos (49.0) que Caribbean Gold (39.0). En contraste, a 30 cm Caribbean Gold superó ampliamente a Bobby F1 (55.0 vs. 27.667). A 45 cm, Caribbean Gold también mantuvo valores superiores (45.667 vs. 38.0) (Figura 2).

Tabla 7
Análisis desagregado por distancia.

Distancia	Híbrido	Media	Error estándar	Intervalo de confianza al 99%	
				Límite inferior	Límite superior
15 cm	Bobby F1	49.000	3.043	39.705	58.295
	Caribbean gold	39.000	3.043	29.705	48.295
30 cm	Bobby F1	27.667	3.043	18.372	36.961
	Caribbean gold	55.000	3.043	45.705	64.295
45 cm	Bobby F1	38.000	3.043	28.705	47.295
	Caribbean gold	45.667	3.043	36.372	54.961

Figura 2
Efecto de la distancia de siembra sobre los días a cosecha.


Diámetro de fruto:

El análisis de varianza mostró un efecto altamente significativo del modelo sobre el diámetro de fruto ($p < 0.001$), explicando el 97.9% de la variabilidad total ($R^2 = 0.979$; R^2 ajustado = 0.964). La distancia de siembra influyó de manera determinante ($p < 0.001$), el híbrido también presentó efecto significativo ($p = 0.002$), Asimismo, la interacción Distancia $\times$ Híbrido fue altamente significativa ($p < 0.001$) (Tabla 8).

Tabla 8

Análisis de varianzas para la variable diámetro de frutos.

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Cuadrático promedio	F	Sig.
Modelo corregido	509.776 ^a	7	72.825	66.544	0.000
Interceptación	45394.862	1	45394.862	41479.266	0.000
BLOQUE	9.985	2	4.993	4.562	0.039
Distancia	275.774	2	137.887	125.993	0.001
Híbrido	19.469	1	19.469	17.789	0.002
Distancia * Híbrido	204.549	2	102.274	93.453	0.001
Error	10.944	10	1.094		
Total	45915.583	18			
Total corregido	520.720	17			

Nota: a. R al cuadrado = 0.979 (R al cuadrado ajustada = 0.964)

El análisis comparativo de medias Tukey ($\alpha = 0.05$) mostró diferencias estadísticas entre las tres distancias evaluadas. El mayor diámetro promedio de fruto se obtuvo a 15 cm (55.120 cm), seguido de 30 cm (49.997 cm) y 45 cm (45.540 cm), conformando subconjuntos independientes, evidenciando la diferencia entre grupos (Tabla 9).

Tabla 9

<i>Prueba de subconjuntos de Tukey</i>				
Distancia	N	Subconjunto		
		1	2	3
45 cm	6	45.540		
30 cm	6		49.997	
15 cm	6			55.120
Sig.		1.000	1.000	1.000

Debido a la significancia de la interacción, se analizaron los efectos simples mediante medias marginales estimadas con ajuste de Bonferroni ($\alpha = 0.05$). A nivel general, Bobby F1 presentó un mayor diámetro promedio de frutos (51.259) en comparación con Caribbean gold (49.179), con una diferencia significativa de 2.080 centímetros ($p = 0.006$) (Tabla 10).

Tabla 10

Efecto simple de medias marginales estimadas.

Híbrido	Media	Diferencia de medias (I-J)	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
				Límite inferior	Límite superior
Bobby F1	51.259	2.080*	0.006	50.300	52.218
Caribbean gold	49.179	-2.080*	0.006	48.220	50.138

El análisis desagregado por distancia (Tabla 11), reveló un patrón diferencial claro. A 15 cm, Caribbean Gold registró mayor diámetro de frutos (57.853) que Bobby F1 (52.853). En contraste, a 30 cm Bobby F1 superó ampliamente a Caribbean Gold (55.447 vs. 44.547). A 45 cm, ambos híbridos presentaron diámetros muy similares (Boby F1 45.943 cm vs. Caribbean gold 45.137cm) (Figura 3).

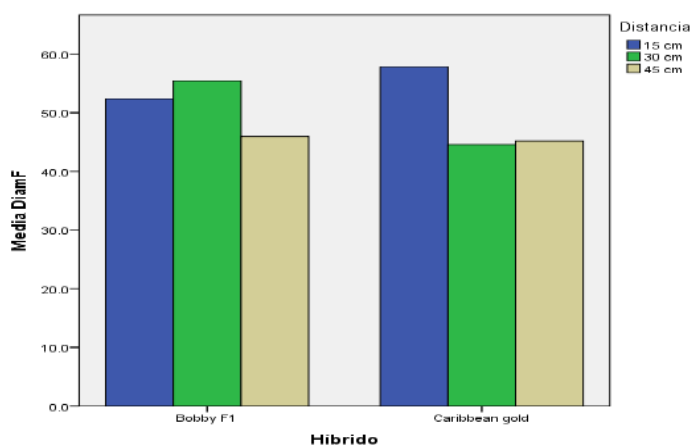
Tabla 11

Análisis desagregado por distancia.

Distancia	Híbrido	Media	Error estándar	Intervalo de confianza al 95%	
				Límite inferior	Límite superior
15 cm	Bobby F1	52.387	0.762	50.725	54.048
	Caribbean gold	57.853	0.762	56.192	59.515
30 cm	Bobby F1	55.447	0.762	53.785	57.108
	Caribbean gold	44.547	0.762	42.885	46.208
45 cm	Bobby F1	45.943	0.762	44.282	47.605
	Caribbean gold	45.137	0.762	43.475	46.798

Figura 3

Efecto de la distancia de siembra sobre el diámetro de fruta.



Peso de fruto:

El análisis de varianza evidenció que el modelo fue altamente significativo ($p < 0.001$), explicando el 96.9% de la variabilidad total del peso de fruto ($R^2 = 0.969$; R^2 ajustado = 0.948), lo que indica un ajuste estadístico robusto y elevada capacidad explicativa del modelo. Se evidencia efectos altamente significativos de la distancia de siembra ($p < 0.001$) y de la interacción Distancia $\times$ Híbrido ($p < 0.001$), así como un efecto significativo del híbrido ($p = 0.008$) (Tabla 12).

Tabla 12

Análisis de varianzas para la variable peso de frutos.

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Cuadrático promedio	F	Sig.
Modelo corregido	4.098 ^a	7	0.585	45.269	0.001
Interceptación	63.431	1	63.431	4904.906	0.000
BLOQUE	0.081	2	0.040	3.122	0.088
Distancia	2.538	2	1.269	98.120	0.001
Híbrido	0.140	1	0.140	10.860	0.008
Distancia * Híbrido	1.339	2	0.670	51.771	0.001
Error	0.129	10	0.013		
Total	67.659	18			
Total corregido	4.227	17			

Nota: R al cuadrado = 0.969 (R al cuadrado ajustada = 0.948)

El análisis comparativo de medias Tukey ($\alpha = 0.05$) mostró diferencias estadísticas entre las tres distancias evaluadas. El mayor peso promedio de fruto se obtuvo a 15 cm (2.322 kg), seguido de 30 cm (1.907 kg) y 45 cm (1.403 kg), conformando subconjuntos homogéneos independientes (Tabla 13).

Tabla 13

Prueba de subconjuntos de Tukey

Distancia	N	Subconjunto		
		1	2	3
45 cm	6	1.403		
30 cm	6		1.907	
15 cm	6			2.322
Sig.		1.000	1.000	1.000

En cuanto al efecto principal de híbrido (Tabla 14), las medias marginales estimadas mostraron que Bobby F1 presentó mayor peso promedio (1.966 kg) que Caribbean gold (1.789 kg). La comparación por pares con ajuste de Bonferroni

confirmó diferencias significativas entre híbridos ($\Delta = 0.177$ kg; $p = 0.015$), con un intervalo de confianza que no incluyó el cero. No obstante, dado que la interacción fue altamente significativa, esta diferencia general debe interpretarse dentro de cada nivel de distancia.

Tabla 14

Efecto simple de medias marginales estimadas.

Híbrido	Media	Error estándar	Intervalo de confianza al 95%	
			Límite inferior	Límite superior
Bobby F1	1.966	0.044	1.869	2.062
Caribbean gold	1.789	0.044	1.693	1.885

El análisis de la interacción (Tabla 15) reveló un patrón diferencial marcado entre híbridos según el distanciamiento. A 15 cm, Caribbean gold alcanzó el mayor peso (2.517 kg), superando a Bobby F1 (2.127 kg). En contraste, a 30 cm, Bobby F1 presentó el valor más alto (2.363 kg), mientras que Caribbean gold disminuyó considerablemente (1.450 kg). A 45 cm, ambos híbridos mostraron valores prácticamente similares (1.407 y 1.400 kg, respectivamente) (Figura 4).

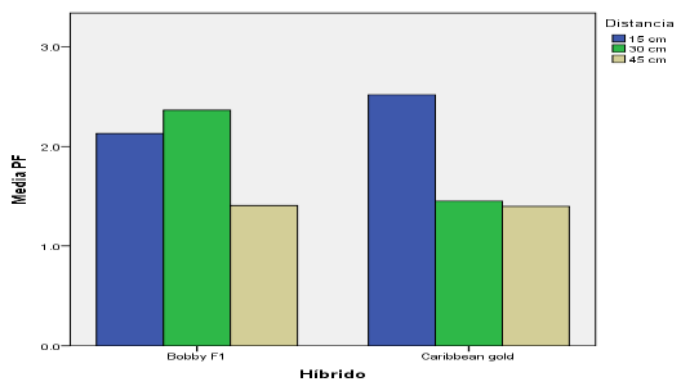
Tabla 15

Análisis desagregado por distancia.

Distancia	Híbrido	Media	Error estándar	Intervalo de confianza al 95%	
				Límite inferior	Límite superior
15 cm	Bobby F1	2.127	0.076	1.960	2.293
	Caribbean gold	2.517	0.076	2.350	2.683
30 cm	Bobby F1	2.363	0.076	2.197	2.530
	Caribbean gold	1.450	0.076	1.284	1.616
45 cm	Bobby F1	1.407	0.076	1.240	1.573
	Caribbean gold	1.400	0.076	1.234	1.566

Figura 4

Efecto de la distancia de siembra sobre el diámetro de fruta.



Rendimiento:

El análisis de varianza para la variable rendimiento (kg/ha) mostró que el modelo general fue significativo ($p = 0.009$), explicando el 78.8% de la variabilidad total observada ($R^2 = 0.788$; R^2 ajustado = 0.640). El factor Distancia de siembra presentó un efecto altamente significativo sobre el rendimiento ($p = 0.001$), mientras que el factor Híbrido no mostró diferencias estadísticas ($p = 0.452$). De igual manera, la interacción Distancia $\times$ Híbrido no fue significativa ($p = 0.200$) (Tablas 16).

Tabla 16

ANOVA para la variable rendimiento.

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Cuadrático promedio	F	Sig.
Modelo corregido	1717920394.981 ^a	7	245417199.283	5.315	0.009
Interceptación	32672307192.096	1	32672307192.096	707.589	0.000
BLOQUE	7032868.406	2	3516434.203	0.076	0.927
Distancia	1507106728.231	2	753553364.116	16.320	0.001
Híbrido	28236209.717	1	28236209.717	0.612	0.452
Distancia * Híbrido	175544588.626	2	87772294.313	1.901	0.200
Error	461741205.862	10	46174120.586		
Total	34851968792.938	18			
Total corregido	2179661600.842	17			

Nota: R al cuadrado = .788 (R al cuadrado ajustada = .640)

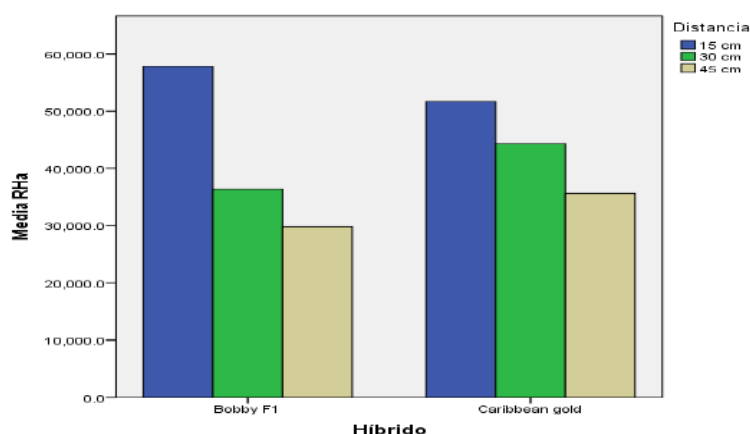
Dado que el factor Distancia resultó significativo, se realizó la prueba de comparación múltiple de Tukey (Tabla 17) ($\alpha = 0.05$). El análisis de subconjuntos homogéneos confirmó la formación de dos grupos estadísticos: el primero integrado por 45 y 30 cm, y el segundo compuesto exclusivamente por 15 cm. El espaciamiento de 15 cm registró el mayor rendimiento promedio (54,768 kg/ha), superando significativamente a 30 cm (40,345 kg/ha) y 45 cm (32,699 kg/ha) (Figura 5).

Tabla 17

<i>Prueba de subconjuntos de Tukey</i>				
Distancia	N	Subconjunto		
		1	2	
45 cm	6	32699.075		
30 cm	6	40345.370		
15 cm	6		54768.518	
Sig.		0.176	1.000	

Figura 5

Efecto de la distancia de siembra sobre el rendimiento (kg/ha) en dos híbridos comerciales.



Discusión

El análisis conjunto de las variables fenológicas revela que el distanciamiento de siembra fue el factor determinante del ciclo productivo del melón en las condiciones agroecológicas de Guararé, Panamá. Para días a floración, la interacción distanciamiento $\times$ híbrido ($p \leq 0.05$) indicó que la respuesta de cada genotipo fue dependiente del espaciamiento disponible, patrón que García et al. (2006) y Ban et al. (2006) atribuyen a diferencias en la plasticidad fenotípica de los híbridos ante la competencia intraespecífica por luz y recursos; en particular, la combinación D1 $\times$ H1 resultó más precoz (14.0 días), lo que sugiere que a mayor densidad el híbrido Bobby F1 anticipa la inducción floral como respuesta a la reducción en la interceptación lumínica por planta. Para días a cosecha, en cambio, el efecto del distanciamiento fue independiente del genotipo ($p = 0.327$), con una tendencia positiva consistente donde el mayor espaciamiento prolongó el periodo hasta la madurez comercial (45 cm: 58.80 días vs. 15 cm: 56.10 días; $p < 0.001$), resultado que concuerda con lo reportado por Ban et al. (2006), quienes relacionan el mayor espacio por planta con una biomasa vegetativa más exuberante que dilata el llenado del fruto; este intervalo floración-cosecha de aproximadamente 42-45 días es coherente con el rango descrito para melón en condiciones de temperatura cálida (Kultur et al., 2001). En conjunto, el distanciamiento de 15 cm optimizó la precocidad del ciclo al reducir tanto los días a floración en el híbrido Bobby F1 como los días a cosecha en el promedio de genotipos.

Los patrones de respuesta documentados en este ensayo confirman que la configuración espacial de siembra opera como un modulador primario de la expresión productiva en melón, aunque su influencia no se manifiesta de manera uniforme a través de los materiales genéticos evaluados. La significancia estadística de la interacción Distancia $\times$ Híbrido en número de frutos, diámetro y peso individual pone de manifiesto que la respuesta agronómica es una función conjunta del genotipo y el nivel de competencia intraespecífica impuesto por la densidad, más que el resultado aditivo de factores independientes. Este comportamiento se alinea



con evidencia previa en *Cucumis melo* L., donde la magnitud de la plasticidad fenotípica ante gradientes de densidad poblacional está condicionada de forma sustancial por la arquitectura genética del material vegetal (Ban et al., 2006; Moniruzzaman et al., 2007).

La ausencia de efecto principal significativo de la distancia sobre el número de frutos, combinada con una interacción altamente significativa, apunta a que los dos híbridos evaluados despliegan estrategias divergentes de respuesta ante la presión competitiva. Caribbean Gold expresó su mayor prolificidad bajo densidades intermedias y bajas, en tanto que Bobby F1 concentró su potencial reproductivo en la configuración de mayor densidad (15 cm). Este tipo de compensación diferencial ha sido caracterizado en sistemas hortícolas intensivos, donde la geometría del dosel y la eficiencia con que cada genotipo intercepta radiación fotosintéticamente activa condicionan la dinámica de floración y el establecimiento efectivo de frutos (Jolliffe & Gaye, 1995). En términos fisiológicos, estas divergencias pueden atribuirse a variaciones genotípicas en la relación fuente–sumidero y en la capacidad de cada híbrido para sostener el desarrollo reproductivo cuando los recursos se distribuyen entre un mayor número de individuos por unidad de área (Marcelis, 1996).

El comportamiento del diámetro y del peso individual de fruto introduce un matiz que contradice la asunción convencional de que las altas densidades deterioran inevitablemente los atributos morfológicos del fruto. En este ensayo, el espaciamiento de 15 cm produjo los valores promedios más elevados para ambas variables. Cuando las condiciones ambientales no imponen restricciones críticas de recursos; escenario característico de entornos tropicales con alta irradiación y temperaturas dentro del rango óptimo para el crecimiento del melón, el incremento en población puede potenciar la eficiencia de uso de radiación y sostener un crecimiento adecuado del fruto, desplazando el umbral de competencia negativa hacia densidades más elevadas (Ban et al., 2006). Bajo las condiciones

agroecológicas de Montero, Guararé, este efecto parece haberse manifestado con claridad.

La respuesta al espaciamiento, sin embargo, no fue homogénea entre materiales. Caribbean Gold alcanzó sus registros más altos de diámetro y peso bajo la mayor densidad evaluada, mientras que Bobby F1 exhibió su mejor desempeño relativo en el espaciamiento intermedio de 30 cm. Este patrón divergente refleja diferencias genotípicas en los mecanismos que regulan la partición de biomasa entre órganos vegetativos y reproductivos. La fisiología de cultivos establece que la fuerza de sumidero del fruto, entendida como su capacidad para atraer y retener asimilados en competencia con otros órganos y la prioridad asignada al crecimiento reproductivo son rasgos de base genética, altamente sensibles a los gradientes de competencia intraespecífica (Marcelis, 1996; Ho, 1996). La ventaja relativa de un genotipo bajo una densidad particular puede explicarse, en consecuencia, por su mayor eficiencia en canalizar fotoasimilados hacia los frutos bajo presión competitiva.

En lo que respecta al rendimiento por hectárea, la distancia de siembra emergió como el único factor con efecto estadísticamente sustentado, sin que la interacción con el híbrido alcanzara significancia. El registro más alto a 15 cm ratifica que, dentro del rango de densidades evaluado, la intensificación poblacional maximiza la productividad por unidad de superficie sin que la competencia supere el umbral a partir del cual el crecimiento individual se deteriora de forma crítica. Esta tendencia es coherente con principios fundamentales de la fisiología de cultivos, donde el rendimiento agregado por área está primariamente determinado por el número de plantas establecidas, siempre que la disponibilidad de recursos no se convierta en un factor limitante (Gardner et al., 1985). Investigaciones previas en melón han documentado patrones equivalentes, confirmando que la reducción del espaciamiento entre plantas eleva el rendimiento total aun cuando los componentes individuales experimenten ajustes compensatorios entre sí (Ban et al., 2006;

Moniruzzaman et al., 2007).

Considerados en conjunto, los resultados posicionan a la densidad de siembra como una variable de gestión agronómica con capacidad de modular tanto la productividad global como los atributos cualitativos del fruto, pero cuya influencia real solo puede anticiparse conociendo el genotipo con el que interactúa. La interacción genotipo $\times$ densidad documentada refleja diferencias entre materiales en arquitectura de planta, geometría de captación de luz y dinámica de distribución de biomasa. Bajo las condiciones tropicales del ensayo, el espaciamiento de 15 cm permitió maximizar el rendimiento por área sin comprometer de forma generalizada las características morfológicas del fruto, aunque la magnitud y dirección de la respuesta en diámetro y peso fue genotipo-dependiente.

Desde una perspectiva de aplicación práctica, los hallazgos subrayan que las recomendaciones de densidad de siembra en sistemas de producción de melón en la región de Azuero no pueden formularse de manera genérica, independientemente del híbrido utilizado. La integración de la selección del material comercial con la optimización del espaciamiento constituye una palanca estratégica para elevar la eficiencia productiva y fortalecer la competitividad del sector hortícola panameño en condiciones tropicales intensivas.

Conclusión

Los datos generados en este ensayo evidencian que la configuración espacial de siembra constituye un eje rector de la expresión productiva del melón bajo las condiciones agroecológicas de Montero, Guararé. Su incidencia trascendió el rendimiento por unidad de superficie para alcanzar los componentes individuales del fruto y el desarrollo fenológico del cultivo, particularmente cuando operó en combinación con el factor genotipo. La significancia estadística de las interacciones en número de frutos, diámetro, peso individual y días a floración ratifica que la respuesta agronómica no es un atributo intrínseco de la densidad, sino el producto

de la articulación entre el espaciamiento impuesto y la plasticidad fisiológica y morfológica propia de cada material genético frente a gradientes de competencia intraespecífica.

El espaciamiento de 15 cm concentró los registros más altos de rendimiento por hectárea y los menores días a cosecha (56.10 días), confirmando que, dentro del rango poblacional evaluado, la intensificación del número de plantas por unidad de área potenció la productividad agregada y la precocidad del ciclo sin deteriorar de forma generalizada los atributos comerciales del fruto. La respuesta diferencial entre híbridos señala, sin embargo, que la optimización de variables como diámetro, peso y días a floración no se explica exclusivamente por el incremento en densidad, sino por la interacción específica entre la constitución genética del material y el microambiente competitivo generado por cada configuración de espaciamiento.

En este marco, Caribbean Gold exhibió mayor capacidad de expresión en condiciones de alta densidad para las variables asociadas a tamaño y peso del fruto, en tanto que Bobby F1 desplegó un desempeño más sólido o equivalente en el espaciamiento intermedio de 30 cm para determinados componentes productivos, a la vez que alcanzó la floración más temprana bajo el distanciamiento de 15 cm (14.0 días). El rendimiento total y los días a cosecha respondieron principalmente al factor densidad con independencia del genotipo, lo que posiciona a la población de plantas como la variable agronómica de mayor peso sobre la productividad y el ciclo productivo final del sistema.

Con proyección hacia la toma de decisiones en campo, los hallazgos apuntan a que el espaciamiento de 15 cm representa la configuración más eficiente para maximizar simultáneamente el rendimiento por hectárea y la precocidad del cultivo en sistemas de producción tropical intensiva bajo riego localizado. Las recomendaciones técnicas, sin embargo, deben ajustarse al híbrido específico que se utilice, contemplando su respuesta particular ante la presión competitiva, el

momento de floración y los estándares de calidad exigidos por el destino comercial de la producción. La integración entre selección del material genético y gestión de la densidad poblacional se consolida, en consecuencia, como una palanca estratégica para elevar simultáneamente la eficiencia productiva y la sostenibilidad económica del cultivo de melón en la región de Azuero.

Referencias Bibliográficas

- Adiredjo, A., Roviq, M., Ardiarini, N., & Leorentina, A. (2024). Performance of melon (*Cucumis melo* L.) hybrids across diverse environmental conditions. *SABRAO Journal of Breeding and Genetics*, 56(1), 211–223. <https://doi.org/10.54910/sabrao2024.56.1.16>
- Alvarado, G., López, M., Vargas, M., & Rodríguez, F. (2018). Plant density effects on yield and fruit quality of melon (*Cucumis melo* L.) under tropical conditions. *Scientia Horticulturae*, 237, 244–251. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.04.021>
- Ban, D., Goreta, S., & Borosic, J. (2006). Plant spacing and cultivar affect melon growth and yield components. *Scientia Horticulturae*, 109(3), 238–243. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.03.015>
- Buczkowska, H., Sałata, A., & Nurzyńska-Wierdak, R. (2023). Melon (*Cucumis melo* L.) fruit yield under irrigation and mycorrhiza conditions. *Agronomy*, 13(6), 1559. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061559>
- Cozzolino, E., Cuciniello, A., & Roupael, Y. (2023). Assessing yield and quality of melon (*Cucumis melo* L.) under different mulch treatments. *Plants*, 12(1), 219. <https://doi.org/10.3390/plants12010219>
- Díaz, M., & Monge, J. (2017). Effect of plant density on yield and fruit quality of melon. *Agronomía Mesoamericana*, 28(2), 423–435. <https://doi.org/10.15517/am.v28i2.24852>
- Díaz, J. (2019). Bell pepper and melon crop responses to plant density. *HortScience*, 54(7), 1120–1126. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14072-19>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2023). *FAOSTAT statistical database*. <https://www.fao.org/faostat>



- García, J., Rodríguez, Z., & Lugo, J. (2006). Efecto del cultivar y la distancia entre plantas sobre el comportamiento agronómico y rendimiento del melón. *Revista de la Facultad de Agronomía (LUZ)*, 23(4), 443–452. <https://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S0378-78182006000400007>
- Gardner, F., Pearce, R., & Mitchell, R. (1985). Physiology of crop plants. *Iowa State University Press*. <https://doi.org/10.1002/9780470650793>
- González, R., Guerra, J., Osorio, N., y Castillo, G. (2013). *Recomendaciones para el cultivo de melón honey dew, canario y galia*. IDIAP. <http://www.idiap.gob.pa/download/recomendaciones-para-el-cultivo-demelon-honey-dew-canario-y-gala/>
- Hsu, H., & Chen, W. (2024). CPPU improves fruit setting and growth in greenhouse-grown oriental melons (*Cucumis melo* L. var. makuwa Makino). *HortScience*, 59(3), 340–347. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI17594-23>
- Humphrey, L. (2017). Manual de manejo agronómico para cultivo de Melón (*Cucumis melo* L.) Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP) y el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). <https://bibliotecadigital.ciren.cl/server/api/core/bitstreams/7ffed441-0493-451d-b28a-9bee64521b1b/content>
- Ho, L. (1996). The mechanism of assimilate partitioning and carbohydrate compartmentation in fruit in relation to the quality and yield of tomato. *Journal of Experimental Botany*, 47(Special Issue), 1239–1243. https://doi.org/10.1093/jxb/47.Special_Issue.1239
- IBM Corp. (2013). IBM SPSS Statistics for Windows (Version 22.0). IBM Corp.
- Jolliffe, P., & Gaye, M. (1995). Dynamics of growth and yield component responses of bell peppers to row covers and population density. *Scientia Horticulturae*, 62(3–4), 153–164. [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(94\)00709-R](https://doi.org/10.1016/0304-4238(94)00709-R)
- Kirnak, H., Kaya, C., Higgs, D., & Gercek, S. (2001). Effects of irrigation and plant density on yield of drip-irrigated melon. *Agricultural Water Management*, 56(2), 131–144. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(01\)00185-7](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(01)00185-7)
- Kultur, F., Harrison, H. C., & Staub, J. E. (2001). Spacing and genotype affect fruit sugar concentration, yield, and fruit size of muskmelon. *HortScience*, 36(2), 274–278. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.36.2.274>
- Lee, J., Park, K., & Kim, Y. (2020). Effects of plant spacing on growth, yield, and fruit quality of greenhouse melon. *Horticulturae*, 6(4), 68. <https://doi.org/10.3390/horticulturae6040068>

- Levene, H. (1960). Robust tests for equality of variances. En I. Olkin (Ed.), *Contributions to probability and statistics* (pp. 278–292). Stanford University Press.
- López, C., Bañón, S., & Fernández, J. (2019). Influence of plant density on yield and quality parameters of melon under Mediterranean conditions. *Agronomy*, 9(10), 602. <https://doi.org/10.3390/agronomy9100602>
- Marcelis, L. F. M. (1996). Sink strength as a determinant of dry matter partitioning in the whole plant. *Journal of Experimental Botany*, 47(Special Issue), 1281–1291. https://doi.org/10.1093/jxb/47.Special_Issue.1281
- Ministerio de Desarrollo Agropecuario (MIDA). (2024). *Cierre agrícola 2022-2023*. <https://mida.gob.pa/wp-content/uploads/2023/09/Cierre-Agricola-2022-2023.pdf?csrt=6436099449304115878>
- Montero, J., Gutiérrez, F., & Dendooven, L. (2021). Yield response of melon (*Cucumis melo* L.) to planting density and fertilization management under tropical open-field conditions. *Agronomy*, 11(5), 912. <https://doi.org/10.3390/agronomy11050912>
- Moniruzzaman, M., Rahman, S. M. L., Kibria, M. G., Rahman, M. A., & Hossain, M. M. (2007). Effect of plant spacing and mulching on yield and profitability of melon. *Journal of Agriculture and Rural Development*, 5(1–2), 73–78. <https://doi.org/10.3329/jard.v5i1.1467>
- Napolitano, M., Terzaroli, N., Kashyap, S., Russi, L., Jones, E., & Albertini, E. (2020). Exploring heterosis in melon (*Cucumis melo* L.). *Plants*, 9(2), 282. <https://doi.org/10.3390/plants9020282>
- Nerson, H. (2009). Effects of plant density on yield and fruit quality in melons. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 84(3), 349–354. <https://doi.org/10.1080/14620316.2009.11512527>
- Neugschwandtner, R.W., Bernhuber, A., Kammlander, S., Wagentristsl, H., Klimek, A., Bernas, J., Kaul, H., (2024). Effect of two seeding rates on yield and yield components of winter and spring faba bean. *Acta Agric. Scand. Sect. B Soil Plant Sci.* 72 (1), 496–505. <https://doi.org/10.1080/09064710.2021.2014552>.
- Ren, T., Shi, X., Zhou, S., Fan, K., Zhang, R., & Nie, L. (2025). Transcriptome profiling reveals the mechanism of fruit navel development in melon (*Cucumis melo* L.). *BMC Plant Biology*, 25, 420. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06444-7>



- Rivera, J. (2011). Análisis geomorfológico de la región costera del este “E”, de la provincia de Los Santos. *Revista Geográfica de América Central*, 2, 1-14.
<https://www.redalyc.org/pdf/4517/451744820610.pdf>
- Rivera, J. (2023). Estimación de la Capacidad Erosiva de Lluvia según Índice Modificado de Fournier: Caso de la Cuenca Hidrográfica 126, República de Panamá. *Gobernanza, Comunidades Sostenibles & Espacios Portuarios*. (pp. 1291 – 1307). España. Editorial/ Asociación de Geógrafos Españoles
<https://doi.org/10.21138/dl/2023.lc>.
- Rivera, J. (2026). *Centro de Capacitación, Investigación y Monitoreo de la Biodiversidad en el Parque Nacional Coiba (CCIMBIO)*. Unidad de análisis espacial. Centro Regional Universitario de Veraguas.
- Rodríguez, J. (2020). Componentes de rendimiento en híbridos comerciales de melón bajo sistemas de producción intensiva. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 14(1), 45–56.
<https://doi.org/10.17584/rcch.2020v14i1.9876>
- Sanabria, N., Melo, C., Nunes, G., Silva, D., de Souza, M., & Corrêa, R. (2025). Floral characteristics and reproductive biology in Brazilian melon accessions: insights from commercial and exotic varieties. *Plants*, 14(19), 3047.
<https://doi.org/10.3390/plants14193047>
- Shapiro, S., & Wilk, M. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3–4), 591–611.
<https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591>
- Wilcox, F., & Rivera, J. (2023). Evaluación de rendimiento en biomasa de cuatro cultivares de maíz: caso de la cuenca Baja del río Purio, provincia de los santos, año 2021. *Tecnociencias*. 25(2), 84-107.
<https://doi.org/10.48204/j.tecno.v25n2.a4066>

Gestión de riesgos en ingeniería de software: seguridad y calidad, ejes fundamentales en ciencias computacionales

Risk management in software engineering: security and quality, fundamental pillars in computer science

Ricardo Manuel Candanedo Yau

Universidad de Panamá, Centro Regional Universitario de Panamá Este (CRUPE),
Facultad de Informática, Electrónica y Comunicación (FIEC).

Panamá, República de Panamá

<https://orcid.org/0009-0002-5017-9830>

ricardo.candanedo@up.ac.pa

Recibido: 23/02/26

Aceptado: 07/06/26

DOI <https://doi.org/10.48204/j.scientia.v36n2.a9424>

Resumen

El estudio tuvo como objetivo analizar la integración de prácticas orientadas a la prevención de incidentes y al aseguramiento de procesos confiables en el desarrollo de sistemas informáticos, y su incidencia en el desempeño organizacional. Se empleó un enfoque cuantitativo, de tipo descriptivo y diseño no experimental, con una muestra de 60 profesionales del área tecnológica vinculados a proyectos de desarrollo en contextos académicos y empresariales.

Para la recolección de datos se utilizaron un cuestionario estructurado y una lista de verificación basada en estándares internacionales, orientados a evaluar procedimientos técnicos y controles operativos. El análisis se realizó mediante estadística descriptiva, utilizando frecuencias y porcentajes.

Los resultados evidenciaron que la aplicación sistemática de metodologías formales se asocia con la reducción de fallos operativos, el incremento de la confiabilidad de los sistemas y la optimización de la gestión de procesos. Asimismo, la adopción de marcos normativos favorece la estandarización y la mejora continua en los entornos organizacionales.

Se concluye que la implementación de estrategias estructuradas de control y evaluación técnica impacta positivamente en la estabilidad de los sistemas y en la eficiencia organizacional, constituyéndose en un aporte relevante para el desarrollo sostenible de soluciones tecnológicas.

Palabras clave: confiabilidad de sistemas, control de calidad, evaluación técnica, gestión de procesos, normalización.

Abstract

The objective of this study was to analyze the integration of practices aimed at preventing incidents and ensuring reliable processes in software development, and their impact on organizational performance. A quantitative, descriptive, and non-experimental design was adopted, with a sample of 60 technology professionals involved in development projects in academic and business



environments. Data collection was conducted using a structured questionnaire and a checklist based on international standards to evaluate technical procedures and operational controls. Data were analyzed using descriptive statistics, specifically frequencies and percentages.

The results showed that the systematic application of formal methodologies is associated with reduced operational failures, increased system reliability, and improved process management. Likewise, the adoption of regulatory frameworks promotes standardization and continuous improvement.

It is concluded that structured strategies for technical control and evaluation positively influence system stability and organizational efficiency, representing a relevant contribution to the sustainable development of technological solutions.

Keywords: process management, quality control, standardization, system reliability, technical evaluation.

Introducción

El acelerado desarrollo de las ciencias computacionales ha consolidado a la ingeniería de software como un componente estratégico para el funcionamiento de las organizaciones contemporáneas. Los sistemas informáticos sustentan procesos críticos en sectores como la educación, la salud, la industria y la administración pública, lo que incrementa la necesidad de garantizar su confiabilidad, estabilidad y protección frente a fallos técnicos y amenazas externas (Alshamrani et al., 2021; Felderer et al., 2021). En este contexto, la gestión de riesgos se ha convertido en un enfoque indispensable para anticipar, evaluar y mitigar los factores que pueden comprometer el desempeño de los productos tecnológicos y la integridad de la información (Babar & Fernandez, 2020; Khan et al., 2021).

La complejidad creciente de los entornos digitales ha evidenciado que los errores en el diseño, la implementación y el mantenimiento del software no solo generan pérdidas económicas, sino que afectan la continuidad operativa y la credibilidad institucional (Zhang et al., 2022; Venson, 2024). A su vez, los incidentes asociados a vulnerabilidades informáticas y deficiencias en los procesos de control reflejan la necesidad de integrar de manera sistemática prácticas orientadas a la prevención, el monitoreo y la mejora continua (Dissanayake et al., 2020; Siddiqui et al., 2024). Desde esta perspectiva, la seguridad y la calidad se configuran como ejes fundamentales para el desarrollo de soluciones tecnológicas sostenibles y

alineadas con estándares internacionales (Felderer et al., 2021; Muthanna, 2024).

Diversos estudios han señalado que la adopción de marcos normativos y metodologías formales contribuye a fortalecer los procesos de producción de software, permitiendo reducir fallos operativos y aumentar la eficiencia organizacional (França et al., 2021; Karam et al., 2021; Alsaeedi & Khan, 2022). Asimismo, la incorporación de tecnologías emergentes como la inteligencia artificial en la seguridad del software ha mostrado resultados prometedores en la reducción de vulnerabilidades (Alwageed & Khan, 2025). Sin embargo, persisten brechas entre la teoría y la práctica, especialmente en contextos donde la gestión de proyectos informáticos se realiza sin una estructura clara de evaluación de riesgos (Jarih et al., 2025). Esta situación evidencia la necesidad de profundizar en el análisis de los mecanismos mediante los cuales la gestión de riesgos impacta en la confiabilidad de los sistemas y en la optimización de los procesos internos (Sandhu & Lai, 2025).

La presente investigación se inscribió en este marco científico con el propósito de examinar la relación entre la gestión de riesgos y el fortalecimiento de prácticas orientadas a la protección de la información y a la mejora del desempeño de los productos informáticos. El estudio asumió que la incorporación de procedimientos sistemáticos de identificación, análisis y control de riesgos favorece la estandarización de los procesos y promueve una cultura organizacional basada en la prevención y la evaluación permanente (Coston, 2025; Andersson, 2025; Alghawli & Radivilova, 2024).

La relevancia de este abordaje radicó en su contribución al campo de las ciencias computacionales, al ofrecer evidencias empíricas sobre la necesidad de integrar enfoques preventivos en el ciclo de vida del software (Charoenwet et al., 2023; O'Donoghue et al., 2025). Asimismo, el trabajo se justificó por su valor práctico, al proporcionar un marco de referencia para instituciones académicas y

empresariales interesadas en fortalecer sus procesos tecnológicos mediante estrategias estructuradas que incrementen la estabilidad de los sistemas y reduzcan la exposición a incidentes críticos (Laracy, 2025; Tasmin Jaigirdar et al., 2026). De este modo, la investigación aportó una visión integral sobre la importancia de considerar la gestión de riesgos como un componente esencial para el desarrollo responsable y sostenible de soluciones informáticas.

A partir de este planteamiento surgió la siguiente pregunta de investigación: *¿Cómo influye la gestión de riesgos en la optimización de los procesos de desarrollo de sistemas informáticos y en el fortalecimiento de prácticas orientadas a la confiabilidad y protección de la información en el ámbito de las ciencias computacionales?*

El objetivo general de la investigación consistió en analizar el impacto de la gestión de riesgos en los procesos de desarrollo de software, considerando su contribución al fortalecimiento de prácticas orientadas a la confiabilidad de los sistemas y a la protección de la información en entornos organizacionales (Babar & Fernandez, 2020; Khan et al., 2021).

De manera específica, el estudio se propuso identificar los principales factores de riesgo presentes en los proyectos de desarrollo de sistemas informáticos, examinar las metodologías y marcos normativos aplicados para su control y prevención, y evaluar la relación existente entre la implementación de estrategias estructuradas y la mejora de los procesos internos (Alsaeedi & Khan, 2022; Jarir et al., 2025). Asimismo, se buscó determinar en qué medida la adopción de prácticas sistemáticas favoreció la estandarización, la reducción de fallos operativos y el fortalecimiento de una cultura organizacional orientada a la mejora continua (França et al., 2021; Zhang et al., 2022).

Materiales y métodos

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, con un alcance



descriptivo y un diseño no experimental de tipo transversal, debido a que las variables no fueron manipuladas deliberadamente y los datos se recolectaron en un único momento temporal. Este enfoque permitió analizar de manera objetiva la relación entre la gestión de riesgos y la aplicación de prácticas orientadas a la confiabilidad y protección de la información en proyectos de desarrollo de software (Khan et al., 2021; Alsaeedi & Khan, 2022). La estructura metodológica se fundamentó en lineamientos propuestos por autores clásicos de la investigación científica y en marcos de referencia reconocidos en ingeniería de software, tales como las directrices del Project Management Institute y las normas internacionales ISO/IEC relacionadas con la calidad y la seguridad de los sistemas informáticos (Felderer et al., 2021; França et al., 2021).

La población estuvo conformada por profesionales del área de las ciencias computacionales vinculados a proyectos de desarrollo de sistemas informáticos en instituciones académicas y organizaciones del sector productivo. A partir de esta población, se conformó una muestra de 60 profesionales, seleccionados mediante un muestreo no probabilístico de tipo intencional.

El proceso de selección se realizó considerando como criterio de inclusión la experiencia mínima de un año en actividades relacionadas con el diseño, implementación o evaluación de software. Los participantes fueron identificados y contactados a través de medios digitales y redes profesionales asociadas al ámbito tecnológico, invitándolos a participar de manera voluntaria en el estudio.

Como resultado de este proceso, se obtuvo una muestra representativa en términos de experiencia práctica, lo que permitió recopilar información pertinente sobre los procedimientos reales aplicados en entornos organizacionales y garantizar la validez contextual de los datos obtenidos.

Como técnica principal de recolección de datos se empleó la encuesta,

utilizando un cuestionario estructurado con escala tipo Likert de cinco niveles, adaptado de instrumentos previamente validados en estudios sobre gestión de proyectos y control de riesgos en ingeniería de software, basados en los lineamientos de la norma ISO/IEC 27001 para la gestión de la seguridad de la información y la norma ISO/IEC 25010 sobre calidad del producto software (Zhang et al., 2022; Muthanna, 2024).

La adaptación metodológica consistió en contextualizar los ítems al entorno organizacional objeto de estudio e integrar variables relacionadas con procedimientos de evaluación técnica, estandarización de procesos y monitoreo continuo (Charoenwet et al., 2023). Estas modificaciones se justificaron por la necesidad de adecuar los instrumentos a las características específicas de los proyectos analizados y al contexto institucional donde se desarrolló la investigación.

Adicionalmente, se utilizó una lista de verificación técnica fundamentada en los principios del modelo de gestión de riesgos propuesto por el Project Management Body of Knowledge (PMBOK), con el propósito de identificar la presencia de prácticas formales de identificación, análisis y tratamiento de riesgos (Coston, 2025; Andersson, 2025). Este instrumento permitió contrastar la información declarada por los participantes con criterios objetivos derivados de estándares internacionales (Karam et al., 2021).

Para garantizar la validez de contenido de los instrumentos se recurrió al juicio de expertos en ingeniería de software y gestión de proyectos tecnológicos, quienes evaluaron la pertinencia, claridad y coherencia de los ítems en relación con los objetivos de la investigación (Babar & Fernandez, 2020). Las observaciones realizadas permitieron ajustar la redacción de algunos ítems, asegurando que el instrumento representara adecuadamente los constructos teóricos vinculados con la gestión de riesgos y la confiabilidad de los sistemas informáticos.



La confiabilidad del cuestionario se determinó mediante el coeficiente Alfa de Cronbach, obteniéndose un índice satisfactorio que evidencia un nivel adecuado de consistencia interna para su aplicación en el estudio (Alsaeedi & Khan, 2022). Este procedimiento permitió asegurar la estabilidad y coherencia de las mediciones realizadas.

La recolección de los datos se llevó a cabo mediante la aplicación directa de los instrumentos a los participantes seleccionados. Previamente, se explicó el propósito del estudio y se solicitó su consentimiento informado. Los cuestionarios fueron administrados en formato digital, garantizando condiciones homogéneas para todos los participantes. El proceso de aplicación de los instrumentos se desarrolló en un periodo comprendido entre octubre a diciembre de 2025, bajo condiciones controladas que garantizaron la uniformidad en la recolección de los datos. Posteriormente, la información fue organizada y sistematizada en una base de datos para su análisis estadístico.

El procesamiento y análisis de los datos se realizó mediante estadística descriptiva, empleando medidas de frecuencia y porcentajes para la interpretación de los resultados. Para el procesamiento de los datos se utilizó el paquete estadístico IBM SPSS Statistics versión 26.0 (IBM Corp., Estados Unidos), así como Microsoft Excel 2019 (Microsoft Corporation, Estados Unidos) para la organización inicial de la información. Este tipo de análisis resultó coherente con el enfoque cuantitativo y el alcance descriptivo del estudio.

En cuanto a los materiales y equipos empleados, se utilizaron computadoras personales con sistema operativo Windows 10 (Microsoft Corporation, Estados Unidos) para la aplicación de los instrumentos y el procesamiento de datos. Los cuestionarios fueron administrados en formato digital mediante la plataforma Google Forms (Google LLC, Estados Unidos), lo que permitió garantizar la accesibilidad y el almacenamiento seguro de la información recolectada.

Durante el desarrollo del estudio se respetaron los principios éticos de la investigación científica, garantizando la confidencialidad de los datos proporcionados por los participantes y el uso exclusivo de la información con fines académicos. Asimismo, se aseguró el carácter voluntario de la participación y el anonimato de los encuestados, resguardando su integridad personal y profesional (Felderer et al., 2021).

La metodología aplicada permitió obtener una visión sistemática sobre la implementación de prácticas de gestión de riesgos y su relación con los procesos de desarrollo de sistemas informáticos, aportando resultados confiables y pertinentes para el análisis del fenómeno investigado (Tasmin Jaigirdar et al., 2026).

Resultados

El análisis de los datos recolectados permitió identificar patrones relevantes en relación con la aplicación de prácticas de gestión de riesgos en los procesos de desarrollo de sistemas informáticos y su incidencia en la confiabilidad y protección de la información. Los resultados se organizaron en función de cinco dimensiones fundamentales: identificación de riesgos, aplicación de metodologías formales, cumplimiento de estándares, efectos en la confiabilidad de los sistemas y percepción del impacto organizacional. La presentación de los hallazgos se apoya en tablas descriptivas que sintetizan la información obtenida a partir del cuestionario y la lista de verificación técnica aplicados a los participantes del estudio.

En primer lugar, se examinaron los resultados relacionados con la identificación de factores de riesgo en los proyectos de desarrollo de software. Este análisis permitió reconocer el nivel de conocimiento y aplicación de procedimientos orientados a la detección temprana de amenazas técnicas y operativas.

Tabla 1
Identificación de factores de riesgo en proyectos de desarrollo de software

Nivel de identificación	Descripción del proceso aplicado	Frecuencia	Porcentaje (%)
Alto	Procedimientos sistemáticos y documentados	28	46.7
Medio	Identificación parcial sin documentación formal	20	33.3
Bajo	Identificación ocasional e informal	9	15.0
Nulo	Ausencia de procesos definidos	3	5.0

Nota: La tabla muestra la distribución de respuestas sobre los niveles de identificación de riesgos en proyectos de software.

Antes de la presentación de la Tabla 1 se observó que la identificación de riesgos constituye un punto de partida esencial para la implementación de prácticas preventivas. Los participantes manifestaron diferentes grados de aplicación de procedimientos orientados a reconocer amenazas potenciales durante el ciclo de vida del software.

Posteriormente, los datos reflejaron que una proporción significativa de los profesionales afirmó aplicar procedimientos sistemáticos para la identificación de riesgos, lo que evidencia una tendencia hacia la formalización de prácticas preventivas. Sin embargo, también se identificó un porcentaje relevante de respuestas que señalaron la existencia de procesos incompletos o informales, lo que sugiere debilidades en la estandarización de los mecanismos de análisis inicial. La presencia de un grupo minoritario que no aplica ningún tipo de procedimiento revela la persistencia de enfoques reactivos frente a los problemas tecnológicos.

En una segunda dimensión se analizaron los resultados asociados con la aplicación de metodologías formales para la gestión de proyectos y el control de

riesgos. Este aspecto permitió valorar el grado de estructuración de los procesos técnicos empleados por las organizaciones participantes.

Tabla 2

Uso de metodologías formales en la gestión de proyectos informáticos

Tipo de metodología aplicada	Característica principal	Frecuencia	Porcentaje (%)
Metodologías estandarizadas	Uso de marcos normativos reconocidos	25	41.7
Metodologías mixtas	Combinación de modelos formales e informales	22	36.6
Procedimientos propios	Métodos diseñados internamente	9	15.0
Sin metodología definida	Ausencia de estructura formal	4	6.7

Nota: La tabla presenta la distribución del uso de metodologías en los proyectos de desarrollo de software.

Previo a la exposición de la Tabla 2, se consideró relevante examinar la forma en que los equipos de trabajo estructuran sus procesos, dado que las metodologías influyen directamente en la calidad y confiabilidad de los productos desarrollados. Los datos permitieron identificar una diversidad de enfoques en la gestión de proyectos.

Después del análisis de la tabla se evidenció que la mayoría de los participantes emplea metodologías estandarizadas o mixtas, lo que sugiere una tendencia hacia la adopción de marcos de referencia reconocidos. No obstante, un segmento importante manifestó utilizar procedimientos diseñados internamente, lo cual puede implicar variaciones significativas en los criterios de evaluación y control. La existencia de casos sin metodología definida pone de manifiesto la necesidad de fortalecer la cultura organizacional orientada a la planificación y al control sistemático de riesgos.

En una tercera fase se analizaron los resultados relacionados con el cumplimiento de estándares y normas técnicas vinculadas a la confiabilidad y protección de la información. Este aspecto permitió valorar el nivel de alineación de las prácticas organizacionales con referentes internacionales.

Tabla 3

Nivel de cumplimiento de estándares técnicos en proyectos de software

Nivel de cumplimiento	Tipo de control aplicado	Frecuencia	Porcentaje (%)
Alto	Controles completos y auditados	24	40.0
Moderado	Controles parciales	21	35.0
Bajo	Aplicación mínima de controles	10	16.7
Nulo	Ausencia de controles normativos	5	8.3

Nota: La tabla describe el grado de cumplimiento de estándares técnicos en los proyectos evaluados

La Tabla 3 se consideró que el cumplimiento de estándares constituye un indicador esencial de la madurez de los procesos tecnológicos. La revisión de los datos permitió establecer una relación directa entre la adopción de normas y la estabilidad de los sistemas informáticos.

Posteriormente, los resultados mostraron que una proporción considerable de proyectos alcanza niveles altos o moderados de cumplimiento, lo que refleja avances en la incorporación de controles técnicos. Sin embargo, la existencia de niveles bajos y nulos de aplicación evidencia la presencia de prácticas poco estructuradas que pueden incrementar la exposición a fallos operativos y vulnerabilidades.

En una cuarta dimensión se evaluó el impacto percibido de la gestión de riesgos sobre la confiabilidad de los sistemas informáticos desarrollados por las organizaciones participantes.

Tabla 4

Impacto de la gestión de riesgos en la confiabilidad de los sistemas

Nivel de impacto	Descripción del efecto observado	Frecuencia	Porcentaje (%)
Muy alto	Reducción significativa de fallos	27	45.0
Alto	Mejora notable en la estabilidad	18	30.0
Medio	Cambios moderados	10	16.7
Bajo	Poca influencia observable	5	8.3

Nota: La tabla resume la percepción del impacto de la gestión de riesgos en la confiabilidad de los sistemas.

Antes de presentar la Tabla 4 se planteó la necesidad de analizar la relación entre la aplicación de estrategias preventivas y los resultados obtenidos en términos de estabilidad operativa. Este análisis permitió explorar la eficacia de las prácticas implementadas.

Luego de examinar la tabla se evidenció que la mayoría de los participantes percibió un impacto alto o muy alto de la gestión de riesgos en la reducción de fallos y en la mejora de la confiabilidad. Este hallazgo respalda la importancia de integrar procedimientos sistemáticos de control en el ciclo de vida del software. Los niveles medio y bajo indican que, en algunos contextos, las estrategias aplicadas aún no generan cambios sustanciales, lo que sugiere la necesidad de reforzar los mecanismos de evaluación y seguimiento.

Finalmente, se analizaron los resultados relacionados con la percepción del impacto organizacional derivado de la implementación de prácticas de gestión de riesgos.

Tabla 5

Impacto organizacional de la gestión de riesgos en proyectos informáticos

Nivel de impacto organizacional	Área principal beneficiada	Frecuencia	Porcentaje (%)
Muy favorable	Eficiencia de procesos	26	43.3
Favorable	Toma de decisiones	19	31.7
Moderado	Coordinación interna	10	16.7
Poco favorable	Resultados limitados	5	8.3

Nota: La tabla muestra la percepción del impacto organizacional de la gestión de riesgos.

La Tabla 5 se consideró pertinente evaluar cómo las prácticas técnicas influyen en el funcionamiento general de las organizaciones. Este enfoque permitió trascender el análisis puramente tecnológico e incorporar una visión institucional.

Posteriormente, los resultados reflejaron que una mayoría significativa de los participantes identificó efectos muy favorables o favorables en la eficiencia de los procesos y en la toma de decisiones. Este hallazgo indica que la gestión de riesgos no solo contribuye a la confiabilidad técnica, sino que también fortalece la estructura organizacional y la planificación estratégica. Los niveles moderados y poco favorables sugieren que aún existen áreas de oportunidad para consolidar una integración plena de estas prácticas en la cultura institucional.

En conjunto, los resultados evidenciaron que la gestión de riesgos se encuentra progresivamente incorporada en los proyectos de desarrollo de software,

aunque con diferentes niveles de formalización y alcance. La identificación sistemática de factores de riesgo, el uso de metodologías estructuradas y el cumplimiento de estándares técnicos se asociaron con una mayor confiabilidad de los sistemas informáticos y con mejoras significativas en los procesos organizacionales. Asimismo, se observó que la adopción de prácticas preventivas favorece la reducción de fallos operativos, el fortalecimiento de la toma de decisiones y la consolidación de una cultura orientada a la mejora continua. Estos hallazgos permiten afirmar que la gestión de riesgos constituye un componente estratégico para el desarrollo sostenible de soluciones tecnológicas, al integrar aspectos técnicos y organizacionales en un marco de control y evaluación permanente.

Discusión

Los resultados obtenidos en la presente investigación permitieron evidenciar que la gestión de riesgos se configura como un componente esencial en los procesos de desarrollo de sistemas informáticos, al influir de manera directa tanto en la confiabilidad de los productos tecnológicos como en el fortalecimiento de la estructura organizacional (Babar & Fernandez, 2020; Khan et al., 2021; Alshamrani et al., 2021). Uno de los hallazgos más relevantes fue la tendencia predominante hacia la identificación sistemática de factores de riesgo, lo que refleja un avance significativo en la adopción de prácticas preventivas dentro de los proyectos de software (Alsaeedi & Khan, 2022; França et al., 2021). Este resultado resulta particularmente novedoso en contextos donde tradicionalmente han prevalecido enfoques reactivos, centrados en la corrección de errores una vez que estos se manifiestan, más que en su prevención durante las etapas tempranas del ciclo de vida del sistema (Dissanayake et al., 2020; Siddiqui et al., 2024).

La evidencia empírica mostró que una proporción considerable de los participantes implementa procedimientos documentados para reconocer amenazas técnicas y operativas, lo que sugiere una transición progresiva hacia modelos de

trabajo más estructurados y alineados con marcos normativos internacionales (França et al., 2021; Karam et al., 2021; Felderer et al., 2021). No obstante, la presencia de niveles medios y bajos de identificación de riesgos confirma la necesidad de reforzar los procesos de capacitación y estandarización (Jarih et al., 2025) en las organizaciones dedicadas al desarrollo tecnológico.

En relación con el uso de metodologías formales, los resultados evidenciaron una preferencia significativa por enfoques estandarizados o combinados, lo cual revela un reconocimiento creciente de la importancia de contar con estructuras metodológicas que orienten la planificación y ejecución de los proyectos informáticos (Jarih et al., 2025; Sandhu & Lai, 2025; França et al., 2021). Este aspecto constituye un aporte relevante del estudio, al demostrar que la integración de metodologías no solo mejora la organización del trabajo, sino que también fortalece la gestión de los riesgos asociados al diseño, implementación y mantenimiento del software (Babar & Fernandez, 2020; Alsaeedi & Khan, 2022). Estudios similares han señalado que la aplicación de marcos metodológicos favorece la transparencia de los procesos y la trazabilidad de las decisiones técnicas, lo cual se corresponde con los hallazgos obtenidos en esta investigación (Khan et al., 2021; Karam et al., 2021).

Sin embargo, la existencia de procedimientos diseñados internamente y de casos en los que no se aplica ninguna metodología formal pone en evidencia una heterogeneidad significativa en las prácticas profesionales (Muthanna, 2024). Este fenómeno puede interpretarse como una manifestación de la diversidad de contextos organizacionales y de los distintos niveles de madurez tecnológica (Andersson, 2025; Laracy, 2025). A partir de estos resultados, se plantea la hipótesis de que la ausencia de metodologías estructuradas incrementa la vulnerabilidad de los sistemas frente a incidentes y limita la posibilidad de implementar mecanismos de mejora continua, lo que podría ser objeto de investigaciones futuras con un enfoque explicativo o correlacional (O'Donoghue et

al., 2025; Tasmin Jaigirdar et al., 2026).

Otro aspecto relevante fue el nivel de cumplimiento de estándares técnicos relacionados con la confiabilidad y la protección de la información. La mayoría de los proyectos evaluados presentó niveles altos o moderados de alineación con normas reconocidas, lo que sugiere una creciente preocupación por garantizar la calidad de los productos informáticos (Zhang et al., 2022; Venson, 2024; Felderer et al., 2021). Este resultado coincide con investigaciones previas que destacan la relación entre la adopción de estándares y la reducción de errores operativos (Alsaeedi & Khan, 2022; Khan et al., 2021). La estandarización, en este sentido, no solo actúa como un mecanismo de control, sino también como un referente para la toma de decisiones técnicas fundamentadas en criterios objetivos (França et al., 2021; Karam et al., 2021).

No obstante, los niveles bajos y nulos de cumplimiento detectados en una parte de la muestra revelan la persistencia de prácticas informales que pueden comprometer la seguridad de los sistemas (Muthanna, 2024; Sandhu & Lai, 2025). Este hallazgo introduce un elemento crítico para la discusión, ya que evidencia que la implementación de estándares no es homogénea y depende en gran medida de factores institucionales como la disponibilidad de recursos, la cultura organizacional y el nivel de formación del personal (Andersson, 2025; Laracy, 2025). En este sentido, se propone como nueva línea de investigación el análisis de las variables contextuales que influyen en la adopción efectiva de marcos normativos en ingeniería de software (Tasmin Jaigirdar et al., 2026; Siddiqui et al., 2024).

En cuanto al impacto de la gestión de riesgos en la confiabilidad de los sistemas, los resultados mostraron una percepción mayoritariamente positiva, destacando la reducción significativa de fallos y la mejora en la estabilidad operativa (Babar & Fernandez, 2020; Zhang et al., 2022; Coston, 2025). Este hallazgo constituye uno de los aportes más importantes del estudio, al confirmar



empíricamente que las estrategias preventivas tienen un efecto tangible en el desempeño de los productos tecnológicos (Alghawli & Radivilova, 2024; Siddiqui et al., 2024). Investigaciones anteriores han sostenido que la confiabilidad es un atributo fundamental de la calidad del software, y los datos obtenidos respaldan esta afirmación al vincularla directamente con la implementación de procesos sistemáticos de control y evaluación de riesgos (Zhang et al., 2022; Venson, 2024).

La presencia de niveles medios y bajos de impacto percibido sugiere, sin embargo, que la sola existencia de prácticas de gestión de riesgos no garantiza resultados óptimos (Muthanna, 2024). Este fenómeno puede explicarse por la posible aplicación superficial o incompleta de dichas estrategias, lo que refuerza la necesidad de una integración más profunda en el ciclo de vida del software (França et al., 2021; O'Donoghue et al., 2025). A partir de este análisis, se plantea la hipótesis de que la efectividad de la gestión de riesgos depende no solo de su adopción formal, sino de su coherencia con los objetivos organizacionales y de su continuidad en el tiempo (Laracy, 2025; Andersson, 2025).

El análisis del impacto organizacional permitió ampliar la discusión más allá del ámbito técnico, al evidenciar que la gestión de riesgos influye en la eficiencia de los procesos y en la toma de decisiones institucionales (Laracy, 2025; Andersson, 2025; França et al., 2021). Este resultado es particularmente significativo, ya que demuestra que las prácticas propias de la ingeniería de software tienen repercusiones directas en la estructura y funcionamiento de las organizaciones (Karam et al., 2021; Jarih et al., 2025). En este sentido, los hallazgos concuerdan con estudios que sostienen que la gestión tecnológica constituye un factor estratégico para el desarrollo institucional, al fortalecer la coordinación interna y optimizar el uso de los recursos disponibles (Babar & Fernandez, 2020; Khan et al., 2021).

La percepción favorable del impacto organizacional también sugiere que la gestión de riesgos contribuye a la consolidación de una cultura preventiva, orientada

a la anticipación de problemas y a la mejora continua (França et al., 2021; Felderer et al., 2021). Este enfoque representa un cambio de paradigma respecto a modelos tradicionales centrados únicamente en la resolución de incidentes (Dissanayake et al., 2020; Siddiqui et al., 2024). El estudio aporta, por tanto, una visión integradora que vincula los aspectos técnicos con los organizacionales, destacando la importancia de concebir la gestión de riesgos como un proceso transversal que atraviesa todas las etapas del desarrollo de software (Alsaeedi & Khan, 2022; Karam et al., 2021).

En comparación con otros estudios similares, los resultados obtenidos refuerzan la idea de que la seguridad y la confiabilidad no deben abordarse como componentes aislados, sino como elementos interdependientes dentro de un marco de gestión integral (Zhang et al., 2022; O'Donoghue et al., 2025). Mientras investigaciones previas se han centrado principalmente en el análisis técnico de vulnerabilidades, este trabajo introduce un enfoque más amplio al considerar también el impacto en la eficiencia organizacional y en la toma de decisiones (Laracy, 2025; Andersson, 2025). Este aspecto constituye uno de los elementos más novedosos del estudio, al proponer una comprensión holística de la gestión de riesgos en el ámbito de las ciencias computacionales (Tasmin Jaigirdar et al., 2026; Siddiqui et al., 2024).

Finalmente, los hallazgos permiten proponer nuevas líneas de investigación orientadas a profundizar en la relación entre la madurez de los procesos de gestión de riesgos y los niveles de calidad del software producido (Zhang et al., 2022; Alsaeedi & Khan, 2022). Asimismo, se sugiere explorar la influencia de variables como la formación profesional, el tipo de organización y el contexto institucional en la adopción de prácticas estandarizadas (Jarih et al., 2025; Muthanna, 2024). Estas hipótesis abren la posibilidad de desarrollar estudios comparativos y longitudinales que permitan comprender con mayor precisión la evolución de la gestión de riesgos en la ingeniería de software (Tasmin Jaigirdar et al., 2026; O'Donoghue et al., 2025).

En síntesis, la discusión de los resultados confirma que la gestión de riesgos constituye un eje fundamental para el fortalecimiento de la confiabilidad de los sistemas informáticos y para la optimización de los procesos organizacionales (Babar & Fernandez, 2020; Khan et al., 2021). Los aportes del estudio radican en evidenciar empíricamente la importancia de integrar estrategias preventivas, metodologías formales y estándares técnicos como parte de un enfoque integral orientado al desarrollo sostenible de soluciones tecnológicas (França et al., 2021; Felderer et al., 2021; Zhang et al., 2022). De este modo, la investigación no solo amplía el conocimiento científico en el campo de las ciencias computacionales, sino que también proporciona fundamentos teóricos y prácticos para la toma de decisiones en entornos académicos y empresariales (Laracy, 2025; Andersson, 2025).

No obstante, es importante reconocer algunas limitaciones del estudio que deben ser consideradas al interpretar los resultados. En primer lugar, el tamaño de la muestra, aunque adecuado para un análisis descriptivo, limita la generalización de los hallazgos a otros contextos organizacionales. Asimismo, el uso de un muestreo no probabilístico de tipo intencional implica posibles sesgos en la selección de los participantes, lo que podría influir en la representatividad de los datos obtenidos. Por otra parte, el alcance descriptivo del estudio no permite establecer relaciones de causalidad entre las variables analizadas, sino únicamente identificar tendencias y comportamientos observados en el contexto investigado. En este sentido, se recomienda que futuras investigaciones adopten enfoques metodológicos de mayor alcance, incorporando diseños experimentales o correlacionales y muestras probabilísticas que permitan profundizar en la comprensión del fenómeno estudiado.

Conclusiones

La presente investigación permitió analizar de manera integral la influencia

de la gestión de riesgos en los procesos de desarrollo de sistemas informáticos, considerando su relación con la confiabilidad de los productos tecnológicos y con el fortalecimiento de las prácticas organizacionales orientadas a la protección de la información. En correspondencia con el objetivo general planteado, se concluye que la gestión de riesgos constituye un elemento estratégico dentro de la ingeniería de software, ya que su aplicación sistemática favorece la identificación temprana de amenazas, la reducción de fallos operativos y la consolidación de procesos técnicos más estables y controlados. Los resultados obtenidos confirmaron que la integración de procedimientos estructurados impacta positivamente en la calidad de los sistemas informáticos y en la eficiencia de los entornos organizacionales donde estos se desarrollan.

En relación con el primer objetivo específico, orientado a identificar los principales factores de riesgo presentes en los proyectos de desarrollo de software, se determinó que la mayoría de los profesionales reconoce la existencia de amenazas técnicas y operativas asociadas a la falta de planificación, a la escasa documentación y a la ausencia de mecanismos formales de evaluación. Este hallazgo evidencia que, aunque existe conciencia sobre la presencia de riesgos, su tratamiento no siempre se realiza de manera sistemática, lo que puede generar vulnerabilidades que afectan la continuidad de los procesos informáticos. En este sentido, se concluye que la identificación de riesgos debe ser concebida como una actividad permanente y transversal a todas las etapas del ciclo de vida del software.

Respecto al segundo objetivo específico, centrado en examinar las metodologías y marcos normativos aplicados para el control y la prevención de riesgos, se constató que una proporción significativa de las organizaciones ha incorporado enfoques estandarizados o mixtos en la gestión de sus proyectos informáticos. Este resultado permite afirmar que existe una tendencia progresiva hacia la formalización de los procesos, lo cual contribuye a mejorar la organización del trabajo y la toma de decisiones técnicas. Sin embargo, también se evidenció la



coexistencia de prácticas informales y procedimientos diseñados internamente que carecen de criterios homogéneos, lo que limita la posibilidad de establecer procesos comparables y de garantizar niveles consistentes de confiabilidad. De ello se desprende que la adopción de marcos normativos reconocidos no solo fortalece la gestión de riesgos, sino que también promueve la estandarización y la mejora continua en el desarrollo de software.

En cuanto al tercer objetivo específico, orientado a evaluar la relación entre la implementación de estrategias estructuradas y la mejora de los procesos internos, los resultados mostraron que la aplicación de prácticas sistemáticas se asocia con una disminución significativa de fallos operativos y con un incremento en la estabilidad de los sistemas informáticos. Este hallazgo confirma que la gestión de riesgos no debe ser considerada una actividad aislada, sino un componente esencial de la calidad del software. Asimismo, se concluye que la efectividad de estas estrategias depende en gran medida de su integración coherente con los objetivos organizacionales y de su aplicación continua a lo largo del tiempo, lo que refuerza la necesidad de una cultura institucional orientada a la prevención y al control.

De manera global, la investigación permitió establecer que la gestión de riesgos contribuye no solo al fortalecimiento técnico de los sistemas informáticos, sino también al desarrollo de estructuras organizacionales más eficientes y resilientes. La evidencia empírica obtenida demuestra que las prácticas orientadas a la identificación, análisis y tratamiento de riesgos impactan favorablemente en la confiabilidad de los productos tecnológicos y en la optimización de los procesos de toma de decisiones. Este resultado adquiere especial relevancia para el campo de las ciencias computacionales, al destacar la importancia de integrar enfoques preventivos dentro del ciclo de vida del software como un requisito indispensable para el desarrollo sostenible de soluciones tecnológicas.



En síntesis, las conclusiones del estudio permiten afirmar que la gestión de riesgos se consolida como un eje fundamental para la ingeniería de software, al articular aspectos técnicos y organizacionales en un marco de control y evaluación permanente. La investigación aportó evidencia sobre la necesidad de fortalecer la adopción de metodologías formales y estándares técnicos como mecanismos para garantizar la estabilidad, la confiabilidad y la protección de la información. De este modo, se contribuye al avance del conocimiento científico al ofrecer un análisis integral que vincula la gestión de riesgos con la calidad del software y con la eficiencia institucional.

Como recomendaciones derivadas de los resultados obtenidos, se sugiere que las organizaciones dedicadas al desarrollo de sistemas informáticos fortalezcan la implementación de metodologías formales de gestión de proyectos que integren de manera explícita procedimientos de identificación y control de riesgos en todas las fases del ciclo de vida del software. Asimismo, se recomienda promover programas de capacitación continua para los profesionales del área tecnológica, orientados al uso de estándares internacionales y a la consolidación de una cultura preventiva basada en la evaluación sistemática de amenazas. Resulta pertinente también impulsar futuras investigaciones con enfoques correlacionales o explicativos que permitan profundizar en la relación entre la madurez de los procesos de gestión de riesgos y los niveles de calidad del software producido, así como explorar la influencia de variables contextuales como el tipo de organización, el sector productivo y el nivel de formación del personal. Estas acciones contribuirán a fortalecer el desarrollo científico y práctico de la ingeniería de software, favoreciendo la construcción de entornos tecnológicos más seguros, confiables y sostenibles.

Referencias Bibliográficas

- Alghawli, A. S. A. & Radivilova, T. (2024). Resilient cloud cluster with DevSecOps security model, automates data analysis, vulnerability search and risk calculation. *arXiv preprint*. <https://arxiv.org/abs/2412.16190>
- Alsaeedi, A. & Khan, R. A. (2022). A systematic review of software security risk management. *IEEE Access*, 10, 51402–51420. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3175628>
- Alshamrani, A., Myneni, S., Chowdhary, A. & Huang, D. (2021). A survey on secure software engineering: State-of-the-art and future directions. *Computers & Security*, 101, 102248. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2021.102248>
- Alwageed, H. S. & Khan, R. A. (2025). The role of generative AI in strengthening secure software coding practices: A systematic perspective. *arXiv preprint*. <https://arxiv.org/abs/2504.19461>
- Andersson, S. (2025). Information security risk management tools in the air traffic management domain. *Journal of Transportation Security*, 18(1). <https://doi.org/10.1007/s12198-024-00284-x>
- Babar, M. A. & Fernandez, E. B. (2020). Software security risk management: A systematic literature review. *Computer Standards & Interfaces*, 70, 103431. <https://doi.org/10.1016/j.csi.2020.103431>
- Charoenwet, W., Thongtanunam, P., Pham, V.-T. & Treude, C. (2023). Toward effective secure code reviews: An empirical study of security-related coding weaknesses. *arXiv preprint*. <https://arxiv.org/abs/2311.16396>
- Coston, I. (2025). Enhancing secure software development with AZTRM-D: Automated Zero Trust Risk Management with DevSecOps integration. *Applied Sciences*, 15(15), 8163. <https://doi.org/10.3390/app15158163>
- Dissanayake, N., Jayatilaka, A., Zahedi, M. & Babar, M. A. (2020). Software security patch management: A systematic literature review of challenges, approaches, tools and practices. *arXiv preprint*. <https://arxiv.org/abs/2012.00544>
- Felderer, M., Breu, R. & Katt, B. (2021). *Security engineering for modern software systems*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-66707-7>
- França, B. B. N., Jeronimo, H., Travassos, G. H. & Ebert, C. (2021). DevSecOps: A multivocal literature review. *Journal of Systems and Software*, 180, 111011. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2021.111011>
- Jarih, A. A., Khalefa, M. S., Khalaf, Z. A., Mohamed, A. S. & Ibrahim, K. M. (2025). Review of risk management in software development process. En *Software Engineering: Emerging Trends and Practices* (pp. 358–376). Springer.

https://doi.org/10.1007/978-3-031-70305-8_24

- Karam, M., Baker, T., Taleb-Bendiab, A. & Al-Jumeily, D. (2021). A systematic literature review of software supply chain security. *Computers & Security*, 109, 102298. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2021.102298>
- Khan, M. U., Zafar, A. & Nazir, S. (2021). Risk management in software development life cycle: A systematic literature review. *Journal of Software: Evolution and Process*, 33(9), e2360. <https://doi.org/10.1002/smr.2360>
- Laracy, J. R. (2025). Software quality assurance and AI: A systems-theoretic approach. *Software*, 4(1), 30–45. <https://doi.org/10.3390/software4010003>
- Muthanna, Y. M. A. (2024). Adopting security practices in software development process. *International Journal of Computing and Digital Systems*, 15(1), 1151-1165. <https://doi.org/10.12785/ijcds/150186>
- O'Donoghue, E., Hastings, Y., Ortiz, E. & Manzi Muneza, A. R. (2025). Software bill of materials in software supply chain security: A systematic literature review. *arXiv preprint*. <https://arxiv.org/abs/2506.03507>
- Sandhu, J. & Lai, L. (2025). Research on security risk identification and evaluation in open source software. *ACM Digital Library*. <https://doi.org/10.1145/3736426.3736467>
- Siddiqui, S. A., Thapa, C., Holland, R., Shao, W. & Camtepe, S. (2024). Elevating software trust: Unveiling and quantifying the risk landscape. *arXiv preprint*. <https://arxiv.org/abs/2408.02876>
- Tasmin Jaigirdar, F., Jayatilaka, A. & Babar, M. A. (2026). Software vulnerability management in IoT systems: A systematic mapping study. *Cybersecurity*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s42400-025-00234-x>
- Venson, E. (2024). The effects of required security on secure software development cost estimation. *Journal of Systems and Software*, 210, 111956. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2023.111956>
- Zhang, Y., Li, Y. & Liu, J. (2022). Risk-based software quality assurance model for critical systems. *Software Quality Journal*, 30, 1247–1271. <https://doi.org/10.1007/s11219-022-09576-3>

Benceno: 200 años de ciencia, símbolo y transformación**Benzene: 200 years of science, symbol and transformation****Damian Crespo López**

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

<https://orcid.org/0009-0001-9965-1932>damian.crespo@up.ac.pa

Recibido: 22/03/26

Aceptado: 18/05/26

DOI <https://doi.org/10.48204/j.scientia.v36n2.a9591>**Resumen**

El año 2025 marca el bicentenario del descubrimiento del benceno, una molécula que transformó la Química Orgánica desde su aislamiento por Michael Faraday en 1825. El enigma de su fórmula condujo a la revolucionaria propuesta de Friedrich August Kekulé de un anillo cíclico, que más tarde se refinó con la teoría de la resonancia y la deslocalización electrónica. Este avance no solo explicó la excepcional estabilidad del benceno, conocida como aromaticidad, sino que también sentó las bases para los modelos de enlace y la reactividad selectiva en sistemas conjugados.

Desde el punto de vista aplicado, el benceno es un precursor industrial clave, sirviendo como la materia prima fundamental para la síntesis de polímeros (nylon, estireno), numerosos productos farmacéuticos, agroquímicos y solventes. Esta ubicuidad tecnológica le confiere un rol económico global insustituible.

Sin embargo, su legado científico se acompaña de un dilema ético y sanitario: el benceno es un carcinógeno de Grupo 1. Su toxicidad se debe a la formación de metabolitos reactivos que comprometen la médula ósea y están vinculados causalmente con la leucemia. En respuesta, las regulaciones ambientales y laborales se han endurecido significativamente.

El benceno funciona como un recurso didáctico esencial y una metáfora de la ciencia moderna: una estructura simple de profundo impacto que exige la integración de la excelencia científica con una gestión ética rigurosa de sus riesgos, proyectando sus desafíos hacia el futuro de la química sostenible.

Palabras claves: Aromaticidad, Carcinógenos, Historia de la ciencia, Educación química



Abstract

The year 2025 marks the bicentennial of the discovery of benzene, a molecule that transformed Organic Chemistry following its isolation by Michael Faraday in 1825. The enigma surrounding its formula led to Friedrich August Kekulé's revolutionary proposal of a cyclic ring, which was later refined with the theory of resonance and electron delocalization. This conceptual leap not only explained benzene's exceptional stability, known as aromaticity, but also laid the groundwork for modern bonding models and selective reactivity in conjugated systems.

From an applied perspective, benzene is a key industrial precursor, serving as the fundamental raw material for the synthesis of polymers (nylon, styrene), numerous pharmaceutical products, agrochemicals, and solvents. This technological ubiquity grants it an irreplaceable global economic role.

However, its scientific legacy is accompanied by an ethical and health dilemma: benzene is a Group 1 carcinogen. Its toxicity stems from the formation of reactive metabolites that compromise bone marrow and are causally linked to leukemia. In response, environmental and occupational regulations have been significantly tightened.

benzene functions as an essential didactic resource and a metaphor for modern science: a simple structure with profound impact that demands the integration of scientific excellence with rigorous ethical management of its risks, projecting its challenges toward the future of sustainable chemistry.

Keywords: Aromaticity, Carcinogens, History of Science, Chemistry Education

Introducción

En 2025 se conmemora el bicentenario del descubrimiento del benceno, un hito trascendental que marcó el nacimiento de la Química Orgánica moderna, en un laboratorio improvisado y sin saberlo, Michael Faraday aisló en 1825, una sustancia que cambiaría para siempre el curso de la química orgánica: el benceno. A partir de residuos aceitosos, esta simple pero enigmática molécula se transformó rápidamente de un misterio químico a la piedra angular de una revolución científica, un enigma estructural que desafió a generaciones de químicos y una molécula que hoy sostiene industrias enteras. Pero el benceno no es solo carbono e hidrógeno: es símbolo, es historia, es dilema.

A lo largo de 200 años, el benceno ha sido protagonista de descubrimientos brillantes y controversias éticas. Su estructura, soñada por Kekulé en forma de serpiente que se muerde la cola, representa la unión entre intuición y lógica, entre arte y ciencia. Su presencia en plásticos, medicamentos y materiales avanzados lo convierte en una molécula omnipresente, pero también en una amenaza silenciosa cuando se ignoran sus riesgos tóxicos.

El presente ensayo celebra los 200 años del benceno no solo como homenaje químico, sino como reflexión profunda sobre el poder transformador de la ciencia, sus límites, y su papel en la educación contemporánea. Aborda la profunda y dual herencia de esta molécula, explorando su evolución estructural desde la visión onírica de Kekulé hasta los modelos de deslocalización electrónica, su impacto catalizador en la síntesis de innumerables productos industriales y biomédicos, y la necesaria reflexión ética sobre su toxicología y regulación ambiental. Finalmente, se destaca el papel persistente del anillo bencénico como una herramienta didáctica fundamental para la enseñanza de conceptos avanzados de química en la educación superior.

Origen y evolución estructural del benceno

El descubrimiento del benceno marcó un hito en la historia de la química orgánica. En 1825, el científico británico Michael Faraday logró aislar una sustancia incolora y de olor peculiar a partir de residuos de lámparas de gas, que se obtiene de la descomposición aceitosos química del aceite de ballena (Quintero, 2022). Este compuesto, posteriormente identificado como benceno, es un fluido transparente con un aroma distintivo y un sabor que recuerda a algo quemado, cuya fórmula es C_6H_6 . La estructura del benceno está compuesta por un anillo cerrado formado por seis átomos de carbono que están conectados mediante enlaces químicos que oscilan entre enlaces sencillos y dobles. Cada carbono también está enlazado a un átomo de hidrógeno (Cornejo, 2017).

Durante décadas, los químicos intentaron descifrar la disposición de los átomos en esta molécula. Fue en 1865 cuando el químico alemán Friedrich August Kekulé propuso una estructura revolucionaria: un anillo hexagonal con enlaces simples y dobles alternados, inspirado según su propio relato por una visión onírica en la que una serpiente se mordía la cola (Navarro, 2015). Esta imagen simbólica, conocida como el Ouroboros, lo llevó a concebir la idea de una estructura cíclica cerrada, que explicaba en parte la fórmula y el comportamiento químico del

benceno.

Sin embargo, la propuesta de Kekulé no resolvía completamente el misterio. Las propiedades físicas del benceno, como la igualdad en las longitudes de enlace carbono-carbono (140 pm), no coincidían con las diferencias esperadas entre enlaces simples (146 pm) y dobles (134 pm) (Carey y Giuliano, 2014). Esto llevó al desarrollo del concepto de resonancia: Charles Coulson sugirió reemplazar la idea de resonancia y emplear el concepto de deslocalización electrónica para explicar la estabilidad del anillo aromático (Ledesma, 2020).

Este fenómeno, conocido como aromaticidad, confiere al benceno una estabilidad excepcional y una reactividad característica, especialmente en reacciones de sustitución electrofílica aromática. La aromaticidad se define como la propiedad de ciertos compuestos cíclicos, planos y conjugados, cuyos electrones π están deslocalizados, lo que les otorga una energía de estabilización adicional (Ferré, 2013)

La evolución estructural del benceno no solo transformó la química orgánica, sino que también dio origen a conceptos fundamentales como la teoría de enlaces, la resonancia y la deslocalización electrónica. Su estudio permitió el desarrollo de modelos orbitales más precisos y abrió el camino hacia la comprensión de compuestos aromáticos más complejos, como los hidrocarburos policíclicos y el grafeno.

Impacto del benceno en la química orgánica

Herradón García (2023) destaca que el benceno no solo revolucionó la química orgánica, sino que también tuvo un impacto profundo en la sociedad a través de sus aplicaciones industriales y farmacéuticas.

El benceno ha sido, desde su descubrimiento, una piedra angular en el desarrollo de la química orgánica moderna. Su estructura cíclica y su comportamiento químico particular han permitido la formulación de conceptos

fundamentales como la aromaticidad, la resonancia y la reactividad selectiva, que hoy son esenciales en la comprensión de los compuestos orgánicos.

Uno de los aportes más significativos del benceno en la química es su papel en la consolidación de la teoría estructural. La propuesta de Kekulé en 1865 propuso una estructura plana cíclica de benceno con tres dobles enlaces alternos, aunque posteriormente refinada, permitió visualizar por primera vez una estructura cíclica con enlaces alternados, lo que abrió el camino hacia la formulación de modelos más precisos de enlace químico y deslocalización electrónica (Szatyłowicz et al., 2022). Esta visión fue clave para el desarrollo del concepto de resonancia, que explica la estabilidad del benceno como un híbrido de estructuras electrónicas equivalentes.

Desde el punto de vista sintético, el benceno es el prototipo de los hidrocarburos aromáticos y sirve como base para una amplia gama de reacciones. La más característica es la sustitución electrofílica aromática (SEAr), en la que un electrófilo sustituye a un átomo de hidrógeno del anillo, preservando la aromaticidad. Esta reacción incluye procesos como la nitración, halogenación, sulfonación y alquilación de Friedel-Crafts (Autino et al., 2013)

García Castañeda et al. (2025) señalan que el benceno es precursor de fármacos, colorantes, plásticos y solventes, y que su estructura aromática permite la creación de compuestos bioactivos con propiedades terapéuticas.

Además, el benceno ha dado origen a una familia de derivados con aplicaciones industriales y biomédicas de gran relevancia. Entre ellos destacan:

- Tolueno (metilbenceno): utilizado como disolvente y precursor en la fabricación de explosivos, colorantes y resinas.
- Fenol (hidroxibenceno): base para la síntesis de plásticos, desinfectantes y medicamentos como el ácido acetilsalicílico.
- Anilina (aminobenceno): productos farmacéuticos ejemplo antibióticos, como la ciprofloxacina o polímeros como el kevlar (Briceño, 2021). también, producción de colorantes, espumas/cauchos y productos bioactivos (Kramer et al.,

2023, p22).

Estos derivados no solo amplían el espectro de reactividad del benceno, sino que también han permitido el desarrollo de nuevas áreas como la química medicinal, la química de materiales y la nanotecnología.

El benceno ha sido un catalizador conceptual y práctico en la evolución de la química orgánica. Su estudio ha permitido entender fenómenos de estabilidad molecular, diseñar rutas sintéticas eficientes y desarrollar productos de alto valor agregado. A pesar de su toxicidad, su legado científico permanece como uno de los más influyentes en la historia de la química.

Aplicaciones del benceno

Los hidrocarburos aromáticos se consideran las principales materias primas para la síntesis de diversas clases de compuestos. Debido a sus enlaces simples y dobles activos, los derivados funcionales de estos compuestos se utilizan en la producción dirigida de polímeros y materiales compuestos para fines especiales, sustancias fisiológicamente activas y, a su vez, análogos de compuestos naturales y preparados medicinales (Shikhverdieva et al., 2023).

El benceno es utilizado en diversas industrias, desde la química pesada (producción a gran escala de productos químicos básicos que sirven como materia prima para otras industrias) hasta la farmacéutica. Su versatilidad lo convierte en una materia prima esencial para la síntesis de compuestos orgánicos de alto valor agregado.

Aplicaciones industriales

El benceno es el compuesto aromático más básico, con diversas aplicaciones en la industria química. Se utiliza principalmente como producto químico intermedio para el estireno en la fabricación de materiales plásticos. Los derivados del benceno, como el estireno, el cumeno, el ciclohexano y el nitrobenceno, son los

cuatro productos más importantes, cuya producción depende en gran medida de la demanda de benceno (Nithyanandam et al., 2018)

Entre sus algunas aplicaciones destacan:

- Producción de plásticos y polímeros: El 85% de producción de estireno se obtiene mediante deshidrogenación del etilbenceno, ampliamente usado en materiales de embalaje, envases rígidos para alimentos, aislantes y electrodomésticos (Gupta et al., 2022).

- Fabricación de nylon: A través de la síntesis de ácido adípico, derivado del benceno, se obtiene el nylon, utilizado en transporte, productos de consumo, componentes de equipos electrónicos, maquinaria, muebles, entre otros (Lorenzo, 2017, p13).

Obtención de detergentes y colorantes: El benceno participa en la síntesis de alquilbencenos sulfonados, base de muchos detergentes comerciales (Meneses, 2018, p23). También es precursor de nitrobenceno, utilizado en la producción de colorantes sintéticos

- Industria del caucho y neumáticos: La historia del uso del benceno en la fabricación de caucho y neumáticos tiene 100 años. Se emplea el benceno u otros compuestos aromáticos como disolvente en los procesos de producción de cauchos y neumáticos (Hosseini et al., 2014).

Estas aplicaciones han impulsado el desarrollo tecnológico, pero también han requerido estrictas medidas de seguridad debido a la naturaleza volátil y cancerígena del benceno.

Aplicaciones biomédicas

En el campo biomédico, el benceno y sus derivados han sido fundamentales en la síntesis de fármacos y compuestos bioactivos. Algunas de sus aplicaciones incluyen:

Síntesis de medicamentos: Se ha descubierto que las sustancias farmacéuticamente activas contienen compuestos aromáticos, que son derivados

del benceno; antiinflamatorios, antiapoptóticos, antioxidantes, antialzheimer, antimicrobianos, antivirales, antibióticos, antidepresivos, anticoagulantes, antihipertensivos, antisépticos, analgésicos, antipiréticos, entre otros (Doğan, y Çelik, 2023)

Posible uso de derivados del benceno como fungicida: Estudios realizados con benceno han exhibió una potente actividad fungicida contra todos los hongos como *candida spp.*, *Mucor spp.* y *Aspergillus spp.* La inhibición total del crecimiento fúngico, confirmada como un efecto fungicida, se observó a partir de la concentración más baja ensayada, el 10% (v/v) (Alhusayni y Al-Khikani, 2025)

Desarrollo de compuestos aromáticos bioactivos: Derivados como el eugenol, presente en aceites esenciales, poseen propiedades analgésicas y antisépticas, y se utilizan en odontología, la acción antibacteriana de estos compuestos se atribuye a una acción a nivel de la membrana celular que desencadena su disrupción (Erazo et al., 2017)

Derivados del benceno como antifúngicas: Estudios ha encontrado derivados del benceno con acción antifúngicos, lo que condujo al aislamiento e identificación de nueve derivados de benceno monosustituidos (Wan et al., 2016)

“Recientemente, el nailon ha atraído más atención en las industrias biomédicas debido a su prometedor potencial en la ingeniería de tejidos y la medicina regenerativa” (Shakiba et al., 2021, p2)

Aplicaciones Agropecuarias

Aunque el benceno puro posee una toxicidad elevada que restringe su uso directo en la agricultura, sus derivados químicos desempeñan un rol fundamental como bloques de construcción en el sector agropecuario. Este hidrocarburo aromático es un intermediario químico esencial para la síntesis de una amplia gama de productos fitosanitarios, incluyendo pesticidas, insecticidas y herbicidas.

Compuestos como el clorobenceno o el bifenilo (difenilo) son precursores directos o se utilizan como fungicidas específicos para la conservación de alimentos postcosecha. La incorporación de estos derivados bencénicos en las formulaciones agrícolas resulta crítica para optimizar la protección de los cultivos contra plagas, enfermedades fúngicas y la competencia de las malezas, contribuyendo directamente al incremento del rendimiento y a la seguridad alimentaria global. No obstante, el manejo, la aplicación y la gestión de residuos de estos compuestos requieren estrictas regulaciones y estrategias de mitigación ambiental debido a su potencial persistencia y toxicidad inherente.

Uno de los derivados del benceno es el indol es un compuesto biológicamente activo formado por la fusión de benceno y pirrol, y se encuentra ampliamente en productos naturales y fármacos. Debido a su estructura y propiedades únicas, sus derivados suelen presentar actividades fisiológicas distintivas, lo que ha generado gran interés en el campo del desarrollo de plaguicidas (Sun et al., 2024)

Toxicología del benceno

El benceno clasifica como un hidrocarburo aromático volátil, es un agente tóxico de alta relevancia debido a su amplia distribución ambiental y su toxicidad intrínseca para los sistemas biológicos humanos. La exposición ocurre principalmente por vía inhalatoria, dado que sus vapores son un componente común en los gases de escape vehiculares y en el humo del tabaco, aunque la absorción dérmica y la ingestión de agua contaminada también representan rutas significativas.

Las concentraciones de benceno medidas en el aire ambiente son generalmente órdenes de magnitud inferiores a las reportadas en entornos laborales. Las concentraciones de benceno en el aire ambiente han disminuido significativamente con el tiempo en Estados Unidos y Europa (las concentraciones

medias anuales actuales son $< 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Cañas et al., 2024)

Toxicología: efectos sobre la salud humana

La exposición al benceno ocurre principalmente en ámbitos laborales e industrias.

Aunque la exposición al benceno ocurre principalmente en entornos laborales e industriales, este compuesto químico también se encuentra en fuentes comunes como el humo del cigarrillo, la gasolina y los gases de escape vehiculares. Esta exposición ubicua y generalizada se asocia con un riesgo significativo de desarrollar diversos tipos de neoplasias malignas. Específicamente, las leucemias, los linfomas y el cáncer de pulmón figuran entre los cánceres comúnmente vinculados con la exposición al benceno (Paul et al., 2025)

La exposición principalmente por inhalación, pero la absorción cutánea también es una vía de ingreso, lo que provoca la desecación del manto graso y genera diversas dermatopatías. Los estudios sobre la exposición al benceno prevalecen las enfermedades de la piel por esta exposición crónica son la dermatitis atópica, afectando al 90% de los trabajadores. Otras alteraciones comunes incluyen dermatitis de contacto irritante y alérgica, irritación e hipersensibilidad de la piel, sarpullido, enrojecimiento, prurito y sequedad cutánea. Además, la exposición se ha relacionado con patologías más graves como el melanoma cutáneo y el cáncer de piel no melanoma (Torres et al., 2022)

Además, la exposición al Benceno se observa una mayor incidencia de alteraciones hematológicas, principalmente la leucopenia (disminución de glóbulos blancos), con un rango de prevalencia del 20% al 49.3% en diferentes estudios. Otras alteraciones incluyen la trombocitopenia (disminución de plaquetas) y la anemia. La exposición crónica puede progresar a afecciones más graves como el cáncer hematológico, siendo la leucemia la principal consecuencia documentada, junto con el linfoma no Hodgkin. La exposición laboral al benceno en gasolineras

causa graves alteraciones en el sistema hematológico, haciendo indispensable el uso de equipos de protección personal y una vigilancia ocupacional rigurosa para mitigar estos riesgos (García et al., 2023)

Aunque toda la población está expuesta, el riesgo es mayor en el ambiente laboral. Una vez en el organismo, el benceno se biotransforma en metabolitos altamente reactivos y radicales libres que resultan tóxicos, citotóxicos, genotóxicos y carcinógenos, dañando sistemas como el cardiovascular, endocrino, neurológico y, especialmente, el hematopoyético. El efecto adverso más claro y mejor estudiado es la inducción de leucemia, un proceso que se atribuye a la alteración de rutas de señalización hematopoyética, la inhibición de la defensa antitumoral, la inducción de aberraciones cromosómicas y la modificación del epigenoma (Bugarin et al., 2024)

Ambientales y laboral

La vigilancia biológica se considera complementaria a la monitorización ambiental y una herramienta útil para evaluar con precisión la exposición laboral a sustancias químicas. Esta evaluación se realiza periódicamente mediante el monitoreo de las cantidades de la sustancia química sin metabolizar o sus metabolitos en los fluidos biológicos del cuerpo, los cambios fisiológicos o las alteraciones enzimáticas (Rahimpoor et al., 2023)

El benceno es un hidrocarburo aromático volátil y un contaminante atmosférico omnipresente. Debido a su riesgo, las medidas regulatorias y las estrategias de mitigación implementadas desde la década de 1980 han reducido significativamente o sustituido el uso del benceno en diversos productos industriales y de consumo. (Wan et al., 2024)

Debido a su peligrosidad, el benceno está sujeto a estrictas regulaciones

ambientales y laborales. En los últimos años, se han propuesto o ya se han establecido el límite de exposición ocupacional más bajos para el benceno, en el rango de 0,05 a 0,25 ppm, para proteger a los trabajadores del cáncer inducido por el benceno (Boogaard, 2022)

El benceno en la educación

La molécula de benceno (C_6H_6) constituye un pilar didáctico indispensable para la introducción de la Química Orgánica moderna en los niveles de educación superior. Su estudio trasciende la mera memorización de una fórmula, sirviendo como una herramienta conceptual que articula tres principios fundamentales de la química: Resonancia electrónica, Aromaticidad y reactividad.

El benceno como herramienta didáctica

La enseñanza del benceno representa un desafío conceptual en química orgánica, especialmente por su estructura resonante y su comportamiento aromático. Tradicionalmente, se ha abordado mediante modelos de Lewis, estructuras de resonancia y representaciones planas del anillo aromático. Sin embargo, estas aproximaciones pueden resultar abstractas y poco intuitivas para estudiantes que recién se inician en el estudio de la química orgánica (González et al., 2011).

El uso del benceno como herramienta didáctica permite introducir conceptos clave como:

Resonancia electrónica: El benceno es el ejemplo paradigmático para introducir el concepto de resonancia. En lugar de poseer tres enlaces dobles y tres simples alternados (estructura de Kekulé), la realidad es que los seis electrones π se encuentran deslocalizados sobre todo el anillo. Didácticamente, esto permite a los estudiantes comprender:

Modelos de Representación: La necesidad de utilizar el círculo inscrito o las

estructuras de resonancia de Kekulé para ilustrar la nube electrónica uniforme y su estabilidad inherente.

Longitudes de Enlace: La evidencia física (longitudes de enlace carbono-carbono idénticas e intermedias entre simple y doble) que sustenta el modelo teórico de la resonancia.

Aromaticidad: La excepcional estabilidad termodinámica del benceno, conocida como aromaticidad, es el segundo concepto clave que facilita su estudio. La molécula se utiliza para establecer el Criterio de Hückel ($4n+2 = \pi$), enseñando a los estudiantes a diferenciar entre compuestos aromáticos (muy estables), antiaromáticos (inestables) y no aromáticos. Esta diferenciación es esencial para predecir la reactividad de otros sistemas cíclicos conjugados.

Reactividad y sustitución electrofílica aromática: En términos de reactividad, el benceno funciona como un material didáctico crucial para contrastar la química de los alquenos (reacciones de adición) con la de los aromáticos (reacciones de sustitución). Su estabilidad intrínseca dicta que las reacciones preferentes son aquellas que preservan el sistema aromático, siendo la sustitución electrofílica aromática (nitración, halogenación, alquilación de Friedel-Crafts) la vía principal para la funcionalización del anillo. Este contraste es vital para entender por qué los compuestos orgánicos se comportan de maneras tan diversas.

La estructura del Benceno se ha utilizado para aplicar diferentes formas didácticas como es el caso del enfoque Sistémico para la Enseñanza y el Aprendizaje (SATL) y la teoría de las Inteligencias Múltiples (MI) para la educación en Química. Para lograr una enseñanza innovadora y superar los métodos tradicionales en las cuatro paredes de un salón de clases, utilizando el modelo de actividad de la estructura del benceno como una actividad sistémica aplicable al aire libre. Esta metodología de enseñanza buscó intencionalmente activar las inteligencias musical-rítmica, corporal-cinestésica e interpersonal de los estudiantes para así potenciar sus inteligencias lógico-matemática y visual-espacial. El objetivo



de usar el benceno en este modelo era que los estudiantes alcanzaran una comprensión profunda de su estructura y enlace químico, desarrollaran una actitud positiva hacia el trabajo en equipo y adquirieran la habilidad de implementar modelos de actividad sistémica efectivos en Química (Fahmy y Lagowski, 2013).

El Benceno y los compuestos aromáticos se ha utilizado como herramienta didáctica utilizando la taxonomía de Bloom para ayudar a los educadores de química orgánica a alinear mejor sus evaluaciones con las actividades de enseñanza y para ayudar a los futuros profesores de química a mejorar sus habilidades de aprendizaje y metacognición. Estudios han mostrado formas de mejorar la enseñanza y el aprendizaje de los estudiantes en química orgánica, en el ejemplo de los hidrocarburos aromáticos, ajustando así la enseñanza y mejorando el dominio del material por parte de los estudiantes, desarrollando preguntas en niveles más altos de habilidades cognitivas y ayudando a los estudiantes a prepararse para los exámenes (Asgarova et al., 2025)

Integración de tecnologías inmersivas en la enseñanza del benceno

Las tecnologías inmersivas, como la realidad aumentada (AR) y la realidad virtual (VR), ofrecen nuevas posibilidades para visualizar y comprender la estructura y reactividad del benceno. Estas herramientas permiten representar el anillo aromático en tres dimensiones, observar la distribución electrónica y simular reacciones químicas en entornos seguros e interactivos.

Plataformas como CoSpaces, Merge Cube y Elements AR permiten a los docentes diseñar escenarios educativos donde los estudiantes pueden:

- Manipular modelos tridimensionales del benceno y sus derivados.
- Visualizar la resonancia como una nube electrónica deslocalizada.
- Simular reacciones de sustitución aromática con retroalimentación inmediata.
- Explorar entornos moleculares desde una perspectiva inmersiva,

favoreciendo el aprendizaje activo y significativo (Universidad de Huelva, 2025; Observatorio Tec, 2018).

Estas experiencias aumentan la motivación, la retención de conocimientos y la capacidad de razonamiento espacial de los estudiantes. Además, permiten integrar la química con otras disciplinas como la biología, la física y la ética ambiental, promoviendo una educación transdisciplinaria.

Conclusión

A dos siglos del descubrimiento del benceno por Michael Faraday en 1825, esta molécula ha demostrado ser mucho más que un compuesto químico: es un símbolo de la evolución científica, la creatividad humana y los dilemas éticos que acompañan al progreso. Su estructura hexagonal perfecta, basada en la resonancia electrónica, no solo revolucionó la química orgánica, sino que dio origen a miles de compuestos esenciales para la medicina, la industria, la nanotecnología y la vida cotidiana.

Sin embargo, el legado del benceno no puede celebrarse sin una mirada crítica. Su toxicidad, su presencia en contaminantes ambientales y su uso en procesos industriales nos recuerdan que toda innovación científica debe ir acompañada de responsabilidad ética. La educación contemporánea, especialmente aquella que integra tecnologías inmersivas, tiene el deber de enseñar el benceno no solo como molécula, sino como metáfora: una estructura estable que desafía transforma y exige reflexión.

Hoy, al conmemorar sus 200 años, el benceno nos invita a mirar hacia el futuro con una visión integradora: ciencia rigurosa, pedagogía creativa y ética comprometida. Que su hexágono siga siendo un punto de encuentro entre el conocimiento, la conciencia y la imaginación.

Referencias bibliográficas

Alhusayni, A. A., & Al-Khikani, F. H. O. (2025). Antimicrobial Activity of Petroleum and Benzene Against Selected Bacterial and Fungal Pathogens: Antimicrobial Activity of Petroleum and Benzene. *Infinity Journal of Medicine and Innovation*, 49-53.

[View of Antimicrobial Activity of Petroleum and Benzene Against Selected Bacterial and Fungal Pathogens](#)

Asgarova, A., Asadov, Kh. & Naghiyev, K. (2025). Revised Bloom in teacher education: aromatic hydrocarbons. *Sciences of Europe*, (171), 23-31.

[REVISED BLOOM IN TEACHER EDUCATION: AROMATIC HYDROCARBONS](#)

Autino, J. C., Romanelli, G. P., & Ruiz, D. M. (2013). Introducción a la química orgánica. Series: Libros de Cátedra. Editorial de la universidad de la Plata.

Boogaard, P. J. (2022). Human biomonitoring of low-level benzene exposures. *Critical Reviews in Toxicology*, 52(10), 799-810.

[Human biomonitoring of low-level benzene exposures](#)

Briceño Velazquez, G. F. (2021). Síntesis de anilinas sustituidas vía reducción de azidas y evaluación mecanística [tesis de maestría, Universidad autónoma de San Luis Potosí]. Repositorio Nacional CONACYT. [Síntesis de anilinas sustituidas vía reducción de azidas y evaluación mecanística](#)

Bugarin, O. T., Ureña, B. S., Jaime, L. F. G., Romero, J. C. L., Soto, C. L. G., & Palomo, K. G. M. (2024). Toxicidad por la exposición al benceno: Toxicidad por benceno. *CIENCIA Y FRONTERA*, 2(1), 64-75. [Vista de Toxicidad por la exposición al benceno](#)

Cañas Portilla, AI, Castaño, A. y Organización Mundial de la Salud. (2024). Efectos del benceno, el arsénico, el cadmio, el níquel, el plomo y el mercurio en la salud humana: Informe de una consulta de expertos. Organización Mundial de la Salud. Oficina Regional para Europa.

Carey, F. & Giuliano, R. (2014). Química Orgánica. (9ªEd.) México: McGraw-Hill.

Cornejo Arteaga, P. M. de L. (2017). Propiedades del benceno y sus usos en la industria. *Con-Ciencia Boletín Científico De La Escuela Preparatoria No. 3*, 4(7).

[Vista de Propiedades del benceno y sus usos en la industria | Con-Ciencia Boletín Científico de la Escuela Preparatoria No. 3](#)

Doğan, M. S., & Çelik, H. (2023). Organic Compounds Containing Aromatic Structure Used in Pharmaceutical Production. *Journal of Biochemical Technology*, 14(2-2023), 102-111. [Organic Compounds Containing Aromatic](#)

[Structure Used in Pharmaceutical Production - Journal of Biochemical Technology](#)

Erazo Guijarro, M. J., Arroyo Bonilla, F. A., Arroyo Bonilla, D. A., Castro García, M. R., Santacruz Terán, S. G., & Armas Vega, A. D. C. (2017). Efecto antimicrobiano del cinamaldehído, timol, eugenol y quitosano sobre cepas de Streptococcus mutans. Revista Cubana de Estomatología, 54(4), 1-9.

Fahmy, A. F. M., & Lagowski, J. J. (2013). [SATLC-Initiative] Uses of SATL & multiple intelligences [MI] for secondary and tertiary levels. Part-I: benzene structure activity. African Journal of Chemical Education, 3(1), 60-73.

[Vol. 3 No. 1 \(2013\) | African Journal of Chemical Education](#)

Farré, A. S. (2013). Estructura y Reactividad del Benceno. Su Enseñanza y Aprendizaje en un Curso Universitario de Química Orgánica [Tesis de doctorado no publicada, Universidad de Buenos Aires]. Repositorio institucional digital.

[RID-UNRN: Estructura y Reactividad del Benceno. Su Enseñanza y Aprendizaje en un Curso Universitario de Química Orgánica](#)

García Castañeda, O. A., Evangelista Nolasco, N. M., Huachalla Llicahua, X., Manzano Villegas, Á. G., & León Cárdenas, D. J. (2025). Aplicaciones del benceno en la producción de fármacos y compuestos orgánicos. Trabajo de investigación, Universidad Nacional Mayor de San Marcos. <https://www.studocu.com/pe/document/universidad-nacional-mayor-de-san-marcos/quimica-organica/aplicaciones-del-benceno-en-la-produccion-de-farmacos-y-compuestos-organicos/124348708>

García, J., Florentino, D., Ali, B. N., & Coello, F. J. P. (2023). Enemigo silencioso de la salud: revisión de los efectos en la salud por exposición a benceno. Multidisciplinary & Health Education Journal, 5(3), 546-555.

[View of Silent enemy of health: review of the health effects of exposure to benzene](#)

González Llanos, J. J., Blanco Acosta, N., & Zapata Olivella, M. (2011). Estrategia didáctica con mediación de las TIC, propicia significativamente el aprendizaje de la Química Orgánica en la educación secundaria. [Estrategia didáctica con mediación de las tic.,pdf](#)

Gupta, R., Uslu, H., & Majumder, S. (2022). Production of styrene from dehydrogenation of ethylbenzene. Chemical Engineering & Technology, 45(5), 817-823.

[Production of Styrene from Dehydrogenation of Ethylbenzene - Gupta - 2022 - Chemical Engineering & Technology - Wiley Online Library](#)

Herradón García, B. (2023). Química orgánica: aspectos históricos, impacto en la sociedad, avances recientes e investigaciones en el IQOG-CSIC. Encuentros Multidisciplinares, 73, 1-12. <http://www.encuentros->

multidisciplinares.org/revista-73/bernardo-herradon.pdf

Hosseini, S., Rezazadeh-Azari, M. A. N. S. O. U. R., Taiefteh-Rahimian, R. A. A. N. A., & Tavakkol, E. (2014). Occupational risk assessment of benzene in rubber tire manufacturing workers. International journal of occupational hygiene, 6(4), 220-226.

[138-libre.pdf](#)

Kramer, D. G., Ramos, W. R., Júnior, S., de Sousa, A. M., & Junior, G. B. C. (2023). Anilina: síntese, aplicação e aspectos toxicológicos e ambientais: uma revisão. Saúde e meio ambiente: revista interdisciplinar, 12, 19-30.

[Anilina: síntese, aplicação e aspectos toxicológicos e ambientais: uma revisão | Saúde e meio ambiente: revista interdisciplinar](#)

Ledesma, J. M. (2020). La caracterización estructural del benceno de Kekulé: un ejemplo de creatividad y heurística en la construcción del conocimiento químico. Ciência & Educação (Bauru), 26, e20019.

[SciELO Brasil - La Caracterización Estructural del Benceno de Kekulé: un Ejemplo de Creatividad y Heurística en la Construcción del Conocimiento Químico La Caracterización Estructural del Benceno de Kekulé: un Ejemplo de Creatividad y Heurística en la Construcción del Conocimiento Químico](#)

Lorenzo, D. (2017). Purificación de ciclohexanona obtenida en la oxidación de ciclohexano para la fabricación de caprolactama. [Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid].

[Purificación de ciclohexanona obtenida en la oxidación de ciclohexano para la fabricación de caprolactama](#)

Meneses Cali, M. D. L. (2018). Determinación de la efectividad de agentes microbianos para la degradación de tensoactivos dodecil bencen sulfonato de sodio lineal presente en detergentes (tesis de licenciatura, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo). Ecuador [content](#)

Navarro, M. S. (2015). Serendipia: ¿Descubrimientos casuales? Química, Ciencia. Y sociedad, Revista Cubana de Química, 1(3), 16.

[encuentro con la quimica vol1_no3.pdf](#)

Nithyanandam, R., Mun, Y., Fong, T. S., Siew, T. C., Yee, O., & Ismail, N. (2018). Review on production of benzene from petroleum associated gas by dehydro-aromatization, partial oxidation of methane and methanol-to-aromatics processes. Journal of Engineering Science and Technology, 13(12), 4290-4309.

[FORMAT INSTRUCTIONS FOR SOMChE 2004 PAPERS](#)

Paul, T., Paul, T., Katwal, S., Aroori, P., Dower, P., Bhatia, H., ... & Yadav, T. (2025). Benzene and human health: a comprehensive review of carcinogenic risks, mechanisms, and preventive strategies. Annals of Medicine and Surgery,

87(11), 7162-7168.

[Annals of Medicine and Surgery](#)

Quintero Duque, L. X. (2022). Análisis de las competencias investigativas desde la enseñanza de los hidrocarburos aromáticos en la educación presencial. Boletín PPDQ, (65), 17-27. [Análisis de las competencias investigativas desde la enseñanza de los hidrocarburos aromáticos en la educación presencial | Boletín P.P.D.Q.](#)

Rahimpoor, R., Jalilian, H., Mohammadi, H., & Rahmani, A. (2023). Biological exposure indices of occupational exposure to benzene: A systematic review. Heliyon, 9(11). [Biological exposure indices of occupational exposure to benzene: A systematic review: Heliyon](#)

Shakiba, M., Rezvani Ghomi, E., Khosravi, F., Jouybar, S., Bigham, A., Zare, M., ... & Ramakrishna, S. (2021). Nylon—A material introduction and overview for biomedical applications. Polymers for advanced technologies, 32(9), 3368-3383. [Nylon—A material introduction and overview for biomedical applications - Shakiba - 2021 - Polymers for Advanced Technologies - Wiley Online Library](#)

Sun, P., Huang, Y., Chen, S., Ma, X., Yang, Z., & Wu, J. (2024). Indole derivatives as agrochemicals: An overview. Chinese Chemical Letters, 35(7), 109005. [Indole derivatives as agrochemicals: An overview - ScienceDirect](#)

Szatyłowicz, H., Wierzchowicz, P. A., & Krygowski, T. M. (2022). Aromaticity Concepts Derived from Experiments. Sci, 4(2), 24. [Aromaticity Concepts Derived from Experiments | MDPI](#)

Shikhverdieva, N. T., Mammedova, U. A., & Zeynalov, N. A. (2023). The scientific basis of industrial application of the process of selective hydrogenation of benzene in different catalytic systems. Azerbaijan Chemical Journal, (3), 39-52. [THE SCIENTIFIC BASIS OF INDUSTRIAL APPLICATION OF THE PROCESS OF SELECTIVE HYDROGENATION OF BENZENE IN DIFFERENT CATALYTIC SYSTEMS](#)

Torres, A. M. M., Bojorque, L. M. B., Freire, G. E. O., & Ochoa, P. Y. Q. (2022). Benceno y alteraciones crónicas dermatológicas en trabajadores de gasolineras. Salud, Ciencia y Tecnología, 2, 186-186. [Benceno y alteraciones crónicas dermatológicas en trabajadores de gasolineras](#)

Wan, C., Han, J., Chen, C., Yao, L., Chen, J., & Yuan, T. (2016). Monosubstituted benzene derivatives from fruits of Ficus hirta and their antifungal activity against phytopathogen Penicillium italicum. Journal of Agricultural and Food



Chemistry, 64(28), 5621-5624.

[Monosubstituted Benzene Derivatives from Fruits of Ficus hirta and Their Antifungal Activity against Phytopathogen Penicillium italicum | Journal of Agricultural and Food Chemistry](#)

Wan, W., Peters, S., Portengen, L., Babigumira, R., Stenehjem, J. S., Richardson, D., & Vermeulen, R. (2024). Occupational benzene exposure and lung cancer in human studies: a systematic review and meta-analysis. *Environmental Health Perspectives*, 132(12), 126001.

[Occupational Benzene Exposure and Lung Cancer in Human Studies: A Systematic Review and Meta-Analysis - PMC](#)