



Biología-Química-Física
Matemática-Estadística



TECNOCIENCIA

Volumen 27, N. 1

ISSN L 2415-0940



Revista de la Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología
Universidad de Panamá
Enero - Junio 2025.

TECNOCIENCIA

Volumen 27, N. 1
Enero - Junio 2025

Publicación semestral

UNIVERSIDAD DE PANAMÁ
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES,
EXACTAS TECNOLOGÍA



Consejo Editorial

Directora

Dra. Magaly de Chial

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

Editor Jefe

Dr. Eduardo Camacho Astigarrabia

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

Consejo

Mgter. Roberto Cambra

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

Dr. Enrique Medianero.

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

Dr. Armando Durant.

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

Mgter. Aurora Mejía

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

Dr. Janzel Villalaz

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

Mgter. Jacobo Araúz

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

Dr. Jaime Gutiérrez

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

Dra. María de Stapp

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

Dr. Josep Batlló i Ortiz

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

Dr. Bruno Zachrisson

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

Dr. Luis Wong Vega

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

Dr. Fernando Gómez Merino

Colegio de Postgraduados, México
fernandg@colpos.mx

Dr. Edgardo Castro

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

Dra. Yaxelis Mendoza

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

Comité de diagramación, estilo y producción

Dr. Eduardo Camacho Astigarrabía

Universidad de Panamá - Editor Jefe

Michelle Ferrín

Universidad de Panamá - Secretaría Técnica

Ing. Samuel Rodríguez, Lic. Rigoberto De León

Universidad de Panamá - Técnicos

Autoridades de la Universidad de Panamá

Eduardo Flores Castro
Rector

José Emilio Moreno
Vicerrector Académico

Jaime Javier Gutiérrez
Vicerrector de Asuntos Estudiantiles

Mayanín Rodríguez
Vicerrector de Asuntos Estudiantiles

Ricardo Him Chi
Vicerrector Administrativo

José Luis Solís
Director de Centros Regionales

Ricardo A. Parker D.
Secretaría General

José Álvaro
Presidente de la Asociación de Profesores

EDITORIAL

En un mundo tan cambiante como el de hoy, desarrollar capacidades de investigación científica es esencial para abordar los desafíos locales y globales. Las sólidas capacidades de investigación permiten a los países crear soluciones locales adaptadas a sus necesidades específicas, particularmente en áreas como la salud, la seguridad alimentaria, la mitigación de desastres y el cambio climático. Esta experiencia local no sólo proporciona respuestas relevantes, sino que también promueve la sostenibilidad y la participación de la comunidad.

Las inversiones en investigación y la colaboración entre instituciones educativas, gobiernos e industrias es crucial para crear una fuerza laboral capacitada y fomentar el crecimiento económico. Esta también sirve de base para la formulación de políticas eficaces, garantizando que las decisiones se basen en pruebas sólidas y no en suposiciones.

En resumen, invertir en capacidades de investigación científica es vital para el desarrollo económico, y la gobernanza informada. Dar prioridad a la investigación científica garantiza que las sociedades estén equipadas para prosperar en un mundo cada día más complejo.

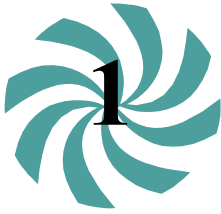
A lo largo de 27 años Tecnociencia ha contribuido a divulgar los resultados de investigaciones científicas a nivel local e internacional y en los próximos meses se verán nuevos cambios que permitirán que siga contribuyendo de una mejor manera a esto.



Dr. Eduardo Camacho Astigarrabía

ÍNDICE

TÍTULO	PÁGINAS
An open Monte Carlo based implementation of Gauss's method for initial orbit determination.....	8-25
Estado poblacional del mono tití panameño (<i>saguinus geoffroyi</i>) en la reserva natural Cerro Ancón, Panamá.....	26-38
Simuladores virtuales para Química General en el Instituto Carmen Conte Lombardo de Penonomé, Panamá.....	39-52
Los métodos de Numerov y Runge-Kutta-Verner aplicados al movimiento de un sistema mecánico con un grado de libertad.....	53-69
Peces de los ríos Aguas Blancas y Chorrerita, Coclé, Panamá y su relación con características ambientales.....	70-87
Caracterización estructural y florística del manglar de playa Morrillo, Veraguas, Panamá.....	88-100
Creando “aulas sin ruido” en Boquete, Chiriquí, Panamá.....	101-113
La resiliencia climática y mitigación para afrontar los efectos del cambio climático en los estudiantes de 10º grado del Instituto Profesional y Técnico Leonila Pinzón de Grimaldo, en Penonomé, Panamá.....	114-124
Determinación del polimorfismo <i>pro12ala</i> en el receptor activado por proliferadores de peroxisomas gamma-2 en pacientes que padecen diabetes mellitus tipo2.....	125-144
Un paseo aleatorio en la bolsa de valores de Panamá.....	145-157
Culture-based and Sanger sequencing approaches to uncover the diversity of leaf-fungal endophytes in neotropical gymnosperms.....	158-173
Tomografía sísmica del Volcán Barú y alrededores, provincia de Chiriquí, sur Occidente de Panamá.....	174-195
Determinación de mecanismos focales compuestos para la región del sistema de fallas Azuero-Soná, Panamá.....	196-211



An open Monte Carlo based implementation of Gauss's method for initial orbit determination

Una implementación abierta basada en Monte Carlo del método de Gauss para la determinación inicial de órbitas

José B. Batista-Mendoza

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Escuela de Física, Panamá.
joseb.batistam19@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-5485-0113>

Eduardo Chung

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Física, Panamá. eduardo.chungng@up.ac.pa <https://orcid.org/0000-0003-2834-9450>

Adam's Martínez-Soto

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Física, Panamá. adams.martinez@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-8060-686X>

Joaquín Fábrega-Polleri

Universidad Católica Santa María la Antigua, Facultad de Ingeniería y Tecnología, Escuela de Ingeniería Civil, Panamá. fabrega@ae.com.pa <https://orcid.org/0009-0007-7770-4996>

Carlos A. Fernández-Valdés

Universidad Latina de Panamá, Facultad de Ingeniería, Escuela de Electrónica, Sistemas y Mecatrónica, Panamá. carlosfernandez@ulatina.edu.pa <https://orcid.org/0000-0003-0983-8777>

Fecha de recepción: 25 de abril de 2024

Fecha de aceptación: 9 de septiembre de 2024

DOI [HTTPS://DOI.ORG/10.48204/J.TECNO.V27N1.A6633](https://doi.org/10.48204/J.TECNO.V27N1.A6633)

ABSTRACT

Hundreds or thousands of Near-Earth Asteroids (NEAs) are discovered every year, so being able to determine their orbits to follow them successfully in the future is essential to warn of the danger they could present. Numerous methods have been developed to improve the precision and efficiency of calculations used in the Initial Orbit Determination (IOD), with Gauss's method being the benchmark due to its intuitive formulation, comparable precision, and historical importance. Herein, we present the results of the development of a new

open access tool to simplify the process of IOD of celestial bodies, specifically, NEAs. This tool was based on a modern implementation, using code written in Python to calculate, propagate, and graph the orbits. The results obtained from the test data exhibited significant accuracy, with the maximum discrepancy not exceeding 1.2% compared to the Horizons System tool, and the average being 0.5%. Furthermore, we found that for the Monte Carlo simulations that the code uses, 5,000 iterations were more than enough to achieve the obtained accuracy.

KEYWORDS

Asteroids, Astronomy, Celestial Mechanics, Gauss' Method, Orbit Determination.

RESUMEN

Cada año se descubren cientos o miles de Asteroides Cercanos a la Tierra (NEAs, acrónimo en inglés de Near-Earth Asteroids), por lo cual, ser capaz de determinar sus órbitas para seguirlos con éxito en el futuro es indispensable para advertir del peligro que estos podrían presentar. Numerosos métodos se han desarrollado para mejorar la precisión y eficiencia de los cálculos en la determinación inicial de la órbita (IOD, acrónimo en inglés de Initial Orbit Determination), siendo el método de Gauss la referencia debido a su formulación intuitiva, precisión comparable e importancia histórica. Aquí se presentan los resultados del desarrollo de una nueva herramienta de acceso abierto para simplificar el proceso del IOD de cuerpos celestes, específicamente, los NEAs. Dicha herramienta estuvo fundamentada en una implementación moderna, empleando un código escrito en el lenguaje de Python para calcular, propagar y graficar órbitas. Los resultados obtenidos para los datos de prueba exhibieron una precisión significativa, con la discrepancia máxima no superando el 1.2 % en comparación con la herramienta Horizons System. Además, se encontró que para las simulaciones de Monte Carlo que el código emplea, 5 000 iteraciones fueron más que suficientes para alcanzar la precisión obtenida.

PALABRAS CLAVES

Asteroides, Astronomía, Mecánica Celeste, Método de Gauss, Determinación de la Órbita.

INTRODUCTION

Every year, hundreds or even thousands of *Near-Earth Asteroids* (NEAs) are discovered, both by professional astronomers and enthusiasts (Minor Planet Center 2023). Therefore, being able to determine their orbits in order to successfully track them in the future is crucial. Determining the orbits of celestial bodies is a problem that has occupied astronomers since ancient times. However, it was not until the beginning of the 19th century that a revolution in celestial mechanics took place, with the work of the German scientist Johann Carl Friedrich Gauss, in which he presented a new orbit determination method from which he obtained an estimate for the orbit of the newly discovered Ceres (Gauss 1809). From his method, numerous algorithms have been developed to improve the accuracy and efficiency of the calculations (Gibbs 1889; Herrick 1971), in addition to the creation of alternative methods (Escobal 1965; Gooding 1997) that are currently considered more favorable for many situations. Nevertheless, Gauss's method is still used as a benchmark for evaluating

other methods because of its intuitive formulation, comparable accuracy, and historical importance (Schwab 2022).

One of the main arguments for studies in the area is to improve monitoring systems. Detecting asteroids and calculating their orbits makes it possible to warn of the danger they could present, in other words, to know if they are *Potentially Hazardous Asteroids* (PHAs), classification given to those asteroids suspected of a collision trajectory with our planet in the next centuries (CNEOS Editors 2023) and those responsible for impact events with our planet. Two of these events, and the most significant, are those of Tunguska (1908) and Chelyabinsk (2013), in Russia. In the former, more than 2 000 km² of the Siberian taiga were obliterated and caused up to 3 reported deaths; while the latter resulted in damage to more than 7 000 buildings in 6 cities in the region, injuring thousands of people (Jay 2008; David 2013). This highlighted the need for improved NEA detection and monitoring systems. Since then, efforts to identify and track NEAs and PHAs have intensified, as well as the development of strategies such as the *Double Asteroid Redirection Test* (DART) mission by NASA, which successfully altered the orbit of the asteroid Dimorphos (Bardan 2022).

The main focus of this work consists in the presentation and analysis of a new open access tool developed to simplify the *Initial Orbit Determination* (IOD) of celestial bodies, with a specific focus on NEAs. This tool is based on a modern implementation of Gauss's method, using a code written in Python to calculate, propagate and plot orbits. Furthermore, by being available to the public (at the GitHub repository github.com/joebro1907/NEIOD), it aims to encourage the participation of students, enthusiasts, and researchers in the celestial dynamics field, as well as computational physics.

MATERIALS AND METHODS

Gauss's Method

The method developed by Gauss is based entirely on the geometry of only three observations. His method provides an estimate of the three positions of the body from an eighth-order polynomial of the second position. Given the estimate of the three \vec{r} , a prediction of instantaneous \vec{v}_2 can be defined, thus completely defining the *state vectors*: (\vec{r}_2, \vec{v}_2) .

At any point in time, the heliocentric position \vec{r} will be given by (Figure 1):

$$\vec{r} = \vec{q} + \rho\hat{\rho} \quad (1)$$

where \vec{q} is the observer's heliocentric position, ρ the body's range (distance) to the observer, and $\hat{\rho}$ its unit vector. The vectors \vec{q} and $\hat{\rho}$ are defined by

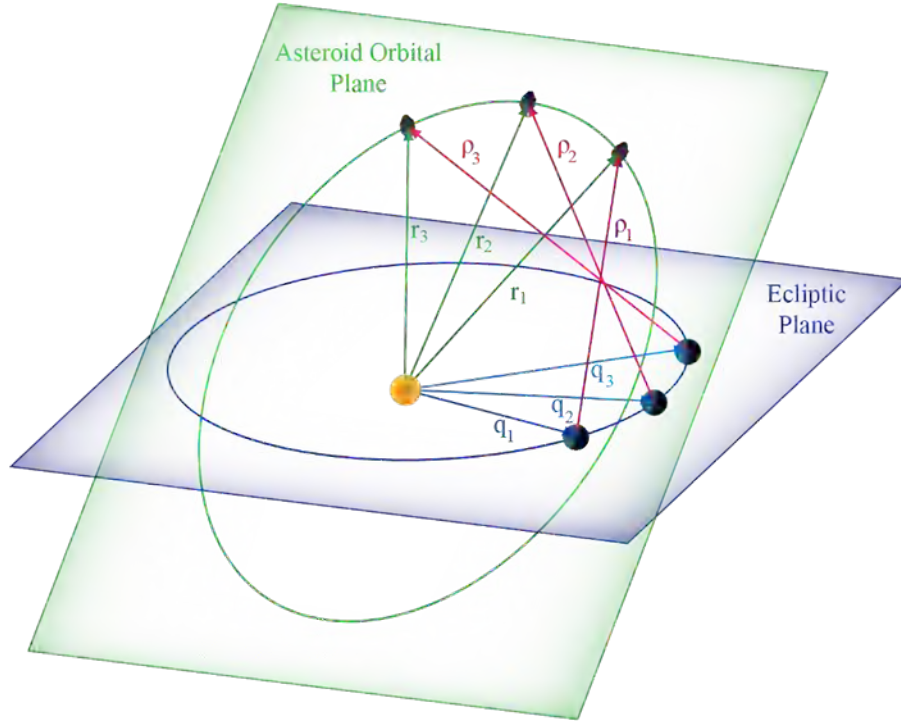
$$\vec{q} = \vec{q}_{\oplus} + \vec{p}_{obs} \quad (2)$$

$$\hat{\rho} = \cos(\delta) \cos(\alpha) \hat{i} + \cos(\delta) \sin(\alpha) \hat{j} + \sin(\delta) \hat{k} \quad (3)$$

where \vec{q}_{\oplus} is Earth's heliocentric position, \vec{p}_{obs} is the observer's geocentric position, and α and δ are the *right ascension* and *declination* (Curtis 2014).

Figure 1.

Geometry of the three observations [based on (Gronchi et al. 2021)].



One consequence of the two-body equation of motion is that, at any other time, the state vectors can be expressed in terms of the initial state vectors by means of Lagrange f and g coefficients. This means that it is possible to express \vec{r}_1 y \vec{r}_3 in terms of \vec{r}_2 y \vec{v}_2 :

$$\vec{r}_1 = f_1 \vec{r}_2 + g_1 \vec{v}_2 \quad (4. a)$$

$$\vec{r}_3 = f_3 \vec{r}_2 + g_3 \vec{v}_2 \quad (4. b)$$

This is due to the fact that the Lagrange coefficients and their time derivatives in these expressions are functions of time and initial conditions themselves, thus allowing us to

express how the state vectors change along the orbit (Danby 1988). If the intervals τ_1 and τ_3 between the three observations are small enough, f and g depend only on \vec{r}_2 :

$$f_1 \approx 1 - \frac{\mu}{2r_2^3} \tau_1^2 \quad f_3 \approx 1 - \frac{\mu}{2r_2^3} \tau_3^2 \quad (5. a)$$

$$g_1 \approx \tau_1 - \frac{\mu}{6r_2^3} \tau_1^3 \quad g_3 \approx \tau_3 - \frac{\mu}{6r_2^3} \tau_3^3 \quad (5. b)$$

where $\tau_1 = t_2 - t_1$, $\tau_3 = t_3 - t_2$, and $\mu = 1.327 \times 10^{20} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$ (Sun's standard gravitational parameter, product of its mass and the universal gravitational constant).

The slant ranges ρ_1, ρ_2 , and ρ_3 are given by

$$\rho_1 = \frac{1}{D_0} \left[\frac{6r_2^3 \left(\frac{\tau_1}{\tau_3} D_{31} + \frac{\tau}{\tau_3} D_{21} \right) + \mu(\tau^2 - \tau_1^2) \frac{\tau_1}{\tau_3} D_{31}}{6r_2^3 + \mu(\tau^2 - \tau_3^2)} - D_{11} \right] \quad (6. a)$$

$$\rho_2 = A + \frac{\mu B}{r_2^3} \quad (6. b)$$

$$\rho_3 = \frac{1}{D_0} \left[\frac{6r_2^3 \left(\frac{\tau_3}{\tau_1} D_{13} + \frac{\tau}{\tau_1} D_{23} \right) + \mu(\tau^2 - \tau_3^2) \frac{\tau_3}{\tau_1} D_{13}}{6r_2^3 + \mu(\tau^2 - \tau_1^2)} - D_{33} \right] \quad (6. c)$$

where A, B, D_0 , and D_{ij} are

$$A = \frac{1}{D_0} \left(-\frac{\tau_3}{\tau} D_{12} + D_{22} - \frac{\tau_1}{\tau} D_{32} \right) \quad (7. a)$$

$$B = \frac{1}{6D_0} \left[(\tau_3^2 - \tau^2) \frac{\tau_3}{\tau} D_{12} + (\tau^2 - \tau_1^2) \frac{\tau_1}{\tau} D_{32} \right] \quad (7. b)$$

$$D_0 = \hat{\rho}_1 \cdot (\hat{\rho}_2 \times \hat{\rho}_3) \quad (7. c)$$

$$D_{ij} = \vec{q}_i \cdot (\hat{\rho}_k \times \hat{\rho}_l) \quad (7. d)$$

To calculate \vec{r}_2 , one can use the square of equation 1 with the new expression for ρ_2 :

$$r_2^2 = \left(A + \frac{\mu B}{r_2^3} \right)^2 + 2E \left(A + \frac{\mu B}{r_2^3} \right) + q_2^2$$

where $E = \vec{q}_2 \cdot \hat{\rho}_2$. Expanding and rearranging terms leads to the eighth-order polynomial $r_2^8 + k_2 r_2^6 + k_1 r_2^3 + k_0 = 0$, with its the coefficients being

$$k_2 = -(A^2 + 2AE + q_2^2), \quad k_1 = -2\mu B(A + E) \quad y \quad k_0 = -\mu^2 B^2$$

And the speed \vec{v}_2 is given by

$$\vec{v}_2 = \left(\frac{f_1 \vec{r}_3 - f_3 \vec{r}_1}{g_3 f_1 - f_3 g_1} \right) \quad (8)$$

It is important to keep in mind that there is a limit to the angular (thus temporal) separation between observations. Separations that are too small lead to numerical instability, especially when measurement noise can be dominant; conversely, too large of a separation renders approximations useless (Tennenbaum & Director 1997). This results in an upper limit around 60° , as indicated by (Escobal 1965) and (Long et al. 1989), and a lower limit of approximately 1° , according to (Vallado 2013), who states that the method works especially well when the separation is about 10° .

Classical Orbital Elements

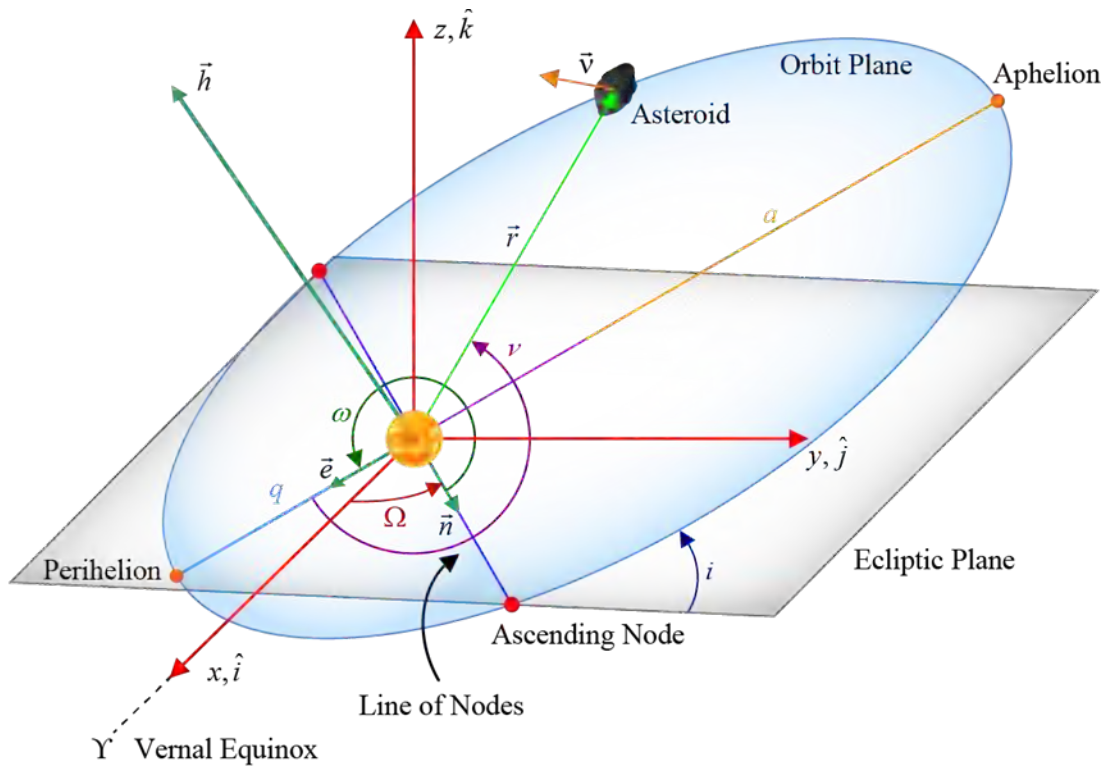
Once the state vectors are calculated, the orbital elements can be obtained using equations which can be found in (Curtis 2014). The elements give the shape and orientation of the orbit in space (Figure 2). These elements are:

- Eccentricity, e : elongation of the orbit.
- Semi-major axis, a : half the length of the line joining the points of perihelion and aphelion (least and greatest distance from the Sun, respectively).
- Inclination, i : angle between the body's orbital plane and the ecliptic (Earth's orbital plane).
- Longitude of the Ascending Node, Ω : angle between the direction of the vernal equinox (point on the ecliptic at which the Sun passes from the southern celestial hemisphere to the northern) and the ascending node (intersection point of the orbital plane and the ecliptic, in the upward direction).
- Argument of Perihelion, ω : angle between the ascending node and the perihelion.
- True Anomaly, v : angle between the perihelion and the body's current position.

In the case of parabolic and hyperbolic orbits, a is not defined (since these are open conic sections), so the Perihelion Distance, q , is used. However, both parabolic and hyperbolic NEAs are rare.

Figure 2.

The classical orbital elements and state vectors [based on (Barbee 2005)].



Monte Carlo Method

It is not reasonable to propagate errors in a traditional way when using extensive and iterative algorithms such as this one. Therefore, the Monte Carlo method is usually chosen to calculate uncertainties since it has been consistently considered a reliable approach and has had wide application in the validation of uncertainty propagators, whether linear or nonlinear in nature. (Ding et al. 2014; Luo & Yang 2017). In the *sampling* use case, the Monte Carlo method simply involves random sampling from a certain probability distribution (Kroese et al. 2014). The idea is to repeat the algorithm or procedure numerous times in order to obtain the quantities of interest using the Law of Large Numbers, a mathematical theorem that states that the average of the results obtained from a large enough number of independent random samples converges to the true value, if it exists (Yao & Gao 2015). This way, we can get the mean value and standard deviation of the simulations, and therefore the uncertainties.

Python Code

The code was written with the popular code development software *Synder IDE* and is based on Python version 3.11. This code was made on the basis of Gauss’s method algorithm developed by (Curtis 2014), which has been translated into the Python language and modified to accommodate our implementation. In addition, we made use of popular astronomy libraries (Table 1).

Table 1.

Python libraries used in the code, essential for various functions and routines.

Library	Description	Creators
Astropy	Core Python package for astronomy, providing tools for celestial calculations.	(Price-Whelan et al. 2018)
Astroquery	Simplifies querying of astronomical databases and web services	(Ginsburg et al. 2019)
Matplotlib	Popular library for creating 2D graphs and charts	(Hunter 2007)
Numpy	Fundamental library for scientific computing with arrays and mathematical functions	(Harris et al. 2020)
Pandas	Data manipulation and analysis library with DataFrames and data arrays	(McKinney 2010)
Poliastro	Library specializing in astrodynamics and orbital mechanics	(Rodríguez et al. 2023)
SciPy	Extends Numpy with advanced scientific computing capabilities	(Virtanen et al. 2020)

The code was written to make its operation as intuitive as possible. Once executed, it runs on a terminal window. Firstly, the program asks for observational data: depending on the user, this can be collected either automatically by reading a text file formatted in the *Astrometry Data Exchange Standard* (ADES) format, or by entering it manually. This data includes: the α and δ values with their respective RMS errors for each of the three observations, the corresponding dates, the NEA identification number, if known, given by the *Minor Planet Center* (MPC, official body for observing and reporting on minor planets under the auspices of the International Astronomical Union) and the observatory code, also assigned by the Minor Planet Center, if it has one (otherwise the geographic coordinates must be entered). After entering all this data, the user will have specified the number N of *Monte Carlo* (MC) *simulations* (a value between 5,000 and 10,000 is recommended) to be done. Before any calculation, we made sure that the code applied *Light-Time Correction* (LTC) to the dates, due to the fact that in reality, the observed positions would correspond to when the light “left” the NEA, so there is a delay. It is calculated with ρ and the speed of light c (Gronchi 2013):

$$\delta t = \frac{\rho}{c} \quad (9)$$

Once this correction is applied, Monte Carlo simulations are done by randomly generating N (α, δ) coordinates for each observation, drawn from the normal distributions defined by their uncertainties. The simulations then proceed by using these coordinates in the Gauss's method algorithm for calculating the corresponding state vectors, and iteratively refining them. The refined state vectors are then used to determine the classical orbital elements as well as the mean anomaly M , orbital period T , mean motion n , perihelion distance q , aphelion distance Q , and perihelion epoch tp . Both the state vectors and the orbital elements are transformed to the ecliptic reference plane with the equations by (Vallado 2013; Sharaf et al. 2014). After this, using the *SciPy* library, the average from each state vector in the MC simulations is calculated with its respective standard deviation, and the same is done for the orbital elements. Once the orbit is calculated, if the NEA is known, the code validates the results by comparing the orbital elements with the ones given by *Horizons System*, an online service by the Solar System Dynamics Group of NASA's JPL for calculating ephemeris (positions) and other high-precision data for bodies in our solar system (Giorgini & SSD Group 2022); otherwise, it queries the JPL Small-body Database (SBDB) for possible matches. In either case, a text file is then generated with the results, including observational data, observation arc (time between the first and last observation), state vectors, and orbital elements with their comparison. In addition, the angular separation θ (angular distance between the first and last observation) is included:

$$\theta = \cos^{-1}[\sin(\delta_1) \sin(\delta_3) + \cos(\delta_1) \cos(\delta_3) \cos(\alpha_1 - \alpha_3)] \quad (10)$$

As a next step, from the orbital elements, the code creates graphics as a visual representation of the NEA orbit, from different views. Finally, the user is given the option to generate ephemerides for the asteroid. To do this, the method of propagating \vec{r}_2 with the f and g coefficients is used (Lee et al. 2019). Throughout the entire run, the code lets the user know what it is doing. It is important to note that the code requires an internet connection at all times to access most tools and services. The recommended value for N was determined with modified versions of the code to calculate the computation time and the consistency of the results for values of N that would be frequently used in MC simulations: 1,000, 5,000, 10,000, 50,000 and 100,000, with 10 iterations each to determine their average. We used observational data (Table 2) obtained from the March 15, 2024 *Minor Planet Circulars Supplement* (Minor Planet Center 2024) with uncertainties of $4.0 \times 10^{-6}^\circ$ and $4.0 \times 10^{-5}^\circ$ for α and δ , respectively, since these were not provided, and we wanted to adhere to MPC's astrometry reporting standards (Project Pluto 2023).

Table 2.

Observational data with the corresponding observation arc and angular separation (between each first and last observation).

NEA	Epoch (LTC UTC)	α [°]	δ [°]	θ [°]	Obs. Arc [d]
1995 FO	2024-02-27 01:13:56.874	141.607171	-24.26946	25.765	16.155
	2024-03-06 21:57:08.999	148.803975	-9.74072		
	2024-03-14 04:57:05.948	153.047900	-1.00581		
2024 ED4	2024-03-12 08:41:43.720	170.134933	-7.38124	2.434	1.822
	2024-03-13 22:18:11.238	172.010721	-8.33164		
	2024-03-14 04:25:06.806	172.334958	-8.46681		
85095 Hekla	2021-08-04 18:59:36.321	1.27685	-7.40092	12.471	40.966
	2021-08-29 18:23:33.218	355.39752	-5.24053		
	2021-09-14 18:10:57.900	349.22838	-3.96226		
200974	2024-03-01 11:56:51.783	158.471079	9.50644	2.986	12.703
	2024-03-06 08:25:22.276	157.295863	9.87134		
	2024-03-14 04:48:37.681	155.573779	10.38525		
526142	2024-03-02 08:53:24.303	178.233829	8.83903	2.785	11.970
	2024-03-06 09:05:28.550	177.390371	9.21129		
	2024-03-14 08:10:49.216	175.630033	9.91533		

RESULTS AND DISCUSSION

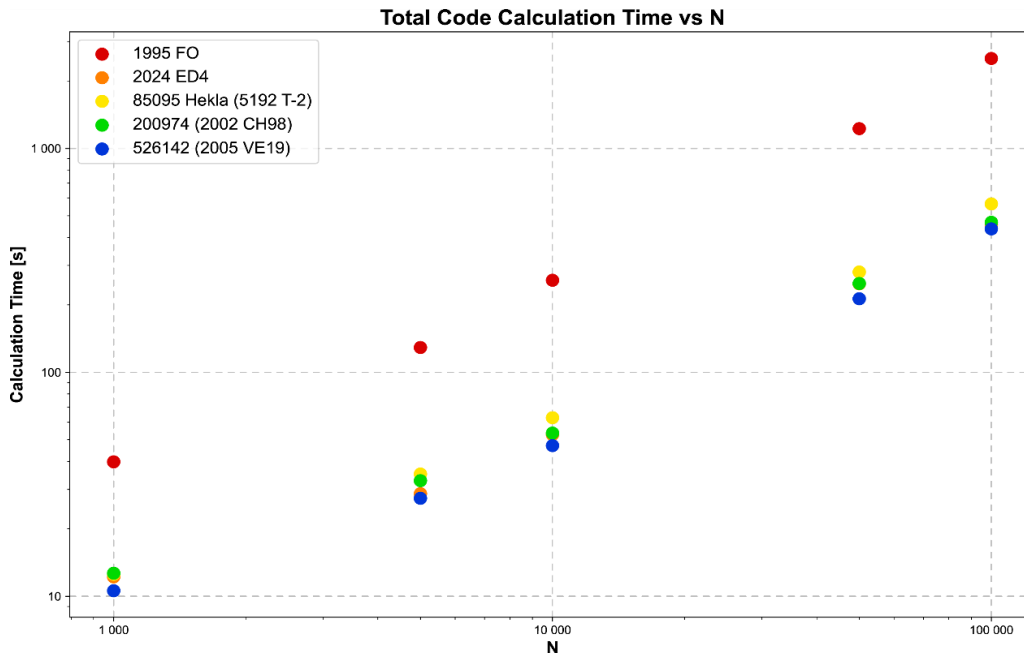
Computation Time

As expected, the code took longer when choosing larger N values (Table 3). In addition, it is seen that, with the exception of 1995 FO, the computation times were similar for each NEA at the respective N values (Figure 3).

Table 3.*Calculation time [s] per N value for each NEA.*

N	1995 FO	2024 ED4	85095 Hekla	200974	526142
1 000	30.353	10.212	12.079	10.899	10.459
5 000	129.17	28.729	35.147	32.823	27.397
10 000	257.84	52.713	62.732	53.539	47.078
50 000	1225.514	248.483	280.655	249.538	213.167
100 000	2521.983	457.661	564.805	468.083	437.314

Performing an analysis of the code we found that this discrepancy between the computation times for 1995 FO is due to the iterative improvement routine in Gauss's method. It turns out that 1995 FO required 5 to 7 times more iterations to achieve state vectors convergence: 270 versus 34, 54, 43 and 37, respectively. This is because the (fixed) tolerance is set to 1.0×10^{-10} to ensure accuracy, therefore, lowering it would reduce the required iterations and computational time, in spite of accuracy, of course.

Figure 3.*Calculation time for each N. The discrepancy in 1995 FO times (in red) can be seen.*

Comparing the times shows that 10,000 iterations of the MC simulation took about one minute to complete, so we consider them to be convenient values. Clearly, if time were the only priority, 1,000 would be the best choice. Additionally, computation times depend on the processing power of the user's computer, logically; therefore, the code was run on a personal desktop computer of modest specifications (Inter Core i7-11700F CPU and 16 GB of RAM), to simulate an average modern user.

Dispersion and Discrepancy of Calculation

Comparing the computational discrepancies for each N (Table 4) we appreciate that the discrepancies of the results with the *Horizons System* reference values did not vary significantly, so increasing N does not necessarily lead to more accurate results; in fact, it only increases the computational demand and, therefore, the computation time. This is what is known as *diminishing returns*, when after a certain threshold, increasing N will not result in noticeable improvements in accuracy (Figure 4).

Table 4.

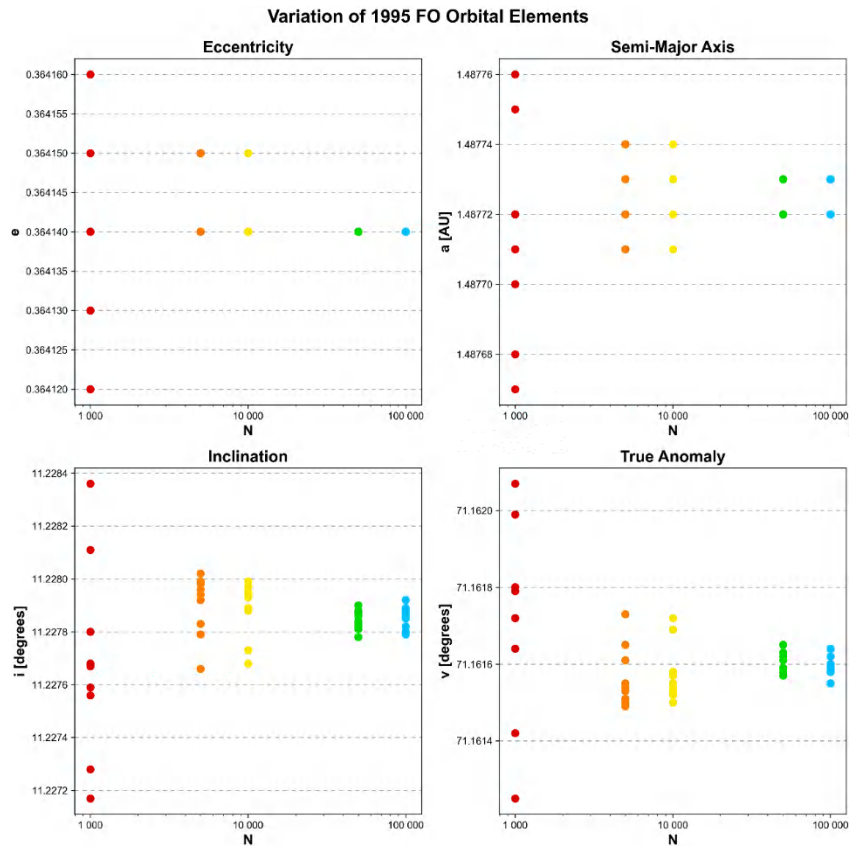
Discrepancy of classical orbital elements with those of the Horizons System for each NEA varying N . The values correspond to the average of 10 iterations.

NEA	N	Δe	Δa [AU]	Δi [°]	$\Delta \Omega$ [°]	$\Delta \omega$ [°]	Δv [°]
1995 FO	1 000	0.00032	0.00079	0.01035	0.00478	0.01116	0.00810
	5 000	0.00031	0.00077	0.01014	0.00469	0.01095	0.00796
	10 000	0.00032	0.00077	0.01016	0.00470	0.01097	0.00797
	50 000	0.00032	0.00077	0.01020	0.00472	0.01102	0.00800
	100 000	0.00032	0.00077	0.01019	0.00471	0.01101	0.00800
2024 ED4	1 000	0.00074	0.00320	0.00156	0.07789	0.15942	0.08199
	5 000	0.00075	0.00323	0.00153	0.07809	0.15970	0.08207
	10 000	0.00075	0.00323	0.00153	0.07813	0.15978	0.08211
	50 000	0.00075	0.00323	0.00154	0.07810	0.15974	0.08210
	100 000	0.00075	0.00323	0.00153	0.07814	0.15979	0.08211
85095 Hekla	1 000	0.00010	0.00011	0.00450	0.00005	0.00395	0.00456
	5 000	0.00010	0.00011	0.00457	0.00005	0.00420	0.00481
	10 000	0.00010	0.00011	0.00458	0.00005	0.00424	0.00486
	50 000	0.00010	0.00011	0.00457	0.00005	0.00419	0.00481
	100 000	0.00010	0.00011	0.00457	0.00005	0.00419	0.00481
200974	1 000	0.00176	0.00223	0.00875	0.02862	0.79071	0.81049
	5 000	0.00165	0.00210	0.00824	0.02700	0.74989	0.76853

	10 000	0.00159	0.00204	0.00799	0.02624	0.73326	0.75137
	50 000	0.00163	0.00208	0.00817	0.02678	0.74539	0.76388
	100 000	0.00165	0.00210	0.00824	0.02699	0.74982	0.76846
526142	1 000	0.00131	0.00021	0.00510	0.02326	0.65304	0.68059
	5 000	0.00130	0.00018	0.00522	0.02478	0.67272	0.70186
	10 000	0.00130	0.00019	0.00521	0.02468	0.67089	0.69993
	50 000	0.00130	0.00019	0.00519	0.02440	0.66751	0.69626
	100 000	0.00130	0.00019	0.00519	0.02447	0.66875	0.69756

Figure 4.

Non-linear variation reduction in some 1995 FO elements for each N .



Therefore, the most important thing in this regard is to choose a value of N that results in the least dispersion, i.e., the greatest consistency in the results. We determined then that if the only priority were consistency, 100,000 would be the best choice.

Determination of N

A value for N should be chosen with these two considerations (low variability and short calculation time). To determine such value, we used a weighted sum model the following way: a weight of 7.5 was given to accuracy, given as the 1-to-5 scoring of the average discrepancy across the elements for each N (smaller discrepancy, higher score); and a weight of 2.5 was given to the computing time, given as the 1-to-5 scoring of the average time for each N (smaller time, higher score). This means a maximum score of $(7.5)(5) + (2.5)(5) = 50$ points. All of this for each NEA, with their score sum determining the final ranking (Table 5).

Table 5.

Weighted scoring of N. The points are the sum of the score for each NEA.

N	Points per NEA (time and accuracy)					Total	Rank
	1995 FO	2024 ED4	85095 Hekla	200974	526142		
1 000	20	50	30	20	35	155	2
5 000	48	40	25	35	25	173	1
10 000	20	28	35	35	35	153	3
50 000	20	30	30	35	28	143	4
100 000	25	10	25	25	25	110	5

We thus determine that the value of N that presents a good balance between the variation of results and the calculation time is 5,000.

CONCLUSIONS

Our code developed in Python allows us to successfully compute the initial orbit of NEAs from three observations of right ascension α and declination δ , using Monte Carlo simulations to obtain the osculating ecliptic orbital elements. The results are sufficiently accurate compared to the reference values by the Horizons System, so the discrepancies are more than acceptable for this type of study. Finally, the developed code has the flexibility and scalability in mind to adapt to different data sets (and therefore, types of orbits) in addition to possible expansions, one of the main reasons for using the Python language since the scope of this work is the creation of an open access tool for the scientific community that facilitates and simplifies the process of studying these bodies.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work is part of the research project “*Estudio de la Forma y Cálculo de las Velocidades Axiales de Asteroides Cercanos a la Tierra*” (*Study of the Shape and Calculation of Axial Velocity of Near-Earth Asteroids*), with identification CUFI-2021-P-CNET-003, which was funded by the 2021 *Convocatoria Universitaria a Fondos de Investigación (University Call for Research Funds)* of the Vice Rectorship for Research and Postgraduate Studies of the University of Panama.

This includes data from the Horizons System tool of the Solar System Dynamics Group, belonging to NASA's Jet Propulsion Laboratory.

This work includes data from the MPC's database, which is made freely available to the public. Funding for this data and the MPC's operations comes from a NASA PDCO grant (80NSSC22M0024), administered via a University of Maryland - SAO subaward (106075-Z6415201). The MPC's computing equipment is funded in part by the above award, and in part by funding from the Tamkin Foundation.

BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

- Barbee, B. W. (2005). Mission Planning for the Mitigation of Hazardous Near-Earth Objects [Master's Thesis, The University of Texas at Austin]. https://www.researchgate.net/publication/36174303_Mission_planning_for_the_mitigation_of_hazardous_Near_Earth_Objects_electronic_resource
- Bardan, R. (2022). NASA Confirms DART Mission Impact Changed Asteroid's Motion in Space. NASA. <http://www.nasa.gov/press-release/nasa-confirms-dart-mission-impact-changed-asteroid-s-motion-in-space>
- CNEOS Editors. (2023). *NEO Basics*. Center for Near-Earth Objects Studies. <https://www.nasa.gov/directorates/smd/planetary-science-division/planetary-defense-coordination-office/nasa-releases-agency-strategy-for-planetary-defense-to-safeguard-earth/>
- Curtis, H. D. (2014). *Orbital Mechanics for Engineering Students* (3rd ed.). Elsevier, BH, Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier.
- Danby, J. M. A. (1988). *Fundamentals of Celestial Mechanics* (2nd ed.). Willmann-Bell.

- David, L. (2013). Russian Fireball Explosion Shows Meteor Risk Greater Than Thought. Space.com. <https://www.space.com/23423-russian-fireball-meteor-airburst-risk.html>
- Ding, C. et al. (2014). Orbit Determination for Asteroid 214088 (2004 JN13) Using Gauss' Method. Summer Science Program 2014. https://bpb-us-w2.wpmucdn.com/campuspress.yale.edu/dist/e/472/files/2015/06/DingChunyang_SSP_Paper-2jvdzig.pdf
- Escobal, P. R. (1965). *Methods of Orbit Determination* (1st ed.). J. Wiley.
- Gauss, C. F. (1809). *Theoria Motus Corporum Coelestium In Sectionibus Conicis Solem Ambientium*. sumtibus Frid. Perthes et I. H. Besser. https://preserver.beic.it/delivery/DeliveryManagerServlet?dps_pid=IE1661019
- Gibbs, J. W. (1889). *On the Determination of Elliptic Orbits from Three Complete Observations*. National Academy of Sciences.
- Ginsburg, A. et al. (2019). Astroquery: An Astronomical Web-Querying Package in Python. *The Astronomical Journal*, 157(3), 98. <https://doi.org/10.3847/1538-3881/aafc33>
- Giorgini, J., & SSD Group, J. (2022). Horizons System. Solar System Dynamics. <https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons/app.html#/>
- Gooding, R. H. (1997). A New Procedure for Orbit Determination Based on Three Lines of Sight. *CELESTIAL MECHANICS AND DYNAMICAL ASTRONOMY*, 66(4), 387–423. <https://doi.org/10.1007/BF00049379>
- Gronchi, G. F. (2013). *Classical Methods of Orbit Determination*. https://www.stardust2013.eu/Portals/63/Images/Training/OTS%20Repository/gronchi_OTSt2013.pdf
- Gronchi, G. F. et al. (2021). Generalization of a Method by Mossotti for Initial Orbit Determination. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 133(9), 41. <https://doi.org/10.1007/s10569-021-10038-4>
- Harris, C. R. et al. (2020). Array Programming with NumPy. *Nature*, 585, 357–362. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>

- Herrick, S. (1971). *Astrodynamics: Orbit Determination, Space Navigation, Celestial Mechanics* (1st ed.). Van Nostrand Reinhold Company.
- Hunter, J. D. (2007). Matplotlib: A 2D Graphics Environment. *Computing in science & engineering*, 9(3), 90–95. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>
- Jay, P. (2008). The Tunguska Event. CBC News. <https://www.cbc.ca/news/science/the-tunguska-event-1.742329>
- Kroese, D. P. et al. (2014). Why the Monte Carlo method is so important today. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 6(6), 386–392. doi:10.1002/wics.1314
- Lee, H. et al. (2019). Orbit Determination of Asteroid 2002 KM6. OSF Preprints. <https://doi.org/10.31219/osf.io/36hkw>
- Long, A. C. et al. (1989). *Goddard Trajectory Determination System (GTDS): Mathematical Theory*. Goddard Space Flight Center. https://books.google.com.pa/books?id=X_WdtgAACAAJ
- Luo, Y., & Yang, Z. (2017). A Review of Uncertainty Propagation in Orbital Mechanics. *Progress in Aerospace Sciences*, 89, 23–39. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2016.12.002>
- McKinney, W. (2010). Data Structures for Statistical Computing in Python. *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*, 445, 51–56. <https://doi.org/10.25080/Majora-92bf1922-00a>
- Minor Planet Center. (2023). Orbits for Near Earth Asteroids (NEAs). Minor Planet Center website. <https://www.minorplanetcenter.net/iau/MPCORB/NEA.txt>
- Minor Planet Center. (2024). *M.P.S. 2024 MAR. 15*. The Minor Planet Circulars/Minor Planets and Comets Supplement, 2145921–2152456. https://www.minorplanetcenter.net/iau/ECS/MPCArchive/2024/MPS_20240315.pdf
- Price-Whelan, A. M. et al. (2018). The Astropy Project: Building an Open-Science Project and Status of the v2.0 Core Package. *The Astronomical Journal*, 156(3), 123. <https://doi.org/10.3847/1538-3881/aabc4f>

- Project Pluto. (2023). Assorted thoughts on astrometric error handling. Project Pluto website. <https://www.projectpluto.com/errors.htm>
- Rodríguez, J. L. C. et al. (2023). Poliastro 0.17.0 (SciPy US '22 edition) (0.17.0). <https://zenodo.org/record/6817189>
- Schwab, D. (2022). Efficacy of Gaussian Process Regression for Angles-Only Initial Orbit Determination [Master's Thesis, The Pennsylvania State University]. https://etda.libraries.psu.edu/files/final_submissions/22263
- Sharaf, M. A. et al. (2014). Two Unified Algorithms for Fundamental Planetary Ephemeris. *International Journal of Astronomy and Astrophysics*, 04(04), 598–606. <https://doi.org/10.4236/ijaa.2014.44054>
- Tennenbaum, J., & Director, B. (1997). How Gauss Determined The Orbit of Ceres. https://archive.schillerinstitute.com/fid_97-01/982_orbit_ceres.pdf
- Vallado, D. A. (2013). *Fundamentals of Astrodynamics and applications* (4th ed.). Microcosm Press.
- Virtanen, P. et al. (2020). SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. *Nature Methods*, 17, 261–272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>
- Yao, K. & Gao, J. (2015). Law of Large Numbers for Uncertain Random Variables. *Fuzzy Systems*, 24(3), 615–621 <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2015.2466080>



Estado poblacional del mono tití panameño (*saguinus geoffroyi*) en la reserva natural Cerro Ancón, Panamá

Population status of the Geoffroy's tamarin (*saguinus geoffroyi*) in the Cerro Ancon Natural Reserve, Panama

Karol M. Gutiérrez-Pineda

Fundación Pro-Conservación de los Primates Panameños (FCPP), Panamá.

gutierrezpinedakm@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-9129-7716>

Karina Carvajal- Castrejón

Fundación Pro-Conservación de los Primates Panameños (FCPP), Panamá.

sergiocar2019@hotmail.com

<https://orcid.org/0009-0007-4403-0331>

Jorge Mendieta

Universidad de Panamá, Escuela de Biología, Centro de Estudios de Recursos Bióticos (CEREB), Panamá. mendi_ja@yahoo.es

<https://orcid.org/0009-0003-6576-5004>

Pedro G. Méndez-Carvajal

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Fisiología y Comportamiento Animal, Panamá.

autor de correspondencia: pedro.mendezc@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0003-1306-5869>

Fecha de recepción: 4 de marzo de 2024

Fecha de aceptación: 9 de septiembre de 2024

DOI [HTTPS://DOI.ORG/10.48204/J.TECNO.V27N1.A6634](https://doi.org/10.48204/J.TECNO.V27N1.A6634)

RESUMEN

En Panamá, las poblaciones del mono tití panameño (*Saguinus geoffroyi*) se encuentran Casi Amenazadas y a partir del 2015 se prevé una reducción poblacional del 25%. Los estudios de ecología poblacional son claves para evaluar la resiliencia de este primate a través del tiempo. Tuvimos como objetivo estimar la estructura grupal y densidad poblacional de *S. geoffroyi* en la Reserva Natural Cerro Ancón (RNCA). Establecimos un transecto de franja (1.75 km de largo y 40 m de ancho) y lo recorrimos dos días a la semana, en dos periodos del día (07:00 a 12:00 h y 13:00 a 18:00 h) desde agosto 2019 a marzo 2020. Logramos contabilizar 54 individuos repartidos en nueve grupos, con promedio de 6 ± 0.7 DE (rango 5 a 7) individuos/grupo, con una relación macho:hembra de 1:0.9, juveniles:hembra de 1.2:0.9 e infante:hembra de 0.2:0.9. La densidad calculada fue de 4.5 individuos/km². Los datos son similares a los reportados anteriormente, mostrando una

resiliencia de los grupos. La RNCA es una zona de refugio para los grupos de *S. geoffroyi*, ofreciéndoles importantes fuentes de alimentación. Recomendamos mantener las conexiones boscosas entre las zonas aledañas y la reserva, de esta forma evitar un hacinamiento de los grupos.

PALABRAS CLAVES

Estructura grupal, densidad poblacional, fragmentación, primates, resiliencia.

ABSTRACT

In Panama, the populations of the Geoffroy's Tamarin (*Saguinus geoffroyi*) are Near Threatened and as of 2015 a population reduction of 25% is expected. Population ecology studies are key to evaluating the resilience of this primate over time. We aimed to estimate the group structure and population density of *S. geoffroyi* in the Cerro Ancon Natural Reserve (RNCA). We established a strip transect (1.75 km long and 40 m wide) and traveled it two days a week, in two periods of the day (07:00 a.m. to 12:00 p.m. and 13:00 to 18:00 h) since August 2019 to March 2020. We managed to count 54 individuals divided into nine groups, with an average of 6 ± 0.7 SD (range 5 to 7) individuals/group, with a male:female ratio of 1:0.9, juveniles:female of 1.2:0.9 and infant:female 0.2:0.9. The calculated density was 4.5 individuals/km². The data are similar to those reported previously, showing resilience of the groups. The RNCA is a refuge area for groups of *S. geoffroyi*, offering them important food sources. We recommend maintaining forest connections between the surrounding areas and the reserve, thus avoiding overcrowding of groups.

KEYWORDS

Group structure, population density, fragmentation, primates, resilience.

INTRODUCCIÓN

El 77% de los primates no-humanos en Panamá se encuentran en categoría de amenaza debido al crecimiento de la población humana y a sus demandas de actividades socioeconómicas, donde muchas de ellas promueven la reducción y aislamiento de las poblaciones de estos primates (Chapman & Peres, 2001; Estrada *et al.*, 2012). El aislamiento a su vez causa hacinamientos, afectando las estructuras grupales y las densidades poblacionales hasta llevarlas a una extinción (Chapman & Peres, 2001; 2021). En 2015, especialistas de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) calcularon que una de las poblaciones más afectadas es la del mono tití panameño (*Saguinus geoffroyi*), previendo una reducción de la población del 25% o más en el transcurso de las próximas tres generaciones (18 años) (Link *et al.*, 2021). Siendo necesario la realización de más estudios que nos indiquen la dinámica en la estructura grupal y densidad poblacional del *S. geoffroyi* en su hábitat natural, para tener un panorama más amplio sobre su estado de conservación según los criterios de ecología poblacional.

En el Neotrópico, se pueden encontrar grupos de primates de la familia Callitrichidae, incluyendo a *S. geoffroyi*, en áreas urbanizadas, siendo considerados como de las pocas familias de primates con buena adaptabilidad al vivir en zonas de regeneración temprana mezclado con áreas abiertas, así como en zonas de regeneración o bosque secundario (Sánchez-Londoño *et al.*, 2013; Soto-Calderón *et al.*, 2023). En Panamá, se ha reportado la presencia del *S. geoffroyi* en áreas conservadas, así como en áreas urbanas (Méndez-Carvajal, 2019).

Estudios realizados en la familia Callitrichidae sugieren que son principalmente monógamos, aunque ocasionalmente ocurren poligamia y poliandria (Sousa, 2005). Las especies del género *Saguinus* tienden a ser monógamos y conformar grupo familiares que pueden ir de dos hasta seis integrantes, compuestos en su mayoría de adultos de ambos sexos, juveniles e infantes (Méndez-Carvajal, 1999; Roncancio *et al.*, 2011). Como ejemplo, en el Parque Natural Metropolitano en Panamá, se encontró un promedio de 4.7 individuos por grupo de mono tití panameño (*S. geoffroyi*) (McNaughton, 2015). De igual manera, en el Choco-Magdalena en Colombia los monos *S. leucopus*, presentan de entre cuatro a seis individuos por grupo (Roncancio *et al.*, 2011). Otro estudio realizado al noreste de Colombia encontró un rango de 2 a 10 individuos de *S. oedipus*, con un promedio de 4.6 individuos por grupo (Savage *et al.*, 2016).

Mientras que las densidades poblacionales pueden ser muy variadas dependiendo del estado de conservación de las localidades (Roncancio *et al.*, 2011). En Panamá, Skinner (1985) reportó densidades de grupos de *S. geoffroyi* en seis áreas de Panamá. Estas densidades iban desde 0.34 grupos/km² a 5.35 grupos/km², esto dependiendo del estado de conservación de la zona y de la perturbación (tráfico de vehículos y peatonal, cazadores furtivos, tráfico de titíes para mascotas, agricultura) (Skinner, 1985). Por otro lado, en Isla Barro Colorado, Zona del Canal de Panamá, reportaron densidades de 3.6 individuos/km², 4.7 individuos/km² y 5.6 individuos/km², que son parecidas a las reportadas para áreas conservadas o con poca perturbación humana, ya sea por ruido u otras (Eisenberg, 1979).

Sin embargo, son pocos los estudios realizados a nivel de ecología poblacional para el *S. geoffroyi* en Panamá. Nuestro objetivo fue estimar la estructura grupal y densidad poblacional de mono tití panameños (*S. geoffroyi*) en la Reserva Natural Cerro Ancón (RNCA), Panamá. De esta manera, conocer el estado poblacional actual de este primate en una zona aislada por la presión antropogénica y proponer planes futuros de conservación en la RNCA y zonas circundantes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

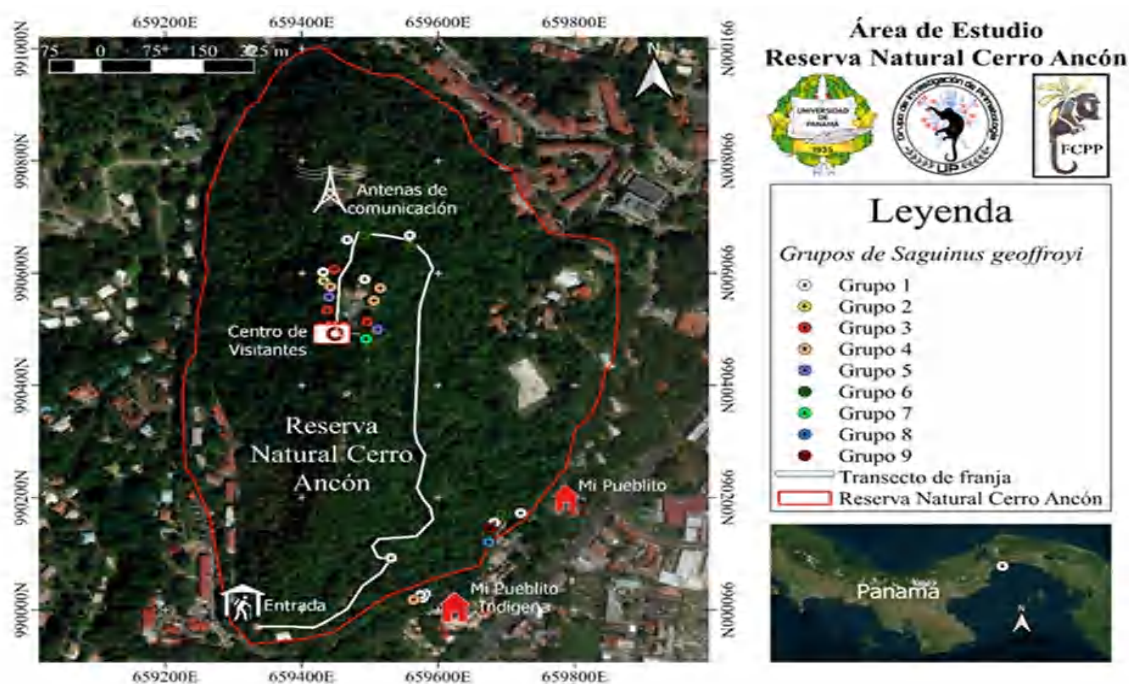
El trabajo de investigación se realizó en la Reserva Natural Cerro Ancón (RNCA), corregimiento Ancón, distrito de Panamá (8°57'26"N, 79°32'58"O) (Figura 1). La RNCA

posee 0.48 km² de extensión, con un Bosque Tropical Seco. Se encuentra a una altitud de 199 msnm y según la estación meteorológica de Balboa de la Autoridad del Canal de Panamá (ACP), presenta una precipitación promedio anual de 137.0 mm, una temperatura promedio anual de 28.5°C, con un promedio de 86% de humedad relativa (Instituto Nacional de Estadística y Censo-INEC, 2015).

La RNCA fue declarada Área protegida y Reserva Natural del Distrito de Panamá, de acuerdo con, el Acuerdo Municipal N° 157 de 31 de julio de 2001. Se declaró Patrimonio de la Nacionalidad Panameña según el Decreto Ejecutivo N° 104 (Ministerio de Economía y Finanzas, 2003). A partir de este decreto se prohíbe la caza, tala, quema, recolección y destrucción de los recursos naturales.

Figura 1.

Localización de los grupos de mono tití panameño (*Saguinus geoffroyi*) en la Reserva Natural Cerro Ancón y áreas aledañas



Localización y estimación de la estructura grupal de *S. geoffroyi*

La búsqueda de los grupos se realizó dos días a la semana, en dos periodos del día (07:00 a 12:00 horas y 13:00 a 18:00 horas) desde agosto del 2019 hasta marzo del 2020, logrando un esfuerzo de muestreo de 80 horas por mes, con 640 horas de muestreo durante los ocho meses que duró el trabajo de campo. Se establecieron tres sitios para localización y estimación de las estructuras grupales, la calle principal Amelia Denis De Icaza, Mi pueblito y Mi pueblito Indígena. Los grupos de mono tití panameño (*S. geoffroyi*) fueron localizados por detección de vocalización y observaciones al dosel de los árboles.

Para la identificación de los grupos se utilizaron binoculares Nikon Action Ex de 10x50 y una cámara handycam Sony de 60x para capturas de fotos y videos de los individuos de mono tití panameño (*S. geoffroyi*). Se clasificó los individuos como, machos y hembras adultos, juveniles e infantes, de acuerdo con las características morfológicas visibles. Los adultos son más grandes que los juveniles e infantes, los machos presentan testículos, las hembras presentan vulva, pezones muy visibles por amamantar o presencia de crías amamantándose, de igual manera, se buscó observar la ausencia de testículos (Skinner,1985). Los juveniles son más grandes que los infantes y se pueden desplazar solos, presentan patrones de coloración irregulares en el pelaje. Por otro lado, los infantes se pueden observar en la espalda de los padres y su cara tiende a ser en forma de V, con ojos grandes (Moynihan, 1970).

Estimación de la densidad poblacional del *S. geoffroyi*.

El muestreo para estimar la densidad poblacional se llevó a cabo de entre dos a tres días por mes, durante los 8 meses del trabajo, realizando un total de 20 muestreos. Para la estimación solo se contabilizó a los individuos que se encontraron dentro del transecto de franja establecido. El transecto de franja tuvo 1.75 km de largo/40 m de ancho y se ubicaba sobre la calle principal Amelia Denis de Icaza y se recorrió a una velocidad promedio de un km/hora.

Para estimar la densidad poblacional se utilizó la ecuación matemática:

$$D=n/L \times 2w,$$

donde, n es el número total de animales contados, L es el largo total del transecto, y w es el ancho del transecto a cada lado de la línea media (Mandujano, 1994).

Análisis estadísticos

Se realizaron estadísticos no inferenciales para estimar el promedio, desviación estándar, error estándar utilizando el software PAlaeontological STatistics (PAST 4.03) (Hammer et

al., 2001). También se calculó la relación entre hembras:machos, hembras:juveniles y hembras:infantes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estructura grupal

Los grupos de la especie *Saguinus geoffroyi* son principalmente familiares, compuestos por adultos de ambos sexos, juveniles e infantes (Méndez-Carvajal, 1999; Roncancio *et al.*, 2011). En este estudio logramos la identificación de 54 individuos repartidos en nueve grupos (tabla 1), compuesto por infantes (6%), hembras (28%), machos (31%) y juveniles (35%). El promedio de individuos por grupo fue de seis $SD\pm 0.7$ (rango 5 a 7), con una relación macho:hembra de 1:1, juveniles:hembra de 1:1 e infante:hembra de 0.2:1. Las estructuras grupales del *S. geoffroyi* que reportamos son similares a las encontradas en otras partes de Panamá, así como las de otras especies del género *Saguinus*. Ejemplo, en el lado Pacífico del Canal de Panamá se reportó un promedio 6.5 individuos por grupo de *S. geoffroyi* (Dawson, 1976). Mientras que, en el Parque Natural Metropolitano en Panamá encontraron un promedio de 4.7 individuos (McNaughton, 2015). De igual manera, en el Choco-Magdalena en Colombia los *S. leucopus*, presentan de entre cuatro a seis individuos por grupo (Roncancio *et al.*, 2011). Otro estudio realizado al noreste de Colombia encontró un rango de 2 a 10 individuos de *S. oedipus*, con un promedio de 4.6 individuos por grupo (Savage *et al.*, 2016).

Tabla 1.

Estructura grupal del mono tití panameño (*Saguinus geoffroyi*) en la Reserva Natural Cerro Ancón, Ciudad de Panamá, Panamá

Grupos (G)	Hembras	Machos	Juveniles	Infantes	Total
G1	1	2	2	0	5
G2	2	2	1	1	6
G3	2	2	3	0	7
G4	2	1	3	0	6
G5	3	3	1	0	7
G6	1	2	3	0	6
G7	1	1	2	1	5
G8	2	2	2	0	6
G9	1	2	2	1	6
Total	15	17	19	3	54
Promedio	1.7	1.9	2.1	0.3	6.0
Desviación estándar	0.7	0.6	0.8	0.5	0.7

Las proporciones encontradas en este estudio coinciden con la estructura social de familia encontrada en *S. geoffroyi* según Méndez-Carvajal (2019). La presencia de una mayor cantidad de juveniles podría ser indicativo de un buen éxito reproductivo y buena tolerancia ante nuevos miembros en el grupo, ya que los nacimientos de estos juveniles pudieron darse meses antes de este estudio. Esto concuerda con el planteamiento de la pirámide con base amplia, es decir que la población de *S. geoffroyi* de la RNCA presenta una proporción alta de individuos jóvenes; característico de poblaciones de crecimiento rápido (Morlans, 2004). Por otro lado, se ha descrito que las hembras del género *Saguinus* pueden llegar a estar receptivas sexualmente incluso después de los 10 días postparto y durante la lactancia, pudiendo estar continuamente preñadas (Carroll & Muir, 2002; Castañeda *et al.*, 2010). En Panamá, se ha reportado que efectivamente la temporada de apareamiento de los individuos de *S. geoffroyi*, al igual que los nacimientos se pueden dar durante todo el año, sin embargo, se ha visto con mayor frecuencia las cópulas durante los meses de noviembre a febrero y los nacimientos van desde marzo a junio (Dawson, 1976). En este trabajo se observó mayor frecuencia en las conductas de cortejo y cópula durante los meses de enero a febrero, indicándonos una nueva etapa de reproducción anual en la población del *S. geoffroyi* en la Reserva Natural Cerro Ancón.

Densidad poblacional

La Reserva Natural Cerro Ancón fue declarada Área protegida, siendo de las pocas zonas en el centro de la ciudad de Panamá que alberga una población de mono tití panameño (*S. geoffroyi*) (Méndez-Carvajal, 2019). Sin embargo, existen pocos datos sobre el estado poblacional de esta especie en la zona, siendo más difícil el poder orientar en acciones de manejo dentro del área protegida. Es por esto que es importante evaluar la relación que hay entre la población y el área que ocupa, por medio de la densidad poblacional (Witmer, 2005). En este estudio logramos localizar al menos 126 individuos de *S. geoffroyii* en un total de 20 muestreos (tabla 2), estimando una densidad poblacional de 4.5 individuos por km² en la RNCA. Esta densidad es similar a las reportadas anteriormente, por ejemplo, en Isla Barro Colorado por Eisenberg (1979), de 3.6 individuos/km², 4.7 individuos/km² y 5.6 individuos/km². Sin embargo, las densidades poblacionales del *S. geoffroyii* pueden depender del estado de conservación de la zona y de la perturbación (tráfico de vehículos y peatonal, cazadores furtivos, tráfico de titíes para mascotas, agricultura, y poda indiscriminada), tal como Skinner (1985) reportó en las seis áreas de Panamá que monitoreo.

Tabla 2.

Datos obtenidos durante el muestreo para estimar la densidad poblacional del mono tití panameño (*Saguinus geoffroyi*) en la Reserva Natural Cerro Ancón. Leyenda: *w* (ancho del transecto), *L* (longitud del transecto), *n* (número de individuos contados), *ng* (número de grupos contados).

Muestreo	Fecha	w(km)	L (km)	n	ng
M-1	Agosto-2019	0.04	1.75	6	1
M-2	Agosto-2019	0.04	1.75	5	1
M-3	Septiembre-2019	0.04	1.75	6	1
M-4	Septiembre-2019	0.04	1.75	6	1
M-5	Septiembre-2019	0.04	1.75	6	1
M-6	Octubre-2019	0.04	1.75	6	1
M-7	Octubre-2019	0.04	1.75	6	1
M-8	Noviembre-2019	0.04	1.75	10	2
M-9	Noviembre-2019	0.04	1.75	7	1
M-10	Noviembre-2019	0.04	1.75	5	1
M-11	Diciembre-2019	0.04	1.75	6	1
M-12	Diciembre-2019	0.04	1.75	6	1
M-13	Diciembre-2019	0.04	1.75	7	1
M-14	Enero-2020	0.04	1.75	6	1
M-15	Enero-2020	0.04	1.75	7	1
M-16	Enero-2020	0.04	1.75	6	1
M-17	Febrero-2020	0.04	1.75	6	1
M-18	Febrero-2020	0.04	1.75	6	1
M-19	Marzo-2020	0.04	1.75	6	1
M-20	Marzo-2020	0.04	1.75	7	1
Total		0.8	35	126	21

Encontramos que estos grupos frecuentan las áreas del mirador en la cima, (Figura 1) dentro del área protegida porque los turistas han colocado comederos para poder acercarse y tomarse fotos con los monos tíes. Aunque nuestros datos muestren que la densidad poblacional es similar a otras poblaciones reportadas para el género *Saguinus*, consideramos que un plan adecuado de turismo ecológico podría incorporarse para proteger directamente a la población de los individuos de monos tíes que utiliza la RNCA como su ámbito hogareño. Una de las consecuencias que conlleva el turismo ecológico mal dirigido es que facilita el tráfico ilegal de este primate. Normalmente trafican individuos inmaduros y para llegar a ellos en muchos

casos tienen que matar a los padres (Shanee *et al.*, 2015; Maher & Wyatt, 2017). En Panamá, así como en otros países los traficantes o cazadores realizan comederos para atraer a los individuos y posteriormente capturarlos (Chutia, 2010; Méndez-Carvajal, 2019). El tráfico ilegal ha causado declives poblacionales, por ejemplo, del *S. oedipus* en Colombia (Castellón Castro, 2020). En el Perú, uno de los géneros más traficados para mascotas y tener en centros turísticos/zoológicos ilegales es el *Saguinus*, causando declives en sus poblaciones (Shanee *et al.*, 2015).

Por otro lado, el turismo ecológico mal dirigido también podría causar zoonosis/antropozoonosis, ya que tanto los visitantes como los individuos de *S. geoffroyi* pueden estar expuestos a enfermedades infecciosas (Rhyan & Spraker, 2010). Esto implica una población vulnerable al estar rodeada de zonas que aún mantienen conexión boscosa pero que los puede llevar a lugares residenciales donde pueden ser expuestos, por lo que una fuerte educación ambiental y presencia de autoridades de la Policía Ambiental, Rural y Turística de Panamá deberían ser asignados a este sector para velar por la conservación de esta especie, ya que la conservación de los primates silvestres también consiste en garantizarles buena salud y longevidad a sus poblaciones (Wallis & Rick Lee, 1999).

Es importante mencionar que durante el estudio pudimos observar que la mayoría de los grupos de *S. geoffroyi* visitan la reserva por la fuente de alimentación que les ofrece, tales como: *Anacardium excelsum*, *Cecropia peltata*, *Chrysophyllum cainito*, *Cissus sicyoides*, *Diospyros inconstans*, *Enterolobium cyclocarpum*, *Ficus sp.*, *Guazuma ulmifolia*, *Musa paradisiaca*, *Muntingia calabura*, *Spondias mombin*, *Sterculia apetala*, y *Tetragastris panamensis* (Carvajal-Castrejón, 2021.). También observamos que los monos titíes se alimentaron de la araña red de oro *Nephila clavipes*, lagartijas *Anolis sp.*, saltamontes de las familias Acrididae y Tettigonidae, entre otros. Por tanto, dentro de las acciones de protección para la RNCA postulamos la conservación y reforestación de estas especies vegetales nativas que son parte de la dieta de los monos titíes (*S. geoffroyi*) y que son claves para el equilibrio ecológico de sus poblaciones.

CONCLUSIONES

Encontramos que el promedio nuestros grupos de *Saguinus geoffroyi* es similar a lo reportado en otros estudios, también encontramos una mayor proporción de inmaduros. Sugerimos que la población de monos titíes en la RNCA tiene buen éxito reproductivo, lo cual es indicativo de las especies del género *Saguinus*. También encontramos que la densidad poblacional estimada es similar a las encontradas en áreas conservadas. Sugerimos que la RNCA es una zona de importancia para la población de *S. geoffroyi*, ofreciéndole una estabilidad alimenticia.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Fundación Pro-Conservación de los Primates Panameños (FCPP) por el financiamiento de este proyecto de investigación. A el Grupo de Investigación de Primatología de la Universidad de Panamá por la asesoría durante el trabajo. A los investigadores del Herbario de la Universidad de Panamá por el apoyo en la identificación de las especies de plantas.

BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

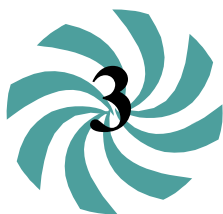
- Carroll, J. B. & Muir, S. (2002). Reproducción y crianza a mano. En: Carroll JB (eds) Guías de manejo de la EAZA para Callitricidos. Bristol zoo gardens, pp 58–64.
- Carvajal-Castrejón, K. (2021). Densidad Poblacional y Disponibilidad de Alimento del Mono Tití Panameño (*Saguinus Geoffroyi*) en la Reserva Natural Cerro Ancón, Ancón, Provincia de Panamá, Panamá. Universidad de Panamá (Tesis de licenciatura). Pp. 100.
- Castañeda, F. E., Buritica, E. F. & Barbos I. X. (2010). Tití gris (*Saguinus leucopus* GUNTHER 1876): algunos aspectos biológicos y de interés veterinario sobre la especie. Revista Colombiana de Ciencia Animal. 3(1): 81-89.
- Castellón Castro, C. A. (2020). Evaluación del estado de aplicación de las estrategias de conservación implementadas en Colombia para la protección del mono titi cabeciblanco (*Saguinus oedipus*). Tesis de licenciatura. Universidad Pontificia Bolivariana, Santander, Colombia.
- Chapman, C. A. & Pérez. C. A. (2021). Primate conservation: Lessons learned in the last 20 years can guide future efforts. *Evolutionary Anthropology*. 30(5): 345-361.
- Chapman, C. A., & Peres, C. A. (2001). Primate conservation in the new millennium: the role of scientists. *Evolutionary Anthropology*. 10(1): 16-33.
- Chutia, P. (2010). Studies on hunting and the conservation of wildlife species in Arunachal Pradesh. *Sibcoltejo*. 5: 56-67.
- Dawson, G. A. (1976). Behavioral ecology of the Panamanian tamarin, *Saguinus oedipus* (Callitrichidae, Primates). Tesis doctotal. Michigan State University, Michigan, Estados Unidos.

- Eisenberg, J. (1979). Habitat, economy, and society: some correlations and hypotheses for the neotropical primates. In: Bernstein and E. Smith, (eds.) Primate ecology and human origins, Garland STPM Press, New York, pp. 215-262.
- Estrada, A., Raboy, B. E. & Oliveira, L. C. (2012). Agroecosystems and primate conservation in the tropics: a review. *American Journal of Primatology*. 74(8): 696-711.
- Giehl, E. L. H., Moretti, M., Walsh, J. C., Batalha, M. A. & Cook, C. N. (2017). Scientific evidence and potential barriers in the management of Brazilian protected areas. *PLoS One*. 12(1): e0169917. Doi:10.1371/journal.pone.0169917.
- Hammer, Ø., & Harper, D. A. (2001). Past: paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia electrónica*. 4(1): 1.
- Link, A., Méndez-Carvajal, P.G., Palacios, E. & Mittermeier, R. A. (2021). *Saguinus geoffroyi* (amended version of 2019 assessment). *The IUCN Red List of Threatened Species* 2021: e.T41522A192551955. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2021-1.RLTS.T41522A192551955.en>. Accessed on 06 February 2024.
- Maher, J. & Wyatt, T. (2017). International Trade in Animals and Animal Parts. In: Maher et al., (eds) The Palgrave International Handbook of Animal Abuse Studies. Palgrave Macmillan, London. https://doi.org/10.1057/978-1-137-43183-7_11
- Mandujano, S. (1994). Conceptos generales del transecto de franja. *Ciencia*. 45: 203-211.
- McNaughton, C. (2015). Characteristics of Geoffroy's tamarin (*Saguinus geoffroyi*) population, demographics, and territory sizes in urban park habitat (Parque Natural Metropolitano, Panama City, Panama). *Independent Study Project (ISP) Collection*. 2276. https://digitalcollections.sit.edu/isp_collection/2276
- Mendez-Carvajal, P. G. (1999). El mono tití. *Revista Ancón*. 9: 26.
- Mendez-Carvajal, P. G. (2019). A long-term monitoring study to evaluate the primate conservation status in Panama using species distribution modelling and complementary information, Doctoral thesis, Durham University, Durham, United Kingdom.
- Ministerio de Economía y Finanzas (MEF). (2003). Cerro Ancon "Patrimonio de la Nacionalidad Panameña". Ciudad de Panamá, Panamá.

- Morlans, M. C. (2004). Introducción a la ecología de poblaciones. Editorial Científica Universitaria, Universidad Nacional de Catamarca.
- Moynihan, M. H. (1970). Some behavior patterns of platyrrhine monkeys: II. *Saguinus geoffroyi* and some other tamarins. *Smithsonian Contributions to Zoology*. 28:1-77.
- Rhyan, J. C., & Spraker, T. R. (2010). Emergence of diseases from wildlife reservoirs. *Veterinary pathology*. 47(1), 34-39.
- Roncancio, N. J., W. Rojas & Defler, T. (2011). Densidad poblacional de *Saguinus leucopus* en remanentes de bosque con diferentes características físicas y biológicas. *Mastozoología neotropical*. 18(1): 105-117.
- Sánchez-Londoño, J. D., Santamaría, M., Devenish, C., Mendoza, H., Forero, F., Medina, S., & Franco, A.M. (2013). Densidad, uso de hábitat y estado de conservación de una población de *Saguinus leucopus* en un bosque premontano de Colombia. En: Defler et al., (eds) *Primates Colombianos en Peligro de Extinción*. Asociación Primatológica colombiana, Bogotá, Colombia, pp 181-193.
- Savage, A., Thomas, L., Feilen, K. L., Kidney, D., Soto, L. H., Pearson, M., & Guillen, R. R. (2016). An assessment of the population of cotton-top tamarins (*Saguinus oedipus*) and their habitat in Colombia. *PLoS One*. 11(12): e0168324.
- Shanee, N., Mendoza, A. P. & Shanee, S. (2015). Diagnostic overview of the illegal trade in primates and law enforcement in Peru. *American Journal of Primatology*. 79(11): e22516.
- Skinner, C. (1985). A field study of Geoffroy's tamarin (*Saguinus geoffroyi*) in Panama. *American Journal of Primatology*. 9(1): 15-25.
- Soto-Calderón, I. D., Pérez-Estrada, A. M., Acosta-Madrigal, T., Jurado-Gutiérrez, A. M., Delgado-Villegas, V., Mesa-Alarcón, V. & Hidalgo-García, C. C. (2023). Exploratory analysis of key factors in the habitat use of a Neotropical primate in an urban environment: The White-footed tamarin (*Saguinus leucopus*, Callitrichidae). *Research Square*. Pp 1-23. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3276518/v1>
- Sousa, M. B. C., Albuquerque, S. D. R., Albuquerque, F. D. S., Araujo, A., Yamamoto, M. E. & Arruda, M. D. F. (2005). Behavioral strategies and hormonal profiles of dominant and subordinate common marmoset (*Callithrix jacchus*) females in wild monogamous groups. *American Journal of Primatology*. 67(1): 37-50.

Wallis, J. & Rick Lee, D. (1999). Primate Conservation: The Prevention of Disease Transmission. *International Journal of Primatology*. 20(6): 803–826.
<https://doi.org/10.1023/A:1020879700286>

Witmer G. W. (2005). Wildlife population monitoring: some practical considerations. *Wildlife Research*. 32: 259–263.



Simuladores virtuales para Química General en el Instituto Carmen Conte Lombardo Penonomé, Panamá

Virtual simulators for General Chemistry at the Carmen Conte Lombardo Institute, Penonome, Panama

Tídiam-Kala Santamaría,

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

tídiam.santamaria@up.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0000-5665-3279>

Yorlanys-Del Carmen Quintero-Cedeño

MEDUCA-Regional de Coclé, Panamá.

yorlanysq@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0006-7832-367X>

Fecha de recepción: 7 de abril de 2024

Fecha de aceptación: 14 de octubre de 2024

DOI [HTTPS://DOI.ORG/10.48204/J.TECNO.V27N1.A6635](https://doi.org/10.48204/J.TECNO.V27N1.A6635)

RESUMEN

En esta investigación, se implementó una Unidad Didáctica Tecnológica (UDT) como estrategia de aprendizaje en los cursos de química del duodécimo grado en el Instituto Carmen Conte Lombardo, ubicado en la provincia de Coclé. La UDT tenía como la finalidad de mejorar las clases de química mediante el uso de herramientas tecnológicas, enfocándose en comprender los conceptos de cinética y equilibrio químico a través de simulaciones virtuales. Participaron dos grupos: el Grupo A se centró en cinética química, utilizando el simulador ChemLab y, el Grupo B que trabajó con equilibrio químico, utilizando tres actividades del simulador LaboVirtual Blogspot.

Con la aplicación de la UDT se observó un aumento del 83% en el aprendizaje de los conceptos de velocidad de reacción y un aumento del 72% en la comprensión de la influencia de los catalizadores. Las actividades diseñadas para el equilibrio químico también tuvieron resultados positivos, con un incremento del 22% en la comprensión utilizando el simulador LaboVirtual Blogspot.

La incorporación de herramientas tecnológicas en las escuelas de la región favorece el aprendizaje independiente y autónomo entre los estudiantes. Para las instituciones, ayuda a aumentar la motivación de los estudiantes, y cultivar un mayor interés por las ciencias, especialmente la Química.

PALABRAS CLAVES

Unidad Didáctica Tecnológica, autoaprendizaje, ChemLab, Labovirtual, pretest, post-test

ABSTRACT

In this research, a Technological Didactic Unit (TDU) was implemented as a learning strategy in twelfth-grade chemistry courses at Instituto Carmen Conte Lombardo in Coclé province. The TDU aimed to enhance chemistry classes by leveraging technological tools, focusing on understanding chemical kinetics and equilibrium concepts through virtual simulations. Two groups participated: Group A focused on chemical kinetics using the ChemLab simulator, while Group B worked on chemical equilibrium with three activities from the LaboVirtual Blogspot simulator.

Following the TDU implementation, there was an 83% increase in learning reaction rate concepts and a 72% improvement in understanding catalyst influence. The activities designed for chemical equilibrium also yielded positive outcomes, with a 22% increase in comprehension using the LaboVirtual Blogspot simulator.

The integration of technological tools in schools across the region promotes independent and autonomous learning among students. For institutions, it not only enhances student motivation but also cultivates a deeper interest in the sciences, with a particular emphasis on Chemistry.

KEYWORDS

Technological Didactic Unit, self-learning, ChemLab, Labovirtual, Pretest, Post-test

INTRODUCCIÓN

En la provincia de Coclé, los fracasos escolares en el área de química han sido motivo de preocupación constante en el ámbito educativo (INEC, 2021). Este problema refleja dificultades significativas en la comprensión y aplicación de conceptos clave dentro de la disciplina. El potencial del uso de recursos informáticos en la enseñanza y aprendizaje de las ciencias, tales como los simuladores, desde sus inicios se ha valorado como un elemento que permite al estudiante explorar, experimentar y descubrir fenómenos naturales, con el potencial de motivar y mejorar su participación en el proceso de aprendizaje (Arguedas_Matarrita, et. al 2017; Barraqué, et. al, 2021; Cajilema, et. al, 2022; Chacha Chonillo-Sislema, 2022; Hernández-Onofre, et. al 2018).

Se desarrolló una Unidad Didáctica Tecnológica (UDT) para el duodécimo grado del Bachiller en Ciencias del Instituto Carmen Conté Lombardo, ubicado en Churuquita Chiquita de Penonomé, provincia de Coclé, República de Panamá. Este colegio fue fundado en 1970 y desde su fundación ha estado formando a jóvenes procedentes de más de 25 comunidades del área norte de Coclé. Actualmente tiene una matrícula de aproximadamente 649 estudiantes y un cuerpo docente de 42 miembros. Este plantel cuenta con 2 Bachilleres, uno

en Ciencias y otro en Turismo. Tradicionalmente, los estudiantes del Bachiller en Ciencias muestran mayor tasa de fracasos en materias como química porque encuentran dificultad para comprender fenómenos o principios abstractos.

La enseñanza de la Química en todos sus niveles es compleja, no sólo por sus contenidos, si no por el fuerte componente experimental de esta ciencia, y el desarrollo de problemas que exigen un modelo mental en el estudiante para su mejor comprensión, en parte por los riesgos asociado en las demostraciones experimentales, y por la carencia de la infraestructura adecuada para estas prácticas, que genera un vacío que aleja al estudiante del interés por esta ciencia (Murillo Pulgarín et. al, 2018). La disponibilidad creciente y acceso actual a recursos informáticos, softwares y simuladores, cada vez más amigables, ha permitido su incorporación al estudio de la Química, representando un avance para una mejor comprensión de esta ciencia y, una mejor forma de compartir el conocimiento por parte de los docentes de esta especialidad (Blanco López, 2018, Medina Valderrama, et. al, 2022).

La UDT diseñada, se aplicó de manera formal para la enseñanza de los temas de Cinética Química a través del simulador Chemlab y de Equilibrio Químico, con el simulador LaboVirtual, los cuales ofrecen entornos interactivos que permiten a los estudiantes explorar y experimentar con conceptos químicos de manera segura y eficaz (Alulima Alulima, et. al, 2021; Arroba Arroba, et. al, 2021; Chacha Cajilema, et. al, 2022; Torres Nieves, 2018). Para evaluar el impacto de la UDT, se formularon preguntas centrales sobre ambos temas, previo al uso de los simuladores, a través de un pretest, y luego del uso de los mismos, a través de la aplicación de un post-test (efectuando las mismas preguntas). El pretest permitió identificar el nivel de conocimiento inicial de los estudiantes, mientras que el post-test evaluó el impacto de la UDT en la comprensión de los temas. Con estos resultados, se obtuvo información sobre el grado de comprensión de los estudiantes sobre los temas desarrollados y, se logró identificar áreas que requieren mayor atención.

El uso de simuladores de laboratorio en la provincia de Coclé, a nivel de educación secundaria, representa una oportunidad para los estudiantes, para que se acerquen más a los fundamentos de las ciencias básicas, especialmente al estudio de la Química, entendiendo su importancia como un eje transversal en diversas disciplinas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación se ajusta a un diseño cuasi experimental porque se trata de un estudio pre/postest y por la forma no aleatoria de seleccionar a las dos poblaciones de estudio, los cuales ya estaban formadas antes de la implementación de la UDT. Se trabajó con los estudiantes del Bachiller en Ciencias quienes históricamente encuentran dificultad para asimilar los conceptos más abstractos de la química, lo que muchas veces provoca alta tasa

de fracasos en este curso. La UDT se desarrolló dentro del marco del proyecto SENACYT-PFIA-IACP-2022-12, y participaron docentes de este plantel y se contó con el apoyo de docentes de química de la Universidad de Panamá. Se estructuró la UDT acompañada de recursos tecnológicos como juegos educativos en línea, exposiciones explicativas (PowerPoint, aulas virtuales, videos personalizados, instructivos, entre otros), con la finalidad de evidenciar que los temas de interés (Cinética Química y Equilibrio Químico) tienen relación significativa con fenómenos de nuestra vida cotidiana y de esta forma, complementar la comprensión de los temas.

En esta UDT, se desarrollaron 12 sesiones de clases, una sesión por semana y en cada una de las sesiones se definieron los conceptos tratados del tema a trabajar, realizando una descripción detallada de los objetivos y actividades mediante exposiciones orales. Los resultados del pretest y post-test fueron tabulados y graficados utilizando el programa Jamovi.

Los sitios web y herramientas digitales como: Classroom, Google sites, YouTube, PowerPoint y videos personalizados fueron utilizados después de la aplicación de diagnóstica (Pre-Test) como aportación para el desarrollo de contenido de los temas de Cinética y Equilibrio Químico. (ver tabla N°1)

Tabla 1

Descripción de herramientas de la UDT

Herramientas tecnológicas	Metodología	Actividad
1. Simulador ChemLab	Explicativo-interactivo	Explicación de contenido de cinética química en una reacción redox
2. Simulador LaboVirtual (Equilibrio químico/Constante de equilibrio/ Principio de Le Chatelier)	Explicativo-interactivo	Resolución de experiencias de laboratorio virtuales de química
3. Google sites	Explicativo	Explicación de contenidos de equilibrio químico.
4. PowerPoint	Explicativo	Explicación de contenidos de cinética química
5. Educaplay	Interactivo	Retroalimentación de conceptos de ambos temas
6. Educaplus	Explicativa	Simulación de equilibrio químico
7. Quizizz	Explicativo-interactivo	Conceptos de cinética química
8. Videos personalizados	Explicativo	Instrucciones de uso de simuladores virtuales
9. Classroom	Interactivo	Aula virtual, para colocar contenidos.
10. Analogías en aula de clases	Interactivo- explicativo	Función del equilibrio químico.

Estas herramientas fueron aplicadas en el tercer trimestre del año 2022 y la población de objeto de estudio estuvo conformada por dos (2) grupos: Grupo A, (con 25 estudiantes) y grupo B, (con 20 estudiantes). Las edades de estos estudiantes oscilaban entre 17 y 19 años.

Recolección de la información

Se planificaron dos etapas para la recolección de la información: antes de aplicar las simulaciones, a través de un pretest y, luego de su aplicación, a través de un post-Test. Tanto el pretest como el post-test se aplicaron de forma presencial (en papel), con la finalidad de agilizar la recolección de los datos.

Pretest: consistió en preguntas cerradas previo al uso de simuladores. Estuvo conformado por 3 grupos de preguntas:

- Ítems para conocer si habían utilizado herramientas tecnológicas en los cursos de química.
- Ítems acerca de los conocimientos previos que posee de la cinética de una reacción.
- Ítems acerca de los conocimientos previos sobre el tema de equilibrio químico.

Post-Test: los ítems aplicados en el **Post-Test** fueron los mismos que se utilizaron en el pretest, pero colocados al final de la aplicación de la UDT para evaluar la comprensión de los temas abordados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este trabajo se estudió y se evaluó la percepción hacia las herramientas tecnológicas utilizadas y el rendimiento de los estudiantes en el aprendizaje de la química, específicamente para los temas de cinética de una reacción y equilibrio químico. Se realizaron análisis comparativos de pretest y post-test para evaluar el impacto de las herramientas tecnológicas y la funcionalidad de la UDT diseñada para los temas desarrollados.

Pretest -Post-Test sobre percepción de herramientas tecnológicas para el aprendizaje de la química.

En la tabla N°2 se observan los resultados del pretest y post-test sobre la percepción de la población de estudio acerca del uso de juegos didácticos como complementos de aprendizaje, en donde se evidenció que la aplicación de la UDT impactó de forma significativa la forma de aprender de los estudiantes. Al comparar las respuestas de los Pretest y Post-Test, fue evidente que antes de la UDT, la mayoría de los estudiantes de ambos grupos no usaban ningún juego didáctico en sus clases de química (86.4% en el Grupo A y 85.0% en el Grupo B).

En cuanto al uso de simuladores de aprendizaje, en la tabla N°3 se observa que, la mayoría de los estudiantes desconocían sobre simuladores para el aprendizaje de la química (71.4% en el Grupo A y 85.7% en el Grupo B). Después de la implementación de la UDT, esta cifra se redujo a cero, indicando una adopción completa de estas herramientas tecnológicas. Estos comparativos nos permiten visualizar el conocimiento previo de la población de estudio sobre algunas herramientas tecnológicas en la enseñanza de la química y de esta forma, evaluar sus expectativas respecto a este tipo de herramientas.

Tabla 2

Percepción sobre uso de juegos didácticos en el aprendizaje de la química

Respuestas	Pretest		Post-test	
	% del Total Grupo A	% del Total Grupo A	% del Total Grupo B	% del Total Grupo B
Educaplay	4.5%	47.6%	5.0%	47.2%
Quizizz	4.5%	4.5.0%	5.0%	52.8%
Educaplus	4.5%	47.6%	5.0%	0.0%
Ninguno	86.4.0%	0%	85.0%	0.0%

Con la aplicación de la UDT, el simulador LaboVirtual mostró el mayor aumento en popularidad, incrementándose del 19.0% al 48.7% con su uso en el Grupo A, mientras que el simulador ChemLab también experimentó un crecimiento significativo, del 4.8% al 45.9% en el Grupo B (Tabla N°3). En contraste, el simulador PhET tuvo un comportamiento mixto, en ambos grupos, lo que se atribuye a que este simulador no tiene tantos recursos visuales para los temas desarrollados dentro de esta investigación. Con la adopción de estas herramientas dentro de la UDT diseñada, se evidenció una mayor disposición y aceptación de las tecnologías educativas para el aprendizaje de la química, indicando que la UDT fue efectiva en promover el uso de simuladores de laboratorio, especialmente LaboVirtual y ChemLab, entre los estudiantes lo que puede contribuir a mejorar la comprensión y el rendimiento en esta disciplina.

Tabla 3

Simulador de laboratorio de Química en el aprendizaje de la química conocido

Respuestas	Pretest		Post-test	
	% del Total Grupo A	% del Total Grupo A	% del Total Grupo B	% del Total Grupo B
PhET	4.8%	2.4%	4.8%	5.5%
LaboVirtual	19.0%	48.7%	4.8%	48.6%
ChemLab	4.8%	48.7%	4.8%	45.9%
Ninguno	71.4.0%	0%	85.7%	0%

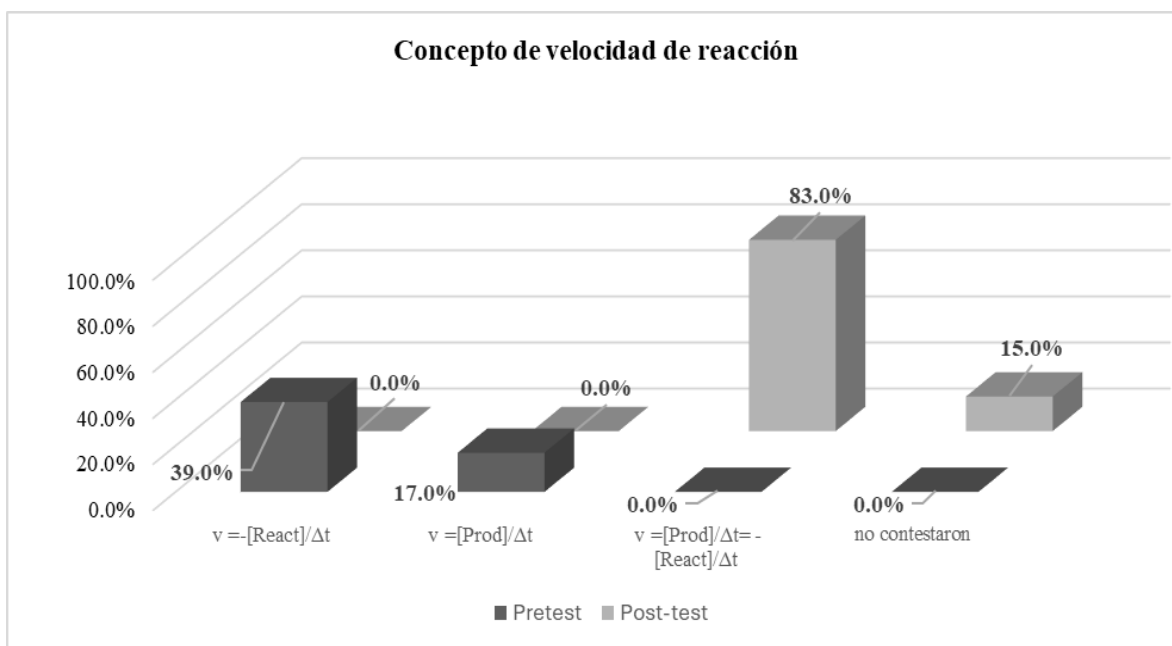
Es importante mencionar que, al inicio de esta investigación, los estudiantes mostraban poco interés y evitaban utilizar cualquier herramienta virtual, reflejando una cierta resistencia a adoptar estas tecnologías. Esta resistencia posiblemente fue ocasionada por el temor de volver a clases completamente virtuales.

Pretest -Post-Test de conocimientos. Tema: Velocidad de una reacción (con el Simulador virtual de ChemLab de Model Science)

Con respecto al grado de conocimiento sobre velocidad de reacción, el cual había sido introducido previamente mediante explicaciones orales con diapositivas y analogías en el aula, en el pretest se observó que un 56.0% de la población de estudio optó por los conceptos relacionados a la reacción directa o a la reacción inversa (formación de productos a lo largo del tiempo o, desaparición de reactivos a lo largo del tiempo), a pesar de no haber visualizado los conceptos en un simulador. Ninguno de los participantes eligió la respuesta integradora sobre el sentido de la reacción, posiblemente debido a su limitado manejo de aspectos lógicos-matemáticos. Al comparar las respuestas del pretest y post-test para este concepto, se pudo observar que en el post-test el 83% de los encuestados optó por la respuesta integradora, evidenciando mejor integración de conceptos matemáticos después de la aplicación de la UDT. (Ver Fig. 1)

Figura 1

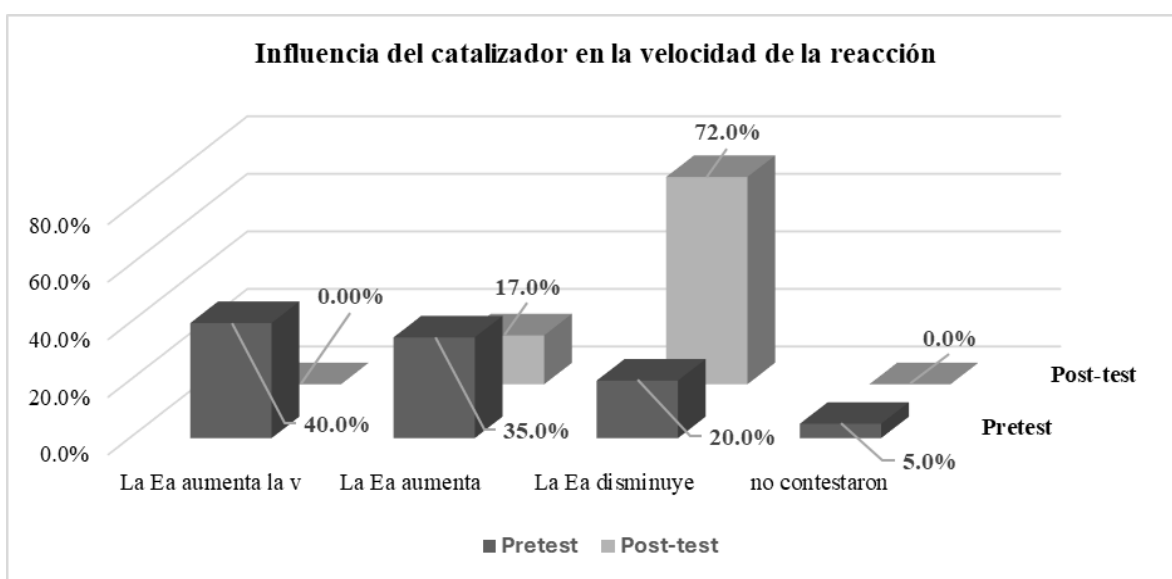
Comparación de pretest y post-test para el concepto de velocidad de reacción (Grupo A)



Con respecto a la pregunta que relaciona energía y velocidad de reacción (Fig. 2), en el pretest se observa que la asimilación de conceptos no fue clara ya que se obtuvo un alto porcentaje de respuestas erróneas. Lo que denota que para relacionar el concepto de energía es necesario utilizar un recurso adicional (herramienta tecnológica), ya que con la explicación tradicional el concepto fue difícil de comprender. Sin embargo, después de la aplicación de la UDT y la visualización de conceptos con el simulador ChemLab, se obtuvo un 72% de respuestas correctas, lo que permitió incrementar el dominio de los conceptos involucrados de forma significativa.

Figura 2

Comparación de pretest y post-test para “Influencia del catalizador en la velocidad de la reacción” (Grupo A)



Estos resultados permitieron observar las ideas previas de los estudiantes con la explicación tradicional, donde se percibieron errores conceptuales que, con la ayuda de diversas herramientas tecnológicas, simulaciones, juegos en clases, en línea y, también analogías en el aula, se logró recrear de una forma sencilla y dinámica, conceptos abstractos, lo cual permitió mejorar, integrar y fortalecer aspectos conceptuales del tema. Estos resultados son consistentes con otras investigaciones en donde se han utilizado simuladores para facilitar el aprendizaje de este tema (López M., et. al., 2018).

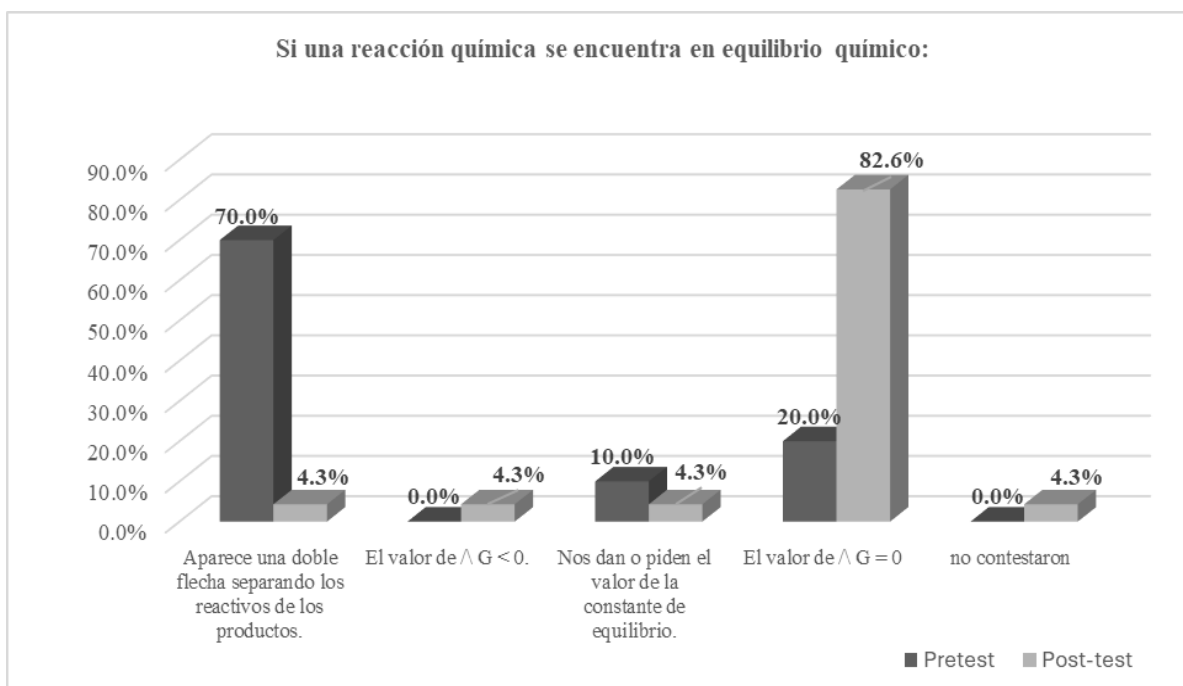
En la figura 3 se observa el comparativo de los pretest y post test para evaluar el grado de conocimiento sobre equilibrio químico, tema que al igual que *velocidad de una reacción*,

había sido introducido previamente mediante explicaciones orales con diapositivas. En comparación con el pretest, se puede observar que después de la aplicación de la UDT un 82.6% de los estudiantes pueden relacionar conceptos con ecuaciones de forma correcta y que las actividades diseñadas y el uso de simuladores, ayudó a mejorar la comprensión del tema de equilibrio. Los resultados fueron muy similares para otras preguntas integradoras relacionadas con reversibilidad y espontaneidad de una reacción química.

Figura 3

Comparación de pretest y post-test para el concepto de equilibrio químico de una reacción (Grupo B)

Pretest -Post-Test de conocimientos. Tema: Equilibrio Químico (con el Simulador virtual de laboratorio LaboVirtual)

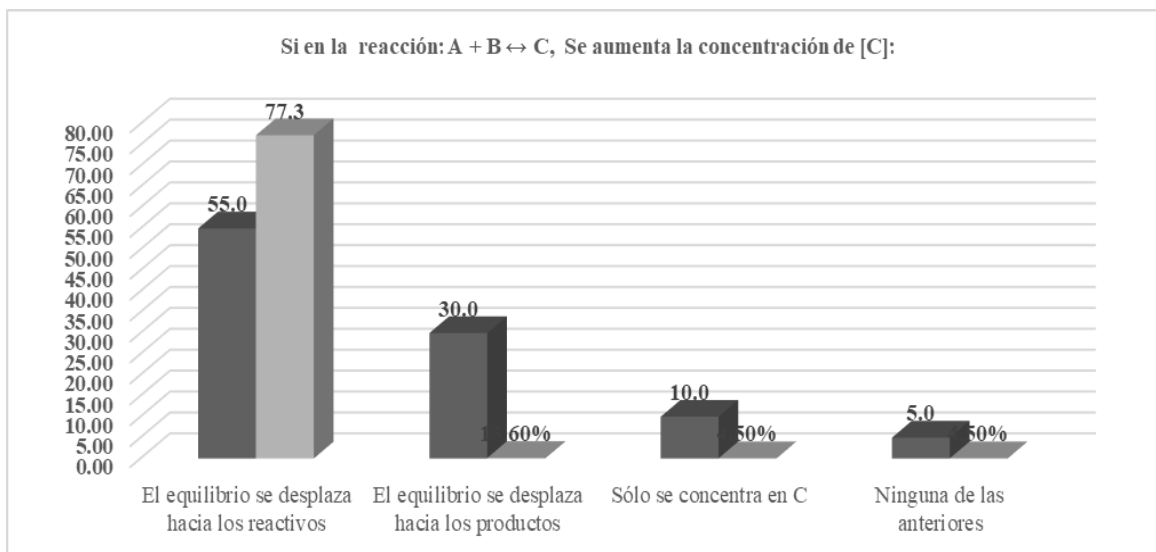


Al abordar el principio de Le'Chatelier, se observó que el 55% de los encuestados acertaron la respuesta correcta en el pretest, es decir, antes de realizar las simulaciones del tema de equilibrio químico. (Fig. 4). Esta información es relevante porque, al analizar más de cerca estos datos, se evidencia que una gran proporción de los estudiantes logró asimilar correctamente el concepto de desplazamiento del equilibrio en una reacción al provocar perturbaciones en el sistema, utilizando la explicación tradicional del tema. Lo anterior,

refuta algunas teorías donde se expone que este tema es difícil de entender para los estudiantes (Quílez J., 2022; Rocha A., et. al., 2000).

Figura 4

Comparación de pretest y post-test para el concepto de desplazamiento del equilibrio químico de una reacción (Grupo B)



Igual consideración se puede indicar, al observar las respuestas del post-test en donde se observa que la aplicación de la UDT mejora y refuerza el conocimiento al aumentar el número de respuestas correctas después de realizadas las actividades prácticas del simulador de equilibrio químico. Esta mejora significativa en el rendimiento es consistente con otras investigaciones en donde se resalta una mejora en el aprendizaje obtenido por parte de los estudiantes de las áreas de Química (Alulima Alulima, et. al, 2021; Arroba Arroba, et. al, 2021; Barraqué, et. al, 2021; Chacha Cajilema, et. al, 2022).

Efectividad de la UDT (actividad de retroalimentación)

Con la finalidad de obtener retroalimentación directa de los estudiantes sobre su experiencia con la UDT y el impacto en su aprendizaje, se realizó una encuesta de satisfacción (como secuencia de aprendizaje) para conocer la percepción general de los estudiantes con la implementación de la UDT y evaluar posibles mejoras a la estrategia utilizada. En esta encuesta se observó que la percepción de la efectividad del aprendizaje en ambos grupos mejoró, ya que en el pretest demostraron apatía hacia las aulas virtuales, mientras que en el post-test esa percepción inicial mejoró después de trabajar con la UDT. (Ver Tabla 4)

Tabla 4*Efectividad del aprendizaje en las aulas virtuales*

Respuestas	Pretest		Post-test	
	% del Total Grupo A	% del Total Grupo B	% del Total Grupo A	% del Total Grupo B
Bastante efectivo	30.0%	5.0%	38.0%	32.0%
Muy efectivo	20.0%	25.0%	16.0%	14.0%
Ligeramente efectivo	45.0%	50.0%	45%	0.0%
Poco efectivo	5.0%	20.0%	1%	0.0%

En términos generales y de manera consistente, el uso de ambos simuladores, influyeron de forma positiva en los estudiantes, en el sentido que les permitió tomar control sobre aspectos demostrativos de sus contenidos teóricos trabajando en el aula y desde casa, pudieron verificar su aprendizaje de forma repetitiva, sin la presencia del docente, de otros compañeros, y sobre todo minimizando riesgos por exposición a sustancias químicas.

Por otro lado, como parte del proyecto se puso a disposición el simulador ChemLab, para los estudiantes, así como las facilidades de uso de computadoras, no obstante, se hace necesario que el estado invierta en este tipo de tecnología, ya que la falta de este tipo de herramientas constituye una limitación que se advierte en otros estudios (Chacón-Ramirez, et. al, 2016).

Otro aspecto por destacar es que, los docentes de química del Instituto Carmen Conte Lombardo se integraron al proyecto de implementación de los simuladores, por lo cual la barrera de la falta de capacitación docente no constituyó una limitante, como se ha evidenciado en otras investigaciones (Arguedas-Matarrita, et. al, 2017).

CONCLUSIONES

En esta investigación se evalúa la influencia del uso de los simuladores en el proceso de enseñanza-aprendizaje, en particular de ChemLab para abordar el tema de cinética química, y de LaboVirtual para el tema de equilibrio químico. A través del desarrollo de una UDT, se aplicó un diseño experimental que incluye la realización de pretest y post-test, con preguntas relacionadas con los temas abordados por ambos simuladores.

Los resultados indican mejoras significativas en el rendimiento de los estudiantes al comparar los post-test y los pretest, evidenciando un claro avance en la comprensión de los conceptos abordados.

Ambos simuladores, (ChemLab y LaboVirtual) proporcionan entornos interactivos que facilitan el aprendizaje práctico, permitiendo a los estudiantes experimentar y explorar de manera segura y efectiva, sin restricciones de tiempo o recursos a través de simulaciones accesibles y visualmente atractivas, ayudando a consolidar el conocimiento teórico de una manera interactiva. Estos hallazgos coinciden con los estudios de Torres Nieves F., 2018 y Alulima Alulima et al., 2021, quienes también han implementado estrategias de enseñanza para el aprendizaje de la química utilizando simuladores.

El uso de simuladores dentro de las actividades de aprendizaje para los temas planificados en el Instituto Carmen Conte Lombardo confirma una estrategia pedagógica efectiva. Estas herramientas no solo complementan la enseñanza tradicional, sino que también potencian la comprensión y retención de conocimientos, mejorando significativamente el rendimiento académico de los estudiantes.

AGRADECIMIENTOS

Las autoras agradecen a la Secretaría Nacional de Ciencias y Tecnología, por su aporte invaluable y el auspicio de la presente investigación, a través del proyecto PFIA-IACP-2022-12.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Alulima Alulima, L. D. & Mena Alvarado, E. V., 2021. Chemlab y Modellus como herramientas de simulación de laboratorio virtual en Química y Física. Tesis de Maestría. Universidad Tecnológica Indoamérica. Disponible en: <http://repositorio.uti.edu.ec/handle/123456789/2847> [Accedido el 21 de junio de 2024].

Arguedas-Matarrita, C., Concari, S. B. & Marchisio, S. T., 2017. Una revisión sobre desarrollo y uso de Laboratorios Virtuales y Laboratorios Remotos en la Enseñanza de la Física en Latinoamérica. Conference Paper. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/317209671> [Accedido el 21 de junio de 2024].

Arroba Arroba, M. F. & Acurio, S., 2021. Laboratorios virtuales en entorno de aprendizaje de química orgánica, para el bachillerato ecuatoriano. Revista Científica UISRAEL, 8(3). Disponible en: <https://doi.org/10.35290/rcui.v8n3.2021.456> [Accedido el 21 de junio de 2024].

- Barraqué, F., Sampaolesi, S., Briand, L. E. & Vetere, V., 2021. La enseñanza de la química durante el primer año de la universidad: el estudiante como protagonista de un aprendizaje significativo. *Educación Química*, 32(1). Disponible en: <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2021.1.75760> [Accedido el 23 de junio de 2024].
- Blanco López, A., 2018. El aprendizaje de la Química. Aspectos importantes a la luz de la investigación didáctica. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/322686282> [Accedido el 23 de junio de 2024].
- Chacha Cajilema, Á. V., 2022. Virtual ChemLab como recurso didáctico para el aprendizaje de Química Analítica con estudiantes de cuarto semestre de la carrera de Pedagogía de las Ciencias Experimentales Química y Biología, periodo octubre 2021 - marzo 2022. Trabajo de titulación para optar al título de Licenciado en Pedagogía de las Ciencias Experimentales Química y Biología. Universidad Nacional de Chimborazo, Facultad de Ciencias de la Educación Humanas y Tecnologías.
- Chacón-Ramírez, N., Saborío-García, F. & Nova-Bustos, N., 2016. El uso de recursos didácticos de la química para estudiantes en los colegios académicos diurnos de los circuitos 09 y 11, San José, Costa Rica. *Revista Electrónica Educare (Educare Electronic Journal)*, 20(3), pp. 1-24. Disponible en: <https://doi.org/10.15359/ree.20-3.2> [Accedido el 23 de junio de 2024].
- Chonillo-Sislema, L., 2022. El laboratorio virtual “Crocodile Chemistry” como estrategia didáctica para el aprendizaje de Química. [Documento de conferencia]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/366247908> [Accedido el 23 de junio de 2024].
- Hernández-Onofre, R., Venegas-López, M. de los Á. & Rayas Monjaraz, N. V., 2018. Estudio sobre el uso de laboratorio virtual de química en alumnos de Mecatrónica de nivel superior. *Revista de Políticas Universitarias*, 2(3), pp. 12-17. Instituto Nacional de Estadística y Censo de Panamá (INEC), 2021. Disponible en: <https://www.inec.gob.pa/archivos/P02895625202301201022548.pdf> [Accedido el 23 de junio de 2024].
- López Guerrero María del Mar, López Guerrero Gema, Rojano Ramos Santiago. (2018). Uso de un simulador para facilitar el aprendizaje de las, Reacciones de Óxido-Reducción. Estudio de caso, Universidad de Málaga. *Revista de Educación en Química*, 29(3), pp. 79-98. DOI: 10.22201/fq.18708404e.2018.3.63728

- Medina Valderrama, C. J., Medina Valderrama, A. I. *Hacedor*, 2022. Estrategias metodológicas para la enseñanza de la química en el nivel universitario. *Hacedor*, 6(1), Enero-Junio. ISSN: 2520-0747.
- Murillo Pulgarín, J.A., Alañón Molina, A., García Bermejo, L.F., Martín Alfonso, F., Sánchez González, P., León Belén, F.P. (2018). El higrómetro coloreado (principio de Le Châtelier). *Didáctica de la Física y la Química en los distintos niveles educativos*, pp.273-277. Disponible en: <https://www.quimicaysociedad.org/wp-content/uploads/2018/04/didactica-de-la-fisica-y-la-quimica-en-los-distintos-niveles-educativos-2.pdf>
- Quílez Juan. (2022). Aproximación histórica al principio de Le'Chatelier: aceptación, cuestionamiento, problemas de enseñanza y dificultades de aprendizaje. Implicaciones didácticas. *Revista de la Real Sociedad Española de Química. An. Quím.*, 118 (3), 2022, 185-191. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8884037.pdf>
- Rocha A., García, E., & Domínguez, J. (2000). Dificultades en el aprendizaje del equilibrio químico. *Revista Adaxe*, 16, pp. 163-178. Disponible en: https://minerva.usc.es/xmlui/bitstream/handle/10347/645/1/pg_163-178_adaxe16.pdf
- Torres Nieves, F., 2018. Simulador virtual Model Chemlab como estrategia para la enseñanza de la química inorgánica. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. Repositorio Institucional de la CUAED. Disponible en: <https://repositorial.cuaed.unam.mx:8443/xmlui/handle/20.500.12579/5262> [Accedido el 23 de junio de 2024].



Los métodos de Numerov y Runge-Kutta-Verner aplicados al movimiento de un sistema mecánico con un grado de libertad

Numerov and Runge-Kutta-Verner methods applied to the motion of a mechanical system with one degree of freedom

Gustavo J. Bracho Rodríguez

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

gustavo.bracho@up.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0003-9804-676X>

Fecha de recepción: 21 de agosto de 2024

Fecha de aceptación: 23 de octubre de 2024

DOI [HTTPS://DOI.ORG/10.48204/J.TECNO.V27N1.A6636](https://doi.org/10.48204/J.TECNO.V27N1.A6636)

RESUMEN

El presente artículo muestra el uso tanto del método de Numerov como del método de Runge-Kutta-Verner de quinto orden donde es realizada la comparación de las soluciones numéricas obtenidas con la correspondiente solución exacta para un sistema mecánico masa-resorte-amortiguador con un grado de libertad que experimenta un movimiento armónico amortiguado libre bajo el régimen de subamortiguamiento y sobreamortiguamiento, respectivamente. Las soluciones numéricas son obtenidas mediante la ejecución de códigos fuentes escritos en Python 3. El propósito del artículo es evaluar y contrastar la precisión y eficiencia computacional de ambos métodos en la solución de ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO) que describen el comportamiento dinámico de un sistema mecánico. Para lograrlo, se presentan ejemplos específicos en los que se aplican ambos algoritmos a sistemas con condiciones iniciales físicamente admisibles. Los resultados obtenidos muestran que, aunque ambos métodos proporcionan soluciones precisas para el sistema estudiado, el método de Numerov se destaca por su precisión, mientras que el método de Runge-Kutta-Verner, presenta ventajas en términos de mayor flexibilidad y eficiencia en problemas con mayor complejidad numérica. El artículo concluye entre otros aspectos, la importancia de que a pesar de que ambos métodos están fundamentados con enfoques totalmente diferentes, éstos presentan excelentes correspondencias entre los resultados numéricos con las soluciones exactas entre ambos, a pesar de que sus campos de estudio donde actúan son completamente diferentes.

PALABRAS CLAVES

Método de Numerov, método de Runge-Kutta, sistema sub amortiguado, sistema sobre amortiguado, Python 3.

ABSTRACT

This article shows the use of both the Numerov method and the fifth-order Runge-Kutta-Verner method where a comparison is made between the obtained numerical solutions and the corresponding exact solution for a one degree of freedom mass-spring-damper mechanical system experiencing free harmonic damped motion under underdamping and overdamping regimes, respectively. The numerical solutions are obtained by executing source codes written in Python 3. The purpose of the article is to evaluate and contrast the accuracy and computational efficiency of both methods in solving ordinary differential equations (ODEs) that describe the dynamic behavior of a mechanical system. To achieve this, specific examples are presented in which both algorithms are applied to systems with physically admissible initial conditions. The results obtained show that, although both methods provide accurate solutions for the system studied, the Numerov method stands out for its accuracy, while the Runge-Kutta-Verner method presents advantages in terms of greater flexibility and efficiency in problems with greater numerical complexity. The article concludes, among other aspects, the importance of the fact that even though both methods are based on completely different approaches, they present excellent correspondences between the numerical results and the exact solutions between both, despite the fact that their fields of study where they act are completely different.

KEYWORDS

Numerov method, Runge-Kutta-Verner method, underdamped system, overdamped system, Python 3.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas mecánicos con un grado de libertad, particularmente el conformado por masa-resorte-amortiguador, son sistemas caracterizados completamente por estar identificados por una sola coordenada independiente, donde el papel desempeñado por el amortiguador es inducir un efecto de fricción viscosa provocando de esta manera que el sistema mecánico pierda energía al transcurrir el tiempo.

Existen varios métodos numéricos utilizados para resolver ecuaciones diferenciales ordinaras (EDO), que surgen de manera natural en una amplia diversidad de problemas físicos, algunos de ellos son los métodos de Euler (Chapra, 2023), métodos de Runge-Kutta (Pang, 2006) y métodos de diferencias finitas (Li et al., 2018), y tal vez el método menos conocido por muchos, perteneciente a la familia de los métodos de Runge-Kutta, nos referimos al llamado método de Runge-Kutta-Verner (Verner, 1978).

Hoy día, en la literatura encontramos una diversidad de artículos donde hacen uso del método de Numerov, pero en su mayoría están enfocados en la solución numérica de la ecuación de Schrödinger en una dimensión independiente del tiempo (Balkrishna, 2014; Caruso et al., 2022; Martinz & Ramos, 2018; Yousefian & Shadmani, 2014). El presente trabajo además de implementar el método de Numerov, también hace uso de uno de los métodos pocos

conocidos que pertenece a la familia de los métodos de Runge-Kutta, se trata del método de Runge-Kutta-Verner (Verner, 1978), pero en esta ocasión, aplicado a un sistema distinto, es decir, a un sistema mecánico con un grado de libertad, conformado por una masa y resorte y un amortiguador cuya función, del amortiguador, es actuar como medio resistivo al movimiento libre de la masa.

Las soluciones numéricas realizadas, son obtenidas mediante ejecución de varios códigos fuentes escritos en Python 3, versión 3.11.0, bajo el entorno de trabajo integrado Visual Studio Code, versión 1.9.2 siendo comparadas con las correspondientes soluciones exactas tanto para el régimen subamortiguado como el sobreamortiguado.

El objetivo del presente artículo es ilustrar la importancia del uso de los métodos numéricos en la simulación de la evolución del movimiento de un sistema físico, al utilizar dos métodos numéricos completamente diferentes en un mismo problema, es decir, haciendo uso particular de sistemas mecánicos con un grado de libertad donde intervengan EDO que experimente un movimiento armónico amortiguado libre, considerando condiciones iniciales físicamente admisibles a ser utilizadas para describir cómo su movimiento, esto es el desplazamiento, varía con el tiempo, cuando éste se encuentre tanto en el régimen subamortiguado como sobreamortiguado.

MATERIALES Y MÉTODOS

Método de Numerov

El método de Numerov (Hjorth-Jensen, 2013; Landau et al., 2015;), llamado así en honor al astrónomo de origen ruso Boris Numerov, el cual fue concebido inicialmente, en esencia, para resolver EDO de segundo orden, con el objetivo de abordar problemas de naturaleza astronómica, como lo es, el cálculo de las correcciones de la trayectoria del cometa Halley (Caruso et al., 2022). Su objetivo principal era obtener soluciones a problemas de los autovalores asociados a las EDO de segundo orden presentes en la mecánica celeste, con la particularidad de que estas no presenten su primera derivada temporal de una función desconocida $y(t)$, de la forma (Vesely, 2013).

$$\frac{d^2y}{dt^2} = -g(t)y + s(t), \quad (1)$$

donde $s(t)$ es un término no homogéneo y $g(t)$ es una función real. Para el caso en que $g(t) > 0$, las soluciones de la ecuación homogénea, esto es, $s(t) = 0$, son oscilatorias (Koonin & Meredith, 2018). Cualquier EDO de movimiento que presenta la forma descrita en la Ec. (1), su solución numérica puede ser obtenida además de los métodos numéricos conocidos, también lo sería por el método de Numerov.

El método de Numerov es considerado un método de multipasos (Vesely, 2013), debido a que es obtenido a partir de puntos discretos en un intervalo de separación h . Así para el tiempo en el n -ésimo punto, sería

$$t_n = t_0 + nh, \quad (2)$$

donde t_0 , es el tiempo al inicio del movimiento.

Podemos hacer uso del método de diferencias finitas centradas, que nos permitirá obtener una expresión recurrente necesaria para ser utilizada por los métodos numéricos, especialmente en lo referente al método de Numerov. El método de diferencias finitas, particularmente las centradas, es una técnica numérica ampliamente utilizada, confiable y efectiva, para resolver problemas en física computacional, donde no solamente es válida para resolver numéricamente EDO, sino también para ecuaciones diferenciales en derivadas parciales (EDP), el cual se fundamenta por diferencias finitas presentes en una malla conformada por puntos discretos (Giordano & Nakanishi, 2006). Para el caso de la segunda derivada, el método de diferencias finitas centradas se expresa en la forma

$$\frac{d^2y(t_n)}{dt^2} = \frac{y_{n+1} - 2y_n + y_{n-1}}{(\Delta t)^2}, \quad (3)$$

donde $y_{n+1} = y(t_{n+1}) = y(t_0 + nh)$, y haciendo $\Delta t = h$.

Para poder implementar el método de Numerov, se hace necesario la obtención de una relación de recurrencia. Esta relación de recurrencia puede ser obtenida, al realizar una expansión en series de Taylor de la función $y(t_n)$ alrededor del punto t_n , esto es,

$$y_{n+1} = y_n + h \left. \frac{dy_n}{dt} \right|_{t=t_n} + \frac{h^2}{2} \left. \frac{d^2y_n}{dt^2} \right|_{t=t_n} + \frac{h^3}{6} \left. \frac{d^3y_n}{dt^3} \right|_{t=t_n} + \frac{h^4}{24} \left. \frac{d^4y_n}{dt^4} \right|_{t=t_n} + \dots \quad (4a)$$

y

$$y_{n-1} = y_n - h \left. \frac{dy_n}{dt} \right|_{t=t_n} + \frac{h^2}{2} \left. \frac{d^2y_n}{dt^2} \right|_{t=t_n} - \frac{h^3}{6} \left. \frac{d^3y_n}{dt^3} \right|_{t=t_n} + \frac{h^4}{24} \left. \frac{d^4y_n}{dt^4} \right|_{t=t_n} - \dots \quad (4b)$$

Una vez sumando la Ec. (4a) y la Ec.(4b), resulta

$$y_{n+1} + y_{n-1} = 2y_n + h^2 \frac{d^2 y_n}{dt^2} + \frac{h^4}{12} \frac{d^4 y_n}{dt^4}. \quad (4)$$

El tercer término del lado derecho de la Ec. (5), puede ser modificado al hacer uso del método de diferencias finitas centradas descrito en la Ec. (3), y haciendo uso de la Ec. (1), asumiendo que $s(t) = 0$ y $g(t) = k$, donde k es una constante. Así,

$$\frac{d^4 y_n}{dt^4} = \frac{d^2}{dt^2} (-k y_n) = -\frac{k_{n+1} y_{n+1} - 2k_n y_n + k_{n-1} y_{n-1}}{h^2}. \quad (5)$$

Sustituyendo las Ec. (6) y Ec. (1) en la Ec. (5), obtenemos

$$\begin{aligned} y_{n+1} - 2y_n + y_{n-1} \\ = h^2 (-k_{n+1} y_{n+1}) + \frac{h^2}{12} (-k_{n+1} y_{n+1} + 2k_n y_n - k_{n-1} y_{n-1}). \end{aligned} \quad (6)$$

Al reordenar los términos en la Ec. (7) y resolviendo para y_{n+1} , obtenemos finalmente que

$$y_{n+1} = \frac{1}{1 + \frac{h^2}{12} k_{n+1}} \left[2 \left(1 - \frac{5h^2}{12} k_n \right) y_n - \left(1 + \frac{h^2}{12} k_{n-1} \right) y_{n-1} \right]. \quad (7)$$

La Ec. (8), representa el método de Numerov de orden superior (Koonin & Meredith, 2018). Resolver la Ec. (8) la cual es una ecuación lineal, ya sea para y_{n+1} (como es nuestro interés), o y_{n-1} , proporciona una relación de recurrencia útil para integrar hacia adelante o hacia atrás.

Existe una versión simplificada (Širca & Horvat, 2018), donde deduce el método de Numerov de quinto orden de la siguiente manera

$$y_{n+1} - 2y_n + y_{n-1} = \frac{h^2}{12} (f_{n+1} + 10f_n + f_{n-1}), \quad (8)$$

donde, por ejemplo, $f_{n+1} = k_{n+1} y_{n+1}$. Esta versión también puede ser utilizada al momento de realizar el proceso de simulación numérica.

Método de Runge-Kutta-Verner

Este método, es una corrección realizada a los métodos que pertenecen a la familia Runge-Kutta, específicamente de quinto orden, el cual son métodos iterativos e implícitos utilizados para resolver numéricamente EDO lineales de primer orden. La corrección del método realizada por Verner (1978), permitió establecer una mejor optimización del método de Runge-Kutta de quinto orden.

El método de Runge-Kutta-Verner, establece las siguientes relaciones

$$k_1 = f(t_n, y_n), \quad (9a)$$

$$k_2 = f\left(t_n + \frac{h}{6}, y_n + \frac{h}{6}k_1\right), \quad (10b)$$

$$k_3 = f\left(t_n + \frac{4h}{15}, y_n + \frac{4h}{75}k_1 + \frac{16h}{75}k_2\right), \quad (10c)$$

$$k_4 = f\left(t_n + \frac{2h}{3}, y_n + \frac{5h}{6}k_1 - \frac{8h}{3}k_2 + \frac{5h}{2}k_3\right), \quad (10d)$$

$$k_5 = f\left(t_n + \frac{5h}{6}, y_n - \frac{8h}{5}k_1 + \frac{144h}{25}k_2 - 4hk_3 + \frac{16h}{25}k_4\right), \quad (10e)$$

$$k_6 = f\left(t_n + h, y_n + \frac{361h}{320}k_1 - \frac{18h}{5}k_2 + \frac{407h}{128}k_3 - \frac{11h}{80}k_4 + \frac{55h}{128}k_5\right), \quad (10f)$$

$$k_7 = f\left(t_n + h, y_n + \frac{11h}{640}k_1 + \frac{11h}{256}k_2 - \frac{11h}{160}k_3 + \frac{11h}{256}k_4 - \frac{11h}{640}k_5\right), \quad (10g)$$

y

$$y_{n+1} = y_n + h\left(\frac{31}{384}k_1 + \frac{1125}{2816}k_3 + \frac{9}{32}k_4 + \frac{125}{768}k_5 + \frac{5}{66}k_6\right), \quad (10)$$

donde $h = (t_{n+1} - t_n)/n$, siendo n el número de puntos.

Es prudente resaltar que todos los métodos numéricos que pertenecen no solo a la familia de los métodos de Euler, sino también los pertenecientes a la familia Runge-Kutta, están concebidos para resolver EDO lineales de primer orden. Sin embargo, para el caso de sistemas mecánicos, particularmente los conformados por masa-resorte-amortiguador, sus ecuaciones de movimiento son de segundo orden, por tanto, no pueden ser utilizados

directamente. Esto nos dice que para obtener la solución numérica de la Ec. (1) con $s(t) = 0$, y $g(t) = k$, debe ser reemplazada por un sistema de EDO lineales de primer orden de la forma

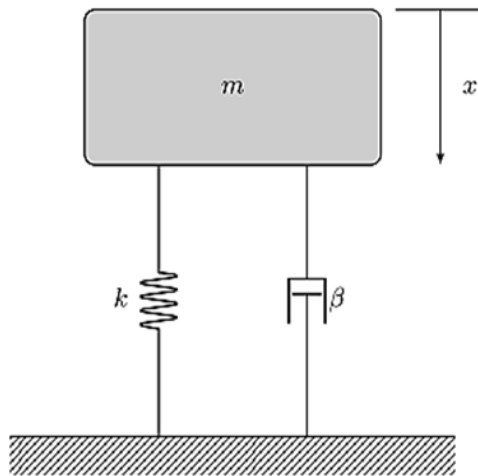
$$\begin{cases} \frac{dz}{dt} = -ky \\ z = \frac{dy}{dt} \end{cases} \quad (11)$$

Sistema mecánico masa-resorte-amortiguador

En el estudio de los sistemas mecánicos con un grado de libertad como el ilustrado en la Figura 1, donde las fuerzas amortiguadoras que actúan sobre el cuerpo se consideran proporcionales a la velocidad, y no existen fuerzas externas que actúan sobre el cuerpo.

Figura 1

Sistema mecánico masa-resorte-amortiguador (Rao, 2018).



La ecuación de movimiento es obtenida a partir de la segunda ley de Newton (Zill, 2024),

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -kx - \beta \frac{dx}{dt}, \quad (12)$$

siendo m la masa del objeto, k la constante del resorte y β la constante de amortiguamiento, respectivamente, todas en unidades del SI. El signo negativo para la fuerza de amortiguamiento es consecuencia que ésta actúa en dirección opuesta al movimiento del

objeto de masa m . Por tanto, la ecuación de movimiento para un sistema con amortiguamiento libre (Zill, 2024) sería

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\gamma \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0, \quad (13)$$

donde $2\gamma = \frac{\beta}{m}$ y $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$, siendo γ y ω_0 , el coeficiente de amortiguamiento reducido y la frecuencia natural, respectivamente.

Estamos interesados, por un lado, en describir el movimiento subamortiguado del cuerpo, esto es, para el caso en que el coeficiente de amortiguamiento β es pequeño en comparación con la frecuencia natural ω_0 , es decir, cuando $\gamma^2 - \omega_0^2 < 0$; y por otro lado describir el movimiento sobreamortiguado cuando el coeficiente de amortiguamiento es mayor que la frecuencia natural, esto es, $\gamma^2 - \omega_0^2 > 0$. (Zill, 2024).

Para el caso del movimiento subamortiguado, la solución general que satisface la Ec. (14) sería

$$x(t) = e^{-\gamma t} \left(C_1 \cos \sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2} t + C_2 \sin \sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2} t \right). \quad (14)$$

En tanto que para el caso del movimiento sobreamortiguado, la solución general estaría dada por

$$x(t) = e^{-\gamma t} \left(C_1 e^{\sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2} t} + C_2 e^{-\sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2} t} \right), \quad (15)$$

donde los valores de las constantes C_1 y C_2 , en ambos casos, son obtenidas a partir de las condiciones iniciales del sistema bajo estudio. Si consideramos que nuestro sistema mecánico presenta como condiciones iniciales¹ x_0 y $\dot{x}(0) = 0$. Al hacer uso de estas condiciones iniciales en las Ec. (15) y Ec. (16), respectivamente, encontramos la solución particular del desplazamiento para cada uno de los casos, esto es,

$$x(t) = \frac{x_0 e^{-\gamma t}}{\sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2}} \left(\sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2} \cos \sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2} t + \gamma \sin \sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2} t \right), \quad (16)$$

para el movimiento subamortiguado, y

$$x(t) = \frac{x_0 e^{-\gamma t}}{2\sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2}} \left(\left(\gamma + \sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2} \right) e^{\sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2} t} + \left(\gamma - \sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2} \right) e^{-\sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2} t} \right) \quad (17)$$

para el movimiento sobreamortiguado.

Para la implementación del método de Numerov considerando tanto el caso del movimiento subamortiguado como el sobreamortiguado, se hace necesario realizar una transformación de variables conveniente en la Ec. (14) con el objetivo de hacer *desaparecer* el término que identifica la primera derivada temporal de la posición. La transformación utilizada para tal caso sería

$$x(t) = e^{-\gamma t} y(t). \quad (18)$$

Una vez haciendo uso de la Ec. (19) en la Ec. (14), obtenemos

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + (\omega_0^2 - \gamma^2) y = 0. \quad (19)$$

Si decimos que $k = \omega_0^2 - \gamma^2$, resulta que

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = -ky, \quad (20)$$

la cual es idéntica a la Ec. (1) con $s(t) = 0$ y $g(t) = k$.

Por otro lado, para implementación del método de Runge-Kutta-Verner de manera correcta, descritas en las Ecs. (10a-f) y la Ec. (11), se hace necesario reescribir la Ec. (14) en un sistema de EDO lineales de primer orden de la forma

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = v \\ \frac{dy}{dt} = -2\gamma v - \omega_0^2 x. \end{cases} \quad (21)$$

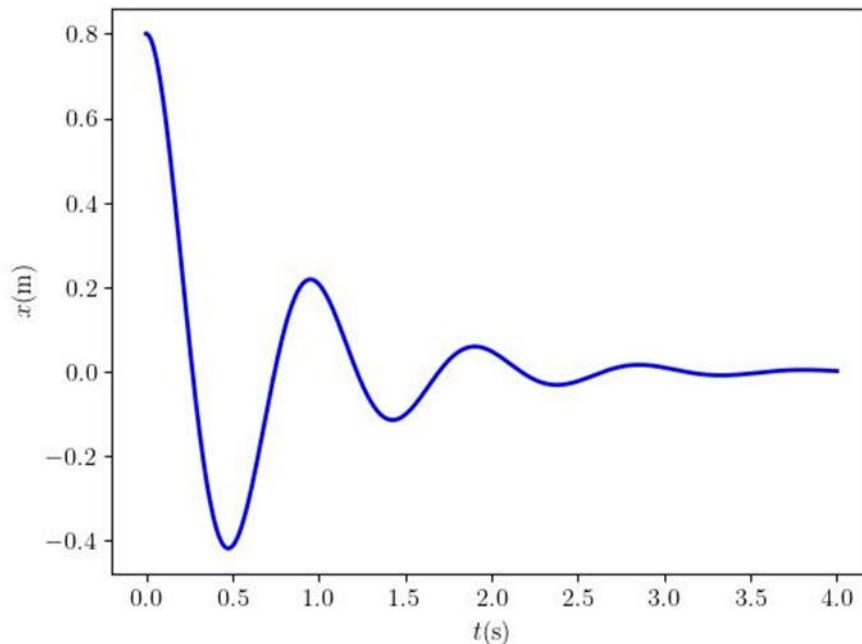
Esto nos permitirá utilizar el método de manera correcta.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 2 puede apreciarse el comportamiento del desplazamiento del sistema mecánico bajo la acción de un movimiento subamortiguado para el caso en los parámetros físicos considerados sean $m = 0,550 \text{ kg}$, $k = 25,0 \text{ N/m}$, $\beta = 1,50 \text{ kg/s}$ y $x_0 = 0,800 \text{ m}$, respectivamente. En tanto que la Figura 3, describe el comportamiento del sistema mecánico para el caso en que $\beta = 6,00 \text{ kg/s}$, ambos comportamientos obtenidos al hacer uso de la solución exacta dada por la Ec. (17).

Figura 2

Comportamiento del desplazamiento para el movimiento subamortiguado suave dado por la Ec. (17), cuando $m = 0,550 \text{ kg}$, $k = 25,0 \text{ N/m}$, $\beta = 1,50 \text{ kg/s}$ y $x_0 = 0,800 \text{ m}$,

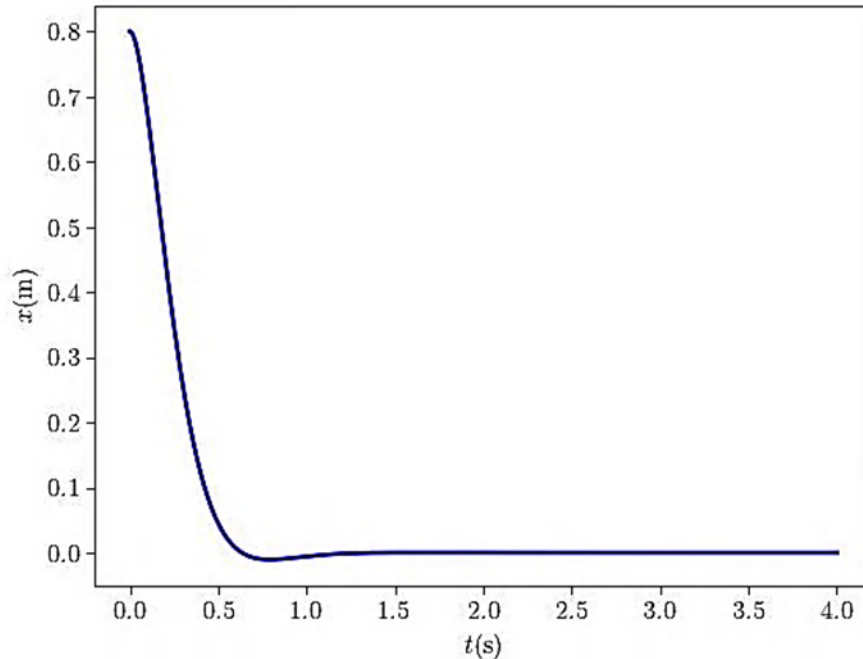


El comportamiento ilustrado en la Figura 2, describe una oscilación amortiguada, donde la acción de la fricción en el sistema debido al amortiguamiento reduce la frecuencia, y la amplitud, parece decrecer de manera exponencial con el tiempo, caracterizándose el sistema por presentar una fricción baja, en otras palabras, experimenta un subamortiguamiento *suave*. Los dispositivos mecánicos que supuestamente deben vibrar con este tipo de comportamiento, podrían ser los osciladores de cristal y los diapasones (Nagle y otros, 2018). Sin embargo, en la Figura 3, la acción de la fricción es tan dominante que evita por completo la oscilación en el sistema, considerando el efecto de la fricción como una pérdida mecánica

no deseada. Uno de los sistemas mecánicos que presentan este comportamiento, son los sistemas de suspensión de los vehículos a motor, debido a que aprovechan la fricción para suprimir las oscilaciones.

Figura 3

Comportamiento del desplazamiento para el movimiento subamortiguado fuerte dado por la Ec. (17), cuando $m = 0,550 \text{ kg}$, $k = 25,0 \text{ N/m}$, $\beta = 6,00 \text{ kg/s}$ y $x_0 = 0,800 \text{ m}$.



Para la situación en que el sistema mecánico masa-resorte-amortiguador descrito en la Figura 1, experimenta un movimiento sobreamortiguado, esto es, cuando $\gamma^2 - \omega_0^2 > 0$, el desplazamiento dado por la Ec. (18) es ilustrado en la Figura 4. Este comportamiento es debido a la acción realizada por la fuerza amortiguadora es tan grande que impide cualquier tipo de oscilación del objeto, haciendo que el mismo retorne rápidamente a su posición de equilibrio sin experimentar oscilación alguna.

Al hacer uso tanto del método de Numerov como del método de Runge-Kutta-Verner, para el caso en que el sistema mecánico experimente un movimiento subamortiguado *suave* (fricción baja), el resultado de la simulación numérica comparada con la solución exacta descrita en la Ec. (17) para los parámetros $m = 0,550 \text{ kg}$, $k = 25,0 \text{ N/m}$, $\beta = 1,50 \text{ kg/s}$ y $x_0 = 0,800 \text{ m}$ es ilustrada en la Figura 5.

Figura 4

Comportamiento del desplazamiento para el movimiento sobreamortiguado dado por la Ec. (18), con $m = 0,550 \text{ kg}$, $k = 25,0 \text{ N/m}$, $\beta = 15,0 \text{ kg/s}$ y $x_0 = 0,800 \text{ m}$.

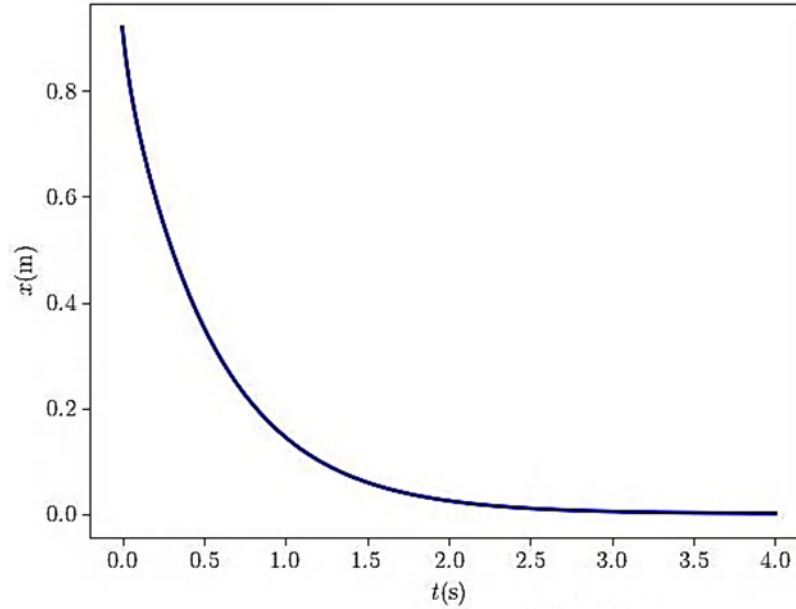
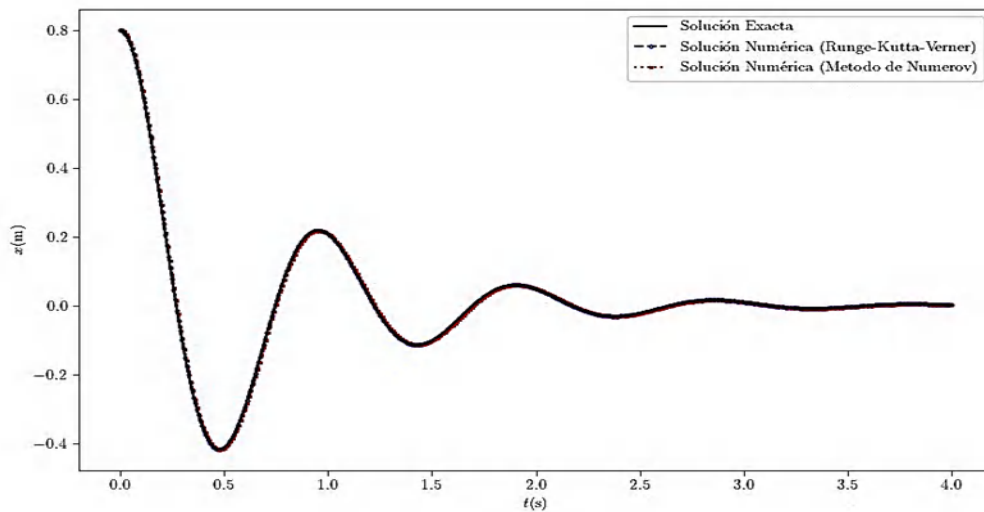


Figura 5

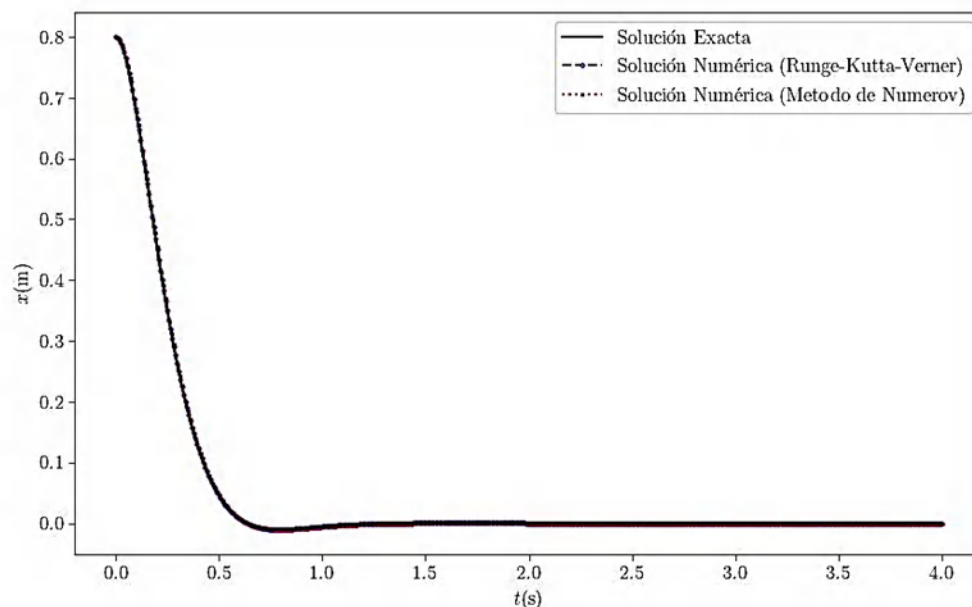
Comparación de las soluciones numéricas con relación a la solución exacta para el desplazamiento de un objeto que experimenta un movimiento subamortiguado suave dado por la Ec. (17) para $m = 0,550 \text{ kg}$, $k = 25,0 \text{ N/m}$, $\beta = 1,50 \text{ kg/s}$ y $x_0 = 0,800 \text{ m}$.



Podemos observar en esta Figura. 5, una excelente concordancia de ambas soluciones numéricas obtenidas por dos métodos numéricos diferentes, con respecto a la solución exacta, para la situación en que la fricción en el sistema mecánico es pequeña. Al aumentar la fricción en el sistema mecánico, a través del incremento del coeficiente de amortiguamiento, esto es, induciendo al sistema a un movimiento subamortiguado *fuerte* (fricción alta), el comportamiento del desplazamiento es completamente diferente al caso de baja fricción, ilustrándose en la Figura 6. Esta situación nos indica que al aumentar la magnitud del coeficiente de amortiguamiento β , el sistema mecánico pierde rápidamente su propiedad oscilatoria, alcanzando rápidamente su posición de equilibrio. Podemos apreciar en la Figura 6, al igual que el caso descrito en la Figura 5, una excelente concordancia de la simulación de ambas soluciones numéricas con relación a la solución exacta.

Figura 6

Comparación de las soluciones numéricas con relación a la solución exacta para el desplazamiento de un objeto que experimenta un movimiento subamortiguado fuerte dado por la Ec. (17) para $m = 0,550 \text{ kg}$, $k = 25,0 \text{ N/m}$, $\beta = 6,00 \text{ kg/s}$ y $x_0 = 0,800 \text{ m}$.

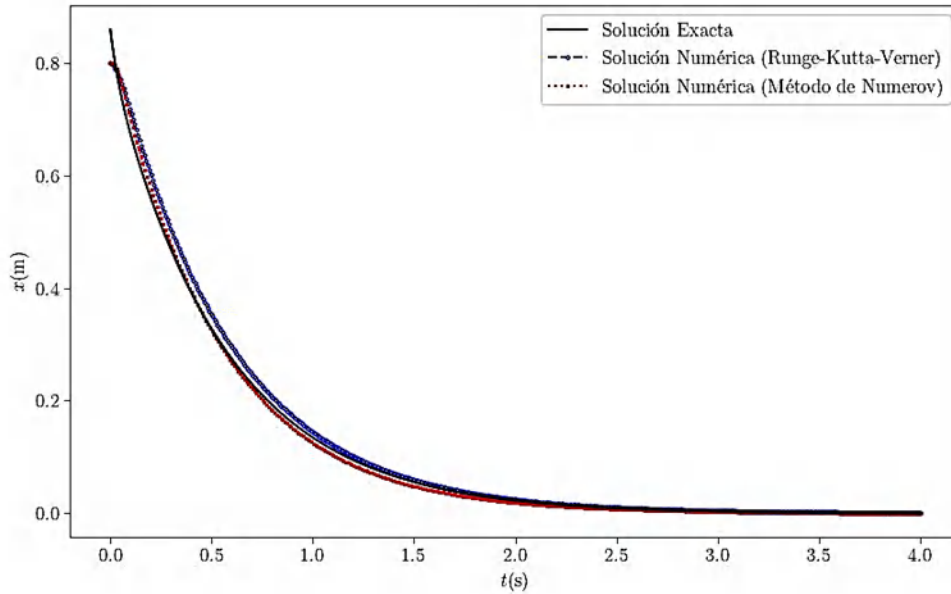


Para la situación en que el sistema mecánico ilustrado en la Figura 1, experimente un movimiento sobreamortiguado, la simulación obtenida bajo esta condición es ilustrada en la Figura 7, donde se compara las soluciones numéricas del comportamiento del desplazamiento realizado al considerar como parámetros de entrada $m = 0,550 \text{ kg}$, $k = 25,0 \text{ N/m}$, $\beta = 15,0 \text{ kg/s}$ y $x_0 = 0,800 \text{ m}$. Al observar la Figura 7, podemos percatarnos de que los

resultados numéricos, presentan una aproximación relativamente buena con relación a la solución exacta.

Figura 7

Comparación de las soluciones numéricas con relación a la solución exacta para el desplazamiento de un objeto que experimenta un movimiento sobreamortiguado dado por la Ec. (18) para $m = 0,550 \text{ kg}$, $k = 25,0 \text{ N/m}$, $\beta = 15,0 \text{ kg/s}$ y $x_0 = 0,800 \text{ m}$.



CONCLUSIONES

El uso del método de Numerov para la solución numérica de EDO en forma diferente a la utilizada usualmente, como lo es en la solución de la ecuación de Schrödinger independiente del tiempo (Caruso y otros, 2022), resulta particularmente útil en la solución numérica de EDO que aparecen naturalmente en sistemas mecánicos con un grado de libertad presentando excelentes resultados al ser comparados con las soluciones exactas que satisfacen dichas EDO, colocando en evidencia la validez y confiabilidad de que el método de Numerov también puede ser perfectamente utilizado para sistemas mecánicos con un grado de libertad, con la particularidad que se debe realizar una adecuada transformación de variables necesaria para eliminar el término que represente la primera derivada temporal. Para trabajar adecuadamente con cualquier método numérico, particularmente los expuestos en el presente artículo, las diferencias finitas centradas, es la técnica que tradicionalmente es utilizada. Esto no quiere decir, que sea la única, ya que también pueden ser utilizadas las diferencias finitas

adelantadas o las atrasadas de segundo orden (Li y otros, 2018), esto conllevaría como consecuencia a la necesidad de realizar algunos ajustes algebraicos para obtener una adecuada relación de recurrencia.

La solución numérica obtenida con el método de Numerov comparada con otro método numérico, como el perteneciente a la familia de los métodos de Runge-Kutta, y tal vez el menos conocido por algunos; el método de Runge-Kutta-Verner, nos presenta una excelente concordancia no solamente con la solución numérica cuando el cuerpo realiza un movimiento subamortiguado tal como se aprecia en las Figura 5 y Figura 6, para los casos de fricción *suave* y fricción *fuerte*, respectivamente, sino también cuando el objeto experimenta un movimiento sobreamortiguado ilustrado en la Figura 7, cuando el coeficiente de amortiguamiento mayor en comparación con la frecuencia natural.

La coincidencia entre ambas soluciones, nos indica que ambos métodos son altamente precisos para simular el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones de amortiguamiento. Esto sugiere que los algoritmos numéricos están capturando de manera adecuada la física del sistema, incluso en situaciones donde las soluciones pueden ser más complejas debido a la naturaleza del amortiguamiento. Al coincidir ambas soluciones, significa que el método es robusto incluso ante la variabilidad de las constantes de amortiguamiento con dinámicas que no se desvían de la predicción matemática. Esto también valida tanto el modelo físico como los métodos numéricos utilizados para resolverlo.

En esencia los métodos tanto de Numerov como de Runge-Kutta-Verner, pueden ser utilizados para el análisis de vibraciones y/o oscilaciones de estructuras mecánicas, es decir, estos métodos son utilizados para resolver EDO en sistemas mecánicos vibratorios lineales, como los abordados en este artículo, sino también para sistemas mecánicos vibratorios no lineales como los que aparecen en situaciones donde la Ingeniería Civil y la Ingeniería Mecánica también intervienen, como lo es en edificios, puentes y vehículos (Chopra, 2019).

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi agradecimiento al Profesor Adams Martínez, por sus valiosas observaciones en la redacción no sólo de este artículo, sino también en una mejor optimización de los códigos fuentes utilizados. Al Profesor Guillermo Burke en la mejora de la redacción del artículo; ambos profesores del Departamento de Física.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Balkrishna, P. S. (2014). Bound state eigenfunctions of an anharmonic oscillator in one dimension: A Numerov method approach. *Int. J. Adv. Appl. Math. and Mech* , 2(2), 102-109.
- Caruso, F., Oguri, V., & Silveira, F. (2022). Applications of the Numerov method to simple quantum systems using Python. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 44, 1-11.
- Chapra, S. C. (2023). *Applied Numerical Methods with MATLAB for Engineers and Scientists*. (Quinta Edición ed.). New York: Mc Graw-Hill.
- Chopra, A. K. (2019). *Dynamics of structure: Theory and applications to earthquake engineering*. Pearson.
- Giordano, N. J., & Nakanishi, H. (2006). *Computational Physics* (Segunda Edición ed.). New Jersey, Estados Unidos de Norteamérica: Prentice Hall.
- Hjorth-Jensen, M. (2013). *Computational Physics*. Retrieved 15 de Mayo de 2024, from <https://courses.physics.ucsd.edu/2017/Spring/physics142/Lectures/Lecture18/Hjorth-JensenLectures2010.pdf>
- Koonin, S. E., & Meredith, D. C. (2018). *Computational Physics. Fortran Version*. Boca Raton, Florida, Estados Unidos de Norteamérica: CRC Press Taylor & Francis Group.
- Landau, R. H., J., P. M., & Bordeianu, C. C. (2015). *Computational Physics. Problem Solving with Python*. (Tercera Edición ed.). Weinheim, Alemania: Wiley- VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Li, Z., Qiao, Z., & Tang, T. (2018). *Numerical Solution of Differential Equations. Introduction to Finite Difference and Finite Element Methods*. New Delhi, India: Cambridge University Press.
- Martinz, S. D., & Ramos, R. V. (2018). Numerical Solution via Numerov Method of the 1D-Schrödinger Equation with Pseudo-Delta Barrier. *Computational Methods in Science and Technology*, 24(3), 177-185.
- Nagle, R. K., Saff, E. B., & David, S. A. (2018). *Fundamentals of Differential Equations and Boundary Value Problems* (Séptima Edición ed.). Estados Unidos de Norteamérica: Pearson.

- Pang, T. (2006). *An Introduction to Computational Physics* (Segunda Edición ed.). Reino Unido: Cambridge University Press.
- Rao, S. S. (2018). *Mechanical Vibrations* (Sexta Edición ed.). Londres, Reino Unido: Pearson.
- Širca, S., & Horvat, M. (2018). *Computational Methods in Physics. Compendium for Students* (Segunda Edición ed.). Cham, Suiza: Springer.
- Verner, J. H. (1978). Explicit Runge-Kutta method with estimates of the local truncation error. *SIAM, Journal on Numerical Analysis*, 15(4), 772-790.
- Vesely, F. J. (2013). *Computational Physics. An Introduction*. New York: Springer Science+Business Media, LLC.
- Yousefian, Z., & Shadmani, N. (2014). Numerical solution for one-dimensional independent of time Schrödinger Equation. *Journal of Physical and Theoretical Chemistry*, 10(4), 215-224.
- Zill, D. G. (2024). *Differential Equations with Modeling Applications* (Décimo segunda Edición ed.). México, México: Cengage.



Creando “aulas sin ruido” en Boquete, Chiriquí, Panamá

Creating "noise-free classrooms in Boquete, Chiriqui, Panama

Daphne Sagel

Ministerio de Educación, Escuela Secundaria Benigno Tomás Argote, Boquete, Chiriquí, Panamá.

dsagelaguilar@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-5481-3424>

Fecha de recepción: 4 de octubre de 2024

Fecha de aceptación: 9 de noviembre de 2024

DOI [HTTPS://DOI.ORG/10.48204/J.TECNO.V27N1.A6639](https://doi.org/10.48204/J.TECNO.V27N1.A6639)

RESUMEN

El ruido es un contaminante que silenciosamente va afectando la salud y la calidad de vida. Panamá es un país en desarrollo con alta concentración de tráfico. La población de Boquete, Chiriquí, no se escapa de este matiz, sobre todo su zona central. En este estudio se busca conocer y analizar el impacto que tiene el ruido en las aulas de clase de una escuela secundaria, al igual que conocer la percepción de la comunidad educativa. Dentro de los resultados obtenido encontramos niveles de 35,5 dB hasta 96,0 dB, lo que indica la alta contaminación en los salones; también la encuesta realizada a la comunidad educativa indica que el 55,8% desconoce los niveles permitidos en las aulas de clases y el 67,4% desconocían las leyes que rigen el ruido en Panamá.

PALABRAS CLAVES

Calidad de vida, contaminación acústica, Panamá, ruido en las aulas.

ABSTRACT

Noise is a pollutant that silently affects health and quality of life. Panama is a country in development with a high concentration of traffic. Here in Chiriquí, Boquete, we do not escape this nuance, especially Boquete's city center. This study seeks to know and analyze the impact that noise has in a high school's classrooms, as well as to know the perception of the educational community. Among the results obtained we found levels from 35.5 dB to 96.0 dB, which indicates high contamination in the classrooms; Also, the survey carried out on the educational community indicates that 55.8% are unaware of the levels allowed in classrooms and 67.4% were unaware of the laws that establish noise pollution levels in Panama.

KEYWORDS

Morrillo beach, mangroves, floristic composition, structural attributes

INTRODUCCIÓN

El sonido es una perturbación de presión en el aire que se mide empleando el nivel de presión sonora, definido de acuerdo a la relación siguiente,

$$SPL = 10 \log \left(\frac{p_{rms}^2}{p_{ref}^2} \right) = 20 \log \left(\frac{p_{rms}}{p_{ref}} \right)$$

Donde p_{rms} es la presión efectiva o rms y p_{ref} es la presión de referencia en el aire de 2×10^{-5} Pa (Cobo & Cuesta, 2022).

“La Organización Mundial de la Salud (OMS) define como ruido cualquier sonido desagradable superior a 65 decibelios (dB) y establece que este se vuelve dañino si supera los 75 dB y doloroso a partir de los 120 dB. En consecuencia, la OMS recomienda no superar los 65 dB durante el día, e indica que para que el sueño sea reparador el ruido ambiente nocturno no debe exceder los 30 dB” (Rubio, 2021).

El ruido tiene un impacto negativo en el proceso de aprendizaje, como lo demuestran estudios realizados en instituciones académicas (Acaro Chacón et al., 2022; Barboza de Sousa, 2020; Burke & Lasso de la Vega, 2017; Chávez et al., 2007; Doutres et al., 2023; Duque-Aldaz, et al., 2023; Huang et al., 2022).

En Panamá se han realizado estudios de ruido, en algunas zonas urbanas, los cuales han sido publicados, dando una mejor orientación a las autoridades para hacer cumplir las normativas respectivas (Nicholson et al., 2022; Ríos & Rusnak, 2023; Santana, 2008; Villarreal et al., 2003).

Estudios realizados en la Universidad de Panamá, encontraron que ninguno de los 19 puntos donde se realizaron las medidas cumplía con los parámetros establecidos por la OMS (Nicholson et al. 2022).

Presentando en la Tabla 1, se comprende los niveles de ruido sugeridos en diferentes ambientes

Tabla 1.

Niveles de ruido sugeridos por la OMS (Organización Mundial de la Salud) (Usbeth Platzer M, 2007).

Ambiente	dB (A)	Tiempo (h)
Viviendas	50	8
Escuelas	35	8
Discotecas	90	4
Conciertos	100	4
Comercio y tráfico	70	4

Para extrapolar estos estudios, y no dejarlos en las zonas de tráfico, se decidió realizar el estudio en los centros escolares. El ruido en los salones de clase es un problema común que tiene un impacto negativo en el proceso de enseñanza y aprendizaje. Factores como el tráfico externo, el bullicio dentro del edificio escolar, las conversaciones entre los propios estudiantes contribuyen a tener niveles de ruido que dificultan la concentración, la comprensión auditiva y la capacidad de los estudiantes para procesar la información. Estos efectos no solo reducen el rendimiento académico, sino que también generan fatiga y estrés, tanto en los estudiantes como en los profesores. Por lo tanto, es crucial que las instituciones educativas implementen medidas efectivas para reducir y controlar el ruido en el entorno de aprendizaje.

La población de Boquete, en la provincia de Chiriquí, Panamá, no se escapa de la contaminación por ruido, atrás quedó aquel pueblo tranquilo y fresco de inicios del siglo XIX, todo esto repercute en las zonas escolares. En especial a la Escuela Secundaria Benigno Tomás Argote, que está ubicada en Alto Boquete, frente a la carretera Vía Boquete, principal arteria vial del distrito.

Fig. 1.

Mapa del área de estudio, Alto Boquete Escuela Secundaria Benigno Tomás Argote.



Es por ello, que el objetivo principal de esta investigación es determinar el nivel de ruido en los salones del plantel y así sugerir medidas a implementar para mitigar el ruido.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la adquisición de datos se utilizó el sonómetro, *sound level meter* SLM-25, un filtro de atenuación A (ponderación A), con una precisión de $\pm 1,5$ dB, rango de medición de 30 a 130 dBA, frecuencia 31,5 Hz a 8 KHz.

La recolección de los datos se efectuó en tres periodos dentro de la jornada escolar: el primero a las 7:30 a.m., el segundo a las 10:30 a.m. y el tercero y último a las 12:45 p.m.

El intervalo de medición fue de 1 minutos tomando la medida máxima en ese periodo en tiempo real, en respuesta rápida.

También se aplicó una encuesta (ver tabla 3), sobre la percepción del ruido, a 95 personas, todas de la comunidad educativa de la Escuela Secundaria Benigno Tomás Argote: estudiantes, docentes y administrativos.

Fig. 2.

Sonómetro utilizado para el estudio.



Como referencia a continuación presentamos una síntesis de las normativas sobre contaminación acústica en la República de Panamá a través de los años:

- Los rangos recomendados en Panamá, dictado en el artículo 7 del Decreto Ejecutivo N° 306 del 4 de septiembre de 2002, establece que entre las 6:00 a.m. y 9:59 p.m., el ruido no debe exceder su intensidad más de 55 decibelios (en escala A) y que de 10:00 p.m. a 5:59 a.m. no debe pasar de 50 decibelios (escala A).
- En el 2004, el Decreto y resolución N° 1 de 15 de enero establece el Ministerio de Salud establece: Diurno (6:00 a.m. a 9:59 p.m.) 60 dB y nocturno (10:00 p.m. a 5:59 a.m.) 50 dB.
- Decreto N° 640, de 27 de diciembre de 2006, el Ministerio de Gobierno y Justicia, modifica el Artículo 12. Prohibiciones en relación con los vehículos en general, en el numeral: f. la emisión de gases, ruidos o sonidos excesivos.
- Decreto N° 506 de 6 de octubre de 1999, el Ministerio de Comercio e Industria, establece 85 dB en la jornada de 8 horas, ofrece los niveles permisibles de exposición en una jornada de trabajo máximo 8 horas diarias.
- Decreto 4113, 26 de junio de 2006, el Municipio de Panamá, establece 60 dB, se fundamenta en el Decreto N° 1 al 15 de enero de 2004, del Ministerio de Salud, que determinó para las áreas residenciales e industriales el nivel sonoro máximo, así como el horario. (DECRETO EJECUTIVO 123 (De 14 de agosto de 2009)

RESULTADOS DE LAS MEDICIONES

A partir de estos resultados se presentan las siguientes tablas y gráficos. Resaltando el periodo de lectura del 2 de julio al 5 de septiembre de 2024. Resaltando que de la semana del 8 al 26 de julio se hizo una pausa por otras asignaciones escolares, como lo mostramos en la tabla 2.

Tabla 2.

Muestras los datos registrados por semana en los tres periodos establecidos. (los espacios en blanco significan que no se registró medida debido a ausencia de clases).

	7:30 a.m.	10:30 a.m.	12:45 a.m.
Lunes			
Martes	79.6	71.4	69.6
Miércoles	56.2	65.5	67.6
Jueves	53.5	57.1	64.3
Viernes	68.9	78.2	66.4
Lunes	72	65	58.9
Martes	73.8	68.6	85.3
Miércoles	68.6	70	70.4
Jueves	68.9	78.8	77.8
Viernes	62.9	73.3	69.8
Lunes	73.9	48.8	83.6
Martes	68.9	62.5	73.3
Miércoles	64.8	96	68.5
Jueves	59.7	56.7	69.3
Viernes	69.7	66	68.5
Lunes	70.3	67.6	75.1
Martes	67.3	68.8	68.4
Miércoles	59.2	75.7	77.9
Jueves	64	63.4	69.3
Viernes	72.2	60.1	66.1
Lunes	54.4	75.6	66.1
Martes	62.5	70.6	76.4
Miércoles	68.5	53.8	90.5
Jueves	65.9	78.4	67.1
Viernes	78.5	74.4	86.3
Lunes	68.4	84.1	66.4
Martes	35.5	59.5	80.3
Miércoles	66.5	77.2	60.8
Jueves	66.4	68.1	59.2
Viernes	72.8	72.5	78.3

Las gráficas a continuación muestran los días de estudio de lunes a viernes en los tres periodos registrados.

Figura 3.

Gráfica del lunes, tres periodos registrados: 7:30 a.m., 10:30 a.m., 12:45 a.m.

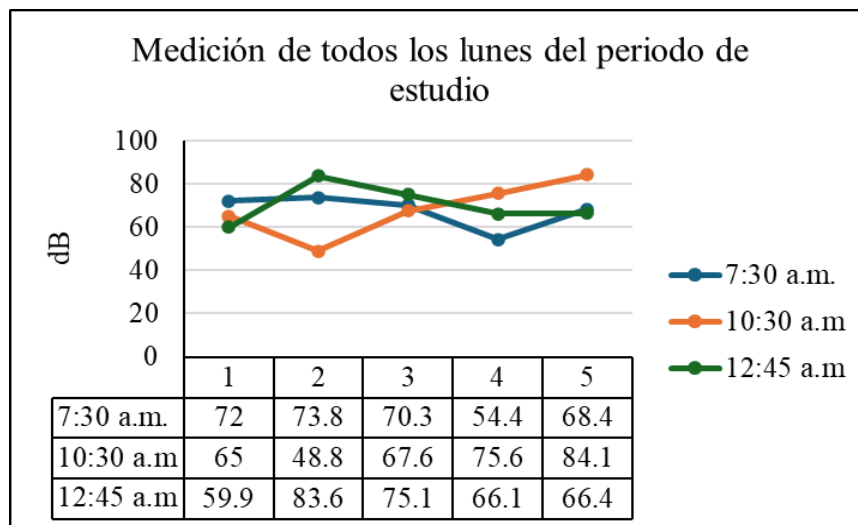


Figura 4.

*Gráfica de **martes**, tres periodos registrados: 7:30 a.m., 10:30 a.m., 12:45 a.m. se registra el nivel más bajo de todas las muestras, 35,5 dB.*

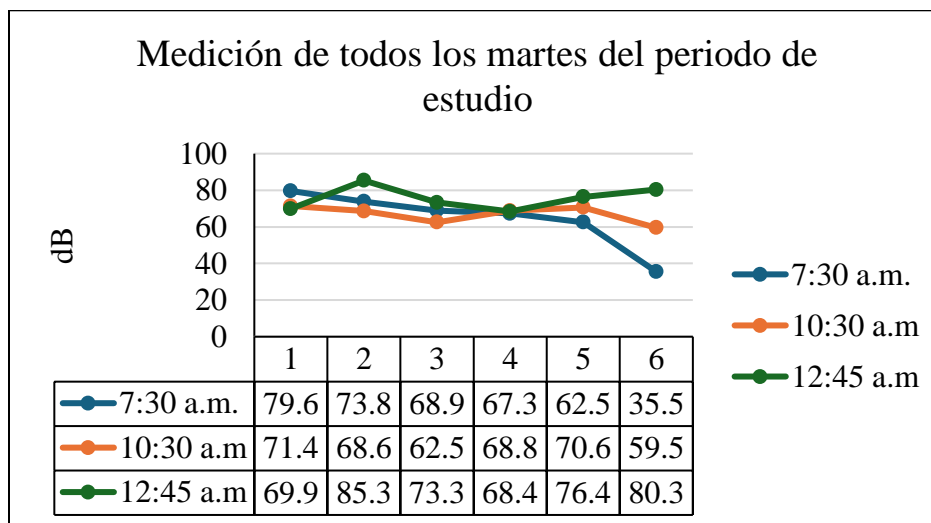


Figura 5.

Gráfica de miércoles, tres periodos registrados: 7:30 a.m., 10:30 a.m., 12:45 a.m. Se refleja una muestra super alta, en esta observación se incluye una hora libre donde el docente no está en el aula o no asistió al colegio.

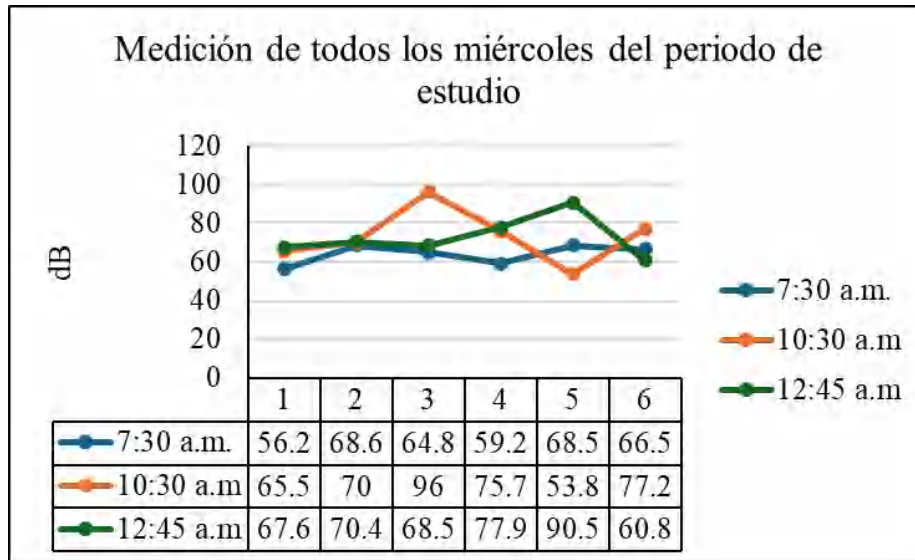


Figura 6.

Gráfica de jueves, tres periodos registrados: 7:30 a.m., 10:30 a.m., 12:45 a.m.

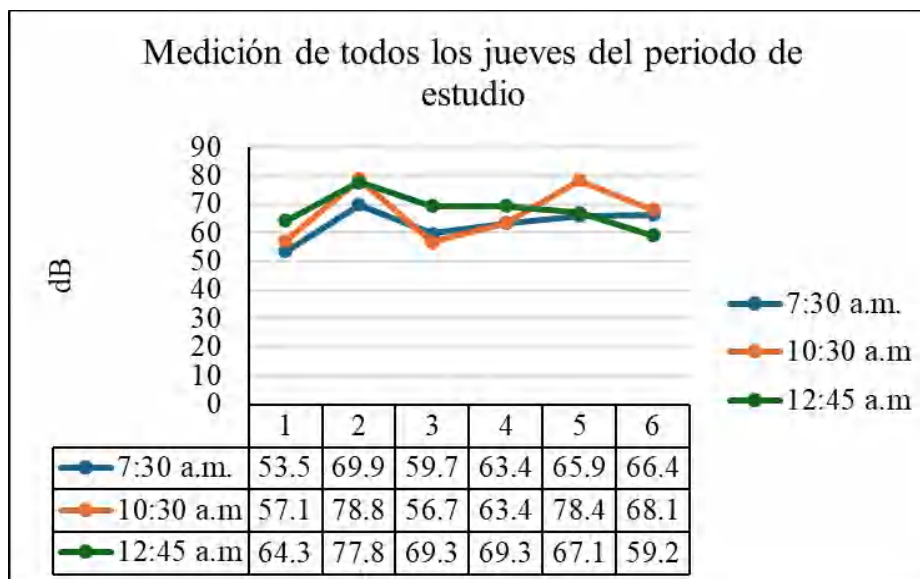


Figura 7.

Gráfica de viernes, tres periodos registrados: 7:30 a.m., 10:30 a.m., 12:45 a.m.

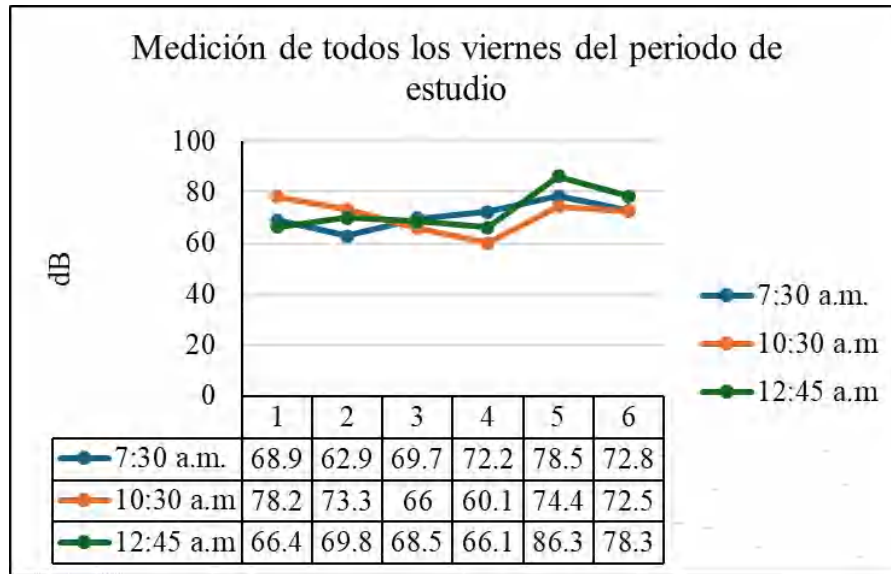
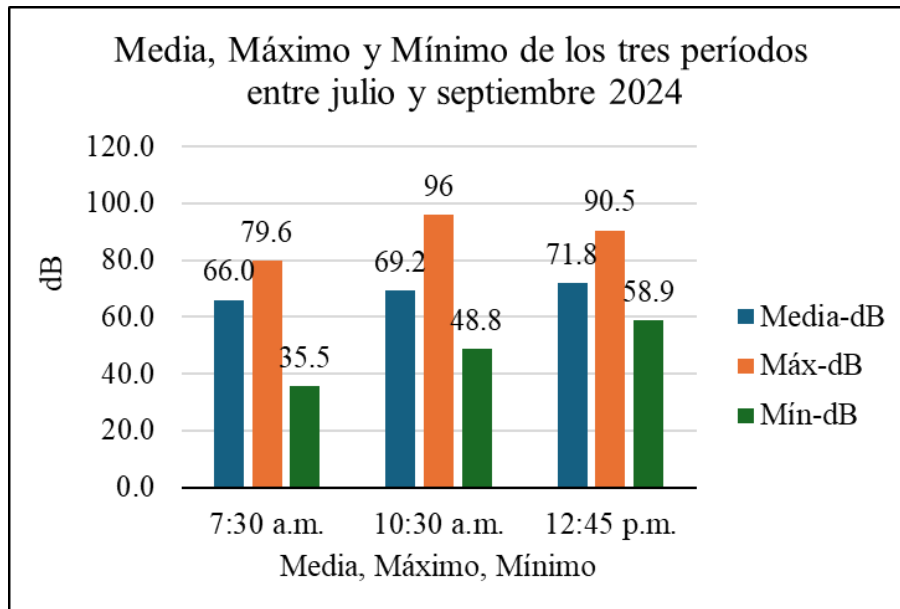


Figura 8.

Muestra los resultados de la media, valores máximos y mínimos de los niveles de ruido en los tres periodos establecidos en el tiempo de estudio.



Resultados de la encuesta:

Tabla 3.

Respuestas a las preguntas de la encuesta.

Pregunta	Valor Obtenido
Sexo	
Masculino	40%
Femenino	60%
Nivel escolar	
Premedia	4,2%
Media	83,2%
Docente	12,6%
Administrativo	2,1%
En qué asignatura escuchaste o te enseñaron sobre la contaminación acústica	
Ciencias Naturales	18,9%
Física	68,4%
No lo hemos visto	5,3%
Otra	9,5%
En blanco	3,2%
Sabes en qué unidad de medida según el SI se mide el ruido	
sí	67,4%
No	32,6%
Conoces las leyes que rigen los niveles de ruido y dónde realizar las denuncias	
Sí	32,6%
No	67,4%
Conoces el instrumento que se usa para medir el ruido o sonido	
Sí	88,4%
No	11,6%
Conoces los niveles de ruido permitidos en un Centro Escolar	
Sí	47,4%
No	55,8%

DISCUSIÓN

Los resultados encontrados en este estudio demuestran la alta contaminación en las aulas de clases de nuestro plantel. Existen períodos de bajos decibeles, pero todos fuera del rango sugerido para las aulas de clases, la cual se establece en 35-40 dB. Se registró una muestra de 96,0 dB, contemplando en las observaciones la hora libre (el profesor no asistió al colegio por causas médicas).

En la encuesta realizada a la comunidad educativa podemos observar el 67,4% desconocían las leyes que rigen el ruido en Panamá, el 88,4% conocía el nombre del instrumento para medir el ruido y el 55,8% desconoce los niveles permitidos en un Centro Escolar.

CONCLUSIONES

La investigación sobre la medición acústica en las aulas de la escuela secundaria revela una conexión significativa entre los niveles de ruido y el rendimiento académico de los estudiantes. A lo largo de las semanas analizadas, se observaron variaciones en los niveles de ruido que corresponden a diferentes horarios y actividades en el aula.

Durante la semana de estudio, los datos mostraron que los niveles de ruido oscilan entre 35.5 dB y 96.0 dB, con los picos más altos generalmente ocurriendo durante los períodos de cambio de clases o durante las horas en las que los estudiantes estaban libres y más activos. Por otro lado, los niveles de ruido fueron más bajos en momentos de mayor concentración o cuando se estaban realizando actividades que requerían mayor atención.

Los períodos de mayor ruido parecen exacerbar las dificultades de aprendizaje, afectando negativamente la concentración y la participación en clase. Estos hallazgos subrayan la importancia de mantener un ambiente acústico controlado para fomentar un entorno de aprendizaje más efectivo y saludable. La investigación resalta la necesidad de implementar estrategias para gestionar el ruido en el aula, como mejorar la insonorización, utilizar medidas para reducir el ruido y planificar horarios escolares que minimicen los cambios bruscos y los períodos de alta actividad, la colocación de sonómetros con pantallas visuales en cada aula es una opción para mejorar. La reducción del ruido no solo puede mejorar la concentración y el rendimiento académico, sino que también puede contribuir al bienestar general de los estudiantes y a una comunicación más efectiva entre profesores y alumnos.

Este estudio no sólo destaca la necesidad crítica de intervención en la escuela en cuestión, sino que también proporciona un marco metodológico que puede replicarse en otros entornos educativos. Promoviendo así un ambiente de aprendizaje más saludable y productivo, esencial para el bienestar y desarrollo académico de los estudiantes.

AGRADECIMIENTOS

A la Escuela Secundaria Benigno Tomás Argote, en especial a los grupos de 12°A, B, C, D y el 10° A, B, C, D ciencias por su colaboración.

A Alain Mulaire por la donación del sonómetro y a Marleni Vargas, Sofía e Isaac Candanedo y por la revisión de este texto.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Acaro Chacón, X.C., Molina Miranda, M.F., & Molina Villacís, M.G. (2022). Evaluación de los niveles de exposición de ruido en aulas de aprendizaje virtual. *Mikarimin. Revista Científica Multidisciplinaria*, 8(1), 71–78. Recuperado a partir de <https://revista.uniandes.edu.ec/ojs/index.php/mikarimin/article/view/2700>

Autoridad Nacional del Ambiente (ANAM). (2012). Decreto Ejecutivo No. 305: Disposiciones sobre Niveles Máximos de Ruido Permitidos. Gaceta Oficial de Panamá.

Bobadilla, Y., Contreras, N., & Medina, M.G. (2018). Características del impacto del ruido externo en las prácticas pedagógicas de las profesoras del Colegio Amigos de la comuna de Pedro Aguirre Cerda., Chile: Universidad Mayor

Burke Mena, G. & Lasso De La Vega, F. (2017). Contaminación acústica en el campus de la USMA, *Investigación y Pensamiento Crítico* 5(3), 19-33 · DOI: 10.37387/ipc.v5i3.73

Chávez, C., Yoza, L, & Arellano, A. (2009). Distribución del ruido ambiental en el campus de la Universidad Nacional Agraria La Molina en el periodo Enero-Marzo 2007. *Anales científicos UNALM* 70(2).

Cobo, P., & Cuesta, M. (2022). Física del ruido, en Manual de Audiología Laboral, Peñuela, J., Lettera Publicaciones, 29-64, isbn: 978-84-121623-5-6 <https://letterapublicaciones.com/producto/manual-de-audiologia-laboral/?v=8cfbb29591ac>

Doutres, O., López M., Rouard, K., Campagna, L.P., Cougoulic, T., Jutras, A., Lauzon, D., Pépin-Pagé P.L., & Purson, A. (2023). Évaluation du bruit dans le campus de L'École de Technologie Supérieure de Montréal et proposition d'un métamatériau acoustique pour la réduction du bruit de transformateur électrique. *Canadian Acoustics/ Acoustique canadienne* 51(2). <https://jcaa.caa-aca.ca/index.php/jcaa/article/view/>

- Duque Aldaz, F., Fierro Aguilar, J., Perez Benítez H., & Tobar Farías, G. (2023). Afectación del ruido ambiental a Instituciones Educativas; conjunto de acciones desde la Participación Ciudadana y Centros Educativos, *Journal of Science & Research*, <https://doi.org/10.5281/zenodo.7802907>
- Huang, X., Liu, J., & Meng, Z. (2022). Application of University Campus Noise Map Based on Noise Propagation Model: A Case in Guangxi University. *Sustainability*, 14(14), <https://doi.org/10.3390/su14148613>
- Instituto de Acústica de Panamá. (2018). "Impacto del Ruido en Zonas Urbanas de Panamá". *Revista de Medio Ambiente y Salud Pública*, 15(3), 45-58.
- Ministerio de Salud de Panamá. (2006). Decreto Ejecutivo No. 213: Regulaciones sobre el Control del Ruido Ambiental. *Gaceta Oficial de Panamá*.
- Municipio de Panamá. (2023). Informe Anual sobre Quejas por Ruido y Sanciones Aplicadas. Oficina del Alcalde.
- Nicholson, M., Edward, H., Cedeño, J. y Caballero, A. (2022) «Niveles sonoros en la zona hospitalaria del barrio La Exposición - ciudad de Panamá», *Tecnociencia*, 24(2), pp. 86–102, <https://revistas.up.ac.pa/index.php/tecnociencia/article/view/3074>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2020). Guías sobre Ruido Ambiental para la Región de las Américas. Ginebra: OMS.
- Ríos, Y., & Rusnak, J. (2023). Niveles de contaminación acústica en las principales vías de la Ciudad de David. *Plus Economía*, 11(1), 57-62.
- Rubio, I. (2021). Cómo evitar la contaminación acústica. *Contaminación Acústica: Qué es y 10 acciones para evitarla - Aural*, <https://www.aural.es/blog/como-evitar-la-contaminacion-acustica>
- Santana, M. (2008). Mediciones de Ruido en la Ciudad de Penonomé, Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá
- Villarreal, Y., Castillo, M.D. L.A., Muñoz, A., Toral, J., & Castro, E.F. (2003). Nivel de ruido en la ciudad de Panamá. *Tecnociencia*, 5(2), 97-108.



Caracterización estructural y florística del manglar de playa Morrillo, Veraguas, Panamá

Structural and floristic characterization of the mangrove at Morrillo beach, Veraguas, Panama

Rosa, G. Castellero

Universidad de Panamá, Centro de Capacitación, Investigación y Monitoreo de la Biodiversidad, Parque Nacional Coiba (CCIMBIO-CRUV-UP). Veraguas, Panamá.

rosa-1110@hotmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-5184-5287>

Dany, D. Luque-Atencio

Universidad Especializada de las Américas. Panamá

luque06@hotmail.com

<https://orcid.org/0009-0008-0811-2513>

Jorge, M. Castillo-Beitia

Universidad Autónoma de Chiriquí. Panamá

jorgemanuel_08@hotmail.com

<https://orcid.org/0009-0005-2414-1240>

Fecha de recepción: 4 de marzo de 2024

Fecha de aceptación: 6 de noviembre de 2024

DOI [HTTPS://DOI.ORG/10.48204/J.TECNO.V27N1.A6638](https://doi.org/10.48204/J.TECNO.V27N1.A6638)

RESUMEN

Entre agosto y septiembre de 2023 se caracterizó la estructura del manglar de Morrillo, para ello se realizaron ocho cuadrantes de 10 x 10 m separados cada 100 m y paralelos a la costa. En cada cuadrante se identificaron las especies presentes, se midió la altura y el Diámetro a la Altura del Pecho (DAP) a 1.30 cm. A partir de esos datos se calculó el Área Basal (AB), volumen y densidad. Se identificaron cuatro especies de manglar: *Pelliciera rhizophorae*, *Laguncularia racemosa*, *Rhizophora racemosa* y *Avicennia germinans* y tres especies asociadas: *Mora oleifera*, *Acrostichum aureum* y *Rhabdadenia biflora*. La mayor frecuencia de altura se ubicó entre los 7.2 y 11.2 m y entre los 2.5 y 12.5 cm de DAP. Se observó la intervención humana en este ecosistema, evidenciada por la presencia de desechos sólidos (chancletas, boyas, botellas plásticas) y la deforestación de *Pelliciera rhizophorae*. Este estudio representa la primera base de datos de manglares del área, esto aporta información valiosa para un mejor manejo de la playa, puesto que también es un sitio de anidación de tortugas marinas.

PALABRAS CLAVES

Playa Morrillo, manglares, composición florística, atributos estructurales

ABSTRACT

Between August and September 2023, a comprehensive study was conducted to generate information on the structural characterization of the Morrillo mangrove. Eight quadrants, each measuring 10 x 10 m and spaced 100 m apart parallel to the coast, were established. Within each quadrant, species identification, along with height and Diameter at Breast Height (DBH) measurements at 1.30 m, was performed. Subsequently, Basal Area (BA), volume, and density were calculated based on these data. The study identified four mangrove species: *Pelliciera rhizophorae*, *Laguncularia racemosa*, *Rhizophora racemosa* y *Avicennia germinans* y tres especies asociadas: *Mora oleifera*, *Acrostichum aureum* y *Rhabdadenia biflora*. The predominant height frequencies ranged between 7.2 and 11.2 m, with DBH varying from 2.5 to 12.5 cm. Human intervention was observed in the ecosystem, evidenced by the presence of solid waste (flip flops, buoys, plastic bottles) and deforestation of *Pelliciera rhizophorae*. This study serves as the inaugural database for the Morrillo mangroves, offering valuable information for enhanced beach management, considering its significance as a sea turtle nesting site.

KEYWORDS

Morrillo beach, mangroves, floristic composition, structural attributes

INTRODUCCIÓN

Los manglares se distribuyen en zonas tropicales y subtropicales del planeta. Se encuentran asociados a bahías más cerradas y protegidas de fuertes oleajes y mareas donde abundan los sedimentos y nutrientes arrastrados por los ríos. Normalmente se pueden encontrar asociados a arrecifes de coral, pastos marinos y fangales, entre otros (ANAM-ARAP, 2013).

Los manglares representan un ecosistema altamente productivo, ya que generan una gran cantidad de nutrientes que son exportados por las mareas a las aguas marinas, donde son aprovechados por pastos marinos, arrecifes de coral y una gran variedad de peces. Además, poseen gran riqueza biológica, ya que es el hábitat tanto de especies residentes permanentes como temporales (Rodríguez et al., 2013).

En Panamá los manglares representan el 2.44 % de la cobertura de vegetación a nivel nacional, cubriendo 183 800 ha, de las que 169 458 ha se encuentran en el litoral Pacífico y el restante en el Caribe (Ministerio de Ambiente, 2022). Sin embargo, la extensión de manglares está disminuyendo a nivel mundial, y Panamá no ha sido la excepción, ya que, debido a la tala, la cría de camarones, las construcciones de hoteles, puertos y mayormente el represamiento de los ríos, se ha visto perjudicada la afluencia de agua, minerales y demás sedimentos necesarios para que se mantengan estos ecosistemas (Del Cid-Perén, 2022).

Debido a la importancia que juegan estos ecosistemas es necesario generar información que permita sustentar la necesidad de conservar y proteger los manglares. Agudelo et al. (2015) señala que, conocer la estructura del manglar permite determinar la dinámica ecológica, lo cual es necesario para el conocimiento, manejo, conservación y potencialización de los servicios ambientales que dichos ecosistemas ofrecen. De igual manera es importante el monitoreo de las variables ambientales que afectan a los manglares, ya que de acuerdo con Serrano-Díaz et al. (1995) la salinidad, el aporte de agua dulce, el potencial redox y las concentraciones de nitrógeno y fósforo inciden en el desarrollo estructural del manglar. Además, Agudelo et al. (2015) mencionan que, la alteración antropogénica afecta fuertemente la estructura del bosque con la proliferación de la regeneración natural y la desaparición de árboles de gran tamaño.

Para Panamá destacan los siguientes trabajos, estructura del manglar (Lovelock et al., 2005) descripción de los manglares, pastos marinos y corales mediante el método CARICOMP en Bocas del Toro (Guzmán et al., 2005), estructura y dinámica del bosque de manglar de Punta Galeta (Sousa et al., 2007), estructura y composición de los manglares en el Archipiélago de las Perlas (McGowan et al., 2010), estructura y biomasa aérea de un bosque de *Pelliciera rhizophorae* en el Golfo de Montijo (Gross et al., 2014), características estructurales del mangle rojo (*Rhizophora mangle*) en isla Payardi (Garcés y Lozano, 2021) y caracterización geomorfológica, florística y estructural del manglar en la costa de Pixvae, Golfo de Chiriquí, Pacífico de Panamá (Castillero et al., 2023).

El Golfo de Montijo integrado por los distritos de Mariato, Montijo, Santiago y Soná ocupa la cuarta posición a nivel nacional en extensión de manglares (CATHALAC, 2007). Los estudios de manglares se han enfocado principalmente en los distritos de Montijo y Soná, sin embargo, hasta la fecha no hay información publicada sobre manglares para el distrito de Mariato. Por lo que el objetivo de este estudio fue caracterizar la estructura del manglar de playa Morrillo, para crear la primera base de datos sobre los manglares en la zona.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

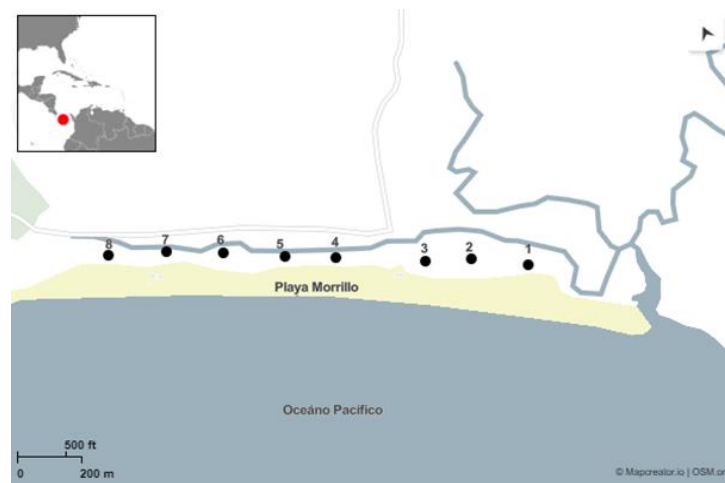
Playa Morrillo forma parte de la Zona Especial de Manejo Marino-Costera (ZEMMC) la Zona Sur de Veraguas, distrito de Mariato, provincia de Veraguas y del área de influencia del Parque Nacional Coiba (PNC). La zona cuenta con playas rocosas y de arena fina y gruesa, acantilados de roca blanda, manglares, formaciones coralinas, fondos, sitios de reproducción de aves marinas y playas de anidación de tortugas marinas (Pinto y Yee, 2011).

Para determinar la composición florística y la caracterización estructural del manglar se realizaron muestreos entre agosto y septiembre de 2023. Se establecieron 10 cuadrantes de

10 x 10 m separados cada 100 m, paralelos a línea de costa (Figura 1). Se identificaron todas las especies presentes en cada cuadrante. Se midió la altura de todos los árboles con DAP mayor a 2.5 cm con un hipsómetro Forestry pro II marca Nikon, y la circunferencia a una altura de 1.30 m para *L. racemosa*, *P. rhizophorae* y *A. germinans* y en el caso de *R. racemosa*, la medición se realizó 30 cm sobre la raíz aérea más alta (Kauffman et al., 2013). Posteriormente este valor se transformó a diámetro (DAP) dividiéndolo por el valor de π (3.1416). Para los análisis sólo se consideraron árboles DAP mayor a 2.5 cm (Cintrón y Schaeffer-Novelli, 1984). Además, se emplearon tres categorías diamétricas: brinzales ($2.5 \leq x < 5.0$ cm), latizales ($5.1 \leq x < 10.0$ cm) y fustales (≥ 10.1 cm) (Cintrón-Molero y Schaeffer-Novelli, 1992). A partir de esos datos se calculó el Área Basal, (AB), volumen y densidad (Váldez-Hernández, 2004).

Figura 1.

Sitios de muestreo en el manglar de Morrillo



Al no cumplirse los supuestos de normalidad y homocedasticidad se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis para analizar la diferencia entre las características estructurales entre especies por cuadrantes para un $\alpha = 0.05$ (Zar, 2009). Se espera encontrar diferencias en los parámetros estructurales de la misma especie asociado a las características particulares de cuadrante. Para analizar los datos se utilizó el programa IBM SPSS Statistics.

RESULTADOS

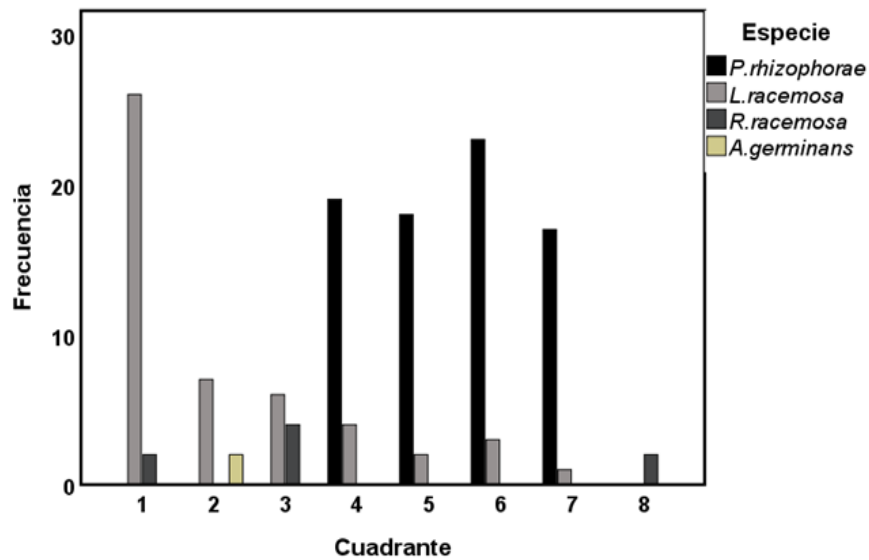
El manglar de Morrillo limita en su parte frontal con playa Morrillo y en su parte posterior con zonas ganaderas. Este manglar recibe aportes de agua dulce del río Morrillo y de la quebrada La Barra, y además cuenta con un canal en el lado sureste donde ocurre el intercambio con el mar.

Se cuantificaron 136 árboles en un área de 800 m², se identificaron cuatro especies de mangle: *Pelliciera rhizophorae* (mangle piñuelo) el cual representó el 56.62 %, *Laguncularia racemosa* (mangle blanco) 36.03 %, *Rhizophora racemosa* 5.88 % y *Avicennia germinans* 1.47 %. Además, se observaron tres especies asociadas al manglar: *Mora oleifera* (alcornoque), *Acrostichum aureum* (helecho de manglar), *Rhabdadenia biflora* (enredadera de manglar).

P. rhizophorae fue la especie más abundante, sin embargo, solo se encontró en cuatro de los ocho cuadrantes. Mientras que, *L. racemosa* fue la especie más frecuente ya que se presentó en siete de los ocho cuadrantes, *R. racemosa* en tres cuadrantes y *A. germinans* solo en uno. Es oportuno mencionar que en el cuadrante ocho solo se encontraron dos árboles de *R. racemosa*, el resto de los árboles correspondieron a *M. oleifera* (Figura 2). La presencia del helecho de manglar se observó en los cuadrantes seis, siete y ocho.

Figura 2.

Distribución de especies por cuadrante



La mayor frecuencia de árboles se ubicó entre los 7.2 y 11.2 m de altura (Figura 3) y entre los 2.5 y 12.5 cm de DAP (Fig. 4). Se encontró representación en las tres categorías diamétricas, sin embargo, los latizales y fustales fueron los árboles más abundantes aportando el 77.94 % (Figura 5).

Figura 3.

Distribución de alturas de los árboles en el manglar de Morrillo

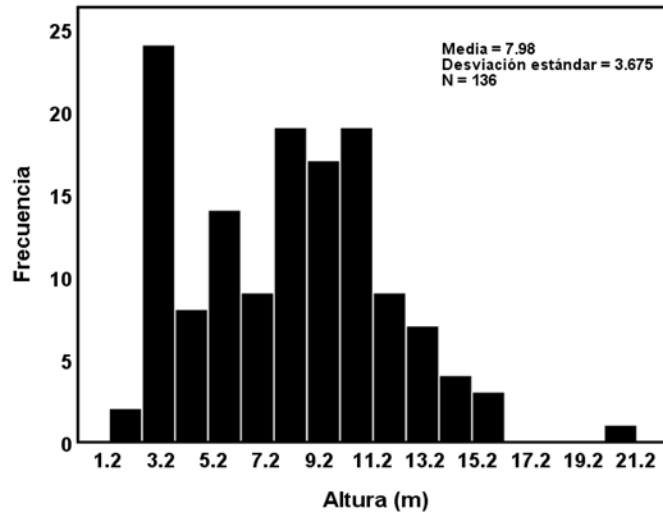


Figura 4.

Distribución diamétrica de los árboles en el manglar de Morrillo

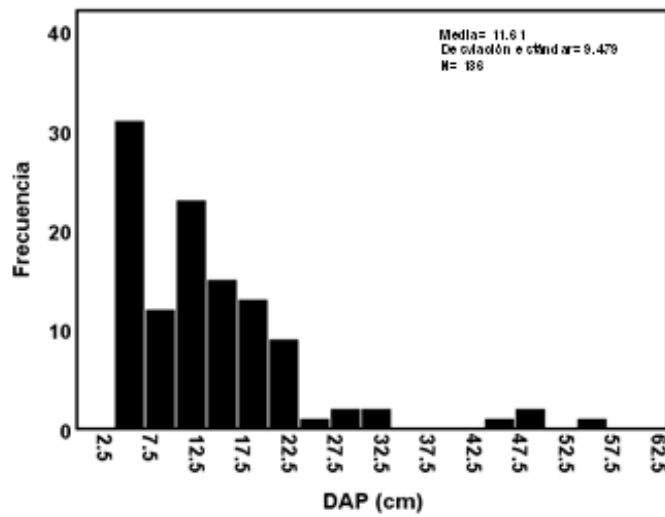
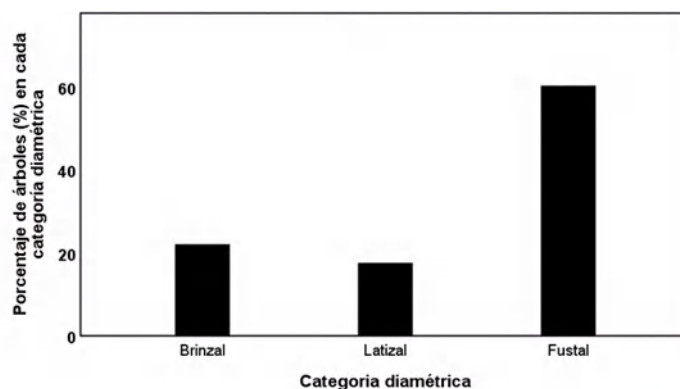


Figura 5.
Categorías diamétricas en el manglar de Morrillo



Para *P. rhizophorae* la densidad fue el único atributo estructural que varió entre cuadrantes ($H= 10.64$, $p= 0.014$), mientras que, *L. racemosa* presentó diferencias en el DAP ($H= 23.54$, $p= 0.001$), AB ($H= 21.19$, $p= 0.002$) y volumen ($H= 21.58$, $p= 0.001$) (Tabla 1)

Tabla 1.
Comparación de los atributos estructurales de las especies presentes en los cuadrantes del manglar de Morrillo

Especie	Parámetro	Cuadrantes							
		1	2	3	4	5	6	7	8
<i>P. rhizophorae</i>	Altura	.	.	.	6.87	7.54	6.70	9.27	.
	DAP	.	.	.	9.60	10.05	10.02	13.91	.
	Área Basal (m ² /ha)	.	.	.	72.38	79.33	78.85	151.97	.
	Densidad (árboles/ha)	.	.	.	1900	1800	2300	1700	.
	Volumen (m ³ /ha)	.	.	.	183.42	279.56	390.04	491.56	.
<i>L. racemosa</i>	Altura	7.26	8.83	10.10	7.55	12.45	5.17	15.90	.
	DAP	6.35	11.20	13.59	16.53	20.40	11.80	15.37	.
	Área Basal (m ² /ha)	31.67	98.52	145.05	214.60	326.85	109.36	185.54	.
	Densidad (árboles/ha)	2600	700	600	400	200	300	100	.
	Volumen (m ³ /ha)	140.40	56.00	120	436	328	1.68	3.70	.
<i>R. racemosa</i>	Altura	4.30	.	12.25	.	.	.	17.85	.
	DAP	3.98	.	18.49	.	.	.	37.96	.
	Área Basal (m ² /ha)	12.44	.	268.51	.	.	.	1131.73	.
	Densidad (árboles/ha)	200	.	400	.	.	.	200	.
	Volumen (m ³ /ha)	1.44	.	240	.	.	.	548	.
<i>A. germinans</i>	Altura	.	9.54	.	.	.	.	.	.
	DAP	.	12.11	.	.	.	.	.	.
	Área Basal (m ² /ha)	.	115.18	.	.	.	.	.	.
	Densidad (árboles/ha)	.	200	.	.	.	.	.	.
<i>A. germinans</i>	Volumen (m ³ /ha)	.	48.64	.	.	.	.	.	.

Es necesario mencionar que en el manglar se observó influencia de la actividad antropogénica, ya que se encontraron chancletas, restos de boyas, pero principalmente botellas plásticas. También fue evidente la tala, pero únicamente de *P. rhizophorae* (Figura 6).

Figura 6

Tala, botellas plásticas y chancletas encontradas en el manglar de Morrillo



DISCUSIÓN

El manglar de Morrillo es un manglar tipo cuenca, el cual se caracteriza por tener poca influencia de la marea y, por lo tanto, la renovación de las aguas ocurre lentamente (Moreno-Casasola y Infante-Mata, 2016). Este manglar está conformado por cuatro de las siete especies reportadas para Panamá de acuerdo con ANAM-ARAP (2013), siendo *P. rhizophorae* la más abundante y *L. racemosa* la más frecuente. *P. rhizophorae* se encontró restringida a los últimos cuadrantes (4, 5, 6, 7), sugiriendo entonces que estos sitios cuentan con las condiciones adecuadas para el establecimiento de dicha especie. Gross et al. (2014) y Castillero et al. (2023) reportaron la presencia de *P. rhizophorae* en sustratos consolidados, y cabe señalar que, en todos los cuadrantes del manglar de Morrillo los sustratos eran estables. Es importante mencionar que *P. rhizophorae* tiene restricciones de distribución asociado principalmente con la salinidad, ya que no tolera más de 37 ups (Jiménez y Soto, 1985), por lo tanto, esta especie se desarrolla cerca de fuentes de agua dulce. En este manglar *P. rhizophorae* se encontró lejos del estero de Morrillo, pero próximo a la quebrada La Barra y el río Morrillo.

Por otra parte, *L. racemosa* presentó asociación con todas las especies de mangle, resultados contrarios a los reportados por Mainardi-Grellet (1995), quién menciona que esta especie tiene baja asociatividad. La mayor frecuencia de *L. racemosa* en el manglar de Morrillo puede estar asociado a que esta especie tiene plasticidad fenotípica, y esto le permite colonizar una variedad de ambientes (Romero-Berny et al., 2019).

Es pertinente resaltar que, el cuadrante ocho fue el que menor número de árboles de mangle presentó, esto se debe a que en este cuadrante dominó *M. oleifera*, *A. aureum* y *R. biflora*. De acuerdo con Pinto-Nolla (1999), la flora asociada a los manglares indica las condiciones ambientales predominantes, la presencia de *A. aureum* y *R. biflora* es un indicador de la existencia de fuentes de agua dulce. Este cuadrante es el que se encuentra más alejado del estero de Morrillo, por lo que tiene menor influencia de agua salada y, además, está cerca a la quebrada La Barra.

De acuerdo con Barrantes-Leiva y Cerdas-Salas (2014) y Flores-Verdugo et al. (2017) el tipo de sustrato, la salinidad y la inundación son factores que determinan la composición de especies en un manglar, es probable que estos factores estén influyendo en la variación de la composición de especies por cuadrante en el manglar de Morrillo.

Morrillo tiene un manglar con buen desarrollo estructural, ya que está dominado por árboles que superan los 10 cm de DAP, sin embargo, existe poca presencia de brinzales, los cuales representan la regeneración del manglar (Agudelo-Ramírez, 2000), una de las causas de la poca presencia de brinzales es la tala selectiva que ocurre en este manglar, puesto que los árboles de poco diámetro son talados por las personas que viven en las comunidades vecinas al manglar para utilizarlos en la construcción de cercas y ranchos (M. Vásquez, com. pers., 2023). Si esta actividad no se controla, la sucesión del bosque será afectada, ya que los árboles no llegarán a la categoría de fustal, y son estos árboles los responsables de la mayor producción de estructuras reproductivas (Orjuela-Rojas et al., 2011). De tal forma que, cuando el número de individuos reproductivos empieza a disminuir, se reducirá la regeneración, y al verse afectado este proceso hay una reducción del número de individuos capaces de llegar a las etapas posteriores.

La densidad constituye un indicador del grado de desarrollo de un bosque. Una baja densidad de árboles y valores altos de área basal representan a un bosque más desarrollado. (Kamruzzaman et al., 2017). El manglar de Morrillo representa un manglar desarrollado, ya que se cumple el supuesto anterior. De acuerdo con Jiménez y Soto (1985) el mayor desarrollo estructural se asocia a sitios que tienen suministro de agua dulce (escorrentías, precipitaciones). En el caso del manglar de Morrillo, éste recibe aporte de agua dulce de la quebrada La Barra y del río Morrillo, y un importante aporte pluvial, puesto que históricamente el distrito de Mariato ha sido uno de los cuatro distritos que integran el Golfo de Montijo que ha reportado la mayor precipitación anual (Fundación MarViva, 2021).

Es importante mencionar que en la zona se observó la tala de *P. rhizophorae* únicamente, esto se debe a que las poblaciones cercanas utilizan esta madera para la construcción de cercas y ranchos, puesto que el tronco de esta especie crece muy recto (M. Vásquez, com. pers., 2023). En otras áreas del Golfo de Montijo se ha reportado la tala del manglar para la construcción de casas, hoteles y para la expansión de la frontera agropecuaria (Fundación MarViva, 2014).

CONCLUSIONES

El manglar de Morrillo es de tipo cuenca, se caracteriza por ser un rodal mixto integrado por cuatro de las siete especies de mangle reportadas para Panamá. Este manglar presenta un buen desarrollo estructural puesto que presenta una mayor abundancia de latizales y fustales. Sin embargo, tiene presiones antropogénicas debido a la presencia de desechos sólidos y deforestación dirigida hacia árboles de *P. rhizophorae*.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo financiero al Programa de Pequeñas Donaciones (PPD)-GEF-PNUD para el traslado al sitio de estudio, al Centro de Capacitación, Investigación y Monitoreo de la Biodiversidad en el Parque Nacional Coiba (CCIMBIO-CRUV-UP) por facilitar los equipos para realizar las mediciones y a los revisores por su contribución al artículo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Agudelo-Ramírez, C. P. (2000). Estructura de los bosques de manglar del departamento de Bolívar y su relación con algunos parámetros abióticos. [Tesis de Licenciatura]. Universidad de Bogotá. Colombia.
- Agudelo, M. C., Bolívar, J., Polanía, J., Urrego, L., Yepes, A. y Sierra, A. (2015). Estructura y composición florística de los manglares de la bahía de Cispatá, Caribe colombiano. *Revista de Biología Tropical*, 63 (4), pp. 1137-1147.
- Autoridad Nacional del Ambiente y Autoridad de los Recursos Acuáticos de Panamá (ANAM-ARAP). (2013). Manglares de Panamá: importancia, mejores prácticas y regulaciones vigentes. Panamá. [Archivo PDF]. Recuperado de <https://www.oteima.ac.pa/web3/wp-content/uploads/2017/10/Manglares-de-Panama-web.pdf>
- Barrantes-Leiva, R. M. y Cerdas-Salas, A. (2014). Distribución espacial de las especies de mangle y su asociación con los tipos de sedimentos del sustrato, en el sector estuarino

del Humedal Nacional Terraba-Sierpe, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 63 (1), pp. 47-60.

Castillero, R. G., Vega, A. J., Robles, Y. A. y Rivera, J. (2023). Caracterización geomorfológica, florística y estructural del manglar en la costa de Pixvae, Golfo de Chiriquí, Pacífico de Panamá. *Tecnociencia*, 25 (1), pp. 209-229.

Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y el Caribe (CATHALAC). (2007). Diagnósticos biofísicos, institucional-legal, socioeconómico y línea base del bosque de manglar del Golfo de Montijo, Provincia de Veraguas. [Archivo PDF]. Recuperado de <https://aquadocs.org/handle/1834/8022>

Cintrón, G. y Schaeffer-Novelli, Y. (1984). Methods for studying mangrove structure. *Monographs on oceanographic methodology*, 8, pp. 91-113.

Cintrón-Molero, G. y Schaeffer-Novelli, Y. (1992). *Ecology and management of New World mangroves*. In Coastal plant communities of Latin America. San Diego Academic.

Del Cid-Perén, F. A. (2022). Manglares en Panamá: Importancia, biodiversidad y medidas para su conservación. *Biocenosis*, 33 (2), pp. 17-27.

Flores-Verdugo, F., Moreno-Casasola, P., Agraz-Hernández, C. M., López-Rosas, H., Benítez-Pardo, D. y Travieso-Bello, A. N. (2017). La topografía y el hidroperiodo: dos factores que condicionan la restauración de los humedales costeros. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 80, pp. 33-47.

Fundación MarViva. (2014). Valoración económica de los Manglares de David y el Humedal Golfo de Montijo. Fundación MarViva, Ciudad de Panamá, Panamá. [Archivo PDF]. Recuperado de <https://chm.cbd.int/api/v2013/documents/05B386D2-5BCD-A52D-6097-F853803CC619/attachments/205376/Informe%20t%C3%A9cnico%20-%20valoracion%20manglares%20David%20y%20Montijo%20-%20Marviva%2C%20CATIE.pdf>

Fundación MarViva. (2021). Atlas Marino-Costero del Humedal Golfo de Montijo, Panamá. Fundación MarViva, Ciudad de Panamá, Panamá. [Archivo PDF]. Recuperado de <https://marviva.net/wp-content/uploads/2022/02/2D3-2022-Atlas-G-de-Montijo-DIGITAL.pdf>

Garcés, B. H. y Lozano, J. (2021). Características estructurales del mangle rojo (*Rhizophora mangle*) en Isla Payardí, Colón, Panamá. *Tecnociencia*, 23 (2), pp. 5-15.

- Gross, J., Flores, E. E. y Schwendenmann, L. (2014). Stand structure and aboveground biomass of a *Pelliciera rhizophorae* mangrove forest, Gulf of Montijo Ramsar site, Pacific Coast, Panama. *Wetlands*, 34 (1), pp. 55-65.
- Guzmán, H. M., Barnes, P. A., Lovelock, C. y Feller, I. (2005). A Site Description of the CARICOMP Mangrove, Seagrass and Coral Reef Sites in Bocas del Toro, Panama. *Caribbean Journal of Science*, 41 (3), pp. 430-440.
- Jiménez, J. A. (1984). A Hypothesis to Explain the Reduced Distribution of the Mangrove *Pelliciera rhizophorae* Tr. & Pl. *Biotropica*, 16 (4), pp. 304-308.
- Jiménez, J. A. y Soto, R. (1985). Patrones regionales en la estructura y composición florística de los manglares de la Costa Pacífica de Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 3 (1), pp. 25-37.
- Kauffman, J. B., Donato, D. C y Adame, M. F. (2013). Protocolo para la medición, monitoreo y reporte de la estructura, biomasa y reservas de carbono de los manglares. [Archivo PDF]. Recuperado de https://www.cifor.org/publications/pdf_files/WPapers/WP117Kauffman.pdf
- Lovelock, C. E., Feller, I. C., McKee, K. L. y Thompson, R. C. (2005). Variation in mangrove forest structure and sediment characteristics in Bocas del Toro, Panama. *Caribbean Journal of Science*, 43 (1), pp. 456-464.
- Mainardi-Grellet, V. (1995). Estructura y composición florística de rodales con *Pelliciera rhizophorae* del manglar de Estero Guarumal, Sierpe, Costa Rica. [Tesis de Maestría]. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Costa Rica.
- Ministerio de Ambiente. (2022). Manglares: industrias de la biodiversidad y servicios a los ecosistemas. [Archivo PDF]. Recuperado de <https://www.miambiente.gob.pa/172368-2/>
- McGowan, T., Cunningham, S. L., Guzmán, H. M., Mair, J. M., Guevara, J. M. y Betts, T. (2010). Mangrove forest composition and structure in Las Perlas Archipelago, Pacific Panama. *Revista de Biología Tropical*, 58 (3), pp. 857-869.
- Moreno-Casasola, P. y Infante-Mata, D. M. (2016). Conociendo los manglares, las selvas inundables y los humedales herbáceos. [Archivo PDF]. Recuperado de https://www.itto.int/files/itto_project_db_input/3000/Technical/Conociendo%20los%20manglares%20y%20selvas%20inundables.pdf

- Orjuelas-Rojas, A. M., Villamil, C. M y Sanjuan-Muñoz, A. (2011). Cobertura y estructura de los bosques de mangle en la Baja Guajira, Caribe colombiano. *Bol. Invest. Mar. Cost*, 40 (2), pp. 381-399.
- Pinto-Nolla, F. (1999). Sucesión y fisionomía de los manglares de Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc*, 23, pp. 141.161.
- Pinto, I. y Yee, J. (2011). Diagnóstico de las áreas marinas protegidas y de las áreas marinas para la pesca responsable en el Pacífico Panameño. Fundación MarViva, Panamá. [Archivo PDF]. Recuperado de <https://marviva.net/diagnostico-de-las-areas-marinas-protégidas-y-de-las-areas-marinas-para-la-pesca-responsable-en-el-pacifico-panameno/>
- Romero-Berny, E. I., Tovilla-Hernández, C. y Torrescano-Valle, N. (2019). Heterogeneidad estructural del manglar como respuesta a factores ambientales y antrópicos en el Soconusco, Chiapas, México. *Polibotánica*, 47, pp. 39-58.
- Serrano-Díaz, L. A., Botero, L., Cardona, P. y Mancera-Pineda, J. E. (1995). Estructura del manglar en el delta exterior del río Magdalena-Ciénaga Grande de Santa Marta, una zona tensionada por alteraciones del equilibrio ecológico. *An. Inst. Invest. Mar*, 24, pp. 135-164.
- Sousa, W. P., Kennedy, P. G., Mitchell, B. J. y Ordoñez. L. B. M. (2007). Mangrove Forest Structure and Dynamics, Punta Galeta, Panama. *Ecological Society of America*, 81 (1), pp. 46-49.
- Valdez-Hernández, J. I. (2004). Manejo forestal de un manglar al sur de Marismas Nacionales, Nayarit. *Rev. Madera y Bosques*, 2, pp. 93-104.
- Zar, J. H. (2009). Biostatistical analysis. ed. 5ta. New Jersey, USA.



Peces de los ríos Aguas Blancas y Chorrerita, Coclé, Panamá y su relación con características ambientales

Fishes of the White Water and Chorreritas rivers, Cocle, Panama and their relationship with environmental characteristics

Bryan E. Jones A.

Universidad de Panamá, Centro Regional Universitario de Coclé, Escuela de Biología

bryanjones03aguilar@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0005-9432-0287>

Marcela E. Pinzón P.

Universidad de Panamá, Centro Regional Universitario de Coclé, Escuela de Biología

marceliza24@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0004-7996-0676>

Martha de Von Chong

Universidad de Panamá, Centro Regional Universitario de Coclé, Escuela de Biología

martha.chaves@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0002-1087-4196>

Italo Goti

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

italo.goti@up.ac.pa

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

Juan Antonio Gómez H.

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

juanay05@hotmail.com

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

Fecha de recepción: 14 de mayo de 2024

Fecha de aceptación: 23 de octubre de 2024

DOI [HTTPS://DOI.ORG/10.48204/J.TECNO.V27N1.A6637](https://doi.org/10.48204/J.TECNO.V27N1.A6637)

RESUMEN

Los ríos Aguas Blancas y Chorrerita, ubicados en la provincia de Coclé, son utilizados para la pesca por los habitantes aledaños. Debido a la importancia pesquera se realizó un estudio ictiológico, análisis de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos asociados a la calidad del agua y su influencia en la abundancia íctica. Se capturaron siete especies de peces en Aguas Blancas y diez en Chorrerita, con baja diversidad, $H' = 0,59$ y $0,71$ respectivamente, en los cuales dominó *Astyanax ruberrimus*, La temperatura y la velocidad de

corriente no presentaron diferencia significativa entre ríos. Por otro lado, los sólidos disueltos totales presentaron promedio de 314 mg/L, valores normales para el desarrollo de las poblaciones de peces. Se presentaron condiciones desfavorables en términos de calidad microbiológica del agua en ambos ríos, con *E. coli* promedio de $1\,935 \pm 2\,221$ UFC/100 mL y Coliformes totales de $4\,804 \pm 5\,165$ UFC/100 mL, con diferencias estadísticas en este grupo. Entre las especies capturadas pocas son de interés alimentario; *Rhamdia quelen*, *Rhamdia laticauda*, *Andinoacara coeruleopunctatus*, *Hoplias microlepis*, *Astyanax ruberrimus*, *Astyanax sp2*. A pesar de que no hubo relación de la incidencia bacteriana y las especies capturadas, los hallazgos alertan posible riesgo para la salud humana.

PALABRAS CLAVES

Peces dulceacuícolas, microbiología, provincia ístmica, sólidos disueltos, velocidad de la corriente

ABSTRACT

The Aguas Blancas and Chorrerita rivers, located in the province of Coclé, are used for fishing by the surrounding inhabitants. An ichthyological study was conducted to analyze the physicochemical and microbiological parameters associated with water quality and its influence on fish abundance due to the importance of fishing. Seven fish species were captured in Aguas Blancas and ten in Chorrerita, with low diversity ($H' = 0.59$ and 0.71 respectively). The dominant species was *Astyanax ruberrimus*. Temperature and current speed did not show significant differences between the rivers. However, total dissolved solids had an average of 314 mg/L, which is normal for the development of fish populations. Unfavorable conditions were found regarding microbiological water quality in both rivers, with an average *E. coli* count of $1,935 \pm 2,221$ CFU/100 mL and total coliforms of $4,804 \pm 5,165$ CFU/100 mL. Statistical differences were observed in this group. Among the captured species, a few are of food interest: *Rhamdia quelen*, *Rhamdia laticauda*, *Andinoacara coeruleopunctatus*, *Hoplias microlepis*, *Astyanax ruberrimus*, and *Astyanax sp2*. While there was no relationship between bacterial incidence and the species captured, the findings indicate a potential risk to human health.

KEYWORDS

Freshwater fish, microbiology, isthmic province, dissolved solids, current velocity

INTRODUCCIÓN

Los cuerpos de aguas continentales soportan una proporción muy alta de la biodiversidad de peces en el mundo (Mendoza-Barrera, 2020). Un estudio realizado por Angulo et al. (2013) reportó la abundancia de 154 especies de agua dulce para Costa Rica. Mientras que en Colombia existen alrededor de 1 435 especies nativa de peces de ríos de ese país, lo que representa aproximadamente el 29 % de los peces de agua dulce que habitan las aguas continentales desde el límite sur de México hasta Chile y Argentina (Maldonado-Ocampo et al., 2008).

Las investigaciones de la diversidad de peces dulceacuícolas de Panamá, desde mediados del siglo XIX hasta principios del siglo XX incluyeron varios estudios zoológicos, entre estos, algunos sobre peces de agua dulce (Heckadon-Moreno, 1998).

En las provincias de Coclé y Colón se han realizado diversos estudios de peces: Río Coclé del Norte, Río Miguel de la Borda y Río Indio. Se concluyó que la cuenca Coclé del Norte presentó una mayor riqueza de especies. Entre los peces observados figuran; *Brycon chagrensis* y *Brycon obscurus*, *Hoplias* sp., *Rhamdia quelen* y *Rhamdia laticauda*, *Astyanax aeneus*, *Gephyrocharax intermedius*, *Roeboides* sp., *Ancistrus chagresi*, los cuales se consideran como grupos primarios, y estrictos habitantes de agua dulce, los cuales no tienen marcada tolerancia a la salinidad (Consorcio TLBG et al., 2003).

Alteraciones de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos inciden sobre la calidad del agua de estos ríos. Esto conlleva consecuencias como altas concentraciones de bacterias, que son fáciles de contraer por los peces, como reflejan los resultados en los estudios de Gonzales-Diaz et al. (2020) y Romero-Jarero y Negrete-Redondo (2011).

Se puede mencionar que las bacterias más comunes encontradas en las aguas superficiales son las Coliformes totales (Swistock, 2020), *Escherichia coli* (Rock y Rivera, 2014), y algunas especies del género *Vibrio* (Finkelstein et al., 2002). Los microorganismos señalados sirven como indicadores de la calidad del agua, e inciden en los procesos de tratamiento de agua y evaluaciones epidemiológicas (Larrea-Murrell et al., 2013).

Los peces de los ríos estudiados forman parte de la dieta de los habitantes de la zona, por lo que la presente investigación se propone determinar la abundancia y diversidad de este grupo y algunos parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua para estimar la calidad ambiental fluvial.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las zonas de estudio están localizadas en las siguientes coordenadas: comunidad de Aguas Blancas 8° 29' 16.7" N 80° 18' 19.7" W y Chorrerita a 8° 28' 59.6" N 80° 18' 19.1" W (Figura 1), ambas recorren un solo río que pertenecen al Corregimiento de El Coco y a la Cuenca Hidrográfica 134, Río Grande (MiAmbiente, 2020), o cuenca 84 según Contreras-MacBeath et al. (2022) y pertenece a la provincia biogeográfica Ístmica (Bussing, 1998).

Figura 1.

Localización del área de estudio



La temperatura fue medida, en todos los sitios de colecta, con un termómetro digital de campo, con una precisión de 0,5 °C. La velocidad de la corriente se determinó mensualmente en ambos ríos a través del método de flotador, para lo cual se midió una distancia de 10 m, en la parte media del curso de agua, luego con la ayuda de pelotas de plásticos colocadas en la marca de inicio, se tomó el tiempo que duró el recorrido, se hicieron diez repeticiones para obtener el promedio, luego de ser calculada mediante la fórmula correspondiente.

Las muestras de agua para la determinación de los sólidos disueltos totales (SDT) fueron colectadas en cada zona de muestreo y colocadas en frascos de vidrios rotulados y trasladadas al laboratorio de química del Centro Regional Universitario de Coclé para su análisis. La concentración de SDT se determinó por el método gravimétrico propuesto por la EPA 160.1, con secado en estufa a 100 °C por 2 horas hasta alcanzar peso constante.

Las muestras de peces fueron capturadas con tres artes de pesca distintos, para obtener organismos con amplia variación de talla y así evitar la selectividad; el primer método consistió de un trasmallo de nylon de 1,2 m, con apertura de malla de 1,5 cm con la que se capturó la mayoría de los peces, el segundo método consistió en cinco cañas de pesca artesanal con varas de madera, en uno de los extremos se ató una cuerda de pesca de 1,5 mm de grosor y de longitud 1,8 m, con anzuelo número 15 con su respectiva carnada. El tercer método consistió en una botella de vidrio verde con corcho, a la cual se le hizo un agujero en

la parte de la base y se introdujo hojuelas de avena y pan como atrayente, sumergida tres veces continuas en la orilla de los ríos, durante 15 minutos.

Los peces capturados fueron medidos con un ictiómetro y pesados con una balanza digital calibrada. Seguidamente, fueron identificados mediante las claves de Bermingham et al. (2001), Angulo et al. (2020), Lasso-Alcalá y Lasso (2008), Maldonado-Ocampo et al. (2005). Luego de identificados se mantuvieron en recipientes plásticos, con agua de río hasta terminar el muestreo, para posteriormente devolverlos a su hábitat.

El procedimiento para la extracción de la muestra para análisis microbiológico se realizó de acuerdo a las recomendaciones establecidas por Green Lab (2017). Este proceso se hizo en la sección media del río, a una profundidad de 30 cm de la superficie del agua. Estas fueron guardadas en envases de plásticos esterilizados de 100 mL, con tapas herméticas. Las muestras fueron rotuladas, registradas y etiquetadas en la hoja de custodia y llevadas al laboratorio de microbiología para ser analizadas.

La determinación de Coliformes totales y *E. coli*, se realizó mediante la técnica de membrana filtrante con una repetición, con la ayuda del medio de cultivo cromógeno diferencial Agar Chromocult, previa filtración en membrana micro porosa en volúmenes de 20 mL, 50 mL y 100 mL para retener las bacterias y se incubaron a 37 °C por 48 horas. Luego, de la formación de colonias se realizó el conteo de coliformes totales y *E. coli*. El resultado de este se multiplicó por los volúmenes de filtraciones correspondiente; para el volumen de 100 mL se multiplicó el resultado por uno, el de 50 mL por dos y el de 20 mL por cinco. Cada uno de los valores obtenidos fue multiplicado por 100 y expresado según el reglamento técnico DGNTI-COPANIT 35-2019 (Gaceta Oficial, 2019), UFC/100 mL. Los vibrios fueron aislados con el medio de cultivo selectivo TCBS. (Quino y Aguilera, 2016), incubados a 37 °C por 24 horas.

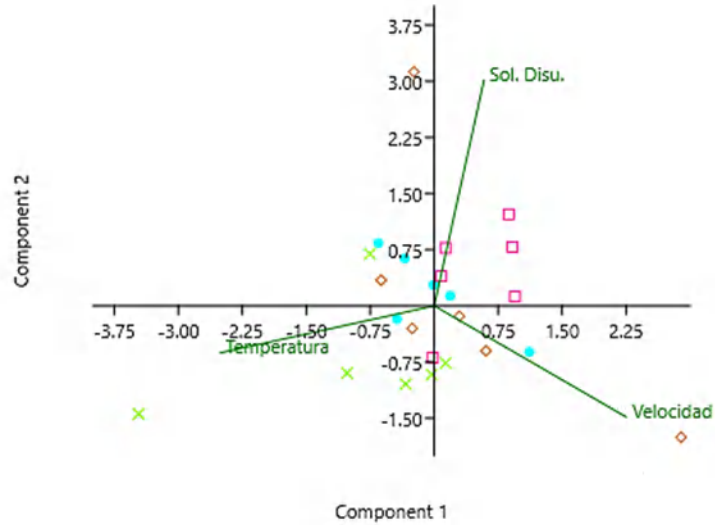
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La temperatura del río de Aguas Blancas presentó un promedio de $25,83 \pm 1,47$ °C, mientras que en Chorrerita fue de $27,63 \pm 1,40$ °C, no se demostró diferencia estadística de esta variable entre ambos ríos ($U = 50$ $p = 0,204$). Los sólidos totales disueltos en Aguas Blancas, indicó una concentración media de $361,90 \pm 99,84$ mg/l y en Chorrerita, $266,40 \pm 250,45$ mg/L, los cuales resultaron ser estadísticamente diferentes ($U = 34$ $p = 0,0282$)

La velocidad de la corriente, en Aguas Blancas fue de $0,23 \pm 0,0773$ m/s, mientras que en Chorrerita $0,20 \pm 0,0603$ m/s, que presentaron diferencia altamente significativa ($U = 5788$ $p = 0,0086$). El análisis de componentes principales mostró que la velocidad de la corriente y los sólidos totales explican la variabilidad de los datos fisicoquímicos (Figura 2).

Figura 2.

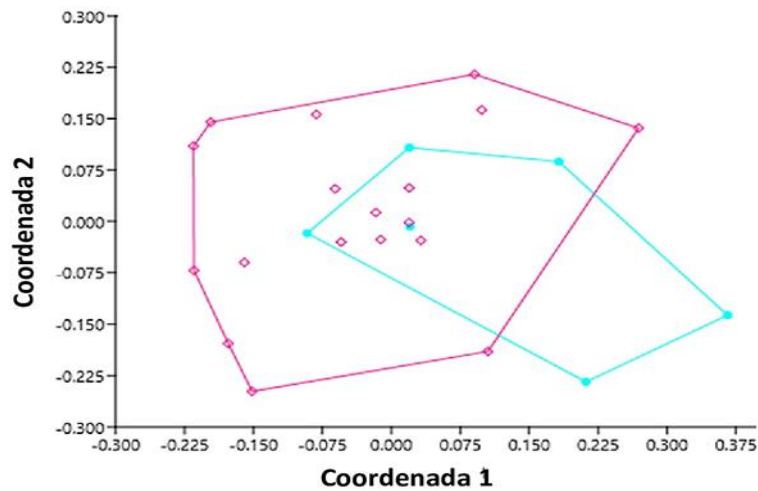
Análisis de componentes principales de parámetros físicos y químicos de los ríos Aguas Blancas y Chorrerita, octubre de 2022 a marzo 2023.



Las características fisicoquímicas no muestran diferencia clara entre los ríos investigados, de acuerdo con el análisis multidimensional no métrico (Figura 3).

Figura 3.

Análisis multidimensional no métrico de los datos físicos y químicos de los ríos Aguas Blancas y Chorrerita, octubre de 2022 a marzo 2023.

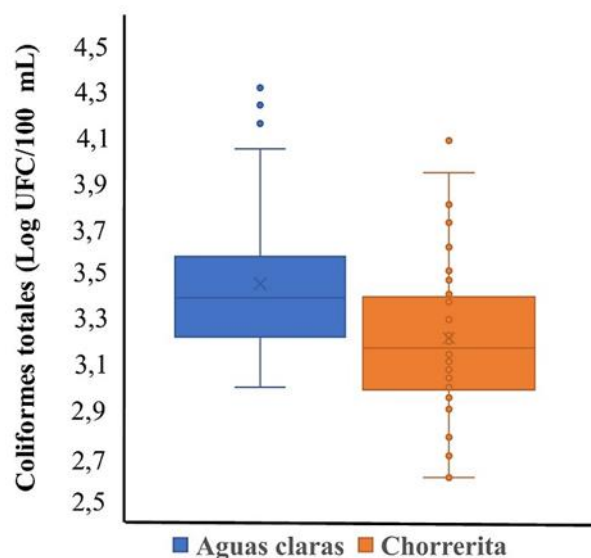


La incidencia total de bacterias indicadoras fecales en ambos ríos, *E. coli* en diluciones de 20 mL presentó promedio de $1\,934 \pm 2\,221$ UFC/100 mL, en 50 ml mostró 743 ± 628 UFC/100 mL y en 100 ml, 613 ± 440 UFC/100 mL. Los Coliformes totales a 20 mL indicaron $4\,804 \pm 5\,165$ UFC/100 mL, a 50 ml, $2\,441 \pm 1\,683$ UFC/100 mL y a 100 ml, $1\,686 \pm 929$ UFC/100 mL.

La incidencia de *E. coli*, por ríos, a pesar de ser mayor en Aguas Blancas, con promedio de $1\,393 \pm 1\,8095$ UFC/100 mL, con relación a Chorrerita, $971 \pm 1\,073$ UFC/100 mL, no mostró diferencias significativas ($U = 1\,343$ $p = 0,474$). Sin embargo, los Coliformes totales con media de $3\,978 \pm 3\,703$ UFC/100 mL en Aguas Blancas y $2\,493 \pm 2\,864$ UFC/100 mL, en Chorrerita, presentó diferencia estadística ($U = 1\,005$ $p = 0,00004$) (Figura 4).

Figura 4.

Incidencia de Coliformes totales (log UFC/100 mL) en ambos ríos)



Existió correlación significativa entre *E. coli* y la temperatura del agua ($r_s = 0,4598$ $p = 0,0237$) y altamente significativa con los Coliformes totales ($r_s = 0,5605$ $p = 0,004$). Además, hubo correlación altamente significativa entre *E. coli* y Coliformes totales ($r_s = 0,8389$ $p < 0,0001$) (Tabla 1).

No existió correlación entre *E. coli* y la velocidad de la corriente, en Aguas Blancas la tendencia fue directamente proporcional (Figura 5A), sin embargo, en Chorrerita se reflejó una tendencia inversamente proporcional entre ambas variables a pesar de que el índice de correlación es positivo ($r_s = 0,0697$) (Figura 5B).

A pesar de que no existe correlación entre los Coliformes totales y la velocidad de la corriente y ($r_s = -0.0405$ $p = 0,7462$), se observa tendencia directamente proporcional entre estas variables en Aguas Blancas (Figura 5A, no así en Chorrerita (Figura 5B).

Figura 5.

Relación de la incidencia de *E. coli* y Coliformes y la velocidad de la corriente en m/s en: A. río Aguas Blancas y B. río Chorrerita

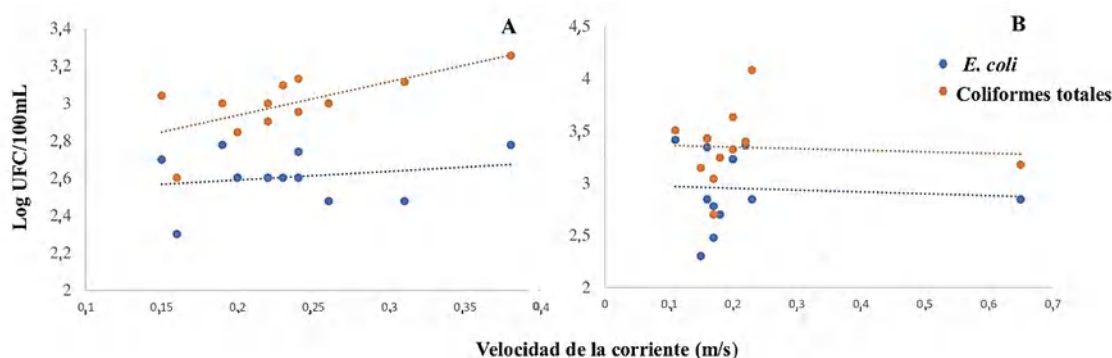


Tabla 1.

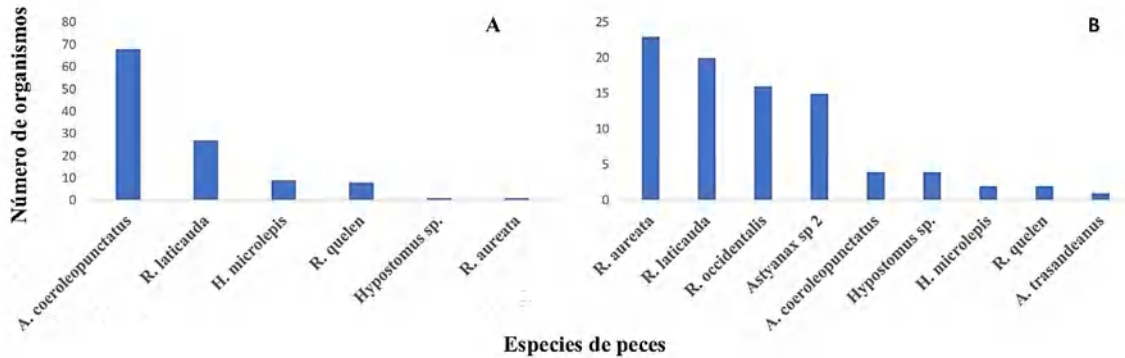
Matriz del coeficiente de correlación de Spearman y p-valor correspondiente, de las variables estudiadas.

	Temperatura	Sólidos Suspendidos	Velocidad de la corriente	<i>Escherichia coli</i>	Coliformes totales
Temperatura		-0,0641	0,2575	0,4598	0,5605
Sólidos Suspendidos		0,7662	0,2245	0,0237	0,0044
Velocidad de la corriente			-0,0783	0,2907	0,8389
<i>Escherichia coli</i>			0,7162	0,1681	0,1681
Coliformes totales				0,0697	-0,0405
				0,7462	0,8511
					0,8389
					< 0,0001

Se colectaron un total de 1 339 peces incluidos en 10 especies, de los cuales *Astyanax ruberrimus* fue la más abundante en los dos ríos y a lo largo del estudio, los cuales representaron el 84,99 % de la abundancia, seguido por *Andinoacara coeruleopunctatus* con 5,38 %. En el río Aguas Blancas se obtuvieron siete especies, mientras que en Chorreritas, 10. Las Figuras 6A y 6B muestran la estructura de la población de ambos ríos, una vez eliminada *Astyanax ruberrimus*, para disminuir el efecto de la dominancia de esta especie sobre las demás.

Figura 6.

Estructura de la población de peces de los ríos: A. Aguas Blancas, B. Chorrerita.



Se obtuvieron seis especies de interés para consumo humano de los moradores de la región, *Astyanax ruberrimus*, *Astyanax sp.*, *Rhamdia quelen*, *R. laticauda*, *Hoplias malabaricus*, *Andinoacara coeruleopunctatus* (Figura 7).

De acuerdo al resultado del análisis de correspondencia canónica de las variables físicas, química, microbiológicas y las especies de peces colectados en ambos ríos, la presencia de *Rhamdia sp2* se relacionó con la incidencia de Coliformes, mientras que *Hoplias microlepis* se vinculó con la abundancia de *E. coli* (Figura 8), principalmente en los sitios de colecta El Chorro y La Quebrada.

Figura 7.

Especies de interés alimenticio

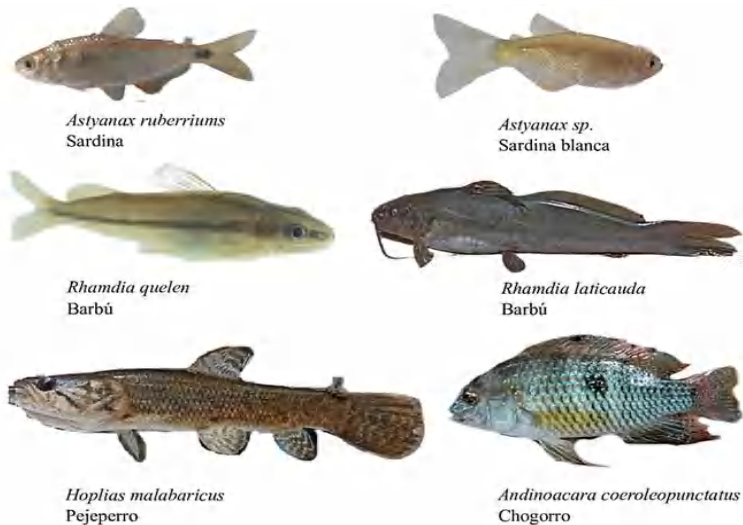
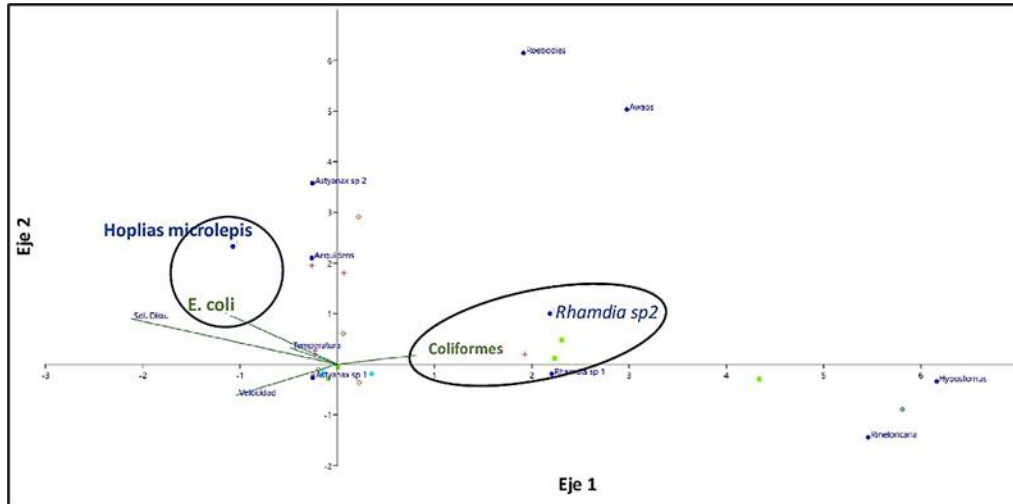


Figura 8.

Análisis de correspondencia canónica de los datos físicos, químicos y microbiológicos con respecto a las especies de peces colectados en los ríos Aguas Blancas y Chorrerita, octubre de 2022 a marzo 2023.



Por otro lado, de las 10 especies capturadas en el estudio, ocho pertenecen al grupo de peces primarios, principalmente los de la familia Characidae y dos especies secundarias: *Awaous transandeanus* y *Andinoacara coerulepunctatus*.

DISCUSIÓN

La temperatura del agua observada está incluida dentro del intervalo óptimo establecido para la biota acuática tropical (Sierra, 2011), además, los valores obtenidos se encuentran dentro de los ámbitos observados en el río Santa María, Veraguas, en el cual se registró variación entre 23 y 31 °C (Robles y Vega, 2014), valores dentro de lo esperado para este tipo de ecosistema en zonas tropicales; Hunt y Doering (2005) indican que el ámbito óptimo para el crecimiento de peces tropicales es entre 21 y 38 °C, mientras que Boyd (2018) indica que este fluctúa entre 26 y 32 °C aproximadamente. Por otro lado, cabe resaltar que la temperatura no influye directamente en la diversidad de peces, debido a la estabilidad térmica de la zona tropical aunado a la disponibilidad de alimento permanente (INECOL, s.f), por lo cual no se espera que esta variable interfiera en la presencia de los peces.

Los sólidos disueltos, describen la calidad de agua, ya que reflejan la concentración de elementos orgánicos e inorgánicos, entre otros, que contaminan los ríos (Pushpalatha et al., 2022) por lo que resultan ser buenos indicadores para evaluar las propiedades ambientales

del curso de agua. En el presente estudio los datos observados, de este parámetro, son inferiores al límite permisible por la norma COPANIT 35-2019, nivel a partir del cual, según Scannell y Jacobs (2001), se produce un efecto negativo sobre la reproducción íctica, en especial sobre la viabilidad larvaria aunado a una temperatura más elevada de la normal (Muller et al., 2017).

Sorensen et al. (1977) indican que concentraciones de sólidos disueltos superiores a 400 mg/L, de acuerdo a las características geológicas de las cuencas hidrológicas, se torna tóxico por la relación inversa con el oxígeno disuelto. Sin embargo, Weber-Scannell y Duffy (2007) mencionan que en el caso de trucha arcoíris, el valor letal asciende a 2 000 mg/L.

La velocidad de corriente en el río de Aguas Blancas fue moderada y directamente proporcional con la cantidad de familias y especies capturadas, contrario a Chorrerita, velocidad, que, según los criterios establecidos por Bussing (2002) y de acuerdo con Habit y Victoriano (2004) es una característica favorable para la presencia y migración de peces.

Pusey et al. (2020) destacan la importancia de la conectividad de los microecosistemas del río para la estructura poblacional de los peces, donde indican la repercusión de la velocidad de la corriente del ambiente lótico, la cual muestra una relación proporcional con la talla de los peces. Del Signore et al. (2016) mencionan que velocidades de 0,25 a 0,29 m/s afecta las etapas tempranas de los peces, sin embargo, en los adultos el valor crítico asciende 0,60 m/s o más, siempre y cuando las especies de peces no sean reófilas, Shiau et al. (2020) indican que la relación inversa entre velocidad de la corriente y la profundidad del río son condiciones que inciden sobre la resistencia al desplazamiento de los peces para el tránsito en el curso de agua.

El análisis microbiológico, mostró mayor incidencia de Coliformes totales y *E. coli* en el río Aguas Blancas, según Him et al. (2019) estos niveles elevados de bacterias pueden sugerir un tipo de contaminación no fecal, que puede provenir del suelo o materia orgánica. Uno de los motivos de la mayor incidencia bacteriana es la presencia de turistas y el mal manejo del agua en actividades domésticas. Los valores observados sobrepasan el valor permisible establecido por la norma COPANIT 35-2019. Por otro lado, no se evidencia la presencia de *Vibrio* en ninguna de las muestras, grupo bacteriano muy diverso y altamente adaptable (Martínez-Urtaza et al., 2010), asociado a aumentos de la temperatura y a la influencia de aportes salinos (Gavilán y Martínez-Urtaza, 2011).

Este estudio tiene semejanza con la investigación realizada por González (2017), quien describe que las altas concentraciones de Coliformes totales y *E. coli* afectan considerablemente a algunos organismos, como los peces y a su vez a las personas que lo consumen, por lo que la presencia de estos representa un problema de riesgo ambiental.

Berthe et al. (2008) señalan que la incidencia de bacterias fecales, en cuerpos de aguas dulce, está relacionada con procesos de deposición de sedimento; en la presente investigación se observó relación de los sólidos disueltos, como indicador de elementos erosionados en la cuenca y la incidencia de Coliformes y de *E. coli*.

La diversidad de peces de agua dulce de Panamá fue destacada por Loftin (1965) quien indica la presencia de 207 especies, por otro lado, ANAM (2004) establece 146 especies, mientras que Garcés y García (2023) indican 196, lo cual genera una incertidumbre para la riqueza íctica de nuestro país. En el presente estudio se identificaron un total de 10 especies, lo cual representa el 4 % para el registro de Loftin y 6 % para el de ANAM.

Entre las familias de peces encontradas en el estudio, los Characidae resultaron ser dominantes, esto coincide con lo mencionado por Meek y Hildebrand (1916), Loftin (1965), Miller (1966) y Vega et al. (2006) quienes en estudios de peces dulceacuícolas en Panamá describen que este es un grupo altamente diverso y abundante. Es importante destacar que esta familia es numerosa en nuestro país debido al origen suramericano (Bussing, 1998) y catalogados como peces primarios (Garcés y García, 2023) lo que indica que se establecen en el sur de Centroamérica desde su formación geológica al inicio del período terciario, denominado por Bussing (1985) elemento meridional antiguo, hecho que les ha permitido distribirse hasta el sur de los Estados Unidos.

El río Chorrerita, al poseer más zonas rocosas, presenta especies propias que se adhieren a sustratos como piedras, arena y ramas de árboles sumergidos, como lo indican Lasso-Alcalá y Lasso (2008), entre los cuales se mencionan *Rinelocaria aurata*, *Hypostomus sp*, *Awaous transandeanus*. En el caso de *Roeboides occidentalis*, que comparte este tipo de hábitat, se capturó entre acumulaciones de maderas en la estación El Chorro, lo que coincide, según lo descrito por Bravo (2018), quien reporta que esta especie habita naturalmente bajo basura flotante y palizadas.

Al examinar y contrastar las comunidades de especies en dos ríos diferentes, se puede identificar similitudes y diferencias en términos de especies, abundancia y adaptación específica (Welcomme, 1992). La comparación de los peces presentes en este estudio brinda información valiosa sobre la diversidad y las características ecológicas del ecosistema acuático.

Las especies consumidas por la población aledaña a los ríos estudiados coinciden con la importancia alimentaria o comercial en Colombia; en ese sentido Maldonado-Ocampo et al. (2012) citan a *Rhamdia quelen* como una especie utilizada para consumo humano en comunidades rivereñas en Tumaradó y Río Patía y la relevancia para la comercialización de las poblaciones cercanas a los ríos San Juan y Dagua. Se destaca el consumo ocasional de

Astyanax ruberrimus en estos dos últimos ríos y la trascendencia pesquera de *Hoplias malabaricus* en la cuenca media y baja del río Atrato y en la Ciénaga Grande de Lórica (Espítia-Hernández et al., 2020).

De las especies identificadas anteriormente, dos son importantes para el consumo humano, las cuales coinciden con las utilizadas por moradores de la provincia de Darién, Panamá: *Astyanax ruberrimus* y *Andinoacara coeruleopunctatus* (Garcés & García, 2023), sin embargo, en dicha zona, además, se consume *Roeboides occidentalis*, la cual no es aprovechada por las comunidades cercanas a los ríos Aguas Blancas y Chorrerita.

Guillen y Wrast (2010) indican que la incidencia de *E. coli* en peces de aguas cálidas guarda relación con la incidencia en el sedimento y el agua, sin embargo, no se observa relación con grupos tróficos o taxones específicos de peces y explican que esto se debe a que la tasa de alimentación de los peces puede verse reducida, además de la baja densidad de animales de pastoreo que aporten desechos al curso de agua. Las dos especies de peces que mostraron relación con las bacterias indicadoras fecales tiene hábito alimentario carnívoro, *Hoplias malabaricus* se alimenta principalmente de peces (Herrera-Chimá et al., 2020) y *Rhamdia quelen*, además de peces, incluyen crustáceos e insectos (Olaya-Nieto et al., 2012), por lo que la ingesta de bacterias se espera menor que si fuesen detritívoros o filtradores.

La baja diversidad encontrada y la alta incidencia de bacterias son el reflejo del intenso uso del curso de agua por los moradores de la zona de estudio, que producen alta perturbación en el ecosistema.

CONCLUSIONES

La baja riqueza de especies y la dominancia de *Astyanax* es el reflejo de la perturbación del ecosistema y el mal uso del recurso acuático. La diferencia en riqueza y abundancia de los peces en ambos ríos se debe a que las características de la estructura del fondo son diferentes en cada uno.

Los datos de los parámetros fisicoquímicos están dentro de lo reportado para ríos de zonas tropicales.

La incidencia de bacterias indicadoras fecales sobrepasa las normas COPANIT-2019, lo que representa una amenaza para la calidad del agua, los peces y las personas que los consumen. La diferencia de Coliformes totales en ambos ríos es el reflejo del mal uso de la microcuenca y los efectos de la erosión.

Las capturas realizadas durante el periodo de estudio resaltan especies de valor alimentario significativo en los ríos Aguas Blancas y Chorrerita.

AGRADECIMIENTOS

A los señores Enrique Aguilar, Adrián Aguilar y Moisés Pinzón por su apoyo durante el período de estudio y al Laboratorio de Microbiología del Centro Regional Universitario de Penonomé, Universidad de Panamá.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ANAM (2004). Informe del estado del ambiente GEO Panamá 2004. Novo Art S.A. 175p.
- Angulo, A.; Garita-Alvarado, C. A.; Bussing, W. A. & López, M. (2013). Annotated checklist of the freshwater fishes of continental and insular Costa Rica: additions and nomenclatural revisions. *Check List*, 9(5): 987–1019. <https://doi.org/10.15560/9.5.987>
- Angulo, A., Ramírez, A., & López, M. (2020). Claves de identificación para los peces de aguas continentales e insulares de Costa Rica. Parte I: Familias. *Revista de investigación UNED*, 13 (1), e3145. <https://doi.org/10.22458/urj.v13i1.3145>.
- Bermingham, E., Aswani, A., Castillo, A., & Gonzales, G. (2001). Peces de agua dulce de Panamá. Panamá. En Heckadon-Moreno, S. (ed.). *Puente biológico*. Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales, 33-38.
- Berthe, T., Touron, A., Leloup, J., Deloffre, J., & Petit, F. (2008). Faecal-indicator bacteria and sedimentary processes in estuarine mudflats (Seine, France). *Mar. Poll. Bull.*, 57: 59-67. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.10.013>
- Boyd, C.E. (2018). Water temperature in aquaculture. Responsible seafood advocate. Global Seafood Alliance. <https://www.globalseafood.org/advocate/water-temperature-in-aquaculture/>
- Bravo, G. (2018). Morfometría geométrica en peces de la colección CEMZ-EGA-PUCESE procedentes de la cuenca baja del río Santiago-Cayapas en los años 2012-2017. Universidad Católica del Ecuador.
- Bussing, W.A. (1985). Patterns of distribution of the Central American ichthyofauna. In Stehli, F.G. & Webb, S.D. (eds.) *The great American biotic interchange Volume 4*. Plenum Publishing Corporation.
- Bussing, W. A. (1998). *Peces de las aguas continentales de Costa Rica*. Segunda Edición. Editorial Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. 504 p.
- Bussing, W. A. (2002). *Peces de las aguas continentales de Costa Rica*. Freshwater fishes of Costa Rica. San José: Editorial de la Universidad de Costa Rica.

- Consorcio The Louis Berger Group, Inc. (TLBG), Universidad de Panamá (UP) y Smithsonian Tropical Research Institute (STRI), (2003). Informe final de la región occidental de la cuenca del canal, estudio de recopilación y presentación de datos ambientales y culturales en la región occidental de la cuenca del Canal de Panamá. Autoridad del Canal de Panamá. https://biota.wordpress.com/2008/04/13/peces-de-agua-dulce-en-la-cuenca-de-rio-indio-y-rio-cocle-del-norte/#_ftn1.
- Contreras-Mac-Beath, T., Ardón, D.A., Quintana, Y., Agulo, A., Lyons, T., Lardizabal, C., McMahan, C.D., Elías, D.J., Matamores, W.A., Barraza, J.E., González, R., Fuentes-Montejo, C.E., Ambruster, J.W., Carrasco, J.C. & Brito Rodríguez, M. 2022. Freshwater fishes of Central America: Distribution, assessment, and major threats. *Diversity*, 14, 793.
- Del Signore, A., Lenders, H.J.R., Hendriks, A.J., Vonk, J.A., Mulder, C. & Leuven, R.S.E.W. (2016). Size-mediated effects of water-flow velocity on riverine fish species. *River Res. Appic.*, 32, 309-398. <https://doi.org/10.1002/rra.2847>
- Espítia-Hernández, I.P., Valle-Díaz, Y.J., Vargas González, J., Hernández-Correa, J.J., Tordecilla-Petro, G., Martínez-gonzález, A.L., Olaya-Nieto, C.W. & Segura-Guevara, F.F. (2020). Ecología reproductiva del moncholo *Hoplias malabaricus* en la ciénaga grande de Lorica, Colombia. IX Congreso Colombiano de Acuicultura. Universidad de la Amazonia.
- Fernández, M.C., Álvarez, A. & Espigares, M. (2001). Transmisión fecohídrica y virus de la hepatitis A. *Higiene y Sanidad Ambiental*. 18: 8-18.
- Finkelstein, R., Edelstein, S. & Mahamid, G. (2002). Infecciones fulminantes de heridas por *Vibrio vulnificus*. *Isr. Medicina. Asoc. J.* 4:654-655.
- Gaceta Oficial (2019). Gaceta oficial digital N. 2886-B. Gobierno de la República de Panamá.
- Garces, H. & García, J. (2023). Distribución de los peces de agua dulce del Parque Nacional Darién y áreas de influencia. *Revista Científica Guacamaya* 8(1), 53-67. <https://doi.org/10.48204/j.guacamaya.v8n1.a4317>
- Gavilán, R.G. & Martínez-Urtaza, J.M. 2011. Factores ambientales vinculados con la aparición y dispersión de las epidemias de *Vibrio* en América del Sur. *Rev. Peru Med. Exp. Salud Pública*, 28(1), 109-115.
- González, R. (2017). Microbiota bacteriana en peces de consumo del río Ayuquila, Jalisco, México. [Tesis] Universidad de Guadalajara. 87 p.
- González-Díaz, R., Mercado-Silva, N., Reynaga-Delgado, E., & Martínez-Rivera, L. (2020). Microbiota bacteriana de peces silvestres de agua dulce utilizados para consumo en el oeste de México. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 36(1) 215-222, 2020 <https://doi.org/10.20937/RICA.2020.36.53432>

- Green Lab. (2017). Muestreo de agua para análisis microbiológico. 5 p.
- Guillen, G. & Wrast, J. (2010). Fishes as sources of *E. coli* bacteria in warm water streams. Environmental Institute of Houston, University of Houston Clear Lake. 81 p.
<https://www.uhcl.edu/environmental-institute/research/publications/documents/ramirez-et-al-2009-tcafs.pdf>
- Habit, E., & Victoriano, P. (2004). Peces de agua dulce de la cordillera de la costa. Historia, biodiversidad y ecología de la cordillera de la costa de Chile. Santiago: Editorial Universitaria, 392-406.
- Heckadon-Moreno, S. (1998). Naturalistas del Istmo de Panamá. Un siglo de historia natural sobre el puente biológico de las Américas. STRI-Fundación Santillana para Iberoamérica. Editorial Santillana, Panamá, 215 p.
- Herera-Chimá, L.M., Petro-Banquicet, J.D., Vargas-González, J., Hernández-Correa, J.J., Tordecilla-Petro, G., Segura-Guevara, F.F., Martínez-González, A.L. & Olaya-Nieto, C.W. 2020. Hábitos alimentarios del moncholo *Hoplias malabaricus* en la Ciénaga Grande de Lorica, Colombia. IX Congreso Colombiano de Acuicultura, Universidad de la Amazonia, Florencia, Caquetá, Colombia. Revista FAGROPEC 12(2), 370.
- Him J., Arena, E., & Bósquez, K. (2019). Calidad fisicoquímica y microbiología del agua del río Santa María en las inmediaciones del reservorio de agua del acueducto de Santiago, Veraguas. Tecnociencia, 21(2), 13–30.
- Hunt, M. J., & Doering, P. H. (2005). Significance of considering multiple environmental variables when using habitat as an indicator of estuarine condition. In Bortone, S.A (ed.). Estuarine Indicators. CRC Press: Boca Raton, FL. 211–227.
- INECOL, Instituto de ecología, A.C. (s.f.). ¿Por qué hay tantos peces en el agua?
<https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/2017-06-26-16-35-48/17-ciencia-hoy/2005-por-que-hay-tantos-peces-en-el-rio>
- Larrea-Murrell, J., Rojas-Badía, M., Romeu-Álvarez, B., Rojas-Hernández, N. & Heydrich-Pérez, M. (2013). Bacterias indicadoras de contaminación fecal en la evaluación de la calidad de las aguas: revisión de la literatura. Revista CENIC. Ciencias Biológicas, 44(3), 24-34.
- Lasso-Alcalá, O. & Lasso, C. (2008). Revisión taxonómica del género *Awaous* Valenciennes 1837 (Pisces: Perciformes, Gobiidae) en Venezuela, con notas sobre su distribución y habitat. Memoria de La Fundación La Salle, 117–140.
- Loftin, H. G. (1965). The geographical distribution of freshwater fishes in Panama. Ph. D. Diss., Florida State University Tallahassee, Florida.

- Maldonado-Ocampo, J., Ortega-Lara, A., Usma, J., Galvis, G., Villa-Navarro, F., Vásquez, L., Prada-Pedrerros, S. & Ardila, C. (2005). Peces de los Andes de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos «Alexander Von Humboldt». Bogotá. 346 p.
- Maldonado-Ocampo, J., Vari, P. & Usma, J. (2008). Biota colombiana. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos «Alexander Von Humboldt». Universidad Nacional de Colombia.
- Maldonado-Ocampo, J.A., Usma Oviedo, J.S., Villa-Navarro, F.A., Ortega-Lara, A., Prada-Pedrerros, S., Jiménez S., L.F., Jaramillo-Villa, U., Arango, A., Rivas, T.S. & Sánchez Garcés, G.C. 2012. Peces dulceacuícolas del Chocó biogeográfico de Colombia. WWF Colombia, Instituto de Investigaciones de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH), Universidad del Tolima, Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca (AU-NP), Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, 400 pp.
- Martínez-Urtaza, J., Bowers, J.C., Trinanes, J. & DePaola, A. 2010. Climate anomalies and the increasing risk of *Vibrio parahaemolyticus* and *Vibrio vulnificus* illnesses. Food Res. Int., 43, 1780-1790.
- Meek, S. & Hildebrand, S. (1916). The fishes of the freshwaters of Panama. Publ. Field. Mus. Nat. Hist. Zool. Ser. 10:217-374.
- Mendoza-Barrera, E. (2020). Peces de agua dulce, clasificación, diversidad e importancia. <https://animalesbiologia.com/peces/actualidad/peces-de-agua-dulce>
- MiAmbiente (2020). Dirección de Gestión Integrada de Cuencas Hidrográficas, Panamá. <https://cuencas.miambiente.gob.pa/wp-content/uploads/2020/08/Cuenca-Hidrografica-Rio-Grande-134.pdf>.
- Miller, R. R. (1966). Geographical distributions of Central America freshwater. Copeia, 4, 773-802.
- Muller, J.S., Grabowski, T.B., Brewer, S.K. & Worthington, T.A. (2017). Effects of temperature, total dissolved solids, and total suspended solids on survival and development rate of larval Arkansas river shiner. J. Fish Wild. Manag., 8(1), 79-88. <https://doi.org/10.3996/112015-JFWM-111>
- Olaya-Nieto, C.W., Pacheco-Orozco, L., & Ochoa-Arteaga, J. (2012). Ecología trófica del Liso (*Rhamdia quelen* Quoy & Gaimard, 1824) en el río Sinú, Colombia. Rev. MVZ, Córdoba, 17(3), 3217-3223.
- Pushpalatha, N., Sreeja, V., Karthik, R. & Saravanan, G. (2022). Total dissolved solids and their removal techniques. IJESP, 2(2), 13-30. <https://doi.org/10.35745/ijesp2022v02.02.0002>
- Pusey, B.J., Douglas, M., Olden, J.D., Jackson, S., Allsop, Q. & Kennard, M.J. (2020). Connectivity, habitat, and flow regime influence fish assemblage structure: Implications for environmental

- water management in a perennial river of the wet-dry tropics of northern Australian. *Aquatic Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.*, 30, 1397-1411. <https://doi.org/10.1002/aqc.3347>
- Quino, W., & Aguilera, C. (2016). Cultivo para identificación de *Vibrio parahaemolyticus*. MET-CNSP-083.
- Robles, Y. & Vega, A. (2004). Caracterización fisicoquímica y biológica de la parte media - baja del río Santa María, Veraguas, Panamá. *Tecnociencia*, 6(2): 75-89.
- Rock, CH. & Rivera, B. (2014). La calidad del agua, *E. coli* y su salud. The University of Arizona. College Of Agriculture and Life Sciences, 5 <https://extension.arizona.edu/sites/extension.arizona.edu/files/pubs/az1624s.pdf>
- Romero-Jarero, J. M. & Negrete-Redondo, M. P. (2011). Presencia de bacterias gram positivas en músculo de pescado con importancia comercial en la zona del Caribe mexicano. *Rev. Mex. Biodivers.* 82(2):599-606. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2011.2.465>
- Scannell, P.W. & Jacobs, L.L. (2001). Effects of total dissolved solids on aquatic organisms. A literature reviews. Technical Report N. 01-06. Alaska Department of Fish and Game Restoration.
- Shiau, J., Watson, J.R., Cramp, R.L., Gordos, M.A. & Franklin, C.E. (2020) Interactions between water depth, velocity, and body size on fish swimming performance: Implications for culvert hydrodynamics. *Ecol. Eng.*, 156: 105987. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105987>
- Sierra, C. A. (2011). Calidad del agua: Evaluación y diagnóstico. Universidad de Medellín, 457 p.
- Sorensen, D.L., M. McCarthy, E.J. Middlebrooks & D.B. Porcella, (1977). Suspended and dissolved solids effects on freshwater biota: A review. US Environmental Protection Agency, EPA-600/3-77- 042.
- Swistock, B. (2020). Bacterias Coliformes. Penn State Extension. <https://extension.psu.edu/bacterias-coliformes#:~:text=La%20presencia%20de%20coliformes%20en,y%20el%20suministro%20de%20agua>
- Vega, A.J., Robles, Y.A., Tuñón, O. & Barrera, C. (2006). Fauna acuática del área centro occidental de Panamá. *Tecnociencia*, 8(2), 87-100.
- Weber-Scannell, P.K. & Duffy, L.K. (2007). Effects of total dissolved solids on aquatic organisms: a review of literature and recommendation for salmonid species. *Am. J. Environ. Sci.*, 3(1), 1-6. <https://doi.org/10.3844/ajessp.2007.1.6>
- Welcomme, R. L. (1992). Pesca fluvial. FAO Documento técnico de pesca 262. M-12. ISBN 92-5-3D2299-X.



La resiliencia climática y mitigación para afrontar los efectos del cambio climático en los estudiantes de 10° grado del Instituto Profesional y Técnico Leonila Pinzón de Grimaldo, en Penonomé, Panamá

Climate resilience and mitigation to address the effects of climate change in 10th grade students of the Instituto Profesional y Técnico Leonila Pinzón de Grimaldo, in Penonome, Panama

Eyris Ibeth Bonilla Aguilar

Ministerio de Educación, Penonomé, Panamá.

eyris.bonilla@meduca.edu.pa

<https://orcid.org/0009-0006-6162-3721>

Fecha de recepción: 7 de octubre de 2024

Fecha de aceptación: 12 de noviembre de 2024

DOI [HTTPS://DOI.ORG/10.48204/J.TECNO.V27N1.A6640](https://doi.org/10.48204/J.TECNO.V27N1.A6640)

RESUMEN

La ciudad de Penonomé, en la provincia de Coclé, Panamá, ha experimentado de manera significativa los efectos del cambio climático en las últimas décadas.

Las consecuencias del cambio climático se manifiestan con un incremento de los desastres por causas naturales, inundaciones, marejadas que penetran en los poblados costeros, aumento del nivel del mar y movimiento de masa, con los consiguientes daños materiales, pérdidas humanas, agrícolas y pecuarias.

Un segmento de la población estudiantil del El I.P.T. Leonila Pinzón de Grimaldo está expuesto a un alto nivel de riesgo, ya que deben desplazarse desde sus residencias utilizando caminos rurales, muy expuestos a las tormentas tropicales, inundaciones y deslizamiento de tierra, propios del área durante la época lluviosa. Por tal motivo, hemos empleado la inducción para mejorar los niveles de resiliencia climática y de mitigación dirigido a sus estudiantes, como medida efectiva para reducir la posibilidad de afectación ante los desastres relacionados al cambio climático.

Se realizó un diseño que permitió reconocer el nivel resiliencia climática y mitigación para reducir el nivel de vulnerabilidad utilizando una metodología consistente en: un pretest con el fin de diagnosticar los conocimientos previos de los estudiantes sobre el cambio climático, su nivel de resiliencia climática y

mitigación. Seguido de una inducción para reducir los riesgos con medidas de seguridad en los distintos desastres climáticos de su entorno, utilizando imágenes y simuladores con el propósito de visualizar los efectos ambientales y sociales. Finalmente, se aplicó un post test, observándose una mejora en su conocimiento y adaptación al cambio climático.

PALABRAS CLAVES

Cambio climático, mitigación, Penonomé, resiliencia climática

ABSTRACT

The city of Penonomé, in the province of Coclé, Panama, has significantly experienced the effects of climate change in recent decades.

The consequences of climate change are manifested by an increase in natural disasters, floods, storm surges that penetrate coastal towns, rising sea levels and mass movement, with the resulting material damage and human, agricultural and livestock losses.

A segment of the student population of the Leonila Pinzón de Grimaldo IPT is exposed to a high level of risk since they must travel from their residences using rural roads, which are very exposed to tropical storms, floods and landslides, typical of the area during the rainy season. For this reason, we have used induction to improve the levels of climate resilience and mitigation aimed at its students, as an effective measure to reduce the possibility of being affected by disasters related to climate change.

A design was carried out to identify the level of climate resilience and mitigation to reduce the level of vulnerability using a methodology consisting of: a pre-test to diagnose the students' prior knowledge about climate change, and their level of climate resilience and mitigation. Followed by an induction to reduce risks with safety measures in the different climate disasters in their environment, using images and simulators to visualize the environmental and social effects. Finally, a post-test was applied, observing an improvement in their knowledge and adaptation to climate change.

KEYWORDS

Climate change, Climate Resilience, Mitigation, Natural disasters

INTRODUCCIÓN

- Evaluar la resiliencia climática y mitigación de la población estudiantil, en distintos desastres naturales generados por los efectos del cambio climáticos en su entorno.
- Proponer actividades de mitigación que se encuentre al alcance del entorno, para enfrentar los desastres naturales.

- Verificar si la resiliencia de la población en estudio, sobre los efectos del cambio climático, resultan diferentes, según lo que arrojen los resultados del test realizado.

El cambio climático está intensificando la frecuencia de eventos extremos como inundaciones y sequías en Panamá, afectando de manera desproporcionada a las comunidades rurales dependientes de la agricultura, ganadería y turismo alternativo. En la provincia de Coclé, los estudiantes, como los actores principales del crecimiento económico, tomadores de decisiones, desempeñan un papel crucial en la construcción de una sociedad más resiliente (OCHA, 2020).

Este estudio tiene como objetivo evaluar la percepción de los estudiantes de 10° grado del I.P.T. Leonila P. de Grimaldo, en Penonomé, sobre los impactos del cambio climático en su comunidad y su nivel de conocimiento sobre prácticas de mitigación y adaptación. Basándonos en el marco teórico de la percepción social del riesgo, buscamos comprender cómo los estudiantes interpretan la información sobre el cambio climático y cómo estos conocimientos influyen en sus actitudes y comportamientos (Villalpando & Corona, 2022).

Al identificar las brechas existentes en el conocimiento y la percepción de los estudiantes, este estudio contribuirá a diseñar programas educativos y de sensibilización más efectivos para fomentar la resiliencia climática en la región (López Martín & Martínez Cebolla, 2021). Los resultados de esta investigación también proporcionarán información valiosa para los tomadores de decisiones a nivel local y regional, quienes pueden utilizarla para desarrollar políticas y estrategias de adaptación más adecuadas a las necesidades de la comunidad (Mendoza Carretero & Muñoz, 2023).

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, utilizando un diseño pre-experimental con pretest y post-test. El estudio se llevó a cabo con estudiantes de 10° grado del Instituto Profesional y Técnico Leonila Pinzón de Grimaldo, en Penonomé, quienes enfrentan altos niveles de riesgo debido a la geografía y las condiciones climáticas de la región.

Fases del estudio

El proceso metodológico se dividió en tres fases:

1. Fase 1: Pretest

Se aplica una encuesta con respuestas cerradas para identificar los niveles de percepción de los estudiantes sobre la resiliencia en tema del cambio climático y sus estrategias de mitigación ante desastres naturales. La escala de Likert para

identificar su acuerdo, desacuerdo o no sé. A cada respuesta se dio un valor basado en el puntaje de 1, 2, 3 para la recolección de datos. El pretest permitió identificar debilidades en el conocimiento y la preparación de los estudiantes para afrontar los efectos del cambio climático.

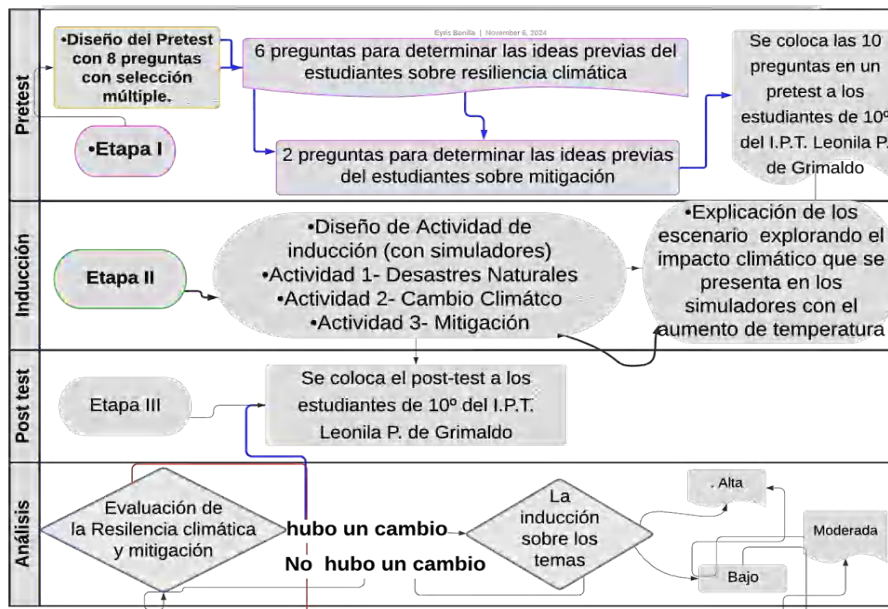
2. Fase 2: Inducción al cambio climático

Se diseñó actividades interactivas para que el estudiante indague sobre el cambio climático (Poveda et al., 2020), mediante el uso de recursos visuales (imágenes) y simulador (*En-ROADS Climate Scenario*, 2024) sobre fenómenos climáticos y crear escenarios con una política de mitigación donde se mantiene una temperatura de menor a 2° C. De modo de darle herramientas para reducir la vulnerabilidad (Bustos Melín, 2020). Esta segunda fase se implementa para fortalecer el aprendizaje de cambio climático y capacitar a los estudiantes, ante desastres climáticos.

3. Fase 3: Post-test

Tras la inducción, se aplicó un post-test para evaluar los conocimientos de resiliencia climática y mitigación de los estudiantes. Mediante la escala de Likert donde se identifica su acuerdo, desacuerdo o no sé. A cada respuesta se dio un valor basado en el puntaje de 1, 2, 3 para la recolección de datos. El post-test permitió contrastar los resultados para evaluar si se presenta un cambio con nuevo aprendizaje.

Figura 1:
Etapas del proceso metodológico



La encuesta utilizada con el pretest y post-test consta de preguntas cerradas y escalas de Likert, que permitieron medir la percepción de los estudiantes sobre el cambio climático y su nivel de resiliencia y mitigación. Los datos se procesaron en el software estadístico SPSS.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del estudio muestran que los estudiantes presentaron mejoras significativas en sus conocimientos sobre cambio climático y en su capacidad para desarrollar estrategias de mitigación (González Calderón, 2023). Tras la inducción, se observó un aumento en la resiliencia climática de los estudiantes, lo que sugiere la efectividad de la intervención educativa, la cual se presenta en la tabla 1 y 2.

Análisis Univariado

De los puntajes obtenidos, respecto a la resiliencia, las mayores frecuencias en el pretest se dieron en 2 (73.9%) y 3 (19.2%) puntos, en tanto, en el post-test fueron de 3 (35%) y 4 (48%) puntos y se observa a continuación en la tabla 1.

Resiliencia

De los puntajes obtenidos, respecto a la resiliencia, las mayores frecuencias en el pretest se dieron en 2 (73.9%) y 3 (19.2%) puntos, en tanto, en el post-test fueron de 3 (35%) y 4 (48%) puntos se detallan en la tabla 1.

Tabla 1

Distribución de los estudiantes según puntaje obtenido en la encuesta de Resiliencia en el pretest y post-test.

Puntaje	pretest		post-test	
	f	%	f	%
1	13	6.4	3	1.5
2	150	73.9	27	13.3
3	39	19.2	71	35.0
4	1	0.5	99	48.8
5	0	0.0	3	1.5
Total	203	100	203	100

Muestra la distribución de los estudiantes según el puntaje obtenido en resiliencia.

Mitigación

En cuanto a la Mitigación, los mayores puntajes del pretest se presentaron en 0 (41%) y 1 (58%) punto y, en el post-test 1 (34%) y 2 (63%) puntos (Tabla 2).

Tabla 2

Distribución de los estudiantes según puntaje obtenido en la encuesta de Mitigación en el pretest y post-test.

Puntaje	pre-test		post-test	
	f	%	f	%
0	83	41	7	3
1	117	58	69	34
2	3	1	127	63
Total	203	100	203	100

Muestra la distribución de los estudiantes según el puntaje obtenido en mitigación.

Análisis bivariado

Al comparar los niveles de resiliencia de los estudiantes según el pretest y post-test se encontraron diferencias, estadísticamente significativas ($X^2=9.670$, $p=0.014$). El nivel de resiliencia mejoró ya que, de los 163 estudiantes que clasificaron en un nivel bajo en el pretest, 130 clasificaron en un nivel moderado en el post.test se observa en la tabla 3.

Tabla 3

Prueba Chi-cuadrado de Pearson para los niveles de resiliencia de los estudiantes según el pretest y post-test. Se presenta los resultados del analice de la Prueba Chi-cuadrado de Pearson de los 203 estudiantes y su nivel de resiliencia.

Resiliencia pretest	Resiliencia post- test			Total	Chi-cuadrado de Pearson		
	Bajo	Moderado	Alto		Valor	df	Significación exacta (bilateral)
Bajo	30	130	3	163	9.670	2	0.014
Moderado	0	40	0	40			
Total	30	170	3	203			

Se encontraron diferencias, estadísticamente significativas ($X^2=46.179$, $p=0.000$), en los niveles de mitigación de los estudiantes en el pretest y post-test. De 83 estudiantes con un nivel bajo en el pretest, 49 pasaron a un nivel moderado y 29 a un nivel alto en el post-test. De 117 con un nivel moderado 95 pasaron a un nivel alto a continuación se observa en la tabla 4.

Tabla 4

Prueba Chi-cuadrado de Pearson para los niveles de Mitigación de los estudiantes según el pretest y post-test. Se presenta los resultados del analice de la Prueba Chi-cuadrado de Pearson de los 203 estudiantes sobre la mitigación.

Mitigación pretest	Mitigación post-test				Chi-cuadrado de Pearson		
	Bajo	Moderado	Alto	Total	Valor	df	Significación exacta (bilateral)
Bajo	5	49	29	83	46.179	4	0.000
Moderado	2	20	95	117			
Alto	0	0	3	3			
Total	7	69	127	203			

Figura 2

Distribución de los estudiantes según puntaje obtenido en la encuesta de Mitigación en el pretest y post-test de la encuesta de resiliencia.

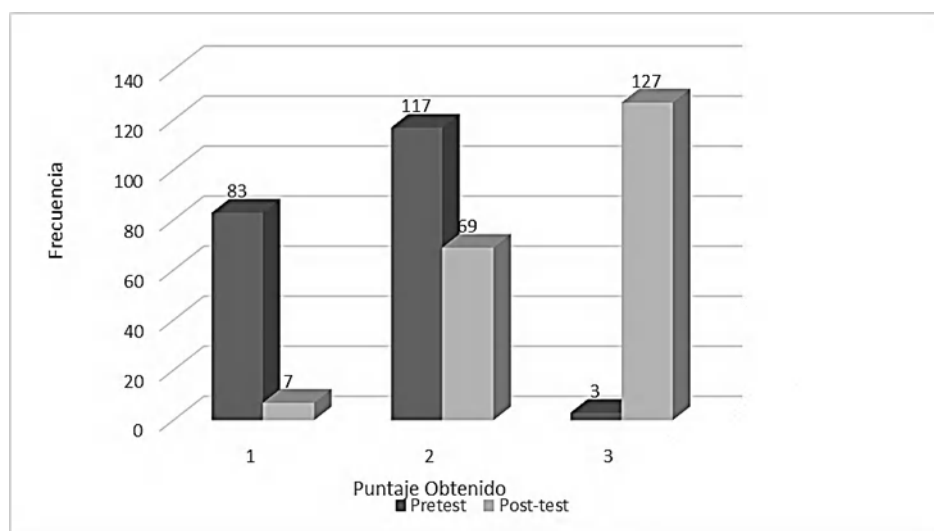
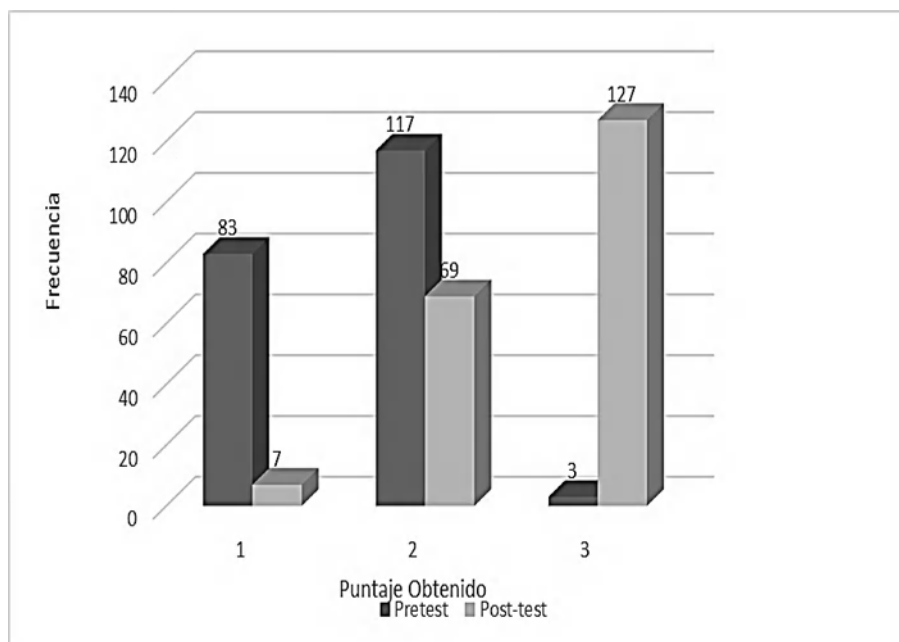


Figura 3

Distribución de los estudiantes según puntaje obtenido en la encuesta de Mitigación en el pretest y post-test.



CONCLUSIONES

La información obtenida y los posteriores análisis muestran que existe una relación entre los resultados del pre-test y post-test. Los estudiantes y docentes del Instituto Profesional y Tecnológico Leonila P. de Grimaldo muestran conocimiento del cambio climático. Aunque solo reconocen el reciclaje como la única acción para aminorar los efectos del cambio climático. Se comprueba la hipótesis previa de la relación entre estas variables.

- El análisis pretest muestra diferencias en el manejo de los conceptos, de la resiliencia climático y mitigación, pero hay que seguir sensibilizando a la población.
- Los estudiantes presentan el reciclaje como la única opción de mitigación para ayudar al cambio climático, por las jornadas de acción de reciclaje que se realizan en el Instituto Profesional Técnico Leonila P. de Grimaldo periódicamente.
- Se tendrán que seguir realizando jornadas de inducción sobre la disminución de riesgos con medidas de seguridad y acciones de mitigación para los estudiantes porque el aumento de los efectos del cambio climático es frecuente.

RECOMENDACIONES

El conocimiento sobre el cambio climático está ralentizado, debe ser asertivo en la sensibilización de adaptación climática y ampliar acciones de mitigación. La investigación en el futuro debe proyectarse en otras instituciones educativas de la región de Penonomé, en estudiantes de pre-media y media. Implementar más actividades como eje transversal, en educación sobre el cambio climático. Elevar el tema del cambio climático a una urgencia nacional, ya que todos los años se duplican los desastres naturales

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Bustos Melín, L. (2020). Diseño, implementación y análisis de una secuencia de enseñanza-aprendizaje acerca de cambio climático en el marco de la enseñanza para la comprensión para estudiantes de séptimo básico: Clima global, cambio sinigual. *Revista de Innovación En Enseñanza de Las Ciencias*, 3(2). <https://doi.org/10.5027/reinnec.v3.i2.64>
- González Calderón, M. J. (2023). Preparación del docente de la primera infancia para el enfrentamiento al cambio climático. *Diá-Logos*, 1(26). <https://doi.org/10.5377/dialogos.v1i26.16318>
- López Martín, F. G., & Martínez Cebolla, R. (2021). Nota sobre herramientas geográficas para la observación del Cambio Climático. *Geographicalia*, 73. https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.2021735301
- Masson-Delmotte, V., & Zhai, P. (2022). Tendencias regionales de los fenómenos extremos en el informe del IPCC de 2021. *Boletín de La OMM*, 71(1). www.ipcc.ch/AR6/WG1
- Mendoza Carretero, M. del R., & Muñoz, V. G. (2023). Experiencias didácticas en materia de sostenibilidad del profesorado de Educación Secundaria Obligatoria en la Comunidad de Madrid. *European Journal of Child Development, Education and Psychopathology*. <https://doi.org/10.32457/ejpad.v10i1.2078>
- Poveda, G., Amador, J., Ambrizzi, T., Bazo, J., Robelo-González, E., Rubiera, J., & Vicente-Serrano, S. M. (2020). Tormentas y huracanes. In *Adaptación frente a los riesgos del cambio climático en los países RIOCC – Informe RIOCCADAPT*.

- Villalpando, V. G., & Corona, G. B. M. (2022). Diálogo de saberes desde un enfoque constructorista acerca de las realidades campesinas complejas y sus estrategias de adaptación ante el cambio climático en la Sierra Nevada de Puebla. *Revista Campo-Territorio*, 17(45). <https://doi.org/10.14393/rct174506>
- Cambio Climático*. (2009). SICA. <https://www.sica.int/cambioclimatico/glosario.aspx>
- CATHALAC. (2024). *Monitoreo: Huracanes, tormentas, sismos, terremotos*. SERVIR. https://www.servir.net/servir_alertas/index-new.php
- CIIFEN. (2024). Centro Internacional Para La Investigación Del Fenómeno de El Niño. http://www.ciifen.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=99&Itemid=342&lang=es
- Climate analytics — climate impact explorer*. (2006). Climate Analytics. https://climate-impact-explorer.climateanalytics.org/impacts/?region=PAN&indicator=tasAdjust&scenario=h_cpol&subregion=PA.CC&warmingLevel=1.5&temporalAveraging=annual&spatialWeighting=area&compareYear=2030
- CPC. (2005). Climate Weather Linkage: El Niño Southern Oscillation. <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/enso.shtml#history>
- Data supplement to the Global Carbon Budget 2021*. (2021). ICOS. <https://www.icos-cp.eu/science-and-impact/global-carbon-budget/2021>
- Desastres Naturales en América Latina y el Caribe, 2000 - 2019*. (2020, March). OCHA. <https://www.unocha.org/publications/report/world/desastres-naturales-en-am-rica-latina-y-el-caribe-2000-2019>
- En-ROADS climate scenario*. (2024). En-ROADS. <https://en-roads.climateinteractive.org/scenario.html?v=24.10.0&lang=es>
- Grajales Saavedra, F., Ciniglio, S., Machado, V., & Vallarino, R. (2021). Análisis de aumento del nivel del mar en Isla Colón, Bocas del Toro. *Revista de Iniciación Científica*, 7(2), 39–49. <https://doi.org/10.33412/rev-ric.v7.2.3337>
- Gupta, A., K., Acharya P., & Gupta, A. (2024). *Climate Change: Extremes, Disasters and Call for Resilient Development in Disaster Risk and Management Under Climate Change (Disaster Resilience and Green Growth*. Springer; 1st ed.

- IPCC AR6-WGI atlas. (2024). Atlas Interactive Del IPCC WGI. <https://interactive-atlas.ipcc.ch/>
- Lima, R. M. (2020, November 10). Centroamérica y el Caribe: Huracanes devastadores del siglo. *Deutsche Welle*. <https://p.dw.com/p/3l4da>
- Nullis, C. (2021, August 31). *Los desastres de índole meteorológica han aumentado en los últimos 50 años y han causado más daños, pero menos muertes*. Organización Meteorológica Mundial. <https://wmo.int/es/news/media-centre/los-desastres-de-índole-meteorologica-han-aumentado-en-los-ultimos-50-anos-y-han-causado-mas-danos>
- Sea level rise and coastal flood risk maps -- a global screening tool by Climate Central*. (2021). Climate Central. https://coastal.climatecentral.org/map/10/-80.3065/8.4137/?theme=water_level&map_type=water_level_above_mhbw&basemap=roadmap&contiguous=true&elevation_model=best_available&refresh=true&water_level=1.0&water_unit=m
- United Nations (2022). *COP26*. United Nations. <https://www.un.org/es/climatechange/cop26>
- World Meteorological Organization (WMO). (2021, October 25). *El estado de los gases de efecto invernadero en la atmósfera basado en observaciones globales hasta 2020*. OMM; N° 17. <https://library.wmo.int/records/item/58705-no-17-25-october-2021>
- x.com*. (2023). X (Formerly Twitter). <https://twitter.com/NOAANCEI/status/1482019999762071560>
- x.com*. (2024). X (Formerly Twitter). <https://twitter.com/ScottDuncanWX/status/1481673880989282311?s=20&t=bYtyi3i0HvCzi0LOeIFOaQ>



Determinación del polimorfismo *pro12ala* en el receptor activado por proliferadores de peroxisomas gamma-2 en pacientes que padecen diabetes mellitus tipo 2

Determination of the *pro12ala* polymorphism in peroxisome proliferator-activated receptor gamma-2 in patients with type 2 diabetes mellitus.

Evelyn Visuete

Universidad de Panamá, Panamá.

evelyn.visuete@up.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0005-0388-9145>

Tomás A. Diez

Universidad de Panamá, Facultad de Medicina, Departamento de Bioquímica, Panamá.

tomas.diez@up.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0003-9846-0952>

Edgardo Castro

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales Exactas y Tecnología, Departamento de Genética y Biología Molecular, Panamá.

hdnacastro@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-4884-9479>

Magaly de Chial

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales Exactas y Tecnología, Departamento de Genética y Biología Molecular, Panamá.

magaly.dechial@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0002-6393-9299>

Ana E. Tejada

Universidad de Panamá, Facultad de Medicina, Departamento de Bioquímica, Panamá.

anatejadapa19@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0001-2599-8378>

Carlos W. Ramos D.

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales Exactas y Tecnología, Departamento de Genética y Biología Molecular, Panamá.

laito52@yahoo.com

<https://orcid.org/0000-0003-2344-9241>

Fecha de recepción: 7 de octubre de 2024

Fecha de aceptación: 12 de noviembre de 2024

RESUMEN

La diabetes mellitus es un grupo de trastornos metabólicos comunes que comparten el fenotipo de hiperglucemia. El polimorfismo Pro12Ala en el exón B del gen que codifica para PPAR γ 2 ha sido asociado en algunas poblaciones con diabetes tipo 2. El objetivo de este estudio fue determinar si existe asociación del polimorfismo Pro12Ala de PPAR γ 2 y la diabetes mellitus tipo 2 en una muestra de la población panameña. Se evaluó la posible asociación del polimorfismo Pro12Ala en una muestra de 195 individuos (99 controles y 96 experimentales) de la población panameña. El polimorfismo Pro12Ala se detectó mediante análisis de reacción en cadena de la polimerasa y polimorfismo de longitud de fragmentos de restricción (PCR-RFLP). Se observó una mayor frecuencia del genotipo Pro12Ala en el grupo experimental (DM2) con respecto al grupo control (0.114 vs 0.010). La frecuencia del alelo Ala12 (alelo de menor frecuencia) en nuestro estudio fue de 2.8%. Este trabajo representa el primer estudio sobre asociación entre diabetes mellitus tipo 2 y el polimorfismo Pro12Ala (rs18012829) en una muestra de casos y controles. La razón de momios (OR) evidenció asociación con un riesgo relativo de 1.9735 en aquellos con genotipo Pro12Ala. La frecuencia del genotipo Pro12Ala fue mayor en mujeres lo cual sugiere que éstas pueden estar más predisuestas a desarrollar esta condición.

PALABRAS CLAVES

PPAR γ 2, polimorfismo, diabetes mellitus, población panameña

ABSTRACT

Diabetes mellitus is a group of common metabolic disorders that share the phenotype of hyperglycemia. The Pro12Ala polymorphism in exon B of the gene that codes for PPAR γ 2 has been associated, in some populations, with type 2 diabetes. The objective of this study was to determine if there is an association between the Pro12Ala polymorphism of PPAR γ 2 and type 2 diabetes mellitus in a sample of the Panamanian population. The possible association of the Pro12Ala polymorphism was evaluated in a sample of 195 individuals (99 controls and 96 experimental). The Pro12Ala polymorphism was detected by polymerase chain reaction and restriction fragment length polymorphism (PCR-RFLP) analysis. A higher frequency of the Pro12Ala genotype was observed in the experimental group (DM2) compared to the control group (0.114 vs 0.010). The frequency of the Ala12 allele (lowest frequency allele) in our study was 2.8%. This work represents the first study on the association between type 2 diabetes mellitus and the Pro12Ala polymorphism (rs18012829) in a sample of cases and controls in Panama. The odds ratio (OR) showed an association with a relative risk of 1.9735 in those with the Pro12Ala genotype. The frequency of the Pro12Ala genotype was higher in women, suggesting that they may be more predisposed to developing this condition.

KEYWORDS

PPAR γ 2, polymorphism, diabetes mellitus, panamanian population

INTRODUCCIÓN

La diabetes mellitus es un grupo de trastornos metabólicos comunes que comparten el fenotipo de hiperglucemia. Existen varios tipos de diabetes mellitus y son causados por una

interacción compleja de factores genéticos y ambientales. Los factores que contribuyen a la hiperglucemia incluyen la reducción de la secreción de insulina, la disminución de la utilización de glucosa y el aumento o la producción de glucosa (Janani & Ranjitha, 2014). La ausencia o poca producción de insulina se correlaciona con la presencia de pocos transportadores de glucosa (GLUTs) en la membrana y por ende una reducción en el transporte de glucosa hacia el interior de la célula (AsocMexDiabetes, 2021).

Los dos tipos principales de diabetes mellitus son el tipo 1 y el tipo 2. La diabetes mellitus tipo 1 se caracteriza principalmente por ser autoinmune, ya que el propio sistema inmunológico ataca y destruye las células beta que se encuentran en el páncreas, que son las encargadas de producir la insulina y, por lo tanto, se produce poca o ninguna insulina. Además, suele desarrollarse en la infancia o durante la adolescencia, pero puede presentarse a cualquier edad (Lucier & Weinstock, 2023).

La diabetes mellitus tipo 2 (DM2) es la más común y representa la mayoría de los casos, generalmente, suele aparecer en personas mayores de 40 años, aunque podría presentarse en diferentes rangos de edades. Se caracteriza por niveles elevados de glucosa en sangre, provocado por la resistencia a la insulina. Las células no responden normalmente a la insulina y, por lo tanto, el cuerpo necesita cada vez más insulina para que la glucosa ingrese a las células y pueda ser utilizada como fuente de energía. Esto causa que la glucosa se acumule en la sangre, generando niveles de glucosa mayores de 125 mg/dl (Westman, 2021).

Los Receptores Activados por Proliferadores de Peroxisomas son factores de transcripción activados por ligandos. Existen tres isoformas en las que se incluye el Receptor Activado por Proliferadores de Peroxisomas Gamma-2 (PPAR γ 2) (Zárate et al, 2006). Las variaciones o polimorfismos de un nucleótido (SNPs) son responsables de más del 80 por ciento de la variación entre individuos (Sarhangi et al. 2020). Estas variaciones en uno o más genes, conjuntamente con variaciones en el ambiente y el estilo de vida, han sido asociadas en diversas poblaciones a la susceptibilidad a ciertas enfermedades (Kirk et al. 2002).

Existen polimorfismos de un nucleótido (SNPs) en el gen que codifica para PPAR γ 2 que han sido asociados con el riesgo de padecer de DM2 (Sarhangi et al. 2020) o con un efecto protector hacia el desarrollo de la enfermedad (Hara et al., 2000). El polimorfismo Pro12Ala en el exón B del gen que codifica para PPAR γ 2 (rs1801282) ha sido asociado en algunas poblaciones con el riesgo o susceptibilidad de padecer de diabetes mellitus tipo 2, mientras que en otras ha sido asociado con un efecto protector o incluso no se ha evidenciado asociación con la enfermedad.

Según el Ministerio de Salud de Panamá, el 14% de la población panameña padece DM2, lo que representa una alta incidencia. Además, de acuerdo con la OMS, alrededor de 450 mil personas en Panamá se encuentran en prediabetes, por lo que es importante evaluar si el polimorfismo Pro12Ala en nuestra población está asociado a DM2 y si constituye un factor protector o de riesgo de la enfermedad.

En esta investigación se evaluó la posible asociación del polimorfismo Pro12Ala en una muestra de 195 individuos (99 controles y 96 experimentales) de la población panameña. No existen estudios previos de asociación de este polimorfismo con DM2 en nuestra población y, por lo tanto, nuestro trabajo generará información básica sobre asociación o no de esta variante con una de las condiciones de mayor morbimortalidad en nuestro país.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio

La investigación se realizó en el Laboratorio de Genética y Biología Molecular, ubicado dentro de la Universidad de Panamá, Campus Central Octavio Méndez Pereira (8°59'09" N, 79°31'57" W).

Grupos de estudio

Noventa y seis (96) individuos con diabetes mellitus tipo 2, mayores de 40 años, previamente diagnosticados conformaron el grupo experimental y noventa y nueve (99) individuos sanos, también mayores de 40 años, conformaron el grupo control. Se registraron, cuando fue posible, datos básicos como nombre, apellido, sexo, edad, medidas de altura, peso e índice de masa corporal (IMC). En ningún momento estos datos fueron compartidos o comprometidos con personas que no estaban involucradas en la investigación. La participación en el estudio fue voluntaria con consentimiento informado por parte de los participantes, principalmente personal docente y administrativo de la Universidad de Panamá.

Obtención de la muestra de sangre

Las muestras de sangre fueron extraídas por personal técnico (técnicos de laboratorio y tecnólogos médicos). La mayoría de las muestras fueron colectadas en la Universidad de Panamá (Oficina de Salud Ocupacional, Campus Harmodio Arias Madrid y Laboratorio de Biología Molecular); el resto de las muestras fueron obtenidas en el sitio de residencia de los voluntarios. El estudio fue aprobado por el comité de bioética de la Universidad de Panamá. Para la obtención de la muestra de sangre, se seleccionó el dedo medio, al cual se le aplicó presión desde la falange media hacia la distal, con el propósito de concentrar la sangre en esta región. Manteniendo la presión, se procedió a limpiar la región con alcohol al 70% y,

posteriormente, se realizó una punción con una lanceta estéril. La sangre fue colectada en una tarjeta FTA la cual fue identificada con el código correspondiente (C control y E

experimental-padece DM2) seguido del número que identifica la muestra. Una vez colectada la muestra, se presionó el dedo con algodón impregnado en alcohol 70% hasta detener el sangrado. Las muestras obtenidas fueron almacenadas a 4° C para su posterior utilización en la extracción de ADN.

Extracción de ADN

Se recortaron de la tarjeta FTA pequeños pedazos de aproximadamente 0.5 mm, conteniendo sangre. Los pedazos fueron colocados en un tubo Eppendorf de 1.5 ml conteniendo 200 microlitros de buffer de extracción (TL Buffer de Omega BIO-TEK) e incubados durante 1 hora a 55 °C. Una vez lograda la lisis de los glóbulos blancos, la extracción del ADN se realizó de acuerdo con el procedimiento descrito en el manual E.Z.N.A. Tissue DNA Kit (Omega BIO-TEK). El ADN extraído fue almacenado a -20°C para luego ser utilizado en la reacción de amplificación.

Determinación de la concentración y calidad del ADN

La concentración de ADN fue determinada mediante espectrofotometría utilizando el Espectrofotómetro de micromuestra Nanodrop™ 2000 de ThermoScientific, el cual posee un rango de espectral (190-840nm) para medir diferentes tipos de muestra. La concentración de ADN se determinó mediante la lectura de la absorbancia a 260 nm y la calidad mediante el cociente de las lecturas a 260 y 280 nm.

Reacción en Cadena de la Polimerasa (PCR)

La reacción de amplificación se realizó en un volumen final de 30 µL conteniendo 2 µL (~6.0 ng) de ADN, 12.5 µL de Mastermix 2X (abm MegaFi™ Pro Fidelity), 1 µL de cada primer (10 µM) y 11 µL de agua libre de nucleasas. Las condiciones de amplificación fueron de 94°C durante 8 minutos, seguido de 35 ciclos a 94°C por 50 segundos, 59°C por 50 segundos, 72°C por 1 minuto y una extensión final de 5 min a 72°C. Se utilizó un termociclador T100 Thermal Cycler de BIO-RAD.

Los cebadores utilizados en la PCR fueron 5'-GCCAATTCAAGCCCAGTC-3' y 5'-GATATGTTTGCAGACAGTGTATCAGTGAAGGAATCGCTTTCCG-3' (Priya et al. 2016). Estos cebadores amplifican una región de 270 bp del exón B del gen PPAR γ 2.

Electroforesis del producto de PCR

Con la finalidad de determinar la efectividad de la amplificación, se realizó una electroforesis en gel de agarosa al 1% en TAE IX. Para tal propósito, se cargaron 5 µL de la reacción de amplificación y la electroforesis se realizó a 60 voltios durante 1 hora. En el primer carril se

cargaron los marcadores de peso molecular 100 bp (Bioline) para verificar la generación de un producto de amplificación correspondiente al tamaño esperado (270 bp).

Digestión del producto de PCR

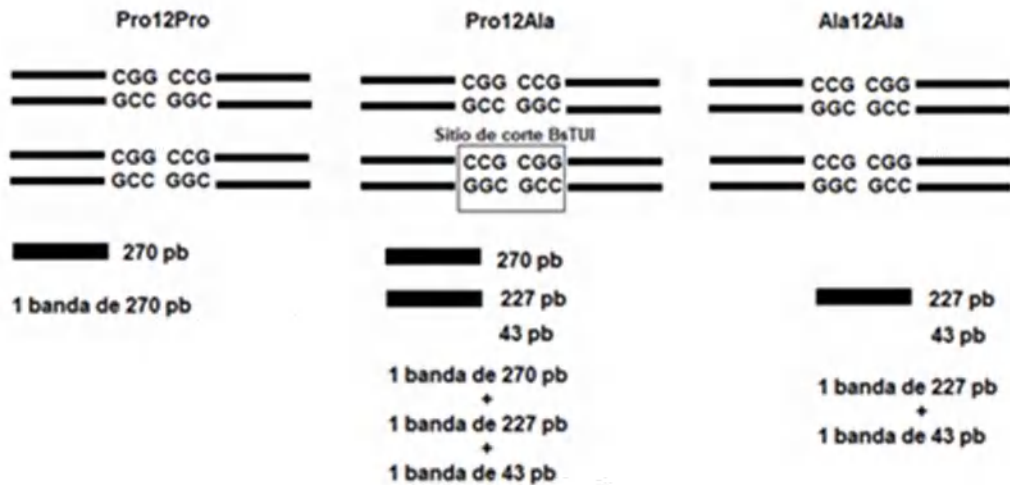
Una vez verificada la amplificación de la región esperada, se procedió a digerir 10 μL (~30 ng) del producto de amplificación con la enzima de restricción BstU1 (New England Biolabs). La digestión se realizó a 60° C durante 3 horas. La reacción de digestión se llevó a cabo en un volumen final de 25 μL y 0.5 μL de la enzima (5 U/ μL).

Determinación del genotipo

El patrón de digestión generado a partir de cada muestra indica el genotipo presente en cada individuo. Debido a que el polimorfismo Pro12Ala resulta del cambio de un nucleótido (C→G) que genera un sitio de restricción que reconoce la enzima BstU1; los individuos que poseen un alelo Ala (heterocigotos) generarán un patrón de restricción de dos bandas: una banda de 270 bp correspondiente al alelo Prolina que no posee un sitio de digestión para la enzima BstU1 y otra banda de 227 bp correspondiente al alelo Alanina, el cual es digerido por la enzima generando dos bandas, una de 227 bp y otra de 43 bp; esta última no se observa en el gel. De esta manera, los individuos heterocigotos (Pro/Ala) presentan una banda de 270 y otra de 227 bp, mientras que los individuos homocigotos Pro/Pro presentan un patrón de una sola banda de 270 bp. El genotipo homocigoto Ala12Ala estaría presentando una banda de 227 bp ya que, como se mencionó con anterioridad, la banda de 43 pb no se observa en la electroforesis.

Figura 1.

Productos de la digestión, sitios de restricción.



Electroforesis de los productos de digestión

El patrón de digestión fue evidenciado mediante electroforesis en gel de agarosa al 3% en TAE IX conteniendo 2 μ L de GelRed (Biotium). Diez microlitros (10 μ L) del producto de digestión de cada muestra fueron cargados en el gel. En cada gel se cargaron, además, 0.5 μ L de marcador de peso molecular 100 bp Ladder (Bioland). La electroforesis se realizó a 45 voltios durante 2 horas. El patrón de digestión fue visualizado en un fotodocumentador UV Gel Doc EZ BioRad.

Frecuencias Genotípicas y Alélicas

Las frecuencias genotípicas y alélicas fueron calculadas tanto en la muestra total como en cada grupo (control y experimental). La frecuencia de cada genotipo fue calculada utilizando la siguiente relación:

$f(\text{ProPro}) = \text{cantidad de individuos con genotipo ProPro} / \text{Total de individuos}$

$f(\text{Pro12Ala}) = \text{cantidad de individuos con genotipo Pro12Ala} / \text{Total de individuos}$

$f(\text{AlaAla}) = \text{cantidad de individuos con genotipo AlaAla} / \text{Total de individuos}$

La frecuencia de cada alelo fue calculada utilizando la siguiente relación:

$$f(\text{Pro}) = \frac{2(\text{cantidad individuos con genotipo ProPro} + \text{cantidad de individuos Pro12Ala})}{2(\text{total de individuos})}$$

$$f(\text{Ala}) = \frac{2(\text{cantidad individuos con genotipo AlaAla} + \text{cantidad de individuos Pro12Ala})}{2(\text{total de individuos})}$$

Equilibrio de Hardy-Weinberg (HWE)

Una vez determinadas las frecuencias alélicas y genotípicas totales, se procedió a determinar si las mismas se encontraban en equilibrio de Hardy-Weinberg, en donde las frecuencias genotípicas esperadas están dadas por la siguiente ecuación:

$$p^2 + 2pq + q^2 = 1$$

El HWE también fue determinado en cada grupo por separado (casos y experimentales). Se utilizó el calculador en línea (wpcalc.com/en/equilibrium-hardy-weinberg/) para determinar si las frecuencias observadas se ajustaban o no al HWE.

Determinación de asociación entre el polimorfismo Pro12 Ala y DM2

La asociación del genotipo Pro12Ala fue evaluada mediante una prueba de chi cuadrado (χ^2). Para comprobar la asociación entre el genotipo Pro/Ala y DM2, se realizó una prueba de Razón de Momios (odds ratio) para determinar el grado de asociación entre estas variables.

Razón de Momios

La razón de momios fue calculada utilizando el programa Epi Info 7.2. (<https://www.cdc.gov/epiinfo/index.html>).

RESULTADOS

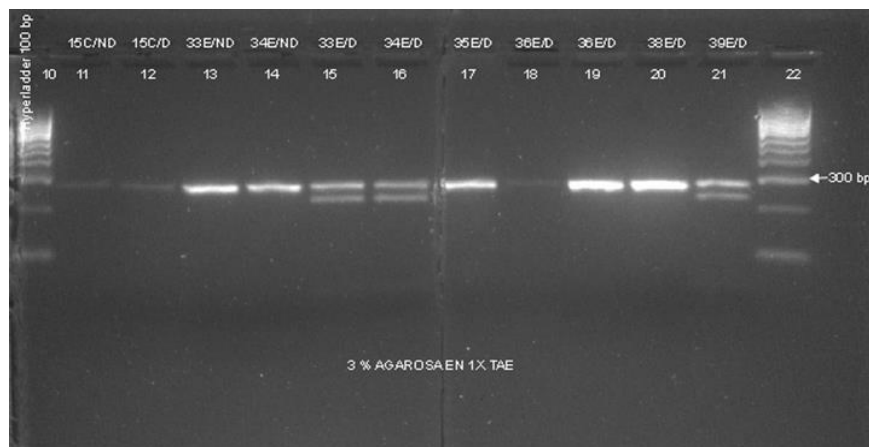
Se analizaron 195 muestras de las cuales 96 corresponden a pacientes con diagnóstico certero de DM2 (experimentales) y 99 individuos sanos (controles).

El genotipo presente en cada individuo se obtuvo mediante PCR-RFLP, observando el tamaño de las bandas generadas después de cortar los fragmentos amplificados con la enzima BstUI. En la figura 2 se observan los genotipos identificados en la muestra control 15C y las experimentales 33E, 34E, 35E, 36E, 38E y 39E. En los carriles 11 y 12 se observan los productos de PCR de la muestra 15C sin digerir y digerida, respectivamente, correspondientes a un individuo de género femenino con genotipo Pro/Pro.

Los carriles 13, 14 15 y 16 corresponden a las muestras 33 y 34 no digeridas y digeridas las cuales corresponden a individuos con genotipo Pro/Ala. Los carriles 17 18 19 y 20 corresponden a las muestras digeridas 35, 36 y 38 con genotipo Pro/Pro. El carril 21 representa el genotipo Pro/Ala de la muestra 39 luego de la digestión.

Figura 2.

Detección del polimorfismo Pro12Ala mediante PCR. Carril 10 y 22 muestran los marcadores de peso molecular. Los carriles 11, 12, 13, 14, 17, 18, 19, 20 muestran el genotipo Pro12Pro (un solo fragmento de 270 pb). Los carriles 15, 16 y 21 muestran el genotipo Pro12Ala con los dos fragmentos de 270 pb y 227 pb que resultan del sitio de restricción adicional en estos individuos. El fragmento de 43 pb no se observa.



El genotipo homocigoto (Ala/Ala) no se observó en los individuos en estudio, ya que ninguna de las muestras digeridas presentó una banda única de 227 pb.

Las frecuencias alélicas y genotípicas de ambas poblaciones (experimental y control) se muestran en la tabla 1. Se observa la ausencia de individuos con genotipo (Ala/Ala) dentro de nuestra muestra.

El alelo Pro se presentó con una frecuencia total de 0.969, mientras que la frecuencia total del alelo Ala fue de 0.030. La frecuencia del alelo Pro en individuos que no padecen DM2 (controles) fue de 0.995, mientras que en individuos con DM2 fue de 0.943. La frecuencia del alelo Ala fue mayor en individuos con DM2 que en aquellos que no padecen la condición. El genotipo con mayor frecuencia fue Pro/Pro en la muestra total y en ambos grupos (control y experimental). Por otro lado, los heterocigotos Pro/Ala se observaron con mayor frecuencia en individuos con DM2 que en individuos sanos.

Tabla 1.

Frecuencias alélicas y genotípicas. N, cantidad de individuos; Cont., controles; Exp., experimentales; f, frecuencia.

N (195)	f(Pro)	f(Ala)	f(ProPro)	f(Pro12Ala)	f(AlaAla)
----------------	---------------	---------------	------------------	--------------------	------------------

Cont.	99	0.995	0.005	0.989	0.011	0
Exp.	96	0.943	0.057	0.885	0.114	0
Total	195	0.969	0.030	0.938	0.061	0

Tabla 2.

Distribución de los individuos por género según su genotipo. F (femenino), M (masculino) y SD (sin determinar).

	Controles			Experimentales		
	Pro/Pro	Pro/Ala	Ala/Ala	Pro/Pro	Pro/Ala	Ala/Ala
Sexo						
F	51	1	0	42	6	0
M	42	0	0	43	3	0
SD	5	0	0	0	2	0
Total	98	1	0	85	11	0

En ambos grupos (control y experimental) el genotipo Pro12Ala fue observado mayormente en mujeres (Tabla 2). En las muestras experimentales, de los 11 individuos heterocigotos, 6 corresponden al género femenino, 3 al masculino y en los 2 heterocigotos restantes no se registró la información del género.

Razón de momios (odds ratio)

La RM fue de 12.6824 con un Riesgo Relativo (RR) estimado de 1.9735 (Tabla 3). En nuestro estudio, el Riesgo Relativo de desarrollar DM2 es mayor en individuos heterocigotos Pro/Ala comparado con aquellos que no poseen este genotipo. Un valor RM mayor de 1 indica que el genotipo Pro12Ala se comporta como un factor de riesgo.

Tabla 3.

Análisis mediante Epi info 7.2

Parámetros basados en posibilidad			
	Estimado	Inferior	Superior
Odds Ratio	12.6824	1.6041	100.2708
MLE Odds Ratio	12.5599	2.0797	278.0071

Fisher Exact	1.7599	551.3208	
Parámetros basados en riesgo			
	Estimado	Inferior	Superior
Riesgo relativo	1.9735	1.5667	2.4861
Diferencia de riesgo	45.2186	27.9918	62.4454
Pruebas estadísticas			
	Chi cuadrado	2-tailed p	
No corregido	9.2129	0.00240438	

DISCUSIÓN

La variación de un sólo nucleótido en el exón B del gen que codifica para PPAR γ 2 (Pro12Ala) ha sido estudiada en varias poblaciones como una variante genética asociada a DM2. El alelo Ala12 ha sido asociado a reducción del riesgo o protección de padecer diabetes mellitus tipo 2 (Altshuler et al. 2000; Hara et al. 2000; Frederiksen et al. 2002; Evans et al. 2001; Memisoglu, et al. 2003; Andrulionyté et al. 2004; Doney, et al. 2004; Pinteróvá et al. 2004; Moon et al. 2005; Jaziri, et al. 2006; Soriguer, et al. 2006; Meshkani et al. 2007). Por el contrario, en otras poblaciones, la presencia de este alelo ha sido asociada con predisposición o riesgo de desarrollar DM2 (Evans et al. 2001; Kilpelainen et al. 2008; Florez et al. 2007; Gouda et al. 2010; Ghoussaini et al.2005; Zeggini et al. 2005; Chistiakov et al. 2010; Vergotine et al. 2014; Majid et al. 2017). En otros estudios no se observó asociación entre este alelo y la diabetes mellitus tipo 2 (Mancini et al 1999; Bouassida et al. 2005; Badii et al. 2008; Malecki et al. 2003; Moffett et al. 2005).

Independientemente de los resultados contradictorios en cuanto a asociación o no de Ala12 con DM2, el alelo de menor frecuencia (poco común) el que codifica para alanina en la posición 12 (Ala12), en todas las poblaciones estudiadas. La frecuencia de este alelo varía entre 2% a 23% en diferentes grupos étnicos (Stumvoll & Haring, 2002). En individuos sanos, la frecuencia de este alelo es de 1.7 a 21.6%; en caucásicos varía entre 5.9% y 21.6% y en individuos de ascendencia asiática entre 1.7% y 9.3% (Gouda et al., 2010).

En nuestro estudio, la frecuencia del alelo Ala12 fue de 2.8%, frecuencia que se ubica en el rango de los valores de las frecuencias reportadas para este alelo a nivel mundial. No obstante, la frecuencia fue mucho menor que la observada en niños mexicanos (Stryjecki et al. 2015), Amerindios (Cañizales-Quintero et al. 2007) y niños españoles (Vales-Villamarín et al. 2021). La frecuencia del alelo Ala12 observada en nuestro estudio se aproxima más al 2.1 % observada en negros americanos (fornage et al. 2005) y al 2.2 % reportada en algunas poblaciones asiáticas (Namvaran et al. 2010).

Las frecuencias genotípicas en la muestra total, como también en ambos grupos control y el experimental, se encuentran en equilibrio de Hardy-Weinberg. Las frecuencias genotípicas en la muestra total fueron 93.8 %, 6.1% y 0 % para los genotipos Pro12Pro, Pro12Ala y Ala12Ala, respectivamente. La ausencia de homocigotos Ala12Ala ha sido reportada en otros estudios (Namvaran et al. 2010; Stryjecki et al. 2015). Frecuencias genotípicas de 97.4 % (Pro/Pro), 2.5% (Pro/Ala) y 0 % (Ala/Ala) un tanto similares a las nuestras fueron observadas en un estudio con 540 nativos de la isla de Java (Danawati et al. 2005).

Las frecuencias genotípicas por grupo fueron significativamente diferentes, como muestra el valor de chi cuadrado. Así, una mayor frecuencia del genotipo Pro12Ala se observó en el grupo experimental (DM2) con respecto al grupo control (0.114 vs 0.010). Interesantemente, la frecuencia de este genotipo en mujeres con DM2 fue mayor que en hombres con esta condición. Resultados similares se reportaron en nativos americanos de la etnia Oji-Cree (Hegele et al. 2000).

En nuestro trabajo, el polimorfismo Pro12Ala muestra asociación con DM2 como un factor de riesgo, como ha sido reportado en varias investigaciones y contrario a otros en los que se asocia como un factor protector. En cuanto a la asociación o no como factor protector o de riesgo, las diferencias pueden ser atribuidas al hecho que la DM2 es una enfermedad multifactorial en la cual intervienen tanto componentes genéticos como ambientales (Christiansen et al. 2023). La mezcla racial es un factor genético que juega un papel importante ya que se ha demostrado que el riesgo de padecer diabetes mellitus tipo 2 varía entre grupos raciales o étnicos (Weiss et al. 1984). Se ha demostrado que los Indios Americanos poseen una de las tasas más altas de diabetes en el mundo (West 1978; Bennett 1983).

Estudios de prevalencia de diabetes mellitus tipo 2 en poblaciones producto de la mezcla entre indios y caucásicos, como por ejemplo las poblaciones de hispanos del suroeste de Estados Unidos, muestran una prevalencia intermedia a la observada en indios y caucásicos (Gardner et al. 1984; Iyengar et al 1991).

La obesidad, el aumento en el consumo de calorías y grasas, la reducción en el consumo de carbohidratos complejos y la poca actividad física son factores ambientales asociados a un incremento en la incidencia y prevalencia de diabetes mellitus tipo 2 (Hamman, 1992; Torun et al., 2002; Klimentidis et al., 2009). A pesar de que se ha cuestionado el rol de los factores ambientales, debido a la carencia de este tipo específico de estudio, es importante mencionar que, en investigaciones en Hawainos que migraron a Japón (Kawate et al., 1979;) y en Yemenies que migraron a Israel (Cohen et al., 1961), se observó un incremento de esta patología en los migrantes con relación a individuos del mismo acervo genético que no migraron, lo cual indica que el medio es un factor que se relaciona con el desarrollo de la condición. Esta interacción entre genes y genes y ambiente podría explicar la inconsistencia en los resultados de estudios de asociación genética con la DM2. Estudios de análisis de interacción logística de parejas de SNPs evidenciaron que la presencia de ciertas parejas de SNPs se asocian significativamente como factor de riesgo de padecer DM2 a pesar de que, individualmente, no mostraron asociación (Irgam et al. 2021). La interacción entre el estilo de vida (dieta, actividad física) y las variantes genéticas relacionadas con DM2 deben ser estudiadas en cada grupo étnico (Hur et al. 2022).

Un aspecto adicional a considerar son las modificaciones epigenéticas en la patogénesis de DM2 (Ahmed et al. 2020). Estudios realizados hace algunas décadas han demostrado la relación entre epigenética y diabetes mellitus tipo 2. Se han identificado alteraciones en el patrón de metilación del ADN en los islotes pancreáticos, tejido adiposo, músculo esquelético e hígado en individuos con DM2. De hecho, factores no genéticos asociados al riesgo de padecer de DM2, como la obesidad, la dieta, inactividad física, envejecimiento y entorno intrauterino, han sido asociados con modificaciones epigenéticas (Ling et al. 2022).

En nuestro país, la mezcla racial responde a un modelo trihíbrido complejo con contribuciones de africanos, europeos y amerindios (Castro et al. 2016). Esta compleja mezcla racial podría aportar componentes genéticos característicos que, aunados a los factores ambientales propios de nuestra sociedad y estilo de vida, respondan de manera muy particular al desarrollo o no de la DM2. Por lo tanto, algunos componentes genéticos presentes en nuestra población podrían no considerarse como factores de riesgo frente a ciertos factores ambientales o estilos de vida o bien ser considerados factores de riesgo, dependiendo del género.

En resumen, este es el primer estudio sobre el polimorfismo Pro12Ala en el gen PPAR γ 2 en la población panameña, encontrando una posible asociación de riesgo de entre este polimorfismo y la DM2.

CONCLUSIONES

Este trabajo representa el primer estudio sobre asociación entre diabetes mellitus tipo 2 y el polimorfismo Pro12Ala (rs18012829) en una muestra de casos y controles de la población panameña. La razón de momios (OR) evidenció asociación con un riesgo relativo de 1.9735 en aquellos con genotipo Pro12Ala. La frecuencia del genotipo Pro12Ala fue mayor en mujeres lo cual sugiere que éstas pueden estar más predispuestas a desarrollar esta condición. Los resultados observados en este trabajo no necesariamente son aplicables a otras poblaciones ya que el acervo genético de la población panameña, el estilo de vida y las condiciones medio ambientales son muy particulares en nuestra población.

Consideramos necesario realizar estudios de asociación de genoma completo (GWAS) en los cuales se consideren varios marcadores de manera simultánea y se correlacionen estos con patrones epigenéticos y estilos de vida mediante un análisis de metadatos en una muestra mayor de la población panameña considerando un diseño de casos y controles.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo de la oficina de Salud ocupacional de la Universidad de Panamá por coordinar la logística para la toma de las muestras de los colaboradores de la institución que participaron en este estudio y a todos los voluntarios que no laboran en la institución. A los estudiantes de Tecnología Médica de la Facultad de Medicina por permitirnos obtener el resto de las muestras utilizadas en este estudio. Agradecemos al personal técnico del Laboratorio de Genética y Biología Molecular por el tiempo y orientación proporcionada.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Ahmed, S. A. H., Ansari, S. A., Mensah-Brown, E. P. K. & Emerald, B. S. (2020). Clinical Epigenetics. 12:104 <https://doi.org/10.1186/s13148-020-00896-4>
- Altshuler, D., Hirschhorn, J., Klannemark, M. et al. (2000). The common PPAR γ Pro12Ala polymorphism is associated with decreased risk of type 2 diabetes. *Nat Genet* 26, 76–80. <https://doi.org/10.1038/79216>
- Andrulionytė, L., Zacharova, J., Chiasson, J. et al. (2004). Common polymorphisms of the PPAR- γ 2 (Pro12Ala) and PGC-1 α (Gly482Ser) genes are associated with the conversion from impaired glucose tolerance to type 2 diabetes in the STOP-NIDDM trial. *Diabetologia*, 47(12), 2176–2184. <https://doi.org/10.1007/s00125-004-1577-2>

- AsocMexDiabetes. (2021, 30 junio). TRANSPORTADORES DE GLUCOSA (GLUTS). Asociación Mexicana. <https://www.amdiabetes.org/post/transportadores-de-glucosa-gluts>
- Badii, R., Bener, A., Zirie, M. et al. (2008). Lack of association between the Pro12ALA polymorphism of the PPAR- Γ 2 gene and Type 2 diabetes mellitus in the Qatari consanguineous population. *Acta Diabetologica*, 45(1), 15-21. <https://doi.org/10.1007/s00592-007-0013-8>
- Bouassida, K., Chouchane, L., Jellouli, K. et al. (2005). The peroxisome proliferator activated receptor gamma2 (PPARgamma2) Pro12Ala variant: lack of association with type 2 diabetes in obese and non obese Tunisian patients. *Diabetes Metab*; 31(2):119-23. doi: 10.1016/s1262-3636(07)70177-5.
- Cañizales-Quinteros, Aguilar-Salinas, C., Ortiz-López, M G. et al. (2007). Association of PPARG2 Pro12Ala variant with larger body mass index in Mestizo and Amerindian populations of Mexico. *Hum Biol*. 79(1):111-9. doi: 10.1353/hub.2007.0022.
- Castro, E., Trejos, D., Hrbek, T. et al. (2016). Genetic Ancestry of the Panamanian Population: Polymorphic Structure, Chibchan Amerindian Genes; and Biological Perspectives on Diseases. *The Internet Journal of Biological Anthropology*. Volume 9 Number 1. Doi: 10.5580/IJBA.44045
- Chistiakov, D. A., Potapov, V. A., Nosikov, V. V. et al. (2010) The PPARgamma Pro12Ala variant is associated with insulin sensitivity in Russian normoglycaemic and type 2 diabetic subjects. *Diab. Vasc. Dis. Res.* 7, 56–62. <https://doi.org/10.1177/1479164109347689>
- Christiansen, C., Arathimos, R., Pain, O. et al. (2023). Stratified genome-wide association analysis of type2 diabetes reveals subgroups with genetic and environmental heterogeneity. *Human Molecular Genetics* 32 (16): 2638-2645.
- Cohen, A. M., Bavly, S. & Poznanski, R. (1961). Change of diet of Yemenite Jews in relation to diabetes and ischemic heart disease. *Lancet* 21399-1401.
- Danawati, C. W., Nagata, M., Moriyama, H. et al. (2005). A possible association of Pro12ALA polymorphism in peroxisome proliferator-activated receptor Γ 2 gene with obesity in native Javanese in Indonesia. *Diabetes/Metabolism Research and Reviews*, 21(5), 465-469. <https://doi.org/10.1002/dmrr.543>

Doney, A., Fischer, B., Cecil, J. et al. (2004). Association of the Pro12Ala and C1431T variants of PPARG and their haplotypes with susceptibility to Type 2 diabetes. *Diabetologia* 47, 555–558.

EpI InfoTM | CDC. (s. f.). <https://www.cdc.gov/epiinfo/index.html>

Evans, D. et al. (2001). Association between the P12A and c1431t polymorphisms in the peroxisome proliferator activated receptor gamma (PPAR gamma) gene and type 2 diabetes. *Exp. Clin. Endocrinol. Diabetes* 109, 151–154, 10.1055/s-2001-14838.

Florez, J. et al. (2007). Diabetes Prevention Program Research Group. Effects of the type 2 diabetes-associated PPARG P12A polymorphism on progression to diabetes and response to troglitazone. *J Clin Endocrinol Metab.* 2007 Apr;92(4):1502-9. doi: 10.1210/jc.2006-2275.

Fornage, M. et al. (2005). Inverse effects of the PPARc2 Pro12Ala polymorphism on measures of adiposity over 15 years in African Americans and whites The CARDIA study. *Metabolism Clinical and Experimental*, 54, 910 – 917

Frederiksen, L. et al. (2002). Comentario: estudios del polimorfismo Pro12Ala del gen PPAR-gamma en la cohorte danesa MONICA: la homocigosidad del alelo Ala confiere un menor riesgo de síndrome de resistencia a la insulina. *J Clin Endocrinol Metab.* 87: 3989–3992.

Gardner, L. I. et al. (1984). Prevalence of diabetes in Mexican Americans: relationship to percent of gene pool derived from Native American genetic admixture. *Diabetes* 33:36-92.

Ghoussaini, M. et al. (2005). Implication of the Pro12Ala polymorphism of the PPAR-gamma 2 gene in type 2 diabetes and obesity in the French population. *BMC Med Genet.* 22;6:11.doi:10.1186/1471-2350-6-11.

Gouda, H. et al. (2010). The Association Between the Peroxisome Proliferator-Activated Receptor-g2 (PPARG2) Pro12Ala Gene Variant and Type 2 Diabetes Mellitus: A HuGE Review and Meta-Analysis. *Am. J. Epidemiol* 171:645-655. doi: 10.1093/aje/kwp450

Hara, K. et al. (2000). The Pro12Ala polymorphism in PPAR gamma2 may confer resistance to type 2 diabetes. *Biochem Biophys Res Commun.* 29;271(1):212-6 doi: 10.1006/bbrc.2000.2605.

- Hamman, R. (1992). Genetics and environmental determinants of Non-Insulin Dependent Diabetes Mellitus (NIDDM). *Diabetes/Metabolism Reviews*, Vol. 8, No. 4, 287-338
- Hegele, R. A. et al. (2000). Peroxisome Proliferator-Activated Receptor- γ P12A and Type 2 diabetes in Canadian Oji-Cree. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 85(5), 2014-2019. <https://doi.org/10.1210/jcem.85.5.6610>
- Hur, H. et al. (2022). Association of Polygenic Variants with Type 2 Diabetes Risk and Their Interaction with Lifestyles in Asians. *Nutrients*, 14, 3222. <https://doi.org/10.3390/nu14153222>
- Irgam, K. et al. (2021). The genetic susceptibility profile of type 2 diabetes and reflection of its possible role related to reproductive dysfunctions in the southern Indian population of Hyderabad. *BMC Medical Genomics*. 14:272
- Iyengar, S. et al. (1991). Amerindian admixture among the Anglo and Hispanic ethnic groups in the San Luis Valley, Colorado. *Am J Phys Anthropol Suppl*. 12:97-98.
- Janani, C., & Ranjitha Kumari, B. (2014). PPAR gamma gene – A review. *Diab Met Syndr: Clin Res Rev*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsx.2014.09.015>
- Jaziri, R. et al. (2006). The *PPARG* Pro12Ala polymorphism is associated with a decreased risk of developing hyperglycemia over 6 years and combines with the effect of the APM1 G-11391A single nucleotide polymorphism: the Data From an Epidemiological Study on the Insulin Resistance Syndrome (DESIR) study. *Diabetes* 55 1157–1162
- Kawate, R. et al. (1979) Diabetes mellitus and its vascular complications in Japanese migrants and on the island of Hawaii. *Diabetes Care* 2:161-170.
- Kilpelainen, T. et al. (2008). SNPs in *PPARG* associate with type 2 diabetes and interact with physical activity. *Med Sci Sports Exerc.* 40(1):25-33. doi: 10.1249/mss.0b013e318159d1cd.
- Kirk, B. et al. (2002). Single Nucleotide Polymorphism seeking long term association with complex disease. *Nucleic Acid Research*. Vol 30 No 15 3295-3311
- Klimentidis, Y., Miller, G., & Shriver, M. (2009). The Relationship Between European Genetic Admixture and Body Composition Among Hispanics and Native Americans. *Am. J. Hum. Biol.* 21:377–382.

- Ling, C., Bacos, K. & Rönn, T. (2022). Epigenetics of type 2 diabetes mellitus and weight change — a tool for precision medicine?. *Nat Rev Endocrinol* 18, 433–448. <https://doi.org/10.1038/s41574-022-00671-w>
- Lucier, J., Weinstock RS. Type 1 Diabetes. (2023) Mar 3. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2024 Jan–. PMID: 29939535.
- Majid, M. et al. (2017) Association of Pro12Ala polymorphism of peroxisome proliferator-activated receptor gamma 2 (PPARgamma2) gene with type 2 diabetes mellitus in ethnic Kashmiri population. *Biochem Genet.* 55, 10–21, <https://doi.org/10.1007/s10528-016-9765-6>
- Malecki, M. et al. (2003). The Pro12Ala polymorphism of PPARgamma2 gene and susceptibility to type 2 diabetes mellitus in a Polish population. *Diabetes Res Clin Pract* 62(2):105-11. doi: 10.1016/s0168-8227(03)00164-5.
- Mancini, F. et al. (1999). Pro12Ala substitution in the peroxisome proliferator-activated receptor-gamma2 is not associated with type 2 diabetes. *Diabetes*;48(7):1466-8. doi: 10.2337/diabetes.48.7.1466.
- Memisoglu, A. et al. (2003). Interaction between a peroxisome proliferator-activated receptor gamma gene polymorphism and dietary fat intake in relation to body mass. *Hum Mol Genet.* 12(22):2923-9. doi: 10.1093/hmg/ddg318. Epub 2003 Sep 23. PMID: 14506127.
- Meshkani, R. et al. (2007). Pro12Ala polymorphism of the peroxisome proliferator-activated receptor-gamma2 (PPARgamma-2) gene is associated with greater insulin sensitivity and decreased risk of type 2 diabetes in an Iranian population. *Clin Chem Lab Med.* 45(4):477-82. doi: 10.1515/CCLM.2007.095.
- Moffett, S. et al. (2005). The C161 → T polymorphism in peroxisome proliferator-activated receptor gamma, but not P12A, is associated with insulin resistance in Hispanic and non-Hispanic white women: evidence for another functional variant in peroxisome proliferator-activated receptor gamma. *Metabolism* 54:1552–1556
- Moon, M. et al. (2005). Genetic polymorphisms in peroxisome proliferator-activated receptor gamma are associated with Type 2 diabetes mellitus and obesity in the Korean population. *Diabet. Med.* 22, 1161–1166, doi:10.1111/j.1464-5491.2005.01599.x

- Namvaran, F., Rahimi-Moghaddam, P. & Azarpira, N. (2010). Genotyping of peroxisome proliferator-activated receptor gamma (PPAR- γ) polymorphism (Pro12Ala) in Iranian population. *JRMS*; 16(3): 291-296
- Organización Mundial de la Salud, Informe Mundial sobre la Diabetes, noviembre de 2021.
- Pintérová, D. et al. (2004). The frequency of alleles of the Pro12Ala polymorphism in PPAR γ 2 is different between healthy controls and patients with type 2 diabetes. *Folia Biologica (Praha)*, 50: 153-156.
- Poulsen, P. et al. (2003). Impact of two common polymorphisms in the PPAR γ gene on glucose tolerance and plasma insulin profiles in monozygotic and dizygotic twins: thrifty genotype, thrifty phenotype, or both? *Diabetes*. 52(1):194–198.
- Priya S.S. et al. (2016). Genotype Phenotype Correlation of Genetic Polymorphism of PPAR Gamma Gene and Therapeutic Response to Pioglitazone in Type 2 Diabetes Mellitus- A Pilot Study. *Journal of Clinical and Diagnostic Research*. Vol-10(2): FC11-FC14
- Sarhangi, N. et al. (2020). PPAR γ (Pro12Ala) genetic variant and risk of T2DM: a systematic review and meta-analysis. *Sci Rep* 10, 12764. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69363-7>
- Soriguer, F. et al. (2006). Pro12Ala polymorphism of the PPAR γ 2 gene is associated with type 2 diabetes mellitus and peripheral insulin sensitivity in a population with a high intake of oleic acid. *J Nutr*. 136(9):2325-30. doi: 10.1093/jn/136.9.2325.
- Stryjecki, C. et al. (2015). Association between PPAR- γ 2 Pro12Ala genotype and insulin resistance is modified by circulating lipids in Mexican children. *Scientific Reports* | 6:24472 DOI: 10.1038/srep24472
- Stumvoll, M. & Haring, H., (2002). The peroxisome proliferator-activated receptorgamma2 Pro12Ala polymorphism. *Diabetes*. 51(8):2341-7. doi: 10.2337/diabetes.51.8.2341.
- Torun, B. et al. (2002). Rural-tourban migration and cardiovascular disease risk factors in young Guatemalan adults. *International Journal of Epidemiology*. 31: 218-226
- Vales-Villamarín, C. et al. (2021). PPAR γ 2 Pro12Ala Polymorphism is Associated in Children With Traits Related to Susceptibility to Type 2 Diabetes. *Front. Pharmacol*. 12:763853. doi: 10.3389/fphar.2021.763853

- Vergotine, Z. et al. (2014). Proliferator-activated receptor gamma Pro12Ala interacts with the insulin receptor substrate 1 Gly972Arg and increase the risk of insulin resistance and diabetes in the mixed ancestry population from South Africa. *BMC Genet.* 15, 10, <https://doi.org/10.1186/1471-2156-15-10>
- Weiss, K., Ferrell, R., & Hanis, C. (1984). A New World syndrome of metabolic disease with a genetic and evolutionary basis. *Yearbook Phys Anthropol* 27:153-178.
- West, K. (1978). *Epidemiology of Diabetes and its Vascular Lesions*. Elsevier Biomedical Press, New York.
- Westman E. (2021). Type 2 Diabetes Mellitus: A Pathophysiologic Perspective. *Front Nutr.* 10;8:707371. doi: 10.3389/fnut.707371.
- Zárate, A., Saucedo, R., & Hernández, M. (2005) El receptor de peroxisoma-proliferador-activado gamma (PPAR γ) es un factor de transcripción multigénico de versatilidad metabólica. *Acta Med.* 3(1):53-54.
- Zeggini, E. et al. (2005). Examining the relationships between the Pro12Ala variant in PPARG and Type 2 diabetes-related traits in UK samples. *Diabet Med.* 22(12):1696-700. doi: 10.1111/j.1464-5491.2005.01717. x.



Un paseo aleatorio en la bolsa de valores de Panamá

A random walk in the Panamanian stock market

Leonel Antonio Castillo Poveda

Georgia Institute of Technology, Online Master of Science in Analytics

lcastillo@up.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0005-1007-792X>

Fecha de recepción: 25 de abril de 2024

Fecha de aceptación: 13 de noviembre de 2024

DOI [HTTPS://DOI.ORG/10.48204/J.TECNO.V27N1.A6642](https://doi.org/10.48204/J.TECNO.V27N1.A6642)

RESUMEN

Los mercados de valores han sido objeto de estudio intenso por matemáticos, estadísticos y economistas desde el siglo XX, en gran parte motivados por el posible beneficio que pudiese obtenerse de descifrar los patrones que presentan. Una de las teorías principales que prevalecen hoy en día, y la primera en ser planteada matemáticamente, indica que los retornos del mercado son completamente aleatorios y de volatilidad finita. Además de tener evidencia empírica, esta idea es popular por facilitar tareas importantes como la construcción de portafolios y la gestión de riesgos. En este artículo se pone a prueba esta teoría con el mercado de valores panameño, el cual nunca ha sido incluido en estudios previos de esta idea. Los resultados indican que el mercado panameño es indistinguible de un paseo aleatorio en ciertas temporalidades, pero en el muy corto plazo presenta el fenómeno de reversión a la media.

PALABRAS CLAVES

Panamá, paseo aleatorio, tasa de varianza, reversión a la media

ABSTRACT

Stock markets have been the object of intense study by mathematicians, statisticians, and economists since the twentieth century, in large part motivated by the benefits one would obtain from deciphering their patterns. One of the main prevalent theories today, and the first to ever be proposed in mathematical language, asserts that market returns are completely random and with finite volatility. On top of having plenty of empirical evidence, these ideas are also popular for simplifying important tasks such as portfolio construction and risk management. This paper puts this theory to the test using the Panamanian stock market, which has never been included in

previous studies of these concepts. The results show that the Panamanian stock market is indistinguishable from a random walk for certain holding periods, but in the very short term presents evidence of mean reversion.

KEYWORDS

Mean reversion, Panama, random walk, variance ratio

INTRODUCCIÓN

El matemático Louis Bachelier propuso por primera vez una teoría probabilística del mercado de valores en su tesis doctoral. Bachelier (1900) plantea un modelo matemático en el cual los precios en el mercado tienen igual probabilidad de subir o bajar en todo momento y tal que la expectativa de cualquier movimiento es nula. Su trabajo hoy es reconocido como un caso particular de la hipótesis del paseo aleatorio popularizada posteriormente por Malkiel (2007). Esta hipótesis afirma que, para todo propósito práctico, la única manera de honestamente modelar los precios futuros de una acción utilizando precios pasados es mediante el paseo aleatorio:

$$\Delta A_t = A_t (\mu \Delta t + \sigma \sqrt{\Delta t} W_t)$$

donde A_t representa el precio de la acción en el periodo t , μ representa la tendencia promedio, σ representa la volatilidad de la acción y W es una variable aleatoria de media cero y varianza unitaria. Se fija $\Delta t = 1$ y se divide entre el precio actual para obtener la ecuación simplificada

$$\frac{A_{t+1}}{A_t} = 1 + \mu + \sigma W_t .$$

Se define $r_t = \ln \left(\frac{A_{t+1}}{A_t} \right)$ motivado por la propiedad $A_{t+n} = A_t e^{r_t + r_{t+1} + \dots + r_{t+n-1}}$.

Esto revela que si se conoce el precio actual A_t entonces el comportamiento futuro está completamente determinado por los r_t conocidos como los retornos logarítmicos de A . Por lo tanto, el problema matemático de predecir A_t se convierte en el problema de predecir r_t . Este planteamiento es relevante pues, aunque A_t es un paseo aleatorio complicado con media y varianza no-constante, r_t tiene el potencial de ser una variable estacionaria. Incluso, como se observará posteriormente, los r_t asociados al mercado panameño tienen media y varianza constante.

Algunos inversionistas (conocidos como inversionistas de impulso) piensan que si una acción ha tenido retornos altos recientemente entonces es más probable que los retornos futuros se mantengan altos. Esta visión correspondería a que los r_t tengan una fuerte correlación

positiva entre ellos. Al contrario, otros inversionistas (conocidos como inversionistas de contracorriente) piensan que si una acción ha tenido retornos altos recientemente entonces es más probable que los retornos futuros sean bajos o hasta negativos para compensar el periodo de retornos altos. Este efecto se conoce como reversión a la media y esta visión correspondería a que los r_t tengan una fuerte correlación negativa entre ellos. Sin embargo, se puede escribir la ecuación anterior como $r_t = \ln(1 + \mu + \sigma W_t)$ lo que implica que un r_t no tiene relación con sus valores pasados. No es más que un proceso estocástico controlado por la variable aleatoria W . En otras palabras, la correlación entre los r_t es nula. Esto quiere decir que la hipótesis del paseo aleatorio contradice a ambos los inversionistas de impulso como a los inversionistas de contracorriente. La pregunta que surge naturalmente es si los datos empíricos apoyan o contradicen esta hipótesis y, en el caso de que la contradigan, entonces cual grupo de inversionistas previamente mencionados tiene razón. Originalmente estudios como Fama & French (1988) y Poterba & Summers (1989) encontraron fuertes evidencias de que la hipótesis del paseo aleatorio era incorrecta utilizando datos del mercado de valores de países desarrollados, aunque se contradicen a la hora de decidir cual estrategia de inversión es preferible. Posteriormente estudios como Kim et al. (1991) descubrieron que al eliminar las varias suposiciones impuestas sobre la distribución de los r_t en los estudios anteriores las evidencias previamente obtenidas se desvanecen casi completamente. Otras metodologías como las de Spierdijk et al. (2012) trabajaron con datos del mercado de valores de 18 países y llegaron a la conclusión de que solo podían rechazar la hipótesis del paseo aleatorio en 8 de ellos. Recientemente Eren & Karahan (2020) replicaron los métodos de Kim et al. (1991) sobre índices de mercado que cubren 76 países y adicionalmente examinaron 12 de estos (6 desarrollados y 6 emergentes) individualmente. Aunque hay casos especiales, en general los resultados demuestran que no hay suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis del paseo aleatorio a nivel de país, región y mundo. Sin embargo, en ninguno de los estudios previamente mencionados se analiza la bolsa de valores de Panamá. Por lo tanto, se replican los métodos de Eren y Karahan (2020) sobre los datos históricos del mercado panameño y se comparan con aquellos obtenidos de otros países. Esto revelará la madurez del mercado de valores panameño y contribuirá al debate sobre la validez de la hipótesis de paseo aleatorio.

METODOLOGÍA

Para medir la hipótesis de paseo aleatorio se utilizará la metodología de ratio de varianzas. Sea r_t es una serie de retornos logarítmicos. Se define

$$R_{n,t} = r_t + r_{t+1} + \dots + r_{t+n-1}$$

como la serie de n retornos pues $A_t e^{R_n t} = A_{t+n}$. En lo que sigue se escribe solamente R_n pues se sobreentiende que este valor puede calcularse en cualquier punto del tiempo. Se puede calcular la varianza de R_n como

$$Var(R_n) = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{n-1} Cov(r_i, r_j).$$

Pero, si la hipótesis del paseo aleatorio fuera correcta, $Cov(r_i, r_j) = 0$ siempre que $i \neq j$ así que lo anterior se reduce a $Var(R_n) = n Var(R_1)$. Motivados por esta ecuación se define la ratio de varianza como $VR(n) = \frac{Var(R_n)}{nVar(R_1)}$. Si la hipótesis de paseo aleatorio fuera correcta entonces siempre será el caso que $VR(n) = 1$. Por lo tanto, si empíricamente se observa evidencia estadísticamente significativa de que $VR(n) \neq 1$, se puede rechazar a la hipótesis de paseo aleatorio. Incluso se puede dar un paso más y aplicar el resultado de Cochrane (1988):

$$VR(n) \approx 1 + 2 \sum_{j=1}^{n-1} \frac{n-j}{n} \hat{\rho}_j.$$

Donde $\hat{\rho}_j = Corr(r_t, r_{t+j})$ calculado sobre la muestra. Esta relación demuestra que si se obtiene el resultado $VR(n) > 1$ con suficiente significancia estadística se puede inferir que entre las autocorrelaciones de r_t dominan términos positivos, dándole la razón a los inversionistas del impulso. De lo contrario, si $VR(n) < 1$ se infiere que tienen razón los inversionistas de contracorriente. Además, se puede mejorar esta prueba aplicando el resultado encontrado en Kendall & Stuart (1976) que indica que, bajo la hipótesis nula de independencia de los retornos (una implicación de la hipótesis de paseo aleatorio), $E[\hat{\rho}_j] = \frac{-1}{T-j}$ donde T es el tamaño de la muestra. Por lo tanto:

$$E[VR(n)] = 1 - 2 \sum_{j=1}^{n-1} \frac{n-j}{n(T-j)}.$$

Al dividir nuestro cálculo de $VR(n)$ por el valor anterior se corrige el sesgo de la muestra. Este valor corregido será el utilizado para observar si se rechaza la hipótesis de paseo aleatorio. Para medir la significancia estadística de un valor corregido de $VR(n)$ típicamente sería necesario hacer ciertas suposiciones sobre la distribución de esta estadística las cuales

pueden, o no, ser correctas. Para evadir el cuestionamiento que estas suposiciones pudiesen levantar se utiliza el método de aleatorización propuesto por Kim et al. (1991). Como nuestra hipótesis nula es que los valores de r_t son indistinguibles de un paseo aleatorio, se puede crear una distribución empírica cambiando el orden de los retornos aleatoriamente más de

10,000 veces. Luego se calcula la probabilidad de obtener un valor tan lejos de 1, o más, que el valor corregido de $VR(n)$ bajo esta distribución empírica. Este método funciona pues al cambiar aleatoriamente el orden de la serie de retornos efectivamente se crea un paseo aleatorio por definición. La pregunta que se busca responder es que tanto se parece la muestra real a las muestras completamente aleatorias. La probabilidad calculada, que es precisamente el valor p , nos indicará si se puede, o no, rechazar la hipótesis nula.

Todo lo anterior es equivalente a el método utilizado por Omar & Karahan (2020). Sin embargo, este estudio va a diferir en un punto importante: en vez de utilizar series de retornos mensuales se utilizarán series de retornos diarios. Esta decisión está fundamentada por dos factores. Primero, el mercado de valores panameño solo tiene datos desde 2007 lo cual nos incentiva a preferir un delta pequeño como $\Delta t = 1$ día. Segundo, y quizás más importante, aquellos inversionistas que se fijan única o principalmente en los retornos pasados para predecir retornos futuros tienden a utilizar gráficas de corto plazo. Por lo tanto, resultados para Δt pequeño pueden ser más interesantes para un público general. En particular pueden ser relevantes resultados como Serletis & Rosenberg (2009) quienes concluyen, utilizando datos diarios, que el mercado de valores estadounidense presenta una tendencia contraria cuando Omar & Karahan (2020), utilizando datos mensuales, encuentran que tiene una tendencia de impulso, aunque con débil evidencia estadística.

Para medir el mercado panameño se utiliza la serie de retornos del índice BVPSI. El BVPSI es el índice de retorno total de la bolsa de valores de Panamá. En otras palabras, es equivalente a invertir en las empresas más grandes que cotizan en la bolsa panameña proporcionalmente según el tamaño de estas. Varios estudios previos como Fama & French (1988) también han indicado la posible diferencia entre resultados obtenidos para índices como el BVPSI y acciones individuales. Por lo tanto, se analizan por separado las acciones de Empresa General de Inversiones, S.A. (EGIN) en representación del sector financiero, Grupo Melo, S.A. (MELO) en representación del sector de consumo y Panama Power Holdings, Inc. (PPHO) en representación del sector de energía. Todas las anteriores son componentes significantes del BVPSI. Adicionalmente se analizan las acciones de Copa Holdings, S.A. (CPA) y Bladex (BLX) por ser empresas significantes en la economía panameña pero que cotizan en el New York Stock Exchange y por lo tanto no son parte del BVPSI. Adicionalmente para poder medir si el cambio en nuestra metodología tiene algún impacto significativo en los resultados se agregan los índices MSCI World y MSCI US los

cuales también fueron estudiados en Omar & Karahan (2020). Para todos los índices y acciones estudiadas se restringirá la muestra en el tiempo tomando solo valores desde marzo 2007 pues es desde esta fecha que se tienen datos para el BVPSI. Los datos llegan hasta octubre 2023. Adicionalmente, con excepción de BVPSI, CPA y BLX, se toman en cuenta las series de retorno sin ajustar por dividendos pues el estudio anterior demuestra que, para nuestros propósitos, el impacto de los dividendos es negligible.

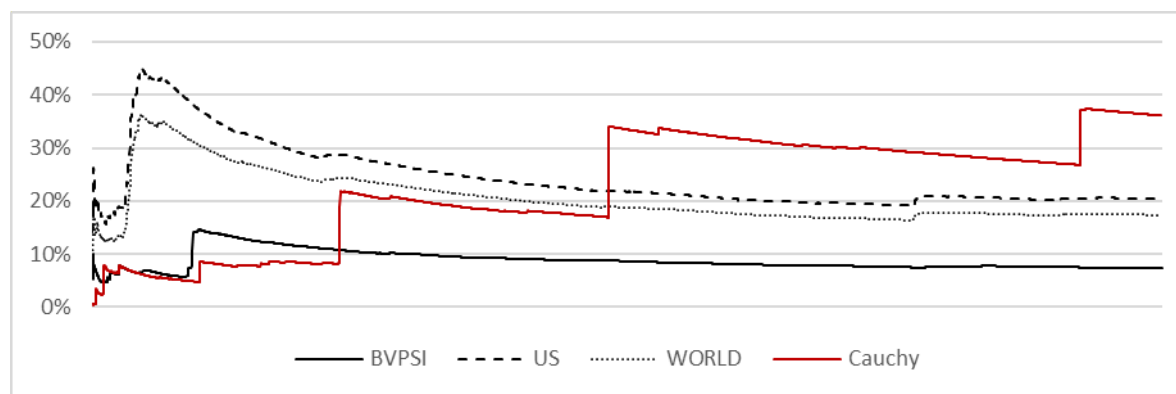
CONSIDERACIONES PREVIAS

La metodología descrita anteriormente tiene varias suposiciones que raramente son consideradas. En particular, se asume que la media y la varianza de r_t existen y que no dependen del tiempo. Estos temas tienen sus propias líneas de investigación, aunque no son el tema central de este artículo. Sin embargo, como son propiedades necesarias para aplicar los métodos descritos, se incluye una exploración corta de los mismos.

La literatura sobre la existencia de la varianza y otros momentos es rica pero inconclusa. Fedotenkov (2013) menciona como las pruebas más utilizadas deben hacer ciertas suposiciones sobre las colas de las distribuciones con las que trabajan, pero propone su propio método para evitar este problema. Sin embargo, este método, al igual que otros similares, está sujeto a sus propias limitaciones. Como estas pruebas pueden dar evidencia inconclusa y este no es el tema central de investigación, se utiliza una variante del método intuitivo utilizado por Mandelbrot (1963). Este método busca comparar gráficamente un índice real contra un índice ficticio controlado por una variable aleatoria de varianza infinita.

Figura 1.

Volatilidad parcial del BVPSI, MSCI US, MSCI WORLD y una variable Cauchy. Nota. La volatilidad parcial es la volatilidad calculada desde la primera observación hasta cada punto en el tiempo



Como se puede ver en la Figura 1, los tres índices presentan un comportamiento muy similar. Inicialmente son caóticos, pero mientras se incluyen más valores de la muestra la volatilidad se normaliza y tiene la apariencia de convergencia. La variable Cauchy, al contrario, presenta la apariencia de convergencia en varios puntos, pero luego su volatilidad vuelve a saltar. Por lo tanto, se puede asumir que la suposición de varianza finita (y en consecuencia media finita) es razonable para el mercado panameño. Sin embargo, no sería imposible que los mercados de valores tuviesen volatilidad infinita, pero con valores extremos ocurriendo tan infrecuentemente que todavía no se ha llegado al punto en el cual aparece el siguiente salto. Por ahora se concluye que no hay evidencia que indique que la volatilidad del mercado panameño sea infinita, aunque no se pueda asignar un valor p a esta observación.

Para determinar si una serie de tiempo es estacionaria típicamente se utiliza la prueba de Dickey-Fuller aumentado o Kwiatkowski–Phillips–Schmidt–Shin sin embargo estas pruebas solo pueden discernir si la media es estacionaria. Para datos del mercado de valores la principal cuestión es si la varianza es estacionaria pues de esto dependen las correlaciones. Por lo tanto, se aplica el método popularizado por Fielitz (1971) quien adapta la prueba de arreglos invertidos encontrada en Bendat & Piersol (2010) a el mercado de valores. Para una serie de retornos se puede dividir el periodo de la muestra en varios subperiodos de mismo tamaño no-superpuestos y luego calcular el estimado, según cada uno de esos subperiodos, de los momentos relevantes (en este caso el promedio y la varianza). Si los retornos fuesen estacionarios entonces los diferentes estimados obtenidos para los momentos deben ser observaciones de una misma variable aleatoria. Si las N observaciones obtenidas están en la serie de tiempo X_t , se dice que hay una inversión o arreglo invertido en esta serie cuando $X_i > X_j$ para $i < j$. En Bendat & Piersol (2010) se demuestra que la cantidad total de arreglos invertidos en una muestra de N observaciones de una misma variable aleatoria sigue una distribución específica llamada A con valor esperado $\frac{N(N-1)}{4}$. Para las muestras del mercado de valores se puede calcular empíricamente cual es la cantidad real de arreglos invertidos de sus momentos y obtener el valor p utilizando la tabla A.6 de Bendat & Piersol (2010). En este caso la hipótesis nula es que la serie de retornos es estacionaria por lo que el valor p nos indicaría si se puede rechazar la estacionariedad. Para esta prueba se asume que tomar el promedio de los momentos por un periodo de un año es suficiente para obtener un estimado razonable del valor real. El periodo entre 2007 y 2023 se divide en $N = 16$ periodos no-superpuestos por lo cual se esperaría obtener 60 arreglos invertidos. Según la distribución A , la hipótesis nula no se puede rechazar si la cantidad de arreglos observados se encuentra entre 38 y 81. En la siguiente tabla se observa el conteo de las inversiones para cada periodo utilizando datos del BVPSI. El periodo 1 suma 11 inversiones para la media pues hay 11 valores posteriores de la media que son menores a 10.4%. El periodo 2 suma 0 inversiones para la media pues no hay ningún valor posterior que sea menor a este. El cálculo de los arreglos invertidos se completa sumando la cantidad de inversiones de cada periodo.

Tabla 1.

Inversiones para cada periodo del BVPSI. Nota. Se muestra la media y volatilidad anualizada en vez de la media y varianza diaria. Estas son solo otras escalas más intuitivas para el mismo valor y por lo tanto se preserva la cantidad de inversiones.

Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Media	10.4%	-22.8%	21.5%	16.6%	24.8%	17.2%	-10.0%	1.3%	-2.6%	7.4%	9.1%	-4.4%	-20.4%	4.4%	2.7%	-2.2%
Inversiones	11	0	12	10	11	10	1	4	2	5	5	1	0	2	1	0
Volatilidad	6.4%	18.0%	6.2%	5.1%	7.1%	5.1%	5.9%	7.3%	4.4%	4.4%	5.5%	4.1%	7.9%	8.4%	3.7%	6.3%
Inversiones	10	14	8	5	8	4	5	6	2	2	2	1	2	2	0	0

Se observa en la Tabla 2 que en ningún caso se puede rechazar la hipótesis nula de estacionariedad. Interesantemente, el mercado panameño es el que se desvía más del promedio. Esto sucede porque prácticamente todo el crecimiento y volatilidad en el mercado panameño sucedió entre 2010 y 2013. Después de este periodo, el índice tiende a tener un retorno menor e igualmente menor volatilidad, lo cual incrementa los arreglos invertidos. Sin embargo, la prueba nos indica que esto parece más una coincidencia que una verdadera dependencia con el tiempo.

Tabla 2.

Arreglos invertidos del BVPSI, MSCI US y MSCI WORLD

Índices	Arreglos Invertidos		Valor p	
	Media	Varianza	Media	Varianza
BVPSI	75	71	0.17	0.32
US	60	63	1	0.78
WORLD	57	70	0.78	0.36

Se concluye que la evidencia sugiere que la media y varianza del mercado de valores panameño existen y no varían con el tiempo. Por lo tanto, la metodología propuesta es aplicable.

RESULTADOS

Tabla 3.

Estadísticas relevantes de los índices y acciones estudiadas.

Ticker	Retorno Anualizado	Volatilidad Anualizada	Estadística	1 mes	3 sem.	2 sem.	1 sem.
BVPSI	3.23%	7.45%	VR	1.0988	0.9206	0.7894	0.6948
			P	0.2129	0.1911	0.0012	0.0001
WORLD	4.21%	16.87%	VR	1.0796	1.0768	1.0749	1.0991
			p	0.3023	0.2258	0.1347	0.0018
US	6.58%	20.14%	VR	0.7497	0.7643	0.7625	0.8137
			p	0.0013	0.0002	0.0001	0
EGIN	5.37%	9.79%	VR	0.9620	0.8757	0.8088	0.7879
			p	0.6389	0.0491	0.0002	0
MELO	4.81%	20.76%	VR	0.8355	0.8179	0.8316	0.8214
			p	0.0451	0.0219	0.0109	0.0041
PPHO	-9.48%	23.49%	VR	0.9435	0.9465	0.9520	0.9767
			p	0.524	0.4507	0.3787	0.4587
CPA	4.76%	46.61%	VR	0.9595	0.9686	0.9757	1.0310
			p	0.6311	0.6322	0.645	0.3553
BLX	7.43%	37.09%	VR	0.8126	0.8181	0.8211	0.8450
			p	0.0198	0.005	0.0005	0

El índice BVPSI muestra evidencia significativa de una tendencia contraria para periodos cortos como una o dos semanas, pero al considerar tiempos más largos como 3 semanas o un 1 mes esta evidencia se desvanece y se vuelve indistinguible de un paseo aleatorio como se esperaría. Interesantemente con periodos más largos como de 6 meses se encuentra evidencia de impulso, pero como el periodo de 2007 a 2023 contiene menos de 35 tales periodos no-superpuestos, esos resultados pudiesen ser cuestionados. Por lo tanto, se concluye que no hay suficiente evidencia para descartar la hipótesis del paseo aleatorio en el mercado panameño excepto en las temporalidades más cortas.

Al comparar el índice panameño con los otros dos índices se observa que se comporta de manera similar al índice mundial MSCI World el cual rechaza la hipótesis nula para el periodo de una semana (aunque con evidencia de impulso), pero, al incrementar n , se vuelve un paseo

aleatorio. El resultado mensual concuerda perfectamente con los resultados de Omar & Karahan (2020) quienes tampoco pudieron rechazar la hipótesis del paseo aleatorio para el periodo de un mes. Interesantemente este no es el caso para el índice MSCI US pues utilizando datos diarios se encuentra evidencia muy fuerte, en todas las temporalidades consideradas, de una tendencia contraria lo cual contradice el estudio previo que no logró rechazar la hipótesis nula del paseo aleatorio. Esto pudiese ser influenciado por usar datos de años distintos. Sin embargo, al repetir este estudio utilizando los retornos mensuales como la serie de tiempo base sobre el mismo periodo se encuentra que la evidencia de contracorriente se desvanece. El único factor que puede explicar esta diferencia es el uso de retornos diarios en vez de retornos mensuales en el denominador. Esto implica que es posible que las autocorrelaciones diarias de una serie de tiempo sean distintas a 0 pero las autocorrelaciones mensuales de la misma serie de tiempo no lo sean. Por lo tanto, se resalta la necesidad de un estudio de igual generalidad como Omar & Karahan (2020) que examine la hipótesis del paseo aleatorio usando diferentes valores de Δt .

Volviendo al mercado panameño, EGIN se comporta de manera similar al índice BVPSI. Esto no es sorprendente pues EGIN es su componente más grande. Sin embargo, MELO muestra evidencia significativa de tendencia contraria mientras que PPHO en todas sus temporalidades es indistinguible de un paseo aleatorio. Similarmente, CPA es indistinguible de un paseo aleatorio en todas sus temporalidades lo cual resalta el hecho de que es la acción más volátil de todas las estudiadas, lo cual puede estar muy ligado a su sector económico y eventos recientes. Por otro lado, BLX muestra la evidencia más fuerte de tendencia contracorriente entre las acciones individuales. Esto es muy similar a los resultados de EGIN, que también pertenece al sector financiero, que muestra evidencia de contracorriente en todas las temporalidades estudiadas excepto la mensual. La diferencia entre CPA y BLX, y la similitud entre EGIN y BLX, sugieren la necesidad de un estudio más general que considere el sector económico de una acción individual como un posible factor.

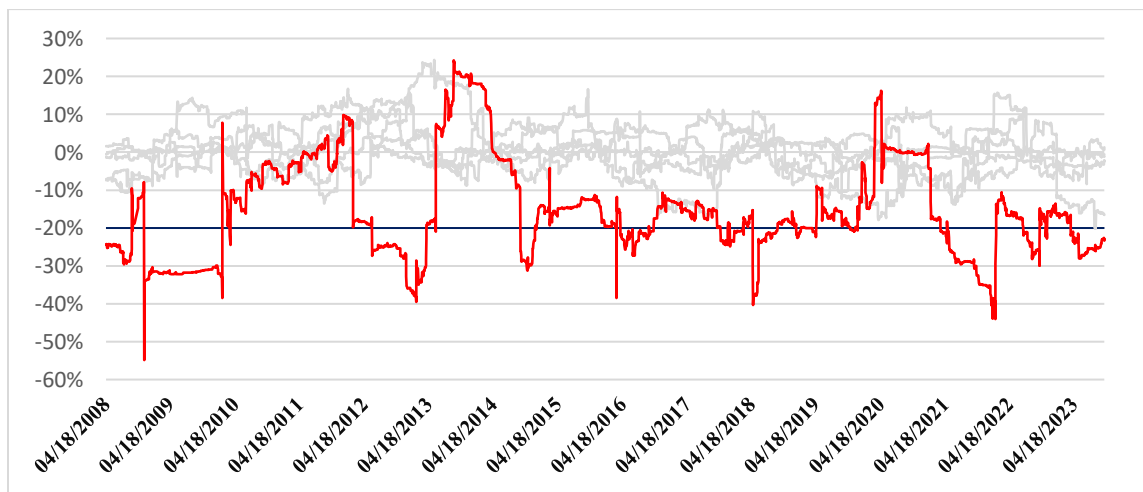
CONCLUSIONES

Se estudió el índice del mercado de valores panameño y 5 acciones de alta relevancia para la economía panameña por un total de 6 los cuales fueron analizados en cuatro temporalidades (de una semana hasta un mes). De las 24 pruebas realizadas solo 13 (54%) rechazan la hipótesis nula del paseo aleatorio y en todos esos casos el resultado apoya a los inversionistas de contracorriente. Esto da evidencia, aunque mixta y no necesariamente concluyente, a la idea de que los mercados muestran reversión a la media. Interesantemente esto también se verificó para el mercado de valores estadounidense lo cual le da mayor apoyo a esta teoría. Por otro lado, si se observa solamente la temporalidad más larga estudiada (1 mes), solo 2 pruebas de 6 (33%) rechazan la hipótesis del paseo aleatorio. Esto puede indicar que la

reversión a la media es un efecto de corto plazo que pierde relevancia en plazos más largos. Esto se puede entender mejor cuestionando la prueba utilizada en sí. Según el resultado de Cochrane (1998), $VR(n) \approx 1 + 2 \sum_{j=1}^{n-1} \frac{n-j}{n} \hat{\rho}_j$, lo cual implica que para n pequeño, las primeras autocorrelaciones dominan completamente la ratio de varianzas. Tomando como ejemplo los retornos del índice BVPSI se obtiene $\hat{\rho}_1 = -20\%$. Para n pequeño este valor negativo es casi completamente responsable de empujar los primeros valores de $VR(n)$ hacia abajo. Y, cuando se llega a $VR(1 \text{ mes})$, este incrementa precisamente porque ya se le permite al estadístico incorporar los efectos de suficientes autocorrelaciones que resultan ser positivas y mitigan el efecto negativo de la primera autocorrelación. Esto puede indicar que quizás no es que el mercado de valores es un paseo aleatorio, si no que los retornos presentan autocorrelaciones positivas y negativas de tal manera que en ciertas temporalidades sus efectos se cancelan y se componen en una serie de tiempo que parece un paseo aleatorio. Sin embargo, otra perspectiva pudiese indicar que esto es precisamente lo que se esperaría de una muestra particularmente patológica de un paseo aleatorio. El paseo aleatorio perfecto tendrá las autocorrelaciones de sus retornos en 0 pero sus muestras pueden tener correlaciones positivas y negativas que se cancelan entre ellas. En esta segunda perspectiva, el hecho de que el valor calculado de $\hat{\rho}_1$ sea tan negativo sería una coincidencia. La Figura 2 puede ayudar a entender mejor que es lo que en realidad puede estar sucediendo.

Figura 2

Cálculo de $\hat{\rho}_1$ para el BVPSI y sus aleatorizaciones a través del tiempo. Nota. Las muestras de $\hat{\rho}_1$ se calculan tomando los 252 días de historia anteriores a cada punto. Los resultados para el BVPSI real están indicados por la línea roja mientras que las líneas grises son algunas de sus aleatorizaciones. La línea horizontal negra marca el valor de $\hat{\rho}_1$ para el BVPSI real en la muestra completa (-20%).



Aunque hay una gran variabilidad, incluso un periodo donde la autocorrelación llegó a superar 20% positivo, se puede observar que frecuentemente el estadístico vuelve a estar alrededor de -20%. Como punto de comparación se traza, en gris, el mismo cálculo, pero para paseos aleatorios creados utilizando el método de aleatorización sobre la serie de retornos del BVPSI. Se puede observar que estas se comportan de manera muy diferente a la serie real. En particular, las líneas grises se vuelven negativas solo el 50% del tiempo (como se esperaría de un paseo aleatorio) mientras que la línea roja se mantiene negativa más del 88% del tiempo. Estos datos indican que el resultado $\widehat{\rho}_1 = -20\%$ no es una coincidencia y, como indican los resultados originales, el mercado de valores panameño presenta el efecto de reversión a la media en el corto plazo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Bachelier, L. (1900). *Théorie de la spéculation*. Annales scientifiques de l'école normale supérieure, 17, 21–86.
- Bendat, J., & Piersol, A. (2010). *Random data: Analysis and measurement procedures*. Fourth edition, Wiley.
- Cochrane, J. H. (1988). How big is the random walk in GNP? *Journal of Political Economy*, 96(5), 893–920.
- Eren, Ö., & Karahan, C. (2020). Mean reversion in international equity markets. *Ege Akademik Bakış (Ege Academic Review)*. <https://doi.org/10.21121/eab.69946>
- Fama, E. F., & French, K. R. (1988). Permanent and temporary components of stock prices. *The Journal of Political Economy*, 96(2), 246–273.
- Fedotenkov, I. (2013). A simple nonparametric test for the existence of finite moments. SSRN. <https://ssrn.com/abstract=2202269>
- Fielitz, B. D. (1971). Stationarity of random data: Some implications for the distribution of stock price changes. *The Journal of Financial and Quantitative Analysis*, 6(3), 1025–1034.
- Kendall, M. G., & Stuart, A. (1976). *The advanced theory of statistics* (3rd ed.). Griffin.
- Kim, M., Nelson, C. R., & Startz, R. (1991). Mean reversion in stock prices? A reappraisal of the empirical evidence. *The Review of Economic Studies*, 58(3), 515–528.

- Malkiel, B. G. (2007). *A random walk down Wall Street: The time-tested strategy for successful investing* (ninth edition). W. W. Norton & Company
- Mandelbrot, B. (1963). The variation of certain speculative prices. *The Journal of Business*, 36(4), 394–419.
- Poterba, J., & Summers, L. H. (1989). Mean reversion in stock prices: Evidence and implications. *Journal of Financial Economics*, 22(1), 27–59.
- Serletis, A., & Rosenberg, A. A. (2009). Mean reversion in the US stock market. *Chaos, Solitons & Fractals*, 40(4), 2007–2015.
- Spierdijk, L., Bikker, J. A., & van den Hoek, P. (2012). Mean reversion in international stock markets: An empirical analysis of the 20th century. *Journal of International Money and Finance*, 31(2), 228–249.



Culture-based and Sanger sequencing approaches to uncover the diversity of leaf-fungal endophytes in neotropical gymnosperms

Enfoques basados en el cultivo y la secuenciación Sanger para descubrir la diversidad de endófitos fúngicos de hoja en el neotropical gimnosperma

Omayra Meléndez,

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

omayraaimeemp@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-6675-7263>

Rita Bethancourt,

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

bethancourtrita61@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0006-6060-0640>

Ariadna Bethancourt,

Universidad de Panamá, Facultad de ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Microbiología y Parasitología, Panamá.

ariadna.bethancourt@up.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0009-6488-3264>

Lilisbeth Rodríguez–Castro,

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Botánica, Panamá. lili_0990@outlook.es

<https://orcid.org/0000-0002-4307-5956>

Jorge Mendieta,

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Botánica, Panamá. mendi_ja@yahoo.es

<https://orcid.org/0009-0003-6576-5004>

Armando A. Durant Archibold

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Bioquímica, Panamá. armando.durant@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0002-6516-9427>

Marta Vargas,

Smithsonian Tropical Research Institute, Ancón, Panamá.

vargasm@si.edu

<https://orcid.org/0009-0009-4286-8987>

Brian Sedio,

University of Texas, Austin, Texas, United States & Smithsonian Tropical Research Institute, Ancón, Panamá.
sediob@utexas.edu <https://orcid.org/0000-0002-1723-9822>

Kristin Saltonstall

Smithsonian Tropical Research Institute, Ancón, Panamá.
SaltonstallK@si.edu

<https://orcid.org/0000-0002-1811-4087>

Juan Carlos Villarreal A.

Smithsonian Tropical Research Institute, Ancón, Panamá & Department of Biology, Université Laval, Québec, G1V 0A6, Canada.
corresponding author jcvi19@ulaval.ca

<https://orcid.org/0000-0002-0770-1446>

Fecha de recepción: 1 de octubre de 2024

Fecha de aceptación: 18 de noviembre de 2024

DOI [HTTPS://DOI.ORG/10.48204/J.TECNO.V27N1.A6647](https://doi.org/10.48204/J.TECNO.V27N1.A6647)

ABSTRACT

Endophytic fungi play a crucial role in the survival and adaptation of their host plants. In recent decades, unprecedented diversity of endophytic fungi has been reported in angiosperms, but knowledge about this diversity in tropical gymnosperms is lacking. Among gymnosperms, cycads (Cycadales) are important components of Neotropical forests with high levels of endemism in Central and South America. We used a combination of axenic culture and Sanger sequencing to isolate and identify leaf endophytes of two endemic cycads from humid forests of Panama, *Zamia nana* and *Z. pseudoparasitica*. The latter is the only known epiphytic gymnosperm. In *Z. pseudoparasitica*, 50 morphotypes were isolated from El Copé, 58 from Santa Fe, and 22 from Cerro Marta. We sampled one wild population of *Z. nana* (El Valle de Antón), from which we recovered 74 morphotypes. We also sampled *Z. nana* from the International Garden of Cycads in Panama City. Sequencing of 69 cultures with the ITS rRNA locus identified several ascomycetes: *Colletotrichum*, *Cercophora*, *Hypoxylon*, *Phyllosticta*, *Xylaria*, and a basidiomycete: *Tritirachium*. This is one of the first studies to document the diversity of endophytic fungi in a Neotropical gymnosperm and provides a window into the endophytic fungi that inhabit the leaves of tropical plants.

KEYWORDS

Endophytic fungi, *Colletotrichum*, *Tritirachium*, *Xylaria*, *Zamia*.

RESUMEN

Los hongos endófitos desempeñan un papel crucial en la supervivencia y adaptación de sus plantas huésped. En las últimas décadas, se ha reportado una diversidad sin precedentes de hongos endófitos en angiospermas, pero se carece de conocimiento sobre esta diversidad en las gimnospermas tropicales. Entre las gimnospermas, las cícadas (Cycadales) son componentes importantes de los bosques neotropicales con altos niveles de endemismo en América Central y del Sur. Utilizamos una combinación de cultivo axénico y secuenciación Sanger para aislar e identificar endófitos foliares de dos cícadas endémicas de bosques húmedos de Panamá,

Zamia y *Z. pseudoparasitica*. Esta última es la única gimnosperma epífita conocida. En *Z. pseudoparasitica* se aislaron 50 morfotipos de El Copé, 58 de Santa Fe y 22 de Cerro Marta. Se muestreó una población silvestre de *Z. nana* (El Valle de Antón), de la cual se recuperaron 74 morfotipos y también se muestreó *Z. nana* del Jardín Internacional de Cícadas en la Ciudad de Panamá. La secuenciación de 69 cultivos con el locus ITS rRNA identificó varios ascomicetos: *Colletotrichum*, *Cercophora*, *Hypoxylon*, *Phyllosticta*, *Xylaria* y un basidiomiceto: *Tritirachium*. Este es uno de los primeros estudios en documentar la diversidad de hongos endófitos en una gimnosperma neotropical y proporciona una ventana a los hongos endófitos que habitan en las hojas de las plantas tropicales.

PALABRAS CLAVE

Hongos endófitos, *Colletotrichum*, *Tritirachium*, *Xylaria*, *Zamia*

INTRODUCTION

Endophytic non-pathogenic fungi live asymptotically within healthy plant tissues (Rodríguez, *et al.*, 2009; U'Ren *et al.*, 2012). Fungal endophytes are a highly diverse and polyphyletic assemblage of mainly ascomycete fungi with diverse and often poorly defined or unknown ecological roles. Endophytic fungi have been recovered from all major land plant lineages and from all terrestrial ecosystems, in natural and anthropogenic communities ranging from the arctic to the tropics (Arnold *et al.*, 2000; Arnold, 2007; Franco *et al.*, 2022). Their role in plant fitness and evolution has been widely recognized (Rodríguez *et al.*, 2009; González–Teuber *et al.* 2021).

Endophytes can confer great adaptive potential to their host plant species against adverse abiotic conditions (Rodríguez *et al.*, 2009) and provide defensive characteristics against microbial pathogens for the host (González–Teuber *et al.*, 2021), producing secondary metabolites that inhibit a particular pathogen or other endophytic fungi (Rodríguez *et al.*, 2009; Franco *et al.*, 2022). Some endophytes allow host plants to survive in hostile environments where neither the host nor the endophyte can survive alone. This emergent property suggests that interactions with endophytes could influence the response of plants to man-made climate change (Porrás-Alfaro and Bayman, 2011). Other fungi, such as members of the family Botryosphaeriaceae (e.g., *Neofusicoccum* spp., *Lasiplodia* spp.), are aggressive phytopathogenic fungi that stay latent in the leaves without causing apparent damage to the host (Belair *et al.*, 2023). In recent years there has been great interest on endophytic fungi, due to the ease of isolation and identification methods. Such methods range from Sanger Sequencing (especialmente el espaciador transcrito interno, ITS), metabarcoding and whole genome sequencing (Belair *et al.*, 2023; Franco *et al.*, 2022; Sierra *et al.* 2024). Such genetic resources are still mostly restricted to phytopathogenic strains with renewed efforts to isolate fungi to uncover the genome properties of non-pathogenic fungal endophytes (U'Ren *et al.*,

2012; Xiong *et al.*, 2013; Franco *et al.*, 2022 Hill *et al.*, 2023; Villarreal *et al.* 2024). Despite the great advances in the biology of fungal leaf endophytes, there is still a large gap in tropical gymnosperms, especially cycadophytes.

The Order Cycadales is a group of plants that have inhabited the planet for 300 million years, with a current diversity of about 377 species (Osborne *et al.*, 2012; Nagalingum *et al.*, 2011; <https://www.cycadlist.org/index.php>). Cycads harbor a repertoire of anti-herbivorous toxins and other compounds of unknown function (Whittaker and Salzman, 2020; Sierra *et al.*, 2024). Most species have a restricted geographic distribution, and there are high levels of endemism within the group (Calonje *et al.*, 2019). The genus *Zamia* is restricted to the New World and is the most ecologically diverse lineage within the order (Calonje *et al.*, 2019). The most recent phylogeny of *Zamia* proposed five clades with a clear geographic pattern, one of which is restricted to the Central American isthmus (Costa Rica and Panama) with 17 species (Calonje *et al.*, 2019). To date, 16 *Zamia* species have been described in Panama, twelve of which are endemic to the country (Taylor *et al.*, 2012). Unfortunately, these species, as most cycads, suffer anthropogenic threats such as deforestation and poaching, and cycads are now considered to be the most endangered group of seed plants (Fragnière *et al.*, 2015).

We isolated endophytic fungi from leaves from two Panamanian endemics: *Zamia pseudoparasitica* J. Yates and *Zamia nana* A. Lindstr., Calonje, D.W.Stev. & A.S. Taylor. *Zamia pseudoparasitica* is the only obligately epiphytic gymnosperm known and is endemic to the humid tropical forests of the eastern Atlantic coastal zone of Panama (Bell–Doyon *et al.*, 2020). Plants can be found between seven and twenty meters high up on canopy trees (Bell–Doyon *et al.*, 2020; Monteza–Moreno *et al.*, 2022). This species is listed as “Near Threatened” by the IUCN. *Zamia nana* is found in the mountains of the province of Coclé, within the remnant crater of the extinct volcano El Valle de Antón and also in Cerro Turega (Lindström *et al.*, 2013). *Zamia nana* is classified as “Endangered” (EN) in the IUCN Red List due to its restricted distribution and a dwindling population size.

To fill out the gap in knowledge of endophytic fungi inhabiting Neotropical cycads, we seek to answer the following research questions:

1. Using a culture-based approach, what are the differences between the leaf endophyte morphospecies of *Z. nana* and *Z. pseudoparasitica*?
2. Using a culture-based approach, how do *Z. pseudoparasitica* endophyte morphospecies vary between sites?
3. Using a Sanger-based approach (ITS marker), which fungal genera are found in the leaves of both species?

METHODS

Study area

We sampled leaves from three natural populations of *Z. pseudoparasitica* and two populations of *Z. nana*, one natural and one cultivated (Figure 1).

Figure 1.

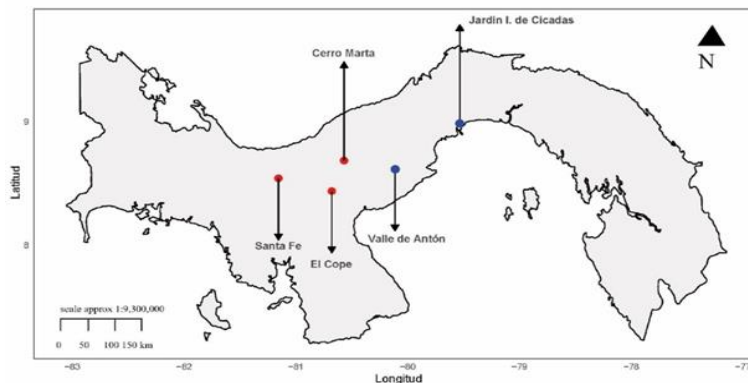
Zamia pseudoparasitica in El Copé. B. *Zamia nana* in El Valle de Antón Photos: P. Castillo and M. Madrid



The collection sites for *Z. pseudoparasitica* were Santa Fe (Veraguas Province), El Copé (Coclé Province) and Cerro Marta (Coclé Province). Samples of *Z. nana* were collected in El Valle de Antón (Coclé Province) and in the International Cycad Garden located within the Campus of the University of Panama (UP, Panama Province) (Figure 2,). Mature and healthy leaflets of *Z. pseudoparasitica* and *Z. nana* were collected, then transported and maintained on ice at an approximate temperature of 10°C until they were processed in the laboratory.

Figure 2

Sampling sites of *Zamia pseudoparasitica* (red) and *Zamia nana* (blue) in Panamá



Isolation of endophytic fungi

To isolate endophytic fungi, leaflets were cut into three sections and 50 2×2 mm² fragments were obtained from the middle section, which were then disinfected as in Bethancourt (2000). In brief, leaflet fragments were placed in a small strainer, submerged, and shaken constantly while they were passed through a disinfection battery composed of ethyl alcohol (70%) for one-minute, commercial Clorox (10%) (5.25% Na Hypochlorite) for two minutes, ethyl alcohol (70%) for 30 seconds, and finally rinsed in ethyl alcohol (40%).

Of the 50 disinfected fragments per leaflet, 12 random fragments were seeded in large Petri dishes (90mm x 14mm) containing Potato Dextrose Agar (PDA) and incubated at 24°- 26°C for approximately one week to allow fungal growth to emerge. To isolate pure cultures, a fragment of mycelium was taken from each cultivar and transferred to a test tube with inclined PDA which was incubated further at 24 - 26°C.

Morphotyping and cloning of the endophytic fungi.

Six weeks after the first isolation carried out, we began the grouping and morphotyping process. Group morphotypes were obtained by grouping isolates with similar morphological characteristics while individual morphotypes were classified when the morphological characteristics were not shared with any other fungus. The morphological characteristics considered for the groupings included: color, texture, colony margin, presence of aerial or immersed mycelium in the agar, pigmentation of the culture medium caused by the fungus, presence or absence of reproductive structures, and the coloration and growth rate of each colony (fast, moderate, or slow). After scoring, fungi were incubated again for two weeks in the new tubes after which the groupings were reviewed and both group and individual morphotypes were confirmed.

Density and relative diversity estimate of endophytic fungi.

The density of endophytic fungi in this study was obtained by dividing the total number of isolates by the total number of incubated leaf fragments, then multiplying by 100:

$$\text{DENSITY} = (\text{Total number of isolated endophytic fungi}) / (\text{Total number of sown fragments}) \times 100$$

The diversity of endophytic fungi was estimated by dividing the total number of morphotypes (both group and individual) by the total number of endophytic fungi that were isolated, then multiplying by 100.

$$\text{DIVERSITY} = (\text{Total number of morphotypes}) / (\text{Total number of isolated endophytic fungi}) \times 100$$

Molecular methods

The Covid-19 pandemic greatly impacted our research since we could not access our cultures for over a year, during which time they were subjected to uncontrolled temperatures and humidity levels and most of our isolates were lost. Before sequencing, we revived our stored cultivars on PDA and prepared three replicates of each isolate to avoid confusion regarding the morphology of each one and also to recognize possible contamination.

We used direct PCR on most samples, where a slice of mycelium was placed directly into the PCR amplification reaction without any prior DNA extraction procedure. DNA from fungal isolates that did not amplify directly were extracted using PrepMan Ultra reagent (Thermo Fisher). The internal transcribed spacer (ITS) rRNA region was amplified (between 400-500 bp) with primers ITS4 and ITS5 (White, 1990). Each reaction included a volume of 20 μL composed of: sterile water, Platinum II 2X PCR Mastermix (Life Technologies), primers (ITS 4 and ITS 5, 10 mM (White et al. 1990), and a fragment of mycelium or a DNA aliquot of the corresponding endophyte. The amplification conditions were 95°C for 3 minutes, followed by 25 cycles of 95°C for 30 seconds, 55°C for 1 minute, and 72°C for 1 minute, with a final incubation at 72°C for 10 minutes. We sequenced the samples using BigDye chemistry on an ABI 3500XL sequencer at the Naos Molecular Laboratory using the same PCR primers (Smithsonian Tropical Research Institute, Panama). We used Geneious Prime 8.0.5 (<https://www.geneious.com>) to clean and align the DNA sequences and used BLAST (Basic Local Alignment Search Tool, Astschul *et al.*, 1990), as implemented in Geneious Prime, to identify taxonomy.

RESULTS

We isolated 733 fungal cultures, 433 from *Z. pseudoparasitica* and 300 from *Z. nana*, which we classified into over 200 morphotypes. Fungal endophytes were isolated from over half of the leaflet fragments that we cultured and both grouped and unique morphotypes were found at each site. Within *Z. pseudoparasitica*, the diversity and density of morphotypes varied across sites, with Cerro Marta having the highest diversity despite having fewer leaflets sampled than the other sites (Table S1). In contrast, El Copé had the lowest morphotype diversity despite having more leaflets sampled. More morphotypes were isolated from *Z. nana* cultivars at both sampling locations (Table 1).

Fungal morphotypes

Table 1:

Density and diversity of cultured fungal endophytes of Zamia pseudoparasitica and Zamia nana identified by morphology.

Species	Site	No. leaflet fragments	No. of isolates	No. of morphotypes	Endophyte Density (%)	Endophyte Diversity (%)
<i>Z. pseudoparasitica</i>	El Copé	480	272	50	56.7	18.4
	Santa Fe	180	130	58	72.2	44.6
	Cerro Marta	108	31	22	28.7	71.0
<i>Z. nana</i>	El Valle de Antón	240	144	74	60.0	51.4
	Cycad Garden	240	156	63	65.0	40.4

Taxonomic identification of fungal isolates

We recovered 77 of our isolates, which included both group and unique morphotypes. However, eight of them could not be amplified. In total, 34 isolates were sequenced from *Z. pseudoparasitica* and 35 from *Z. nana*. Each population of *Z. pseudoparasitica* had at least one unique genus of endophyte isolated. Despite this, higher overall richness of endophytes was identified in *Z. nana* than *Z. pseudoparasitica* (14 vs 8 genera, Figure 3); however, five of these genera were only isolated from *Z. nana* plants growing in the International Cycad Garden and three other genera were unique to the population of El Valle de Antón. Most isolates belonged to the Phylum Ascomycota, including the genera *Colletotrichum*, *Cercophora*, *Hypoxylon*, *Xylaria*, *Phyllosticta*, *Endomelanconiopsis*, *Chaetomium*, *Zasmidium*, *Acremonium*, *Parengyodontum*, *Diaporthe*, *Biscogniauxia*, *Hypomontagnella*, *Pseudocercospora* (Figure. 3; Figure 4). A single member of the Basidiomycota, *Tritirachium*, was isolated from the Jardín de Cicadofitas. Isolates of *Colletotrichum* and *Xylaria* were common in both species and were present in all five *Zamia* populations evaluated (Figure 3; Table 1). One endophyte from the *Z. nana* Valle de Antón population

could only be identified up to the class: Sordariomycetes (Z58), perhaps representing a new ge.nus (Table 1).

Figure 3.

Genera and proportions (%) of cultured fungal endophytes isolated from Zamia species. The identification was made using a 621 bp fragment of the ITS rRNA region.

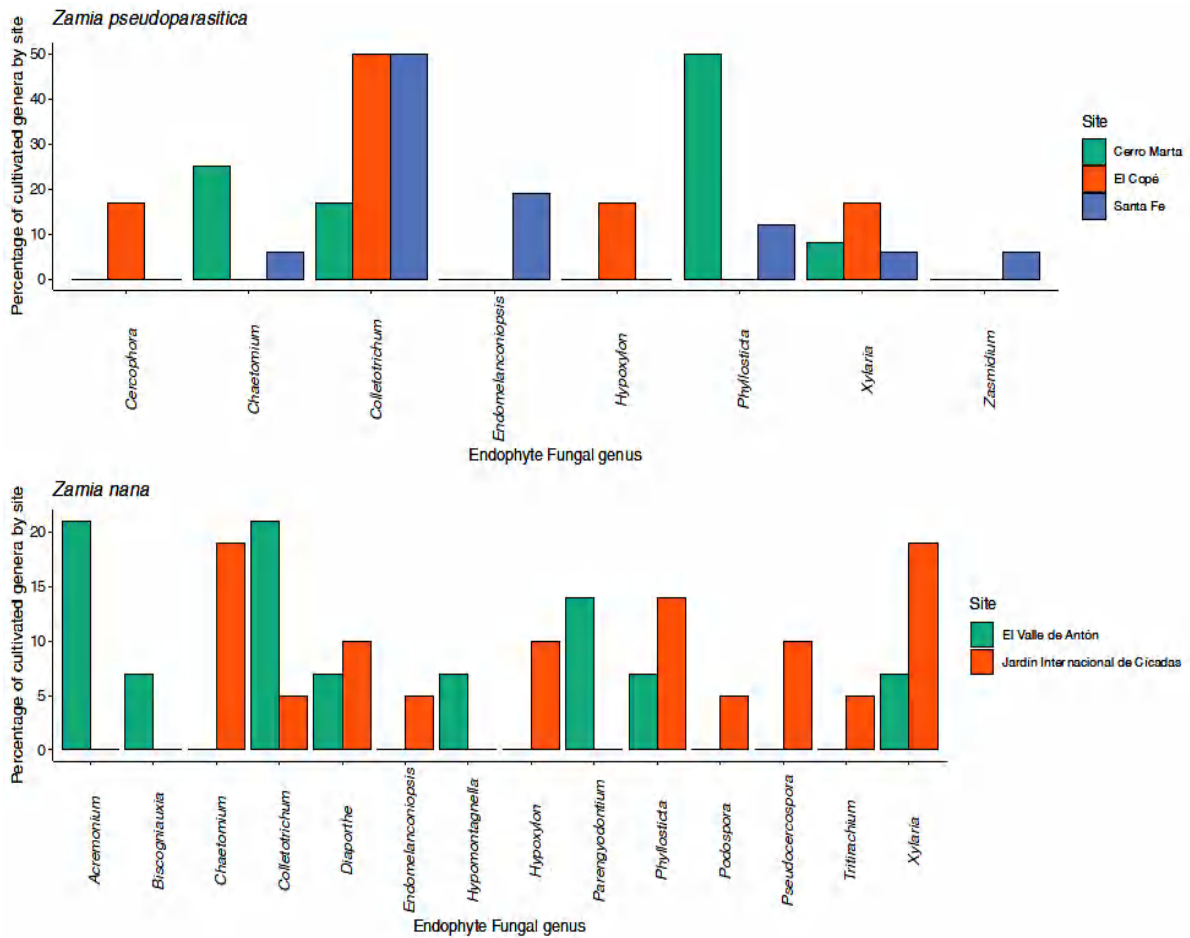
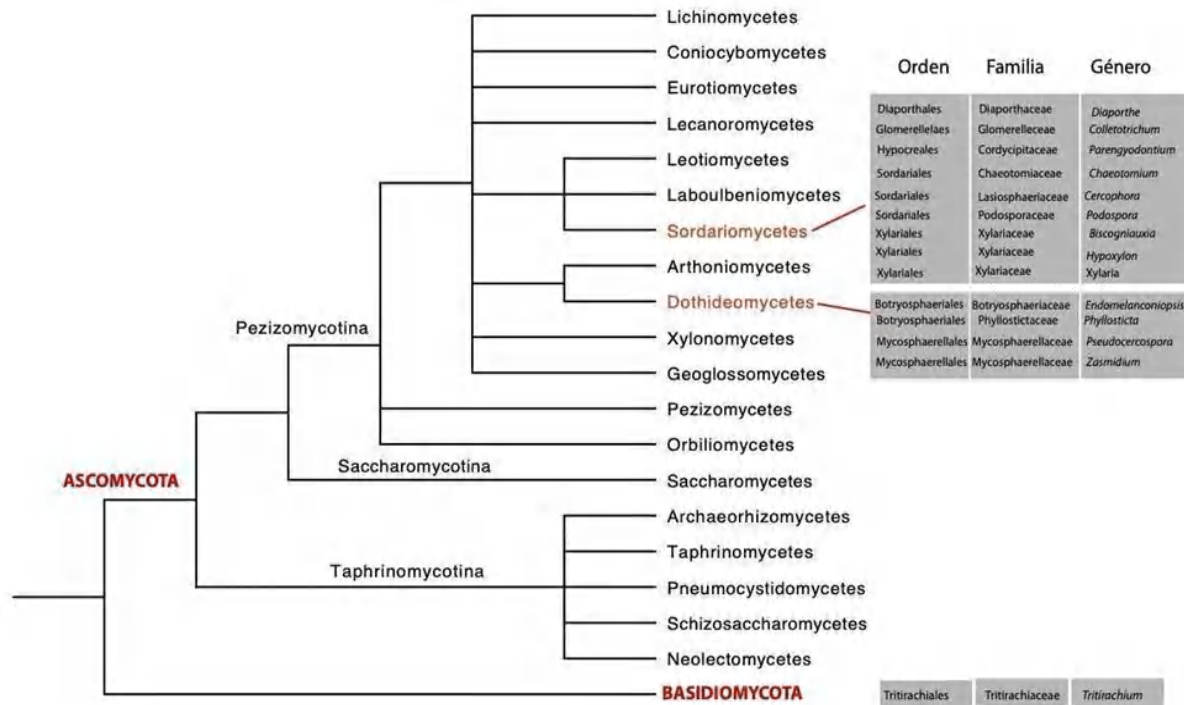


Figure 4.

Phylogeny of Ascomycota and its sister phylum Basidiomycota, with all classes shown. The tree was generated by <https://phylot.biobyte.de/> based on the Current knowledge of fungal phylogenetic relationships. The three classes recovered in this study, with their respective genera, are highlighted in red. Most fungi belong to the classes Sordariomycetes y Dothideomycetes.



DISCUSSION

Our results present a high diversity of fungal endophytes in *Zamia*, similar to those reported for flowering plants (Arnold and Lutzoni 2007). Each sampling location had unique genera, but the dominant taxa were common to all sites, suggesting that a core endophytic microbiome exists in these two *Zamia* species, despite their contrasting lifestyles in the canopy and forest understory.

Several genera were common across our samples from *Z. nana* (understory) and *Z. pseudoparasitica* (epiphytic habitat). *Colletotrichum* spp. were the most common isolates across our five sampling sites and can be found in the soil and in plants as pathogenic agents

and endophytic fungi throughout the world (Farr *et al.*, 2006; Baroncelli *et al.* 2017). This genus was also shown to be a dominant member of the leaf fungal microbiome in a recent metabarcoding study of *Z. nana* and *Z. pseudoparasitica* endophytes (Sierra *et al.* 2024). *Xylaria* spp. were also common in this study, but have been shown to have more diverse lifestyles, ranging from saprophytes to common endophytes in both vascular and non-vascular tropical plants (Bayman *et al.*, al. 1998, Macías-Rubalcava *et al.*, 2017; Villarreal *et al.* 2024). *Phyllosticta*, another genus that has been identified as both a pathogen and endophyte (Valle Bejarano & Carrillo 2023; Vicent 2021), was found at four of our five sampling sites.

Morphotype and BLAST analyses of a subset of these morphotypes showed a higher diversity of endophytic fungi in *Z. nana* than *Z. pseudoparasitica*. This may be a reflection of their habitat as endophytes colonize plants from their surrounding environment (Arnold 2007). For example, *Z. nana* may be receiving inoculants from both the soil and leaf litter as well as the air column while *Z. pseudoparasitica* may have a more limited source of endophytic inoculants up in the forest canopy. We also found several genera unique to the *Z. nana* plants from the International Garden of Cycads. This location is not representative of the natural habitat of *Z. nana* found in the tropical montane forests of Panama and therefore may have a different inoculant pool, as it is in the lowlands of Panama, with a higher annual temperature, lower annual precipitation, and in an urban environment.

Although *Zamia* species are known to have symbiotic associations with fungi and cyanobacteria (*Nostoc* spp.) in roots, we have a limited understanding of the nature of interactions between leaf endophytes and their host plants (Díaz Pérez *et al.*, 2018; Sierra *et al.*, 2024). Most of the genera of endophytic fungi identified in *Zamia* species belong to the Ascomycota. Similarly, Arnold and Lutzoni (2007) examined plant tissue of different plants in eight locations from the Canadian arctic to the lowlands of Canada confirming Ascomycota as the predominant phylum. In our work, however, we were able to detect an endophyte belonging to the Basidiomycota. *Tritirachium* has been also found in the soil and decomposing plant material and recently in coastal sediments in the Arabian Sea (Piontelli *et al.*, 2013; Manohar *et al.*, 2014) and here newly reported from *Zamia nana* in the International Cycad Garden of the University of Panama (UP).

Colletotrichum, *Diaporthe* and *Endomelanconiopsis* have shown to be of great importance as antagonists by being reported as producers of bioactive compounds (Costa-Ferreira *et al.*, 2015). For example, *Colletotrichum* demonstrated selective antibacterial activity against the Gram-negative bacterium *Escherichia coli* (Migula) Castellani and Chalmers and was able to inhibit the proliferation of the infection yellow fever virus. (Costa-Ferreira *et al.*, 2015). On the other hand, *Endomelanconiopsis* and *Diaporthe* showed high trypanocidal activity

against amastigotes forms of *Trypanosoma cruzi* Chagas (Costa-Ferreira *et al.*, 2015). Some foliar endophytic fungi can act as pathogens (Arnold 2007) but also as opportunists, such is the case of species of three of the genera identified in this study: *Hypoxylon*, *Neofusicoccum* and *Biscogniauxia*, which were found in oak trees weakened by biotic or abiotic factors. (Moreno-Rico *et al.*, 2010). Our results, based on axenic cultures, surely underestimate the fungal diversity in cycad leaves. Further work using metabarcoding approaches will unveil more of the hidden diversity of fungal endophytes found in tropical cycads.

CONCLUSIONS

Both morphotype and sequence analyses of cultured fungi show that *Z. nana* and *Z. pseudoparasitica* harbor diverse communities of fungal endophytes in their leaves, dominated by the genera *Colletotrichum*, *Xylaria* and *Phyllosticta*. Additional work exploring these fungi's genomic diversity and functional potential is now needed to better understand the dynamics between this unique group of plants and their microbial partners.

ACKNOWLEDGEMENTS

This project was funded by SENACYT No. 12–2018–4–FID16–237 to Kristin Saltonstall and Juan Carlos Villarreal. We also thank STRI, Universidad de Panamá, the program Canada Research Chair; *Canada Foundation for Innovation* #36781, #39135, and the Simons Foundation No. 429440 (W. Wcislo) for supporting members of this project. Thanks to Maycol Madrid for field assistance, Adriel Sierra Pinilla for help with figures, Cely González and Eyda Gomez for help at the Naos Molecular Laboratory (STRI), Adriana Vasquez and Madeleyn Caceres for help with endophytic fungi isolation, and Dr. Hernán D. Capador–Barreto for discussion. All collection permits were issued by Ministerio de Ambiente, Panamá, no. SE/P–10–2020.

Data availability

Raw sequencing files, images of all sequenced isolates, and associated metadata are available at SI FigShare: <https://doi.org/10.25573/data.22782806.v1>.

BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

- Altschul SF, Gish W, Miller, W, Myers EW, & Lipman DJ. (1990). Basic local alignment search tool. *J. Mol. Biol.* 215:403–410.
- Arnold AE, & Lutzoni F. (2007). Diversity and host range of foliar fungal endophytes: are tropical leaves biodiversity hotspots? *Ecology* 88(3): 541–549.

- Arnold AE, Maynard Z, Gilbert GS, Coley PD, & Kursar, TA. (2000). Are tropical fungal endophytes hyperdiverse? *Ecol. Lett.* 3(4): 267–274.
- Arnold AE, Mejía LC, Kyllo D, Rojas EI, Maynard Z, Robbins N, & Herre EA. (2003). Fungal endophytes limit pathogen damage in a tropical tree. *P. Natl. Acad. Sci. USA.* 100: 15 649-15 654.
- Arnold AE. (2007). Understanding the diversity of foliar endophytic fungi: progress, challenges, and frontiers. *Fungal Biol. Rev.* 21(2–3): 51–66. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2007.05.003>
- Baroncelli R, Talhinhos P, Pensec F, Sukno SA, Le Floch G, & Thon MR. (2017). The *Colletotrichum acutatum* species complex as a model system to study evolution and host specialization in plant pathogens. *Front. Microbiol.* 8: 2001.
- Bayman P, Angulo–Sandoval P, Báez–Ortiz Z, & Lodge DJ. (1998). Distribution and dispersal of *Xylaria endophytes* in Two Tree Species in Puerto Rico. *Mycol. Res.* 102 (8): 944–948. doi: <https://doi.org/10.1017/S09537562970059>
- Belair M, Restrepo-Leal JD, Praz C, Fontaine F, Rémond C, Fernandez O, & Besaury L. (2023). Botryosphaeriaceae gene machinery: Correlation between diversity and virulence. *Fungal Biol.* 127: 1010–1031.
- Bell-Doyon P, Laroche J, Saltonstall K, & Villarreal Aguilar JC. (2020). Specialized bacteriome uncovered in the coralloid roots of the epiphytic gymnosperm, *Zamia pseudoparasitica*. *Environmental DNA*, 2(4): 418–428.
- Bethancourt A. (2000). Un método de muestreo para el estudio de la diversidad de hongos endófitos asociados a especies arbóreas en un bosque tropical. Tesis de grado, Panamá, Panamá: Universidad de Panamá.
- Calonje M, Meerow AW, Griffith MP, Salas–L D, Vovides AP, Coiro M, & Francisco–O J. (2019). A time–calibrated species tree phylogeny of the New World cycad genus *Zamia* L. (Zamiaceae, Cycadales). *Int. J. Plant Sci.* 180(4): 286–314.
- Costa–Ferreira M, Vieira M, Zani CL, De Almeida–Alves TM, Sales–Junior PA, Murta S, Romanha AJ, Vega LH, Gomes A, Zilli JE, Salgado–Vital MJ, Rosa CA, & Rosa LH. (2015). Molecular phylogeny, diversity, symbiosis and discover of bioactive compounds of endophytic fungi associated with the medicinal Amazonian plant

- Carapa guianensis* Aublet (Meliaceae). *Biochem. Syst. Ecol.* 59: 36-44. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.bse.2014.12.017>
- Del Valle Bejarano, N., & Carrillo, L. (2023). *Phyllosticta* spp, Endofitas y patógenas de Naranjo. *Revista Científica FCA*, 16(1).
- Díaz Pérez, C. N., & Morales Puentes, M. E. (2018). Las Zamias: plantas con semillas más antiguas de la tierra.
- Doyle, J. J., & Doyle, J.L (1987). A rapid DNA isolation procedure for small quantities of fresh leaf tissue. *Phytochemical Bull.* 19: 11-15
- Farr D.F., Aime M.C., Rossman A.Y., & Palm M.E. (2006). Species of *Colletotrichum* on Agavaceae. *Mycol. Res.* 110(12): 1395-1408.
- Fragnière Y., Bétrisey S., Cardinaux L., Stoffel M., & Kozłowski G.. (2015). Fighting their last stand? A global analysis of the distribution and conservation status of gymnosperms. *J. Biogeography.* 42(5), 809–820. <https://doi.org/10.1111/jbi.12480>
- Franco MEE, Wisecaver JH, Arnold AE, Ju Y, Slot JC, Ahrendt S, Moore LP, Eastman KE, Scott K, Konkel Z, *et al.* (2022). Ecological generalism drives hyperdiversity of secondary metabolite gene clusters in xylarialean endophytes. *New Phytol.* 233:1317–1330.
- González–Teuber M, Palma–OV, Aguilera S.J., & Mithöfer A. (2021). Roles of leaf functional traits in fungal endophyte colonization: Potential implications for host–pathogen interactions. *J. Ecol.* 109(12): 3972–3987.
- Hill R., Levicky Q., Pitsillides F., *et al.* (2023). Tapping Culture Collections for Fungal Endophytes: First Genome Assemblies for Three Genera and Five Species in the Ascomycota. *Genome Biology and Evolution*, Volume 15 (3): evad038. <https://doi.org/10.1093/gbe/evad038>
- Lindström, A.J., Calonje, M., Stevenson, D.W., & Husby C. (2013). Clarification of *Zamia acuminata* and a new *Zamia* species from Cocle Province, Panama. *Phytotaxa* 98(2): 8 27-42. Doi: 10.11646/phytotaxa.98.2.1
- Macías–Rubalcava M.L., & Sánchez–Fernández R.E. (2017). Secondary metabolites of endophytic *Xylaria* species with potential applications in medicine and agriculture.

World J. Microbiol. Biotechn. 33(1): 1–22. doi: <https://doi.org/10.1007/s11274-016-2174-5>

- Manohar, C.S., Boekhout T., Müller, W.H., & Stoeck T. (2014). *Tritirachium candoliense* sp. nov., a novel basidiomycetous fungus isolated from the anoxic zone of the Arabian Sea. *Fungal biology*, 118(2), 139-149.
- Monteza–M CM, Rodriguez-Castro L., Castillo–C P.L., Toribio E., & Saltonstall K. (2022). Arboreal camera trapping sheds light on seed dispersal of the world’s only epiphytic gymnosperm: *Zamia pseudoparasitica*. *Ecol. Evol.* 12: e8769.
- Moreno-Rico, O., Velásquez-Valle, R., Sánchez-Martínez, G., Siqueiros-Delgado, M. E., Cerda-Lemus, M. D. L., & Díaz-Moreno, R. (2010). Diagnóstico fitopatológico de las principales enfermedades en diversas especies de encinos y su distribución en la Sierra Fría de Aguascalientes, México. *Polibotánica*, (29), 165-189.
- Nagalingum, N.S., Marshall, C.R., Quental, T-B., Rai, H.S., Little, D.P., & Mathews, S. (2011). Recent Synchronous Radiation of a Living Fossil. *Science*. 334 (6057): 796–799.
- Osborne, R., Calonje, M.A., Hill, K.D., Stanberg, L., & Stevenson, D.W. (2012). The world list of cycads. *Mem. New York Bot. Garden* 106: 480–510.
- Piontelli, E., Ch, RC & Amaro, J. (2013). Notas micológicas XI: *Tritirachium oryzae*, *Paecilomyces formosus* y rangos en la Sección Fumigati de *Aspergillus* con énfasis en el complejo *Aspergillus viridinutans*. *Boletín Micológico*, 28 (2).
- Porrás–Alfaro, A., Bayman, P. (2011). Properties: Endophytes and Microbiomes. *Annu. Rev. Phytopathol.* 49: 291–315.
- Rodríguez, R.J., White–J, J.F., Arnold, A.E., & Redman, R.S. (2009). Fungal endophytes: diversity and functional roles. *New Phytol.* 182(2): 314–330.
- Sierra, A.M., Meléndez, O., Bethancourt, R., Bethancourt, A., Rodríguez-Castro, L., López, C.A., ... & Villarreal A, J.C. (2024). Leaf Endophytes Relationship with Host Metabolome Expression in Tropical Gymnosperms. *Journal of Chemical Ecology*, 1-15.
- Taylor, A.S., Haynes, J.L., Stevenson, D.W., Holzman, G., & Mendieta, J. (2012). Biogeographic Insights in Central American Cycad Biology. Rijeka: Intechopen, Chapter 5, *Global Advances in Biogeography*; pp. 73–98.

- U'Ren J.M., Lutzoni F., Miadlikowska, J., Laetsch, A.D., & Arnold, E.A. (2012). Host and geographic structure of endophytic and endolichenonic fungi at a continental scale. *Am. J. Bot.* 99(5): 898-914.
- Vicent, A. (2021). La mancha negra de los cítricos causada por *Phyllosticta citricarpa*. El peso de la evidencia científica. *Phytoma España*, 334, 129-131.
- Villarreal, J.C., Meléndez, O., Bethancourt, R., et al. (2024). Two draft genomes of fungal leaf endophytes from tropical gymnosperms. *Microbiology Resources Announcements*. <https://doi.org/10.1128/mra.00511-24>
- Whitaker, M.R. & Salzman, S., (2020). Ecology and evolution of cycad-feeding Lepidoptera. *Ecology letters*, 23(12), pp.1862-1877.
- White, T.J., Bruns, T.D., Lee, S.B., & Taylor, J.W. (1990). Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. In: *PCR Protocols: A Guide to Methods and Applications*. Academic Press. Inc.
- Xiong, Z.Q., Yang, Y.Y., Zhao N. *et al.* (2013). Diversity of endophytic fungi and screening of fungal paclitaxel producer from Anglojap yew, *Taxus x media*. *BMC Microbiol* 13, 71. <https://doi.org/10.1186/1471-2180-13-71>



Tomografía sísmica del Volcán Barú y alrededores, provincia de Chiriquí, sur occidente de Panamá

Seismic tomography of Baru Volcano and surroundings, province of Chiriquí, southwestern Panama

Daphne Sagel

Universidad de Granada, Granada, España.

dsagelaguilar@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-5481-3424>

Eduardo Camacho Astigarrabía

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

eduardo.camachoa@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0001-7415-6786>

Inmaculada Serrano

Universidad de Granada, Instituto Andaluz de Geofísica, Granada, España

inmasb@ugr.es

<https://orcid.org/0000-0001-5624-5742>

Fecha de recepción: 7 de octubre de 2024

Fecha de aceptación: 19 de noviembre de 2024

DOI [HTTPS://DOI.ORG/10.48204/J.TECNO.V27N1.A6648](https://doi.org/10.48204/J.TECNO.V27N1.A6648)

RESUMEN

Se realizó una tomografía sísmica del volcán Barú y alrededores, en el suroccidente de Panamá. El volcán Barú es uno de los últimos volcanes en el extremo sur de Centroamérica y los estudios realizados en esta investigación brindan un escenario muy importante sobre la estructura interna del mismo. Mediante la tomografía sísmica de velocidad de las ondas P, se obtuvieron imágenes que muestran heterogeneidades en la estructura interna del volcán Barú, las cuales se deben a la compleja evolución, subducción y tectónica de la zona. El resultado más importante es la anomalía negativa al noroeste del volcán Barú y sureste de cerro Tizingal que se observa en todas las capas y que sugiere una posible cámara magmática. Este estudio brinda una panorámica sobre las posibilidades de erupciones futuras, lo que nos permitirá adoptar medidas de mitigación más eficaces en las zonas circundantes al volcán Barú donde existe una población de alrededor de 20.000 habitantes.

PALABRAS CLAVES

Tomografía sísmica de ondas P, volcán Barú, cámara magmática, suroccidente de Panamá

ABSTRACT

A seismic tomography of the Barú volcano and surrounding areas, in southwestern Panama, was carried out. The Barú volcano is one of the last volcanoes in the extreme south of Central America and the studies carried out in this research provide a very important scenario about its internal structure. Through seismic P-wave velocity tomography, images were obtained that show heterogeneities in the internal structure of the Barú volcano, which are due to the area's complex evolution, subduction and tectonics. The most important result is the negative anomaly to the northwest of the Barú volcano and southeast of Cerro Tizingal, present in all the layers, which could be related to a possible magmatic chamber. This study provides an overview of the possibilities of future eruptions, which will allow us to adopt more effective mitigation measures in the areas surrounding the Barú volcano where there is a population of around 20,000 inhabitants.

KEYWORDS

P wave tomography, Barú volcano, magma chamber, southwestern Panamá

INTRODUCCIÓN

La región de Chiriquí en el suroccidente de Panamá es conocida por su alta sismicidad, asociada a su proximidad al punto triple de Panamá y la subducción de la cresta del Coco y tres zonas de fractura. En su cadena volcánica el volcán Barú es la estructura dominante.

A lo largo de tiempos históricos la región de Chiriquí ha sido afectada por sismos destructivos (Vásquez et al., 2021), con los más recientes en 2019. Panamá y el sureste de Costa Rica están en la microplaca de Panamá. Al sur de punta Burica, en la zona fronteriza Panamá-Costa Rica se encuentra el punto triple de Panamá (PTP) en donde convergen las placas del Coco, Nazca y la microplaca de Panamá.

La región suroeste de Panamá es atravesada por diversas fallas y zonas de fractura, que subducen bajo la microplaca de Panamá: la zona de fractura de Panamá (ZFP), la zona de fractura de Coiba y la zona de fractura de Balboa (Camacho, 1991; de Boer et al., 1991; Heil, 1988; Moore & Sender, 1996; Morel et al., 2008). La ZFP es la más activa y al igual que las otras dos tiene rumbo norte-sur, desplazamiento lateral derecho y constituye el límite entre la placa de Cocos y la placa de Nazca en el océano Pacífico.

La interacción entre la ZFP y la subducción de la cresta del Coco (Arroyo & Linkimer, 2020; Corrigan et al., 1990; Kobayashi et al., 2014; Morell, 2016), origina la gran cantidad de

sismos que se registran en esta zona, que es muy compleja por la transición de fallas de rumbo a régimen de subducción (Quintero et al., 2023).

En Chiriquí, al igual que en la mayor parte de América Central, donde White & Harlow (1993), han observado en la cadena volcánica, fallamiento transcurrente con planos nodales muy pronunciados, con rumbo NE-SW y corrimiento lateral izquierdo o rumbo NW-SE y corrimiento lateral derecho. Ellos también reportan la ocurrencia de sismos muy superficiales y enjambres de sismos con magnitudes $M_w \leq 6.0$, que se sienten con intensidades de hasta VIII MM a pocos kilómetros del epicentro. Así mismo, los sismos que se originan mar afuera en la zona de subducción y con magnitudes menores a $M_w 7.0$, generalmente no producen intensidades mayores a VI MM, en tierra firme. Estudios anteriores de mecanismos focales de sismos en el occidente de Chiriquí (Camacho et al., 2009; Cowan et al., 1996) confirman esto.

El volcán Barú, es el principal volcán de Chiriquí y ha estado activo durante el Holoceno con su erupción más reciente hace unos 500 años (Restrepo et al., 1987; Sherrod et al 2007). Periódicamente, alrededor de él ocurren enjambres de sismos moderados: 1930, 1962, 1985 y 2006 (Camacho et al., 2009; de Boer, et al., 1988; Sherrod et al., 2007). Estudios realizados a los sismos del último enjambre de mayo de 2006 (Toral y Ho, 2006), arrojan mecanismos focales que pueden estar asociados a la migración de flujo magmático (Camacho, 2009).

Debido a las diversas y complejas estructuras tectónicas y sismicidad registrada en el sur occidente de Panamá, nace el interés por estudiar esta zona. El volcán Barú con una altura de 3474 msnm está rodeado por valles poblados al oeste y al este, teniendo una población adyacente a él de aproximadamente 20000 personas, donde son mayores los riesgos de futuras erupciones. La llanura costera del Pacífico densamente poblada, atravesada por la carretera Panamericana, se encuentra a 30 km al sur. Episodios eruptivos de Volcán Barú típicamente incluyen restos de tefra generalizada, flujos piroclásticos y lahares. Si estas erupciones se producen ahora, muchas personas y costosa infraestructura estaría en riesgo.

El sur occidente de Panamá brinda un escenario único para entender la complejidad de los procesos tectónicos de colisión y subducción; así como de los fenómenos asociados, como, por ejemplo, el vulcanismo y la sismicidad. Por lo tanto, los sismos ocurridos en esta zona constituyen un grandioso laboratorio natural, que nos van a permitir investigar y definir la sismotectónica y los procesos internos del volcán Barú mediante la Tomografía Sísmica, que tiene como fundamento el uso de los datos procedentes de ondas sísmicas, donde se puede representar la estructura interna de la tierra en base a los tiempos de llegada de las ondas sísmicas (Fitchner et al., 2024).

El uso de la tomografía sísmica nos ayudará a revelar la estructura interna del volcán Barú, de acuerdo con los tiempos de viajes de las ondas P en su interior. Por medio de su uso podemos determinar si existe material fluido, (si los residuos de tiempos de viajes son negativos) marcando anomalías negativas, al igual si existe material compacto o sólido (si los residuos de tiempos de viajes son positivos) marcando anomalías positivas. Dado el caso de encontrar anomalías negativas, podríamos asociarlas con la cámara magmática del Barú; siendo el objetivo principal la identificación de la estructura interna del volcán Barú utilizando Tomografía Sísmica para plantear las diferencias de los materiales (fluido o sólido) que lo conforman y determinar una posible cámara magmática.

Finalmente, este estudio aportará el conocimiento sobre la estructura interna del volcán Barú y la sismotectónica del sur occidente de Panamá, dejando las puertas abiertas a nuevas aportaciones en la comprensión y dinamismo, permitiendo avanzar hacia la validación y mejora de los planes de emergencia de las zonas aledañas al Barú, con los cuales resultarían menos pérdidas humanas en futuras erupciones.

CONTEXTO GEOLÓGICO

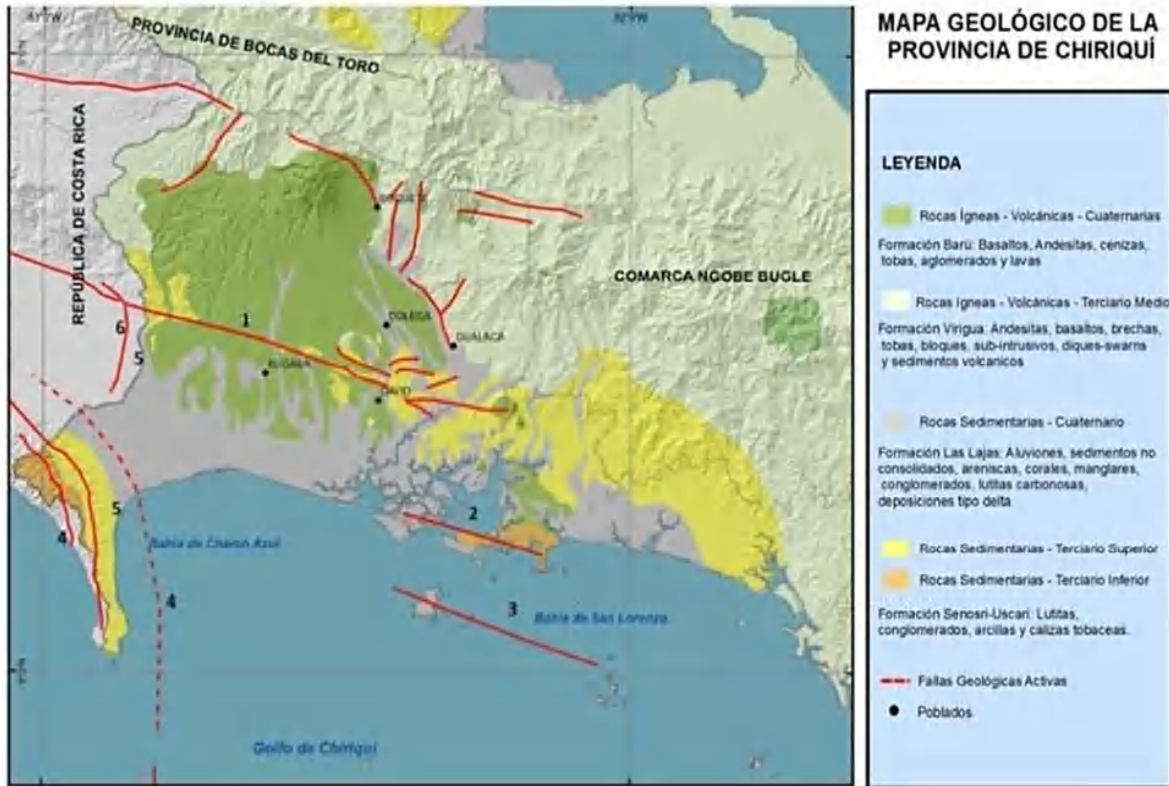
El istmo de Panamá se originó en el Oligoceno o Mioceno temprano a partir de la emersión de un arco de islas volcánicas que iba desde el norte de Costa Rica hasta el noroeste de Colombia, edificado a partir de las plataformas volcánicas. A ese archipiélago original corresponden las penínsulas de Nicoya y Osa en Costa Rica, la península de Azuero, el arco montañoso oriental y los bloques elevados del sur de Darién en Panamá y los bloques del Chocó en Colombia (Bacon et al., 2013; Harmon, 2005; Montes et al., 2012; Montes et al., 2015; Wegner, 2011)

Posteriormente se fueron erosionando las montañas más prominentes de este arco de islas y los sedimentos de dicha erosión se fueron depositando hacia el fondo de las aguas del Caribe y el Pacífico”. (Graham, 1975; Stewart, 1988).

La geología del suroccidente de Panamá ha sido inferida principalmente a partir de estudios realizados la zona fronteriza Panamá-Costa Rica (Coates et al., 1992; Corrigan et al., 1990; de Boer et al., 1988; Díaz Velarde, 1999; Morell, 2013; Morell, 2019), y levantamientos geofísicos (Cowan et al., 1996; Heil, 1988; MacKay & Moore, 1990; Moore & Sender, 1995; Okaya & Ben Avraham, 1987; Silver et al., 1990). En la figura 1 se muestra un mapa con la geología y principales fallas activas del suroccidente de Panamá.

Figura 1.

Mapa geológico del suroccidente de Panamá. Muestra las principales fallas, relieves, cráteres volcánicos del suroccidente de Panamá, (Vásquez et al., 2021).



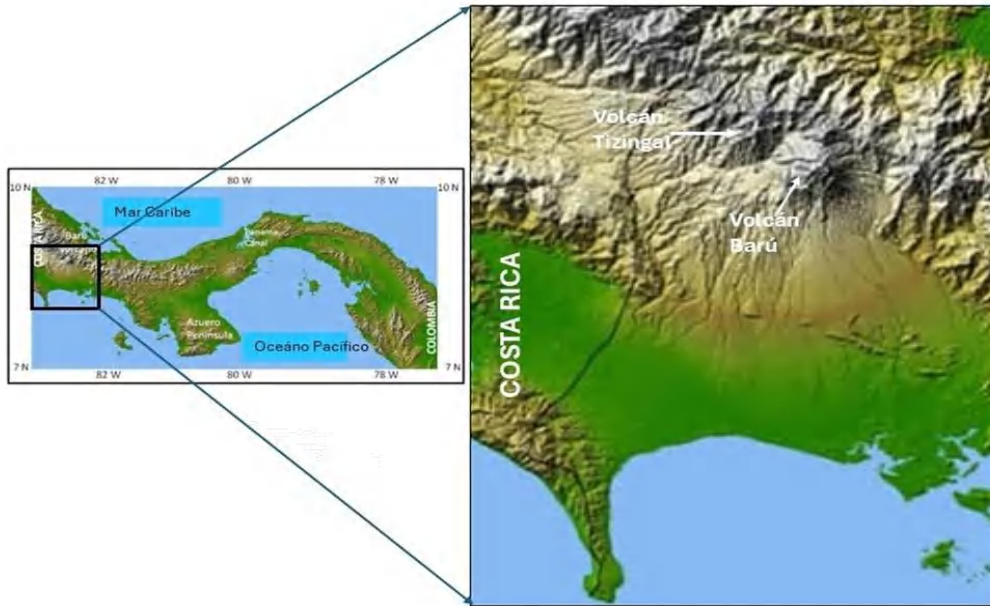
METODOLOGÍA

Realizamos un estudio sobre tomografía sísmica, con el objetivo principal de identificar las estructuras internas del volcán Barú y así plantear las diferencias de los materiales (fluido o sólido) que conforman y determinan una posible cámara magmática.

Para dicho estudio trabajamos con datos sísmicos del periodo 2011-2015, teniendo un total de 1057 terremotos que cumplieron con los parámetros establecidos, proporcionados por el Instituto de Geociencias (IGC), un total de 418 estaciones sísmicas (locales e internacionales), dentro de las coordenadas 82° y 83° longitud Oeste y 8° y 9° latitud norte (Figura 2), el análisis sísmico de los datos se trabajó con SEISAN (Haskov & Ottemoller, 1999; Haskov et al., 2020)

Figura 2.

Zona de estudio en el occidente de la República de Panamá (Sagel, 2015).



Establecimos trabajar hasta los 25 km de profundidad, dividiendo este segmento en 3 secciones, separadas por dos discontinuidades, establecidas a 8.2 km y 20 km de profundidad. Se creó un modelo de velocidad 1D (Kissling et al. 1994) partiendo del modelo de velocidad utilizado por el Instituto de Geociencias de Panamá (Tabla 1) para la zona de estudio, el cual representa el punto de partida para la inversión tomográfica:

Tabla 1.

Modelo de corteza utilizado en la tomografía

Capas	Espesor (km)	V _p (km/s)
Primera	8,2	5,1
Segunda	20,0	6,7
Semi-espacio	-	7,3

La metodología utilizada fue la tomografía sísmica de velocidad para las ondas P (Zhao et al., 1992) utilizamos una rejilla para expresar las discontinuidades a 8.2 km y 20 km de profundidad, en caso de que, exista una cámara magmática en el volcán Barú se logre

detectar; estas discontinuidades se mantendrán fijas en el proceso de inversión. No utilizamos método para las correcciones de estaciones, ya que cualquier anomalía local cercana a las estaciones, puede resolverse como anomalías de velocidad de los nodos de la red de la capa superior en 0 km de profundidad. En este trabajo se usó el modelo 2D, adaptando discontinuidades planas, es decir, se fijan las profundidades, tanto latitud como en longitud, tal como una serie de potenciales de latitud y longitud (Horiuchi et al., 1982, Zhao et al, 1990).

Los parámetros de calidad que se plantearon en este estudio fueron:

- Solo se seleccionaron los terremotos que se registran en un mínimo de 5 estaciones.
- Solo se seleccionaron estaciones sísmicas a las que llegan un mínimo de 5 sismos.
- Solo se seleccionaron los residuos de tiempo de viaje menores a 0.150 segundos.

Descripción de la rejilla:

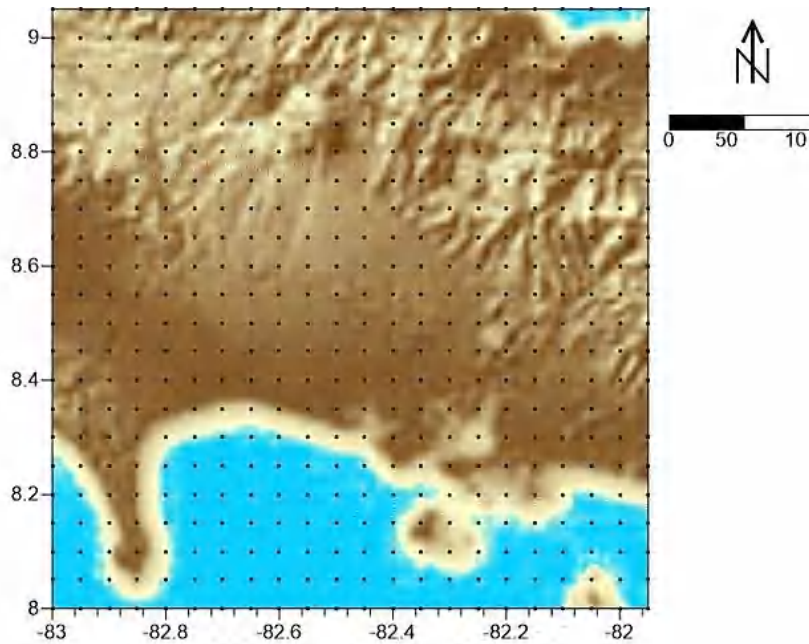
La rejilla está compuesta por un número de nodos que determinamos por su latitud, longitud y número mínimo de rayos que debe pasar por cada nodo.

Establecemos una rejilla para validar el grado de veracidad que tiene este estudio, ya que nos proporciona la cantidad de rayos que pasa por cada nodo y así determinar si los resultados de las perturbaciones pueden ser tomadas como válidas y tener una mayor fiabilidad sobre las interpretaciones.

Para este estudio se establece una matriz de $22 \times 22 \times 10$, donde el resultado de esta matriz es 4187 el cual indica en número inicial de fases P. El número de fases P que se utiliza es de 2895. Resultando un número total de parámetros del modelo de 1359, ya que sólo se obtienen resultados en los nodos donde el número de rayos es mayor de 10 (Figura 3)

Figura 3.

Modelo de la rejilla utilizada para este estudio.



Mapas de Cobertura de rayos o “Hit Counts”:

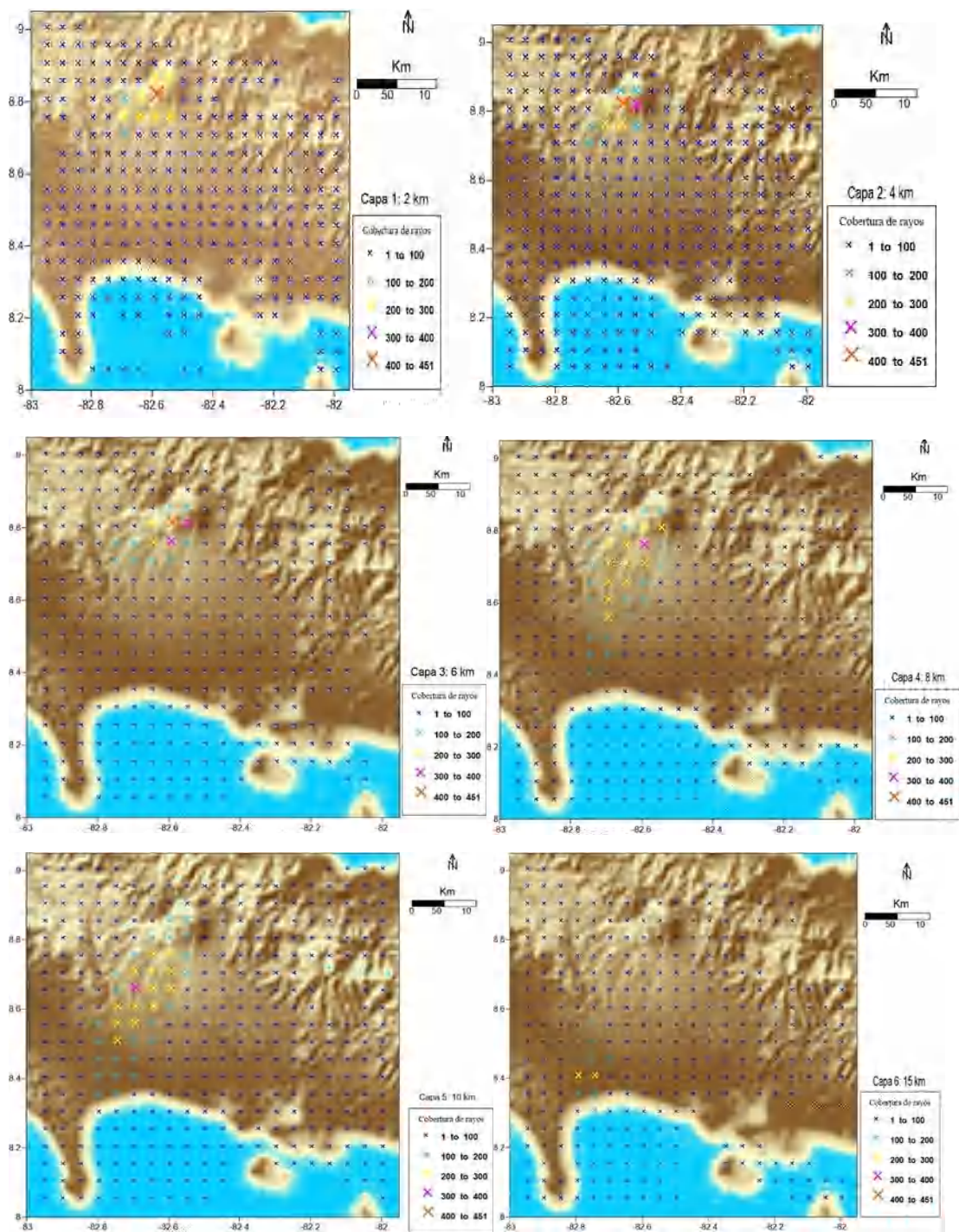
Los mapas, que aparecen en la figura 4, describen la cantidad de rayos que pasan por cada nodo de la rejilla en las diferentes capas de este estudio, lo que nos proporcionará la veracidad de los resultados.

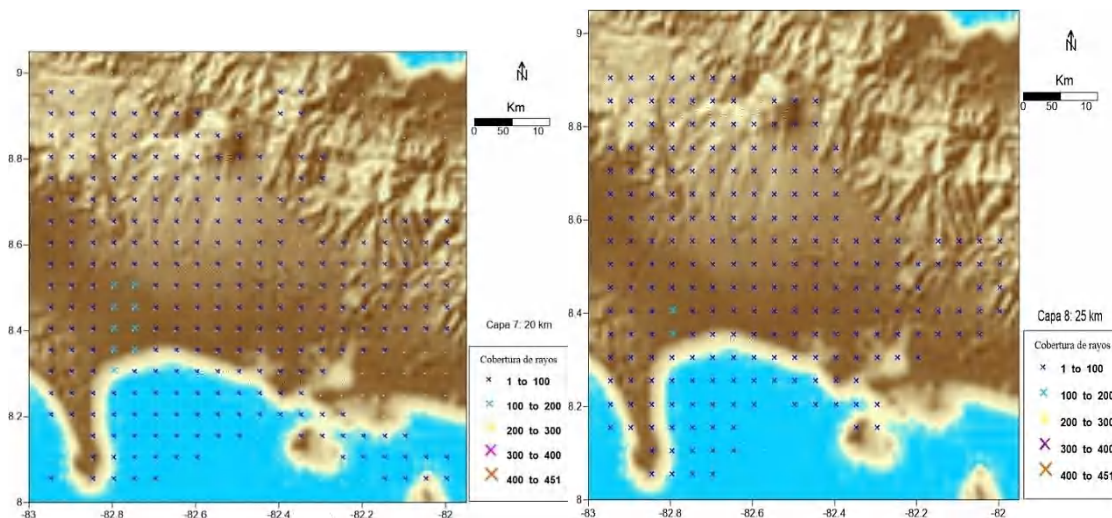
Para las primeras capas de 2, 4 y 6 km de profundidad, la cobertura de rayos es muy buena tanto en profundidad como en el número de estaciones que están repartidas en la zona de estudio. Lo cual en las cercanías al volcán Barú se muestran muy bien las anomalías negativas, dando por veraces estos resultados.

Para las siguientes capas de 8, 10 y 15 km hay mejor cobertura hacia el suroeste del Barú, cubriendo las zonas cercanas al Océano Pacífico, que determinan las altas anomalías positivas destacadas en la capa de 8 km de profundidad.

Para las últimas capas de 20 y 25 km, la mejor cobertura de rayos se centra en las costas de Puerto Armuelles-Océano Pacífico, donde entra la Zona de Fractura de Panamá.

Fig. 4. Cobertura de rayos o “Hit Counts” para la zona de estudio.





RESULTADOS

Interpretación de los resultados

A partir de la figura 5, a continuación se describen las principales anomalías de la velocidad de las ondas P obtenidas en cada capa a partir de los valores de las perturbaciones (%) relacionándolas con la cobertura de rayos en cada nodo.

Capa 1. 2 km. Tenemos dos resultados importantes en esta primera capa, una fuerte anomalía negativa de un -6.0 % con una dimensión aproximada de 181 km², situada entre el volcán Barú y el volcán Tisingal, esto podría estar relacionado con los primeros cambios termales de una posible cámara magmática.

La segunda anomalía negativa de -5.5% con una dimensión aproximada de 30 km², se observa hacia el sureste del Barú en las vecindades del Embalse Barrigón (8.5° N, 82.3° O).

Se observan dos anomalías positivas de +3.5 a +4.5 % con dimensiones de 121 km² y 30 km² respectivamente, las cuales podrían ser el inicio de los restos de la avalancha de escombros del domo que perdió el volcán Barú en su segunda erupción registrada, extendiéndose hasta el océano Pacífico. Estas anomalías positivas podrían relacionarse a la Formación Concepción que se extiende hasta la Bahía de Charco Azul, según observaciones batimétricas (Lizano, O., 2000; Sherrod et al, 2007; Herrick et al, 2013).

Capa 2: 4 km. La anomalía negativa observada en la primera capa se extiende hacia el oeste teniendo una dimensión de 242 km² aproximadamente. Esta podría deberse a la extensión de

la cámara magmática. La anomalía negativa al sureste del Barú cercana al Embalse Barrigón ha disminuido.

Se observan anomalías positivas cerca de las faldas del volcán Barú, de aproximadamente +4.5 %, al igual que existe una anomalía positiva de +3.5 a +4.5 % al noroeste del Embalse Barrigón con dimensiones de 30 km².

Hacia el océano Pacífico se observan anomalías positivas de +1.0 a +2.0 %, centrándose la mayor anomalía (+2.0 %) en la comunidad de Progreso y un círculo de aproximadamente +2.0 % en el océano Pacífico, al oeste de Punta Burica. Estas anomalías positivas podrían asociarse a las formaciones Concepción y Las Lajas que se han determinado por observaciones batimétricas (Lizano, O., 2000; Sherrod et al, 2007; Herrick et al, 2013).

Capa 3: 6 km. En esta capa se mantiene la anomalía negativa entre los volcanes Tisingal y Barú, se mantiene con las mismas dimensiones que en la capa de 4 km, lo que puede indicar la extensión en profundidad de la cámara magmática. Se mantiene la anomalía negativa al sureste del Barú cercana al Embalse Barrigón.

La anomalía positiva observada en la segunda capa está al oeste de Punta Burica en el océano Pacífico, se observa en esta capa como una anomalía negativa de -1.5 %.

Las anomalías positivas disminuyen su diámetro, observándose más fuertes en las cercanías del volcán Barú, pudiendo ser restos de las avalanchas de escombros. La anomalía positiva cercana a las costas en el océano Pacífico se mantiene, y al oeste de esta (región fronteriza entre Costa Rica y Panamá) se observa una anomalía negativa de aproximadamente -1.0 %.

Capa 4: 8 km. Las anomalías negativas son más fuertes hacia el sur occidente del Barú, extendiéndose hacia la zona fronteriza con Costa Rica de -4.5 % teniendo una dimensión de 303 km² aproximadamente, lo que podría indicar que la cámara magmática tiende a ubicarse hacia el sur occidente del volcán Barú. Al sureste del Barú, cerca al Embalse Barrigón, se observa la segunda anomalía negativa de -5.5 % con 181 km² de dimensión, la cual ha extendido su diámetro.

Las anomalías positivas a estas profundidades son mucho más fuertes de +6.5%, extendiéndose desde el borde del edificio del Barú hasta las costas de Puerto Armuelles con una dimensión de 908 km², y con un valor aproximado de +5.0% hacia el océano Pacífico. También se observa un brazo con anomalía positiva de +6.5 % que se prolonga hacia la parte N del Embalse Barrigón, lo que se podría asociar con una de las fallas que pasa por el N del Embalse.

Capa 5: 10 km. La anomalía negativa disminuye hacia el sur occidente del Barú, concentrándose fuerte (-5.5 %) entre el volcán Tisingal y el Barú. La anomalía negativa ubicada en las cercanías del Embalse Barrigón también disminuye (-1.5 %).

Las anomalías positivas disminuyen (+4 %) desde el edificio del Barú, y aumentan de +5.0% a +6.5% con una dimensión de 319 km², hacia el sur occidente en la región fronteriza con Costa Rica y la zona de Puerto Armuelles. A esta profundidad la anomalía podría indicar la parte subducida de la Zona de Fractura de Panamá (Z.F.P.), que es una de las fuentes sísmicas más activa de América Central y se extiende bajo el piso oceánico en sentido norte-sur, sirviendo de límite entre las placas del Cocos, al oeste y la de Nazca, al este, lo cual coincide con lo establecido por Camacho (1991), ya que esta continúa en tierra firme a lo largo del eje de Punta Burica. También podría asociarse con la cresta del Coco que también subduce bajo la microplaca de Panamá (Protti, 2012). Podemos apreciar la elipse roja que indica un error en esta coordenada.

Capa 6: 15 km. Las anomalías negativas se intensifican (-4.5%) entre el Tisingal y el Barú, y se extienden hacia el sur occidente en dirección hacia la zona fronteriza entre Costa Rica y Panamá.

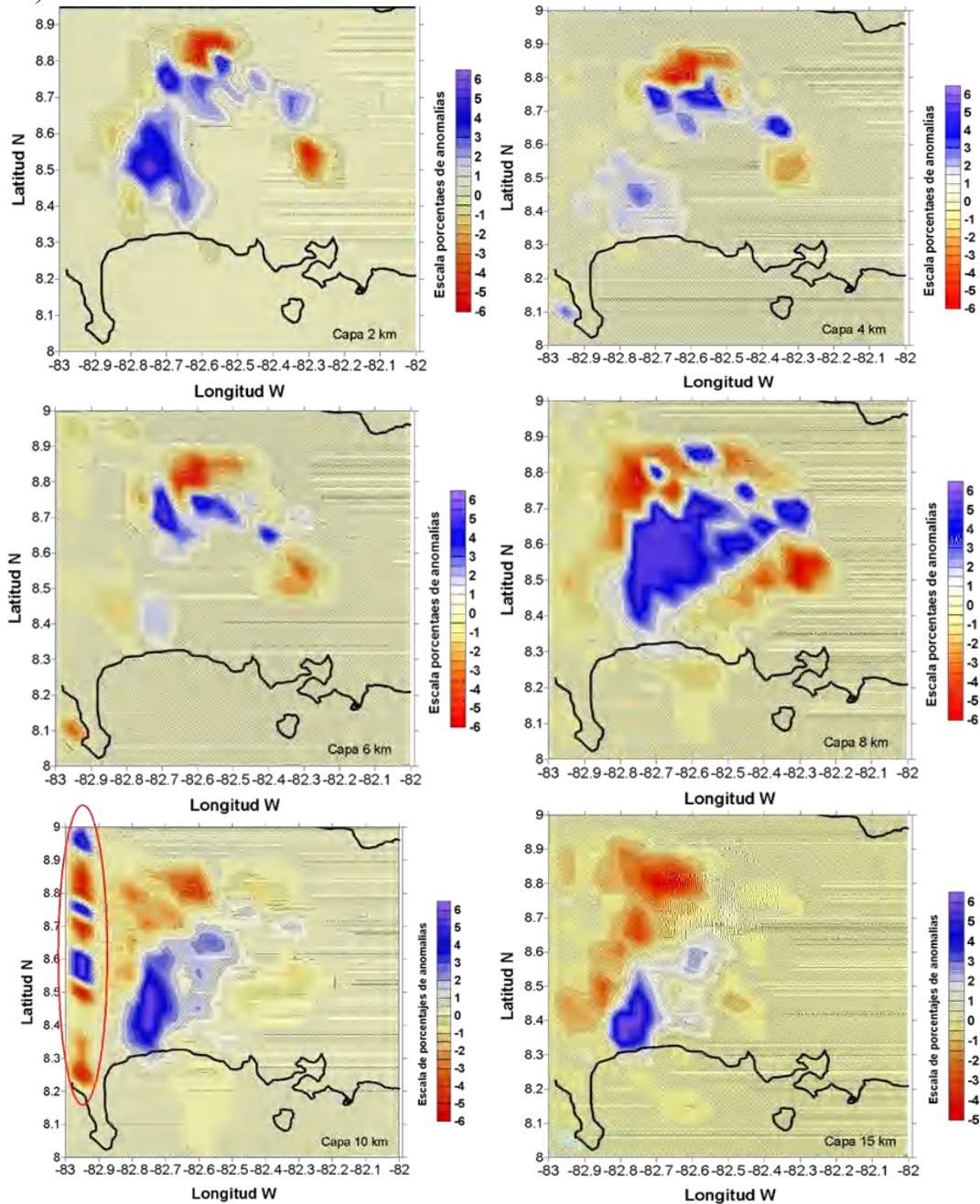
Las anomalías positivas siguen siendo fuertes en las costas del océano Pacífico, región de Puerto Armuelles.

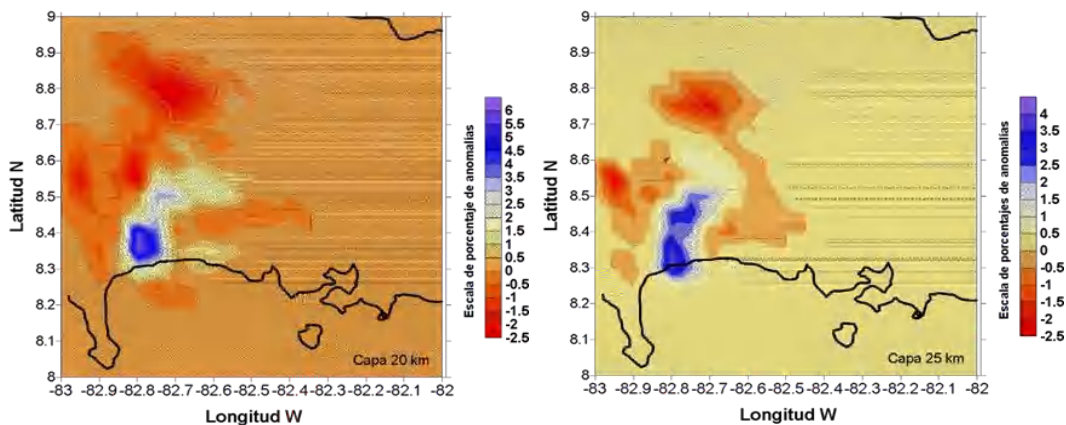
Capa 7 y 8: 20 y 25 km respectivamente. Las anomalías negativas (-3.0 a -2.5 %) entre el Tisingal y el Barú se mantienen, indicando que aún podría existir material magmático a estas profundidades.

Las anomalías positivas (+3.0 a +1.5 %) se mantienen en las costas de Puerto Armuelles, disminuyendo hacia tierra firme, cercano a la base del edificio del Barú.

Figura 5:

Perturbaciones de los porcentajes de anomalías en la zona de estudio. Color rojo: áreas más calientes (anomalías sísmicas donde la velocidad de la onda es menor a la media). Color azul: áreas más frías (anomalías sísmicas donde la velocidad de la onda es mayor a la media).





DISCUSIÓN

Descripción general en las perturbaciones (%) en las diferentes capas de 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20 y 25 kilómetros de profundidad.

En la capa de 2 km el resultado más importante es la anomalía negativa cercana al volcán Barú que se podría relacionar con los primeros cambios de temperatura haciendo referencia a una posible cámara magmática y cercana al Embalse Barrigón al sureste del Barú.

En la segunda capa, 4 km, se destaca la anomalía negativa observada en la primera capa, la cual se mantiene y se desplaza hacia el oeste y aumenta su área de 181 a 242 km² aproximadamente, lo que nos podría indicar que a medida que profundizamos la cámara magmática aumenta su tamaño. Las anomalías positivas se pueden observar en el océano Pacífico, lo cual coincide con las Formaciones Concepción observadas en estudios de batimetría.

En la tercera capa, 6 km, se mantiene el área de la anomalía negativa observada al oeste del Barú.

En la cuarta capa, 8 km, se observa un área mayor de aproximadamente 303 km², teniendo una perturbación mayor en porcentaje, al igual que la anomalía negativa observada en el Embalse Barrigón. Las anomalías positivas aumentan, tanto para el área del Embalse Barrigón que podría coincidir con una de las fallas que cruza por sus cercanías, como para la población de Puerto Armuelles teniendo un área aproximada de 908 km².

En la quinta capa, 10 km, observamos que se mantiene la anomalía cercana al Barú y se extiende hacia el área fronteriza con Costa Rica. Las anomalías positivas aumentan hacia zona Fronteriza con Costa Rica y Puerto Armuelles, lo que podría asociarse con la ZFP.

Las anomalías negativas que se destacan desde los 15 km. podrían asociarse con el inicio de la Cresta del Coco, ya que esta subduce bajo el bloque de Panamá, como se puede mostrar en el corte del estudio de Morell et al, 2013. Estudios batimétricos muestran la somera profundidad que tiene esta cresta (Lizano, 2000), dichas anomalías se extienden débilmente hasta la profundidad de 25 km que se realiza en este estudio. Sin embargo, debemos tomar en cuenta que la resolución a estas profundidades no es convincente, ya que la cobertura de rayos a estas profundidades es limitada.

Por lo tanto, para que esta hipótesis sea más precisa se deben realizar otros estudios como la anisotropía. La misma nos puede brindar mejores interpretaciones sobre la corteza y el magma que puede existir en esta zona, para indicar si estas anomalías negativas son extensiones de la cámara magmática del volcán Barú o podrían proceder de la Cresta del Coco.

CONCLUSIONES

1. Las inversiones de los tiempos de viaje de las ondas P han proporcionado imágenes hasta ahora únicas del interior del sur occidente de Panamá: volcán Barú y costas del Pacífico, que muestran heterogeneidades en la estructura interna del volcán Barú y alrededores, las cuales se deben a la compleja evolución, subducción y tectónica de la zona.
2. Se ha determinado la existencia de una posible cámara magmática al oeste del Barú que se extiende hacia el sur suroeste (SSW).
3. Estos resultados también sugieren que la Zona de Fractura de Panamá continúa subduciendo bajo tierra firme a lo largo de Punta Burica y Puerto Armuelles, lo que explicaría la gran sismicidad registrada en esta zona.
4. Todos estos hallazgos son importantes para el conocimiento de la sismotectónica del sur occidente panameño y la estructura del volcán Barú; sin embargo, se deben contemplar realizar más estudios de la zona, plantearse investigaciones en un área más amplia de la zona, que incluya el punto triple de Panamá y la parte sureste de Costa Rica.
5. Este estudio nos brinda una panorámica sobre erupciones futuras, que permitirá adoptar medidas de evacuación más eficaces de la población circundante de unos 20,000 habitantes.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Adamek, S., Frohlich, C., & Pennington, W.D. (1988). Seismicity of the Caribbean boundary: Constraints on microplate tectonics of the Panama region, *J. Geophys. Res.*, 93, 2053-2075.
- Andrews, D.J. (1989). Mechanics of Fault Junctions, *J. Geophys. Res.*, 94, 9389-9397.
- Arroyo, I., & Linkimer, L. (2021). Geometría de la zona sismogénica interplaca en el sureste de Costa Rica a la luz de la secuencia sísmica de Golfito del 2018. *Geofísica Internacional* 60, 51-75
- Bacon, C.D., Mora, A., Wagner, W.L. & Jaramillo, C.A. (2013). Testing geological models of evolution of the Isthmus of Panama in a phylogenetic framework, *Botanical Journal of the Linnean Society*, 171, 287–300.
- Bowin, C., & McKenzie, D., (1976). The relationship between bathymetry and gravity in the Atlantic Ocean., *J. Geophys. Res., Solid Earth*, 81(11), 1903-1915, <https://doi.org/10.1029/JB081i011p01903>
- Bowland, C., 1984. Seismic stratigraphy and structure of the western Colombian basin (M. A. Tesis), University of Texas at Austin, 195 p.
- Camacho, E. (1991). The Puerto Armuelles Earthquake (Southwestern Panama) of July 18, 1934. *Rev. Geol. Amér. Central*, 13: 1-14.
- Camacho, E., (2003). Sismotectónica del extremo norte de la Zona de Fractura de Panamá. Universidad de Panamá, Laboratorio de Geofísica e Hidrogeología.
- Camacho Astigarrabia, E., (2009). Sismicidad de las Tierras Altas de Chiriquí. *Tecnociencia*, 11. 119-130.
- Case, J.E., Holcome, T.L., Martin, R.G., 1984. Map of geologic Provinces in the Caribbean Region, *Geol. Soc. Am. Memoir*. Pág. 162.
- Corrigan, H.A., Mann, P., Ingle, J. C., 1990. Forearc response to subduction of the Cocos Ridge. Panamá-Costa Rica, *Geol. Soc. Am. Bull.* 102, 628-652.
- Cowan, H.A. L. Sánchez, E. Camacho, J. Palacios, A. Tapia, D. Irving, D. Esquivel & C. Lindholm. (1996). Seismicity and tectonics of Western Panama from new portable

- seismic array data, Final Report to the Research Council of Norway, NTNF-NORSAR, Kjeller, Norway. 23pp.
- Cowan, H.A., Sánchez, L., Camacho, E., Palacio, J., Tapia, A., Irving, D., Esquivel, D. & Lindholm, C., 1995. Seismicity and Tectonic of western Panama from new portable Seismic array data. Final Report to the Research Council of Norway, NTNF-NORSAR. Kjeller, Norway.
- DeBoer, J.Z., Defant, M.J., Stewart, R.H., Restrepo, J.F., Clark, L.F., & Ramirez, A.H. (1988). Quaternary calc-alkaline volcanism in western Panama: regional variation and implication for the plate tectonic framework, *J. S. Am Earth Sci*, 1(3):275–293.
- DeBoer, J.Z., Defant, M.J., Stewart, R.H., & Bellon, H. (1991). Evidence for active subduction below western Panama, *Geology* 19 (1991), pp.649–652.
- DeMets, C. (2001). A new estimate for present-day Cocos-Caribbean plate motion: implications for slip along the Central American volcanic arc, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 4043–4046. <https://doi.org/10.1029/2001GL013518>
- Denyer, P. (2007). Geología y Geotectónica de América Central y el Caribe. Escuela de geología, Universidad de Costa Rica.
- Denyer, P., Montero, W & Alvarado, G., (2003): Atlas tectónico de Costa Rica.- 79 págs. Ed. Univ. Costa Rica, San José.
- Díaz Velarde, G. (1999). Consideraciones a la geología regional del Oeste de Panamá. Academia Mexicana de Ingeniería, México, 37 pp.
- Duncan, R.A., & Hargraves, R.B. (1984). Plate-tectonic evolution of the Caribbean region in the mantle reference frame. In the Caribbean-South American Plate Boundary and Regional Tectonics, 81-93. *Geological Society of America Memoir* 162.
- Fernández, M., Camacho, E., Molina, E., Marroquín, G. & Strauch, W. (2007). Seismicity and neotectonics. En: Bundschum, J. & Alvarado, G.E. (eds.) Central America: Geology, resources, hazards. London, Taylor & Francis, 323-340.
- Fichtner, A., Kennett, B.L.N., Tsai, V.C., Thurber, C.H., Rodgers, A. J., Tape, C., Rawlinson, N., Borchardt, R.D., Lebedev, S., Priestley, K., Morency, C., Bozdağ, E., Tromp, J., Ritsema, J., Romanowicz, B., Liu, Q., Golos, E., & Lin, F-C. (2024). Seismic

Tomography 2024, *Bulletin of the Seismological Society of America* 2024; 114 (3): 1185–1213. doi: <https://doi.org/10.1785/0120230229>

Fisher, D, Gardner, T, Sak, P, Sánchez, J, Murphy, K, & Vanucchi, P, (2004). Active thrusting in the inner forearc of an erosive convergent margin, Pacific coast, Costa Rica, *Tectonics*, 23(5): 13 pp.

Graham, A. (1975). Vegetational paleohistory Studies in Panama and Adyacent Central America/por Alam Graham. En la Botánica y la Historia Natural de Panamá. Pág.163.

Hardy, N. C. (1991). Tectonic evolution of the easternmost Panama. Basin: Some new data and insights, *J. South Am. Earth Sci.* 4, 261-269.

Harmon, R.S. (2005). Geological Development of Panama. In: Harmon, R.S. (eds) The Río Chagres, Panama. Water Science and Technology Library, vol 52. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/1-4020-3297-8_4

Havskov, J., & Ottemoller, L. (2000). SEISAN Earthquake Analysis Software. *Seismo. Research Letters*, 70, 532-534. <http://dx.doi.org/10.1785/gssrl.70.5.532>

Haskov, J., Voss, P., & Ottemoller, L. (2020). Seismological Observatory Software: 30 Yr of SEISAN *Seismological Research Letters*, 91(3): 1846–1852. <https://doi.org/10.1785/0220190313>

Heil, D., & Silver, E. (1987). Forearc uplift south of Panama. A result of transform ridge subduction, *Geol. Soc. Am. Abstracts Prog.* 19, 698.

Heil, D. (1988). Response of and accretionary prism to transform ridge collision, south of Panama. Tesis de Maestría, University of California at Santa Cruz, 156 p.

Heil, D., Silver, E., Mackay, M., & Moore, G. (1986). Effect of obliquely subducting ridge on structural geometry and bathymetry: South Panama, *Geol. Soc. Am. Abstr. Programs*, 19: 698.

Herrick, J. A., (2011). "Recurrent voluminous sector collapses at Volcán Barú, Panama", Master's Thesis, Michigan Technological University. <http://digitalcommons.mtu.edu/etds/324>.

- IRHE, (1985). Estudio de prefactibilidad avanzada del complejo Barú– Colorado, informe geovulcanológico [unpub. report]: Instituto de Recursos Hidráulicos y Electrificación, Informe del Convenio IRHE-BID-OLADE, 74 p. [Smithsonian Institution, Global Volcanism Program library collection.]
- IRHE-BID-OLADE. (1984). Estudio geovulcanológico y evaluación de la amenaza del Volcán Barú. Capítulo III.
- Kellog, J.N., Vega, V., Satallings, T. C., & Aiken, C.A., (1995). Tectonic development of Panama, Costa Rica, and the Colombian Andrés: constraints from Global Positioning System Geodetic studies and gravity en Mann, P. (Ed) Geological and Tectonic Development of the Caribbean Plate Boundary in Southern Central America, *Geol. Soc. Am., Special Paper*, 295, 75-90.
- Kobayashi, D., P. LaFemina, H. Geirsson, E. Chichaco, A. A. Abrego, H. Mora, and E. Camacho (2014), Kinematics of the Western Caribbean: Collision of the Cocos Ridge and upper plate deformation, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 15, 1671–1683, doi:10.1002/2014GC005234
- Kolarski, R.A. & Mann, P. (1990). Combined effects of active underthrusting and strike slip on forearc structure: Pacific margin of southwest Panama, *EOS* 71, 1593.
- Kolarsky R.A. & Mann, P. (1995). Structure and neotectonics of and oblique-subduction margin, southwestern Panama, in Mann P. (Ed.) Geological and Tectonic Development Central America, *Geol. Soc. am Special Paper* 295. Kolarsky, R.A.; Mann P & Montero, W. (1995). Island Arc response to shallow subduction of the Cocos Ridge, in Mann P. (Ed.) Geological and Tectonic Development Central America, *Geol. Soc. am Special Paper* 295, 235-262.
- Moore, G.F.& Sender, K.L. (1996). Fracture zone collision along the South Panama margin. *Geol. Soc. Am., Special Paper* 295, 201-212.
- Morell, K.D., Gardner, T.W., Fisher, D.M., Idleman, B.D., & Zellner, H.M. (2013). Active thrusting, landscape evolution, and late Pleistocene sector collapse of Barú Volcano above the Cocos-Nazca slab tear, southern Central America, *Geological Society of America Bulletin*, 125, 1301-1318.
- La Femina, P., Dixon, T., Govers, R., Norabuean, E., Turner, H., Saballos, S., Mattioli, G., Protti, M., & Strauch, W. (2009). Fore-arc motion and Cocos Ridge collision in Central America., *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10(5): 21 pp

- Linares, O.F., Sheets, P.D. & Rosenthal, E.J. (1975). Prehistoric Agriculture in Tropical highlands., *Science*. 187:137-146.
- Lizano, O. (2000). Batimetría de la plataforma insular alrededor de la Isla del Coco. *Rev. Biol. Trop.* 49. Suplemento 2: 163-170, 2001
- Lonsdale, P. & Klitgord, K.D. (1978). Structure and Tectonic history of the Eastern Panama Basin, *Geol. Soc. Am. Bull.* 89, 981-999.
- Luque, N. (2011). Revisión Catálogo Sísmico Centro América en la Región del Punto Triple Cocos-Nazca-Caribe. Tesis de Maestría, UNAM. México.
- MacDonald, W. (1912). Investigación del Istmo Central de Panamá (Zona del Canal), la región más estudiada y mejor conocida.
- MacKay, M. E., and G. F. Moore (1990), Variation in deformation of the South Panama Accretionary Prism: Response to oblique subduction and trench sediment variation, *Tectonics*, 9(4), 683–698, doi:[10.1029/TC009i004p00683](https://doi.org/10.1029/TC009i004p00683).
- Marshall, J.S. (2007) The Geomorphology and Physiographic Provinces of Central America, vol 1. In: Alvarado GE, Bundschuh J (eds) Central America: geology, resources and hazards. Taylor & Francis, London, pp 75–121.
- Montes, C., Cardona, A., Jaramillo, C., Pardo, A., Silva, J.C., Valencia, V., Ayala, C., Pérez-Ángel, L.C., Rodríguez-Parra, L.A. Ramirez, V., & Niño, H. (2015) Middle Miocene closure of the Central American Seaway, *Science* 348, 6231 pp. 226-229 DOI: [10.1126/science.aaa2815](https://doi.org/10.1126/science.aaa2815)
- Montes, C., Cardona, A., MacFadden, R., Moron, S.E., Silva, C.A., Restrepo-Moreno, S., Ramirez, D.A., Wilson, J., Farris, D., Bayona, G.A., Jaramillo, C., Valencia, V., & Flores, J.A. (2012). Evidence for Middle Eocene and younger emergence in Central Panama: implications for Isthmus closure, *Geological Society of America Bulletin*, DOI: [10.1130/B30528.1](https://doi.org/10.1130/B30528.1).
- Morell, K. D. (2016), Seamount, ridge, and transform subduction in southern Central America, *Tectonics*, 35, 357–385, doi:[10.1002/2015TC003950](https://doi.org/10.1002/2015TC003950)
- Morell, K. D., Fisher, D. M., & Bangs, N. (2019). Plio-Quaternary outer forearc deformation and mass balance of the southern Costa Rica convergent margin. *Journal of*

- Morell, K.D., Gardner, T.W., Fisher, D.M., Idleman, B.D., & Zellner, H.M. (2013). Active thrusting, landscape evolution, and late Pleistocene sector collapse of Barú Volcano above the Cocos-Nazca slab tear, southern Central America. *GSA Bulletin*; 125 (7-8): 1301–1318. doi: <https://doi.org/10.1130/B30771.1>
- Moore, G.F & Sender, K.L. (1995). Fracture zone collision along the South Panama margin, in Mann, P. (Ed) Geological and Tectonic Development of the Caribbean plate Boundary in Southern Central America, *Geol. Soc. Am.*, 295, 201-212.
- New York Times (1930). Diario del 11 de septiembre.
- Okaya, D.A., & Ben-Avraham, Z. (1987). Structure of the continental margin of southwestern Panama: *Geol. Soc. of Am. Bull.*, 99, p. 792-802.
- Pindell, J.L., Barrett, S.F. (1991). “Geological evolution of the Caribbean regional, a plate tectonic perspective”, in The Caribbean Region, Dengo, G., & Case, J.E. editors, <https://doi.org/10.1130/DNAG-GNA-H.405>
- Protti, M., González, V., Freymueller, J. & Doelger, S. (2012). Cocos Island, on Cocos plate, moves at 95 mm/yr towards N33oE and converges with San Andrés Island, on the Caribbean plate, at 78 mm/yr., *Rev. Biol. Trop.* 60 (Suppl. 3 33-41).
- Restrepo, J.F., (1987). A geochemical investigation of Pleistocene to recent calc-alkaline volcanism in western Panama: Tampa, University of South Florida, master’s thesis, 103 p.
- Sallare Ása, V., Dan Äobeitiaa, J.J., & Fluehb, E.R., (1999). Seismic tomography with local earthquakes in Costa Rica. Institute of Earth Sciences Jaume Almera - CSIC, Barcelona, Spain, Research Center for Marine Geosciences GEOMAR, Kiel, Germany.
- Serrano, I., Morales, J., Torcal, F., Vidal, F., & Mancilla, F., (2003). Imágenes Tomográficas en el Sur de España y Marruecos, *Física de la Tierra* 15, 145-162.
- Sherrod, D.R., Vallance, J.W., Tapia Espinosa, A., & McGeehin, J.P., (2007), Volcán Barú: eruptive history and volcanic-hazards assessment: *U.S. Geological Survey Open-File Report*.

- Silver, E.A., Reed, D.L., Tagudin, J.L. & D.L., Heil. (1990). Implications of the North and South Panama Thrust Belts for the origin of the Panama Orocline, *Tectonics* 9, 261-281.
- Strauch, W., Escobar, D., & Lasage, P., (2007). Array alrededor del Barú. Volcano Seismology. Chirinet.Serverftp.org.
- Toral, J. & Ho, C. (2006). Monitoreo y análisis preliminar de la sismicidad alrededor de Boquete, mayo 04-10, 2006. Universidad Tecnológica de Panamá, Centro Experimental de Ingeniería (CEI) Laboratorio de Ingeniería Aplicada (LABIAP) Sección de Sismología, Informe Técnico, 30 págs.
- Vásquez Guardia, F., Camacho Astigarrabía, E. y Rodríguez, A. (2021) Sismotectónica del Occidente de la provincia de Chiriquí a partir de datos de una red sismológica local, *Tecnociencia*, 23(2), 72–92
- Vergara, A. (1988). Tectonic patterns of the Panama Block deduced from Seismicity, gravitational data and earthquake mechanism: Implications to the seismic hazards, *Tectonics*, 154: 253-267.
- Walther, C.H.E., (2003): The crustal structure of the Cocos ridge off Costa Rica, *Journal of Geophysical Research*, 108(B3), 2136.
- Wegner, W., Worner, G., & Harmon, S., & Jicha, B.R. (2011). Magmatic History and Evolution of the Central American Land Bridge in Panama since Cretaceous Times, *GSA Bulletin* 123 (3-4): 703–724. doi: <https://doi.org/10.1130/B30109.1>
- White, R.A., & Harlow, D. (1993). Destructive upper crustal earthquake in Central America since 1900, *Bull. Seismic. Soc. Am.* 83, 1115-1142.
- Wolters, B. (1986). Seismicity and tectonics of southern Central American and adjacent regions with special attention to the surroundings of Panama, *Tectonophysics*, 128: 21-46.
- Zhao, D., Hasewaga, A., Horiuchi, S., 1992. Tomographic imaging of P and S wave velocity structure beneath North-Eastern Japan, *J. Geophys. Res.* 97(19),909–19,928.
- Zhao, D., & Kanamori, H. (1992). P-wave image of the crust and uppermost mantle in southern California. *Geophysical Research Letters*, 19(23), 2329-2332.



Determinación de mecanismos focales compuestos para la región del sistema de fallas Azuero-Soná, Panamá.

Determination of composite focal mechanisms for the Azuero-Sona fault system region, Panama.

Julissa Sanjur

Universidad de Panamá, Instituto de Geociencias, Panamá.
julissasanjur3@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0000-1845-9651>

Arkin Tapia

Universidad de Panamá, Instituto de Geociencias, Panamá.
arkin.tapiae@up.ac.pa
4615

<https://orcid.org/0000-0003-2355-4615>

Néstor Luque

Universidad de Panamá, Instituto de Geociencias, Panamá.
nestor.luque@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0003-4564-1947>

Fecha de recepción: 1 de octubre de 2024

Fecha de aceptación: 21 de noviembre de 2024

DOI [HTTPS://DOI.ORG/10.48204/J.TECNO.V27N1.A6649](https://doi.org/10.48204/J.TECNO.V27N1.A6649)

RESUMEN

En este trabajo se determinaron mecanismos focales compuestos para la región del sistema de fallas Azuero-Soná, en la región sur de Panamá. Esta técnica proporcionó información acerca del régimen de esfuerzos de los bloques tectónicos y correlacionar dichos esfuerzos con la actividad de las fallas y/o sistemas de fallas geológicas del área de estudio. La metodología empleada fue la recopilación de mecanismos focales confiables de la base de datos del Instituto de Geociencias, el procesamiento y clasificación mediante la técnica de mecanismos focales compuesta empleando el programa FMC (Álvarez Gomez, 2015), el análisis de los resultados y la representación de estos empleando el programa GMT (Wessel, P. *et al.* 2019). Los resultados muestran que para la zona de la Isla Coiba la tendencia es consistente con mecanismos focales de desgarre con componente inversa y con componente normal; para la zona de Mariato se presentan mecanismos focales con componente inversa y normal los cual es consistente con un estado de esfuerzos de cizalla en el sistema de fallas Azuero-Soná.

PALABRAS CLAVES

Mecanismos focales compuestos, sistema de fallas Azuero-Soná, sismotectónica, cinturón deformado del sur de Panamá, esfuerzos tectónicos.

ABSTRACT

In this work, the composite focal mechanisms for the region of the Azuero-Soná fault system, the southern region of Panama, were determined. This technique provided information about the stress regime of tectonic blocks and correlated such stresses with the activity of faults and/or geological fault systems in the study area. The methodology used was the compilation of reliable focal mechanisms from the database of the Institute of Geosciences, the processing and classification using the composite focal mechanism technique using the FMC program (Álvarez Gomez, 2015), the analysis of the results and the representation of these using the GMT program (Wessel, P. et al. 2019). The results show that for the area of Coiba Island the trend is consistent with focal mechanisms of tearing with inverse component and with normal component, for the Mariato area there are focal mechanisms with inverse and normal component which is consistent.

KEYWORDS

Compound focal mechanisms, Azuero-Soná fault system, seismotectonics, South Panama deformed belt, tectonic stresses.

INTRODUCCIÓN

La península de Azuero, al sur de Panamá, es una zona que presenta una sismicidad importante desde tiempos históricos. Como ejemplo el primer sismo reportado por los españoles en tierra firme ocurrió el 2 de octubre de 1516 y fue sentido en toda la península de Azuero (Viquez de Pinilla & Toral, 1987). El último sismo destructivo ocurrió el 1 de octubre de 1913 con una magnitud $M_w=6.6$, y causó grandes daños en el suroeste de la península de Azuero (Viquez & Camacho, 1990).

La sismicidad en esta región de Panamá está influenciada por la subducción de la placa de Nazca bajo la microplaca de Panamá (Kolarsky et al., 1995; Rockwell et al., 2010).

Avellaneda (2015) concluyó que en la península de Azuero los lineamientos están dominados por la geología regional, principalmente por la zona de falla Azuero-Soná (ASFZ) con un comportamiento sinistral y que las orientaciones que no son explicadas por ASFZ son anteriores a esta y probablemente asociados a una historia acrecentiva. Este hecho sumado a la extensión deducida por los diques indica una edad relativa del comienzo de ASFZ: el Oligoceno-Mioceno. Además, sugirió que existen 3 zonas de deformación en la península.

Zona 1: áreas Sur de la falla y Norte de la falla, Zona 2: Área intermedia y Zona 3: Norte de la península de Azuero.

Pérez (2015), encontró que la falla Azuero-Soná es una zona de cizallamiento que tiene rocas dúctiles quebradizas, cohesivas, frágiles y angostas, el dominio estructural 2 también contiene una secuencia plegada de carbonatos hemipelágicos (Formación Ocú) y las rocas registran solo un evento de deformación en la sección delgada. Sin embargo, en el campo las correlaciones sugieren que hay al menos dos eventos de deformaciones. Primero fue el cizallamiento de la zona que produjo las milonitas y filonitas y luego otra de rocas Pseudotachylyte, esta es una roca cohesiva vidriosa o de grano muy fino que se presenta como vetas y a menudo contiene inclusiones de fragmentos de roca de pared, estas generadas por un terremoto.

Rodríguez Camaño (2016), relocalizo 401 sismos ocurridos entre 1998 y 2015, registrados por la Red Sismológica de Panamá a cargo del Instituto de Geociencias de la Universidad de Panamá, encontrando, que aparte de mecanismos focales inversos puros hay otros transcurrentes con una componente normal SE, con una componente normal NE, con una componente inversa, normales con direcciones SE y SO. Basándose en estos resultados se elaboró un esquema sismotectónico para el Golfo de Montijo y sus alrededores, y la evaluación de amenaza sísmica para la población de Llano Mariato.

Tapia et al., (2017) realizó el monitoreo sísmico del sistema de Fallas Azuero-Soná, usando un arreglo de estaciones sísmicas. El objetivo de este trabajo fue determinar, a partir de un arreglo de estaciones sísmicas, la principal característica de la tectónica activa del Sistema de Falla Azuero-Soná (SFAS), provincias de Veraguas, Herrera y Los Santos, Panamá. Los mecanismos focales analizados fueron los que presentaron los estándares de residuales, errores en latitud y longitud entre otros. Se subdividió el área de estudio en cuatro (4) subregiones. Entre los mecanismos focales de las diversas subregiones, se centraban en la región de Azuero y el Pacífico donde se localizan una gran cantidad de mecanismos normales, los que en su mayoría fueron consistentes con las diversas fallas de la zona; los mecanismos focales localizados en la zona del golfo de Montijo y área de la costa oeste de Azuero, en el graben, de Quebro, de tipo normal demostrando que en esta zona son fallas normales. En la isla de Coiba, la interacción entre la fractura de Coiba, y las fallas de la Isla Coiba, generan una combinación de mecanismos donde dominan los transcurrentes; también, se identificaron fallas con rumbo norte-sur.

LOCALIZACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO

El área de estudio se ubica al sur del territorio de la República de Panamá, en el cuadrante comprendido entre las coordenadas siguientes: 7.03° norte hasta 8.21° norte y 79.86° oeste

hasta 82.22° oeste (ver la figura 1). Esta ventana incluye las provincias de Los Santos, Herrera y la parte sureste de la provincia de Veraguas.

Figura 1.

Ubicación de la Península de Azuero y Alrededores en la República de Panamá.



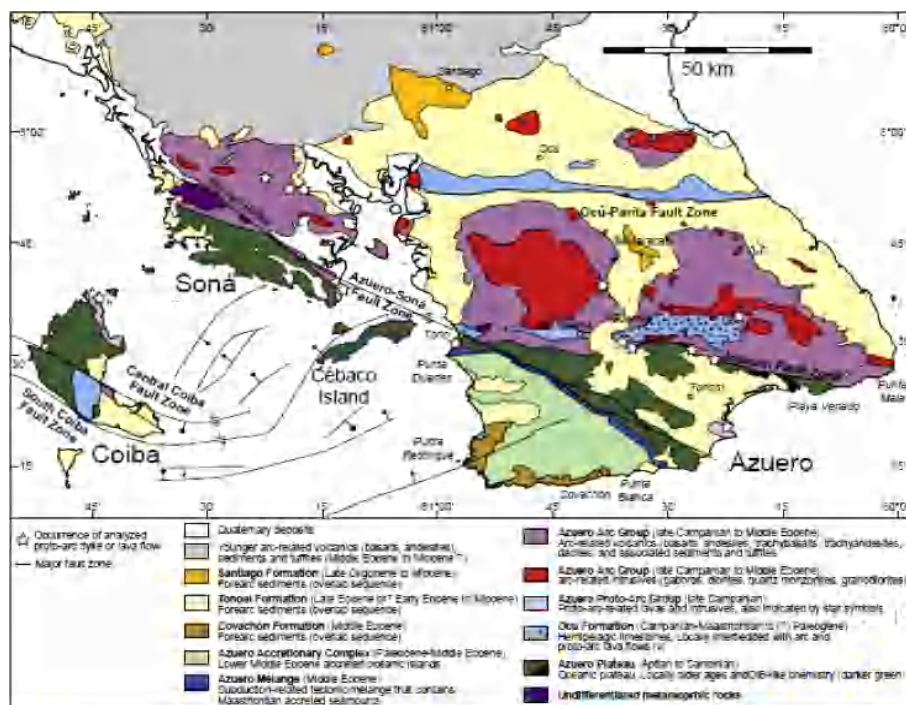
Geología

La península de Azuero ha sido estudiada para conocer la evolución del arco en el margen sur oeste de la Placa del Caribe en el cretáceo tardío, con trabajos geológicos de campo, petrología, análisis geoquímico, datación de rocas y análisis remoto de estructuras en el complejo golfito en Costa Rica y el complejo Azuero en Panamá (Buchs et al. (2010); Corral, et al., 2010, Corral et al, 2011; Kolarsky & Mann, 1995; Mann & Corrigan, 1990; Ortiz-Guerrero, 2024; Recchi, 1969).

En la figura 2, se muestra la geología de Azuero propuesta por Buchs (2010), donde se propone que las rocas mas antiguas de la Península de Azuero, datan de 75 a 73 Millones de años, siendo las más antigua del istmo de Panamá.

Figura 2.

Mapa geológico del Complejo Marginal de Azuero (Buchs et al., 2010)



La mayor parte de la zona de estudio está constituida por materiales volcánicos y volcanosedimentarios que abarcan un rango de edades entre 100,5 hasta 66,0 Millones de años, pertenecientes al arco volcánico generado por la subducción de la placa de Nazca por debajo de la placa del Caribe (Corral et al., 2009).

La característica estructural más sobresaliente de la Península de Azuero es la presencia de la falla de Soná-Azuero, de escala regional, de dirección NW-SE y de tipo desgarre que pone en contacto materiales del complejo Azuero-Soná (basaltos de fondo oceánico) con los materiales del arco-ista cretácico (Kolarsky et al., 1995). Estos últimos están afectados por otras estructuras, tales como fallas regionales de orientación E-W, fallas subparalelas a la falla de Soná-Azuero (NW-SE) y por los intrusivos cuarzodioríticos de El Montuoso y de Vallerico (Corral et al., 2009).

Paleogeográficamente las características geológicas de la Península de Azuero se han interpretado como correspondientes a un arco volcánico de composición calcoalcalina desarrollado sobre una corteza oceánica o plateau oceánico de edad Cretácico Superior Cenozoica (Bowland et al.,1988)

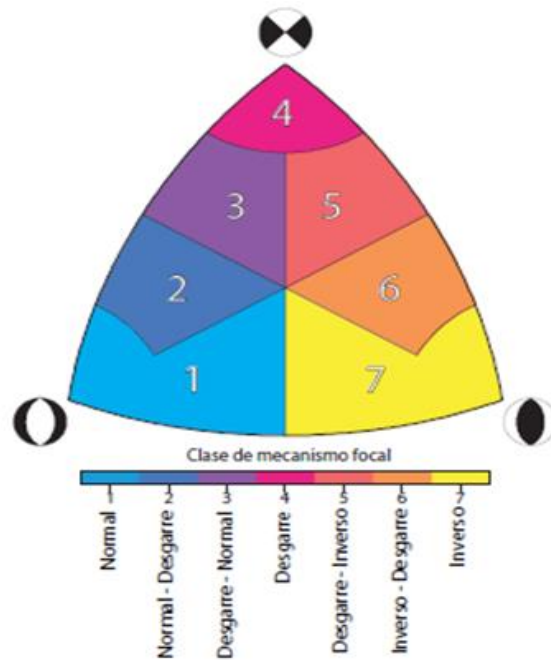
METODOLOGÍA

A partir de 79 sismos con magnitudes $M_w \geq 3.5$, $rms < 1.0$ s y errores de latitud, longitud y profundidad menores a un kilómetro. Para los mecanismos focales compuestos se consideró un error máximo de diez grados. Posteriormente, los mismos se clasificaron utilizando el programa Focal Mechanisms Classification o FMC (Álvarez Gómez, 2014; Álvarez Gómez 2015).

En FMC los datos deben ser ingresados con uno de los dos formatos para mecanismos focales que forman las opciones del programa GMT (Wessel, P. *et al.* 2019), una de ellas es la convención del plano nodal simple de Aki y Richard (1980). Este programa genera un diagrama de clasificación como se muestra en la figura 3, que representa el tipo de ruptura de los mecanismos focales procesados. Con el fin de contar con una clasificación detallada de los mecanismos focales, hay una serie de campos que incluyen los regímenes de deslizamiento oblicuo (Álvarez Gómez , 2015).

Figura 3.

Ejemplo de diagrama de clasificación de mecanismos focales, (Álvarez, 2010)



A partir de esta técnica se obtuvo información de los tipos de mecanismos focales que representan los esfuerzos en los bloques tectónicos del área y se correlacionaron con las fallas geológicas del área de estudio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La clasificación de mecanismos focales compuestos en la región del sistema de Fallas Azuero-Soná, se realizó por subzonas, se separó toda el área de estudio para facilitar el análisis y la interpretación de los resultados. Por lo cual el área de estudio es dividida en Isla Coiba y alrededores y la zona de Mariato, igualmente, por la cantidad de datos sísmicos, estas subzonas son sectorizadas.

Para analizar el papel que desempeña la sismicidad del sitio los diferentes tipos de deformación hemos utilizado el catálogo de mecanismos focales basados en el formato de la convención del plano nodal simple de Aki y Richard (1980).

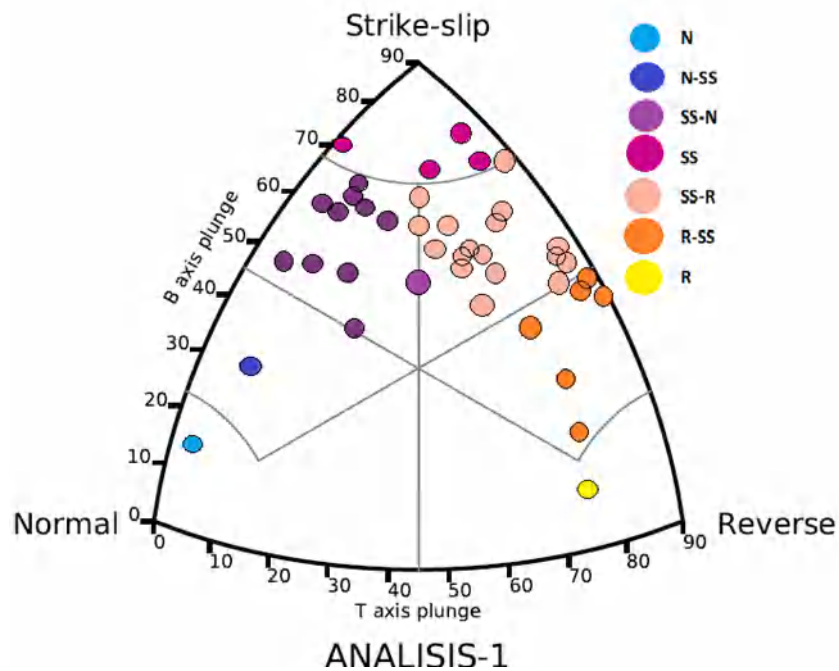
En la figura 4 se muestra el diagrama de mecanismos focales de Isla Coiba y sus alrededores, la misma tiene una tendencia a mecanismos focales de desgarre con componente inversa y mecanismos focales de desgarre con componente normal.

En general el régimen de esfuerzo predominante en la zona es de cizalla, las fuerzas actúan en paralelo, pero en direcciones opuestas. El esfuerzo a lo largo de una falla no es homogéneo, también encontramos esfuerzos de extensión y compresión.

En la clasificación de mecanismos focales compuestos, en la subregion de Isla Coiba y sus Alrededores, se subdividió en grupos de mecanismos focales para obtener una mejor interpretación del régimen de esfuerzos, predominando en esta subzona mecanismos focales compuestos.

Figura 4.

Diagrama de mecanismos focales compuestos de Isla Coiba y sus alrededores.



La Tabla 1 lista los mecanismo focales de la figura 5, que son de desgarre con componente inversa y normal, indicando que comportamiento general la falla al suroeste de la isla coiba es transcurrente y el regimen de esfuerzo para esta zona es de cizalla.

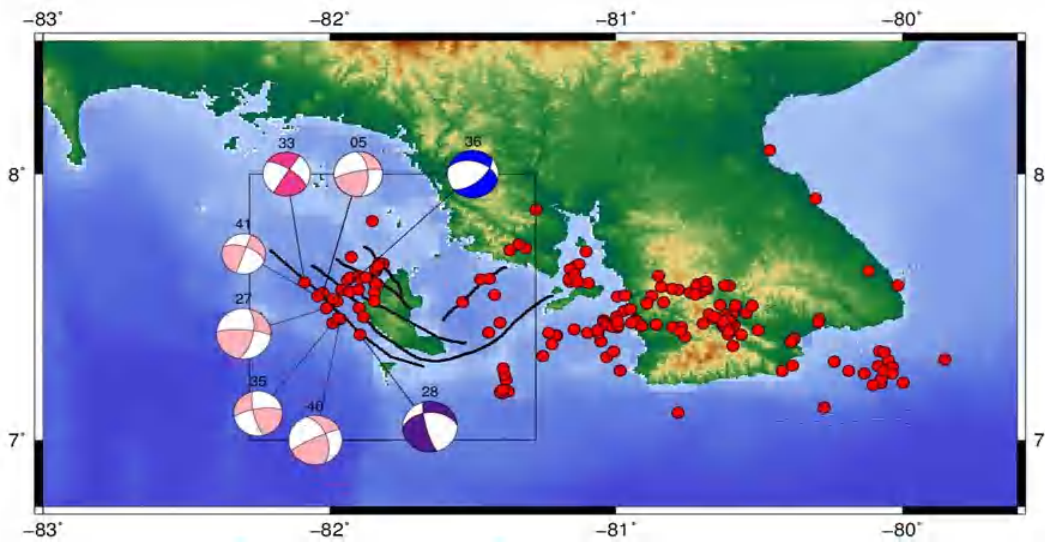
Tabla 1.

Mecanismos focales de sismos al Suroeste de Coiba que aparecen en la figura 5.

Longitud	Latitud	Profundidad	Strike	Did	Rake	Magnitud	ID	MFC
-82.011	7.496	10	11	62	15	4.5	27	SS-R
-82.024	7.554	10	356	56	13	4	28	SS-N
-82.088	7.593	10	304	70	2	3.9	33	SS
-81.989	7.44	10	261	73	15	4	35	SS-R
-81.988	7.531	10	285	45	-44	4.2	36	N-SS
-81.962	7.455	10	340	53	9	4.4	40	SS-R
-82.024	7.554	10	356	56	13	4	5	SS-R
-82.041	7.51	10	20	90	30	3.6	41	SS-R

Figura 5.

Mecanismos focales al suroeste de Coiba.



En la Tabla 2 se muestra el listado de los sismos de la figura 6, donde la mayoría de los epicentros de sismos se presentan al noroeste de Isla Coiba exactamente en la costa y en el mar, los resultados de esta clasificación nos mecanismos focales de desgarre con componente inversa y normal, asociados a la falla coiba y fallas al noroeste de Isla Coiba, dando como resultado un regimen de esfuerzos de cizalla o esfuerzos laterales.

Figura 6.
Mecanismos focales al noroeste de isla Coiba.

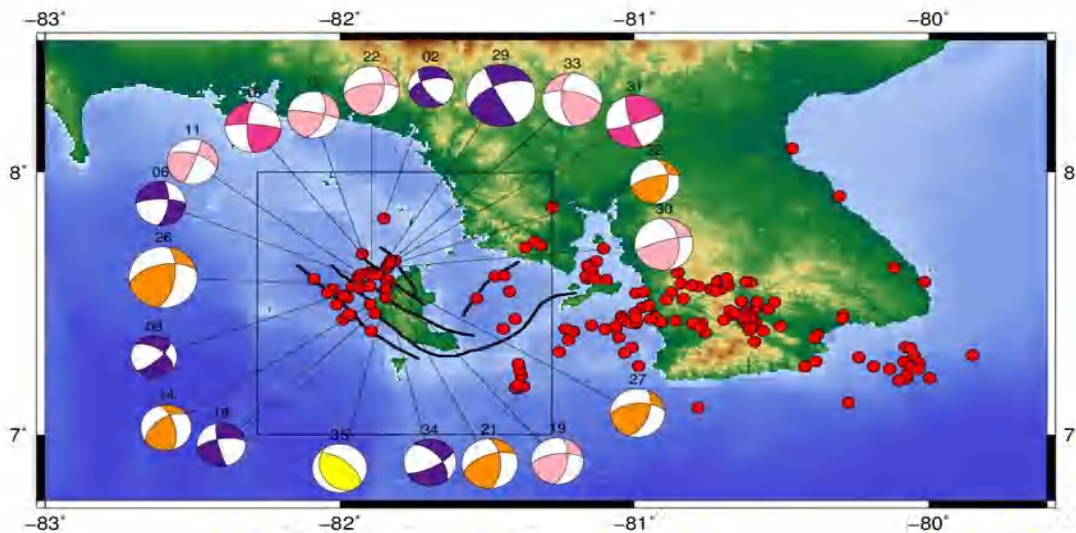
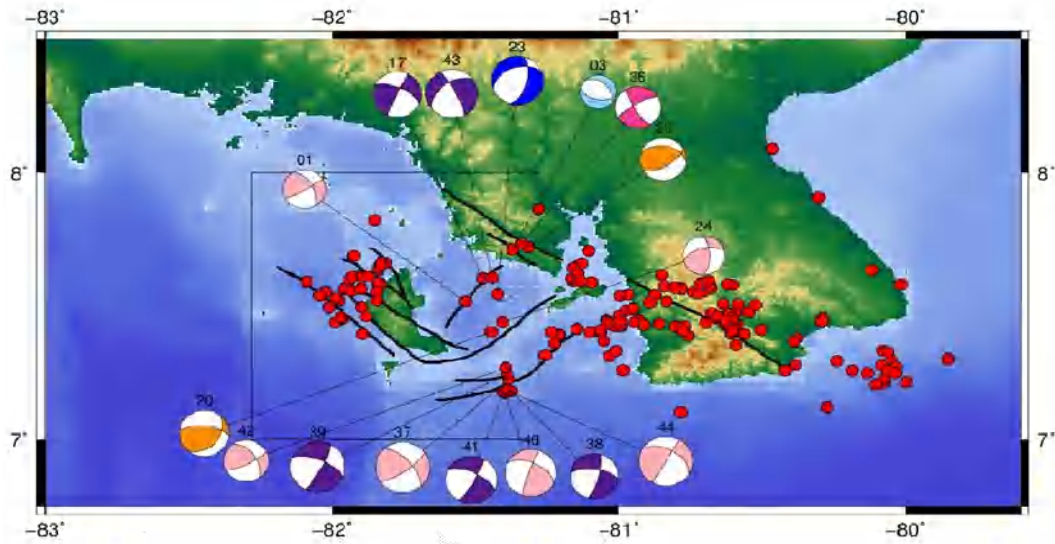


Tabla 2.
Mecanismos focales de sismos al noroeste de Coiba que aparecen en

Longitud	Latitud	Profundidad	strike	Did	Rake	Magnitud	ID	MFC
-81.851	7.824	10	148	67	7.522	3.7	2	N-SS
-81.938	7.601	10	270	74	-25	4	6	N-SS
-81.931	7.558	10	304	56	-22	3.7	8	N-SS
-81.882	7.463	10	167	80	-22	3.9	18	N-SS
-81.874	7.611	10	153	85	-29	5.6	29	N-SS
-81.924	7.688	10	274	80	18	4.5	16	SS
-81.813	7.663	10	163	77	7	4.7	31	SS
-81.928	7.611	10	21	85	30	4.1	11	SS-R
-81.899	7.618	10	16	56	10	4.2	12	SS-R
-81.831	7.584	10	9	59	30	4.2	19	SS-R
-81.893	7.608	10	11	55	30	4.5	22	SS-R
-81.838	7.636	10	354	47	15	4.7	30	SS-R
-81.831	7.655	10	282	66	34	4.8	33	SS-R
-81.841	7.587	10	359	58	35	4.5	21	R-SS
-81.899	7.566	10	9	62	40	5.5	26	R-SS
-81.839	7.589	10	20	57	40	4.4	27	R-SS
-81.897	7.497	10	345	62	40	4.1	14	R-SS
-81.839	7.644	10	5	46	27	4	32	R-SS
-81.844	7.522	10	309	61	78	4.4	35	R

Figura 7.
Mecanismo focales al NE y SE de isla coiba



En la tabla 3 aparecen listados los eventos mostrados en la figura 7, donde se observan mecanismos focales de desgarre con componente inversa y normal, asociados a la falla al

sureste de la Isla Coiba y otros correlacionadas con con fallas geologicas al noreste de la Isla Coiba, dando como resultado para ambas fallas transcurrentes, predominan en esta zona de esfuerzos de cizalla.

Tabla 3.

Mecanismos focales de sismos al NE y SE de Coiba que aparecen en la figura 7.

Longitud	Latitud	Profundidad	strike	Did	Rake	Magnitud	ID	MFC
-81.371	7.714	10	311	43	-68	3.0	3	N
-81.424	7.546	10	250	45	-44	4.3	23	N
-81.397	7.175	10	295	55	9	4.2	40	SS-R
-81.394	7.27	10	64	77	38	3.7	42	SS-R
-81.395	7.189	10	301	50	0	4.4	44	SS-R
-81.384	7.226	10	55	76	27	4.5	37	SS-R
-81.405	7.441	10	359	66	33	3.5	24	SS-R
-81.536	7.519	10	60	87	34	3.5	1	SS-R
-81.376	7.183	10	277	64	-15	4.0	38	SS-N
-81.39	7.247	10	293	66	-12	4.5	39	SS-N
-81.404	7.18	10	296	64	-10	4.2	41	SS-N
-81.442	7.607	10	234	53	-15	4.3	43	SS-N
-81.473	7.604	10	294	65	0	4.0	17	SS-N
-81.34	7.736	10	147	77	-14	3.7	36	SS
-81.445	7.404	10	39	41	41	4.1	20	R-SS
-81.316	7.721	10	59	62	67	3.8	25	R-SS

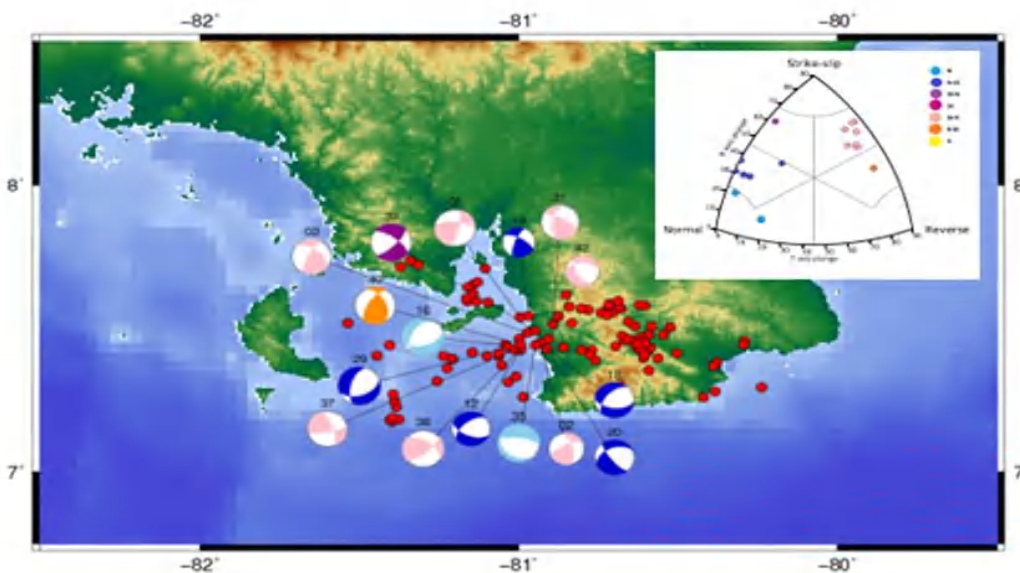
En la zona de Mariato y sus alrededores los sismos aparecen listados en la tabla 4 y se muestra la figura 8. Aquí los mecanismos focales son transcurrente con una componente inversa y normal. En esta zona predominan un sistema de fallas geologicas activas, la zona de falla Azuero-Soná (ZFAS), según los tipos de mecanismos focales, los esfuerzos que actuan son de cizalla y de tensión.

Tabla 4.

Mecanismo focales en la zona de Mariato y alrededores , figura 8

Longitud	Latitud	Profundidad	Strike	D/d	Rake	Magnitud	ID	MFC
-80.995	7.54	10	13	76	29	4.1	1	SS-R
-80.932	7.451	10	345	62	22	3.5	2	SS-R
-80.973	7.485	10	309	54	19	3.9	3	SS-R
-81.012	7.426	11	79	73	25	3.9	37	SS-R
-80.993	7.43	10	49	70	38	4.1	38	SS-R
-80.892	7.514	10	295	71	37	3.8	31	SS-R
-80.995	7.424	10	112	55	-44	3.8	12	N-SS
-80.969	7.544	10	300	67	20	3.3	19	N-SS
-80.911	7.429	10	141	75	-47	3.9	20	N-SS
-81.034	7.434	10	71	48	-47	4.2	29	N-SS
-80.93	7.447	10	96	52	-50	3.9	18	N-SS
-80.906	7.464	10	147	60	-54	3.4	42	N-SS
-81.043	7.444	10	72	53	-64	4.2	16	N
-80.947	7.441	10	124	27	-66	4.2	35	N
-80.95	7.492	10	307	67	-19	4.1	39	SS-N
-80.995	7.446	7	333	48	39	4.1	40	R-SS

Figura 8.
Mecanismo focales en la zona de Mariato y alrededores



DISCUSIÓN

Con el uso de la herramienta FMC los datos de eventos sísmicos en la zona de Azuero y alrededores, se registraron soluciones de mecanismos focales transformantes, en la zona de estudio por las fallas oblicuas presentes en Isla Coiba, predominando así en esta zona esfuerzos de cizalla.

La zona de estudio esta relativamente cerca de la zona de contacto de la Placa de Nazca que subduce de manera oblicua por debajo de la microplaca de Panamá, este contacto con produce fallas de tipo transcurrente, algunas veces con componentes inversas y normales.

La mayoría de los eventos sísmicos registrados estan relacionados a estas fallas geologicas. Aunque en la Cuenca Cebaco hay comportamientos geologicos estructurales que solo estan definidos por algunos autores.

CONCLUSIONES

Los mecanismos focales de eventos sísmicos en el sur de la península de Azuero y sus alrededores tienden a estar asociados a fallas transcurrentes y a esfuerzos de cizalla.

Los resultados nos indican que los comportamientos que se registran en estas fallas no son homogéneos, en isla Coiba y sus alrededores existen un conjuntos de fallas activas transcurrentes con componentes inversas y normal.

Para la zona de Mariato y áreas aledañas el conjunto de fallas presentan fallas transcurrentes con una componente inversas y otras con componente normal que estan asocicadas al sistema de falla Azuero-Soná (ASFZ) y tienen un estado en sus esfuerzos de cizalla.

RECOMENDACIONES

Es importante continuar con los estudios de los mecanismos focales para la determinación de fallas activas que no necesariamente presentan expresiones en superficie y están acumulando esfuerzos tectónicos en el territorio nacional, lo que representa niveles de amenaza sísmica a considerar.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto de Geociencias, a su personal por la colaboración en la ejecución de este proyecto, en facilitarnos los datos y programas para el análisis de estos y, en todas las gestiones realizadas para el desarrollo y la culminación exitosa del trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Aki, K., & Richards P.G. (1980). *Quantitative Seismology: Theory and Methods*, W. H. Freeman, San Francisco, California.
- Álvarez-Gómez, J. A., 2015. FMC – A program to manage, classify and plot focal mechanism data, Facultad de Geología, Universidad Complutense de Madrid, Madrid.
- Álvarez-Gómez, J. A., (2014). FMC: a one-linear Python program to manage, classify and plot focal mechanisms. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 16, EGU2014-10887.
- Álvarez-Gómez, J. A., 2009. Tectónica activa y Geodinámica en el norte de Centroamérica, Ph.D. thesis, Universidad Complutense de Madrid, Madrid.
- Avellaneda, D., (2015). Caracterización estructural y de lineamientos de la Península de Azuero, Departamento de Geociencias, Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes, Bogotá, D.C, Colombia.
- Buchs, D., Arculus, R., Baumgartner, P., Baumgartner-Mora, C., & Ulianov, A., (2010). Late Cretaceous arc development on the SW margin of the Caribbean Plate: Insights from the Gofito, Costa Rica, and Azuero, Panama, complexes: South Central American Arc Initiation. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 11(7).
- Casini, G. & Virginia, Y. (2015). Cálculo del mecanismo focal utilizando el método de la polaridad de la onda P [Tesis para el Título Profesional de Física], Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional de San Marcos, Lima, Perú, 106 p.
- Corral, I., Cardellach, E., Gómez-Gras, D., & Canals, A. (2009). Contribución al conocimiento de la geología del depósito de Au Cu de "La Pava" (Península de Azuero, Panamá), *Geogaceta*, 46.
- Corral, I., Grier, A., Gómez-Gras, D., Corbella, M., & Cardellach, E. (2010). Geochemical evolution of the Panamanian Cretaceous-Paleogene volcanic arc: Insights from the Azuero Peninsula, SW Panama. *Geogaceta*, 49, 79-82
- Corral, I., Grier, A.; Gómez-Gras, D.; Corbella, M.; Canals, A.; Pineda-Falconett, M.; Cardellach, E (2011). Geology of the Cerro Quema Au-Cu deposit (Azuero Peninsula, Panama), *Geologica Acta*, 9(3-4), 481-498 doi: <https://doi.org/10.1344/105.000001742>.
- Frohlich, C., & Apperson, K.D., (1992). Earthquake focal mechanisms, moment tensors, and consistency of seismic activity near plate boundaries. *Tectonics* 11 (2), 279-296.

- Giner, J.L.; de Vicente, G., & Lindo, R. (1996). Estado de esfuerzos actuales en el centro peninsular a partir del análisis conjunto de mecanismos focales de terremotos, *Geogaceta*, 20 (4), 996-999.
- Kolarsky, R., & Mann, P. (1995). Structure and neotectonics of an oblique-subduction margin, southwestern Panama in *Geologic and Tectonic Development of the Caribbean Plate Boundary in Southern Central America*, Paul Mann (editor). Geological Society of America Special Paper 295.
- Mann, P., & Corrigan, F. (1990). Model for late Neogene deformation in Panama. *Geology*; 18 (6): 558–562. doi: [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1990\)018<0558:MFLNDI>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1990)018<0558:MFLNDI>2.3.CO;2)
- Ortiz-Guerrero, Montes, C., Farris, W., Agudelo, Ariza, M., Ayala, J., Avellaneda, D., Cortes-Calderón, A., Gaitang, E., Garzon, S., Gongora-Blanco, D., Jara, N.A., Meza-Calai, J.C., Perez-Angel, L., Pineda-Rodríguez, N., Rodriguez-Parral, A., Revelo-Obando, B., Rubiano, C., Stiles, E., Urdaneta, M.P. Zuluaga, N., Lamus, F., Moreno, F., & Rincon, A. (2024). Crustal structure of the Western Azuero Peninsula, Panama: Insights into the structure of accretionary complexes and forearc ophiolites. *International Geology Review*, 66(1), 172–195. <https://doi.org/10.1080/00206814.2023.2191678>© 2023
- Ortiz-Panchi, O.C. (2013). Sismotectónica y peligrosidad sísmica en Ecuador [Tesis de Maestría], Máster en Geología Ambiental y Recursos Geológicos, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, 52 p.
- Pérez, J.L., Salcedo-Hurtado, E.J., & Mora-Páez, H. (2014). Análisis sismotectónico regional como contribución al estudio de las fuentes sismogénicas locales en la zona del embalse Calima, Valle del Cauca, Colombia, *Boletín de Geología*, 36 (2): 101-124.
- Pérez, Lina Camila. (2015). Structural Characterization of the Azuero-Sona Fault Zone, Departamento de Geociencias, Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes, Bogotá, D.C, Colombia.
- Recchi, G. (1969). Mapa geológico del área del Proyecto Minero de Azuero, Naciones Unidas Programa para el Desarrollo, [Panamá]: República de Panamá, Administración de Recursos Minerales.
- Rockwell T.K., Bennett, R.A., Gath, E., & Franceschi, P. (2010). Unhinging an indenter: A new tectonic model for the internal deformation of Panama, *Tectonics*, 29, TC4027,

doi:10.1029/2009TC002571.

- Rodríguez Camaño, K. M. (2016). Sismotectónica del Golfo de Montijo y sus alrededores provincia de Veraguas, Escuela de Física, Departamento de Física, Facultad de Ciencias Naturales Exactas y Tecnología, Universidad de Panamá, Panamá.
- Tapia A., Luque N., Camacho A. E., Chichaco E., & Gil J. (2017). Monitoreo Sísmico del Sistema de Fallas Azuero-Soná, usando un arreglo de estaciones sísmicas, Instituto de Geociencias, Universidad de Panamá.
- Udías, A. 1989. Parámetros del foco de los terremotos. *Física de la Tierra* 1, 87-104.
- Viques, V. & Camacho, E. (1990). El terremoto de Tonosí del 2 de octubre de 1913. *Humanidades*
- Viquez de Pinilla, V., & Toral J. (1987). Sismicidad histórica sentida en el istmo de Panamá, *Revista Geofísica*, 27, 135-165.
- Wessel, P., Luis, J., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W. H. F., & Tian, D. (2019). The Generic Mapping Tools Version 6. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20 (11), 5556–5564. <https://doi.org/10.1029/2019GC008515>