

TECNOCIENCIA

Volumen 26, No. 2
julio - diciembre 2024

Publicación semestral

UNIVERSIDAD DE PANAMÁ
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES,
EXACTAS Y TECNOLOGÍA



Autoridades de la Universidad de Panamá

Eduardo Flores Castro
Rector

José Emilio Moreno
Vicerrector Académico

Jaime Javier Gutiérrez
Vicerrector de Asuntos Estudiantiles

Mayanín Rodríguez
Vicerrector de Asuntos Estudiantiles

Ricardo Him Chi
Vicerrector Administrativo

José Luis Solís
Director de Centros Regionales

Ricardo A. Parker D.
Secretaría General

José Álvaro
Presidente de la Asociación de Profesores

Consejo Editorial

Directora

Dra. Magaly de Chial

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

Editor Jefe

Dr. Eduardo Camacho Astigarrabia

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

Consejo

Mgter. Roberto Cambra

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

Dr. Enrique Medianero.

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

Dr. Armando Durant.

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

Mgter. Aurora Mejía

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

Dr. Janzel Villalaz

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

Mgter. Jacobo Araúz

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

Dr. Jaime Gutiérrez

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

Dra. María de Stapp

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

Dr. Josep Batlló i Ortiz

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

Dr. Bruno Zachrisson

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

Dr. Luis Wong Vega

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

Dr. Fernando Gómez Merino

Colegio de Postgraduados, México
fernandg@colpos.mx

Dr. Edgardo Castro

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

Dra. Yaxelis Mendoza

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

Comité de diagramación, estilo y producción

Dr. Eduardo Camacho Astigarrabía

Universidad de Panamá - Editor Jefe

Michelle Ferrín

Universidad de Panamá - Secretaría

Ing. Samuel Rodríguez, Lic. Rigo - Universidad de Panamá - Técnicos

EDITORIAL

La revista *Tecnociencia* completa con este número 26 años de publicación ininterrumpida. A lo largo de estos, se ha convertido en referente de la divulgación de la investigación científica y tecnológica en la República de Panamá. La revista tiene logros notables como su indexación en Latindex y Panindex y está gestionando su incorporación Scopus.

El presente número, 26-2 inicia con un estudio en el área de la Física Medica sobre el uso del software Gean4 para diseñar experimentos que no comprometan la salud humana. También se presenta una herramienta en línea para abordar un problema de frontera del tipo Dirichlet, empleando Geogebra.

En el área de Biología Marina se presenta la evaluación de longitud y el crecimiento de las especies de pargo, *Lutjanus guttatus*, *L. peru* y *L. argentiventris*, descargados en Búcaro, Panamá, cuyos resultados son un aporte al estudio de la Biología Marina de esta zona del Pacífico centroamericano. Se presenta un estudio sobre ectoparásitos del mero *Epinephelus labriformis*, que reportan por primera vez la presencia de estos trematodos en este pez en aguas panameñas. Igualmente, en un estudio de actualización sobre las aves marinas de la costa del Pacífico de Panamá, se registraron treinta y nueve especies de aves marinas de 11 familias diferentes agregando tres nuevas especies a la lista de aves de Panamá.

Dentro del área de Biología de la Conservación, un estudio sobre la distribución geográfica de primates panameños utilizando el software Maximum Entropy (MaxEnt) se determinó los mejores modelos de hábitat para cada subespecie y se identificaron áreas cruciales para dirigir esfuerzos de conservación en la diversidad de primates en Panamá. En esa misma línea otro estudio reporta la ocurrencia de *Leopardus tigrinus* *oncilla* del este de Panamá y confirma la importancia del bosque nuboso del Darién para su conservación.

Se reportan 100 especies, incluidas en 29 familias y 10 órdenes, identificándose 43 especies consideradas amenazadas, distribuidas en 12 familias y siete órdenes en estudio sobre las aves de la Reserva Hídrica del Cerro Turega (RHCT), Coclé, Panamá

Empleando SIG se evaluó la diversidad de serpientes en el Occidente de la provincia de Chiriquí, Panamá, considerando las influencias antropogénicas en los microhábitats.

En el área de Matemáticas se analizan minuciosamente los procedimientos que empleó Leonhard Euler para demostrar la irresolubilidad del problema de los puentes de Königsberg y para determinar la posibilidad de recorrer cualquier configuración de aguas y puentes.



Dr. Eduardo Camacho Astigarrabía

Editor

ÍNDICE

TÍTULO	PÁGINAS
ESTUDIO DE INTERACCIONES EN UN CICLOTRÓN DE 16,5 MEV: IMPACTO EN BLANCO E INDUCCIÓN DE ACTIVIDAD.....	7-30
EVALUACIÓN A CORTO PLAZO DE LA BIOMETRÍA Y CRECIMIENTO DE LUTJANUS GUTTATUS, LUTJANUS PERU Y LUTJANUS ARGENTIVENTRIS, BÚCARO, PANAMÁ.....	31-50
CREACIÓN DE HERRAMIENTA EN LÍNEA, ÚTIL PARA ABORDAR UN PROBLEMA DE VALORES EN LA FRONTERA DEL TIPO DIRICHLET.....	51-67
DISTRIBUCIÓN Y CONSERVACIÓN DE PRIMATES PANAMEÑOS USANDO MÁXIMA	68-93
PRIMER REPORTE DE ECTOPARÁSITOS DIGÉNEOS DE LA FAMILIA DIDYMOZOIDAE EN EL MERO <i>Epinephelus labriformis</i> (SERRANIDAE: EPINEPHELINAE) EN EL GOLFO DE PANAMÁ.....	94-100
THE ONCILLA LEOPARDUS TIGRINUS ONCILLA (SCHREBER, 1775): REPORTING ITS OCCURRENCE AT CHUCANTÍ PRIVATE NATURAL RESERVE, DARIEN, PANAMA.....	101-109
SIMPLE AND LOW-COST SYNTHESIS OF Li_2FeSiO_4 CATHODE MATERIALS BY MECHANICAL ACTIVATION USING A Fe^{3+} PRECURSOR	110-125
ANÁLISIS DETALLADO DE LOS PROCEDIMIENTOS EMPLEADOS POR LEONHARD EULER PARA RESOLVER EL PROBLEMA DE LOS PUENTES DE KÖNIGSBERG, SU RELACIÓN CON EL ORIGEN DE LA TEORÍA DE GRAFOS Y LOS OBJETIVOS DE LA EDUCACIÓN MATEMÁTICA.....	126-140
PROSPECCIÓN CON SERPIENTES EN CUATRO DISTRITOS DE LA PROVINCIA DE CHIRIQUÍ CON APLICACIÓN DEL SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG).....	141-154
LAS AVES DE LA RESERVA HÍDRICA DEL CERRO TUREGA, DISTRITO DE PENONOMÉ, PROVINCIA DE COCLÉ, PANAMÁ.....	155-172
SEABIRDS OFF THE PACIFIC COAST OF PANAMA: OBSERVATION FREQUENCY, DISTRIBUTION AND SEASONALITY.....	173-195



ESTUDIO DE INTERACCIONES EN UN CICLOTRÓN DE 16,5 MEV: IMPACTO EN BLANCO E INDUCCIÓN DE ACTIVIDAD

STUDY OF INTERACTIONS IN A 16.5 MEV CYCLOTRON: IMPACT ON TARGET AND INDUCTION OF ACTIVITY

Nicole Moreno H.

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Física, Panamá. nicole.moreno@up.ac.pa <https://orcid.org/0009-0003-5816-6337>

Francisco Jiménez Spang

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Física, Panamá. francisco.jimenez-s@up.ac.pa <https://orcid.org/0009-0005-1775-4444>

Bernardo Fernández

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Física, Panamá. bernardo.fernandezg@up.ac.pa <https://orcid.org/0000-0002-7947-3147>

Fecha de recepción: 30 de agosto de 2023

Fecha de aceptación: 30 de enero de 2024

DOI [HTTPS://DOI.ORG/10.48204/J.TECNO.V26N2.A5390](https://doi.org/10.48204/J.TECNO.V26N2.A5390)

RESUMEN

Los ciclotrones son aceleradores de partículas cargadas, como protones o iones, para que colisionen con blancos escogidos, generando reacciones nucleares. Estas reacciones producen otras partículas que son radiactivas o sea que emiten radiación al desintegrarse. Para optimizar el estudio de los procesos, estas interacciones se simulan mediante el método Monte Carlo. Esto permite predecir la radiactividad producida en los blancos del ciclotrón y establecer los controles respectivos. Para realizar estas simulaciones en detalle, se empleó el software Geant4, una herramienta esencial en el campo de la física de partículas y de radiaciones. Los resultados obtenidos demostraron ser de suma relevancia porque con la simulación se obtuvieron valores de actividad similares a los obtenidos mediante la experimentación, con lo que podemos ver a Geant4 como una herramienta útil para estimar la radiactividad y en consecuencia diseñar la experiencia, sin comprometer la salud humana.

PALABRAS CLAVES

Física médica, actividad, ciclotrón, simulación de Monte Carlo.



ABSTRACT

Cyclotrons accelerate charged particles such as protons or ions so that they collide with chosen targets, generating nuclear reactions. These reactions produce other particles that are radioactive, meaning they emit radiation when they decay. To optimize the study of the processes, these interactions are simulated using the Monte Carlo method. This allows predicting the radioactivity produced in the cyclotron targets and setting the respective controls. To carry out these simulations in detail, the Geant4 software was used, which is an essential tool in the field of particle and radiation physics. The results obtained proved to be of utmost relevance because with the simulation activity values like those obtained through experimentation were obtained, with which we can see Geant4 as a useful tool to estimate radioactivity without compromising human health.

KEY WORDS

Medical physics, activity, cyclotron, Monte Carlo simulation.

INTRODUCCIÓN

El empleo de ciclotrones como aceleradores de partículas para la generación de radionucleidos, se ha difundido ampliamente a nivel global. Hasta la fecha, en los países miembros del Organismo Internacional de Energía Atómica, se han contabilizado, alrededor de 1500 ciclotrones instalados, con niveles energéticos que oscilan entre 7 y 100 MeV (IAEA, 2021). Los ciclotrones poseen una utilidad considerable en la producción de radioisótopos de relevancia médica. Dado que la energía de enlace promedio por nucleón en los núcleos ronda los 8 MeV, se comprende que cuando la energía de una partícula incidente (llamada proyectil) excede esta cifra, la reacción nuclear consiguiente resultará en la emisión de partículas del núcleo objetivo. Así, al elegir con cuidado el núcleo objetivo, la partícula proyectil y su energía, se viabiliza la generación de una amplia gama de radioisótopos.

La Tomografía por Emisión de Positrones (PET) es una técnica de imagenología altamente sensitiva que permite un mapeo tridimensional de radiofármacos emisores de positrones administrados en cantidades minúsculas sin causar efectos fisiológicos o farmacológicos (Borrajó-Sánchez & Cabrero-Fraile, 2010) (Lameka, Farwell, & Ichise, 2016). Eso hace que sea un procedimiento excelente para obtener imágenes de tipo no invasivo, en un amplio rango de investigaciones y aplicaciones clínicas. Además, facilita la evaluación de procesos biológicos y bioquímicos ya que permite realizar estudios en el modo dinámico, por ejemplo, medir a lo largo del tiempo, la actividad metabólica celular.

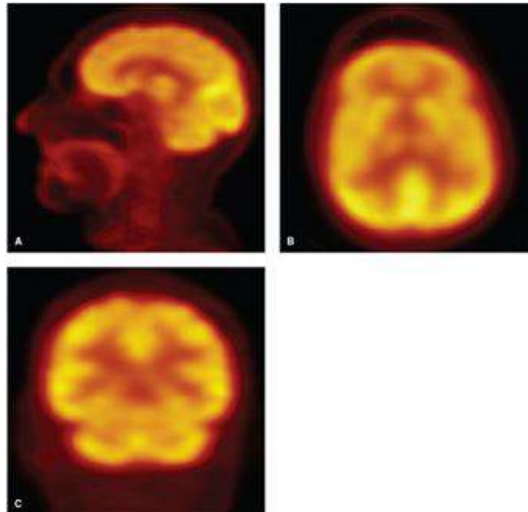
Muchas de las aplicaciones clínicas del PET son a nivel del cerebro y se centran en el uso de radiofármacos clínicamente aprobados como el ^{18}F -FDG (metabolismo de glucosa) y el ^{18}F -amyvid (Imágenes β -amiloides). Resalta su uso importante en el diagnóstico temprano en demencias que no muestran una presencia particular. Entre ellas destacan: la



enfermedad del Alzheimer, las demencias Frontotemporal y la difusa de los cuerpos de Lewy.

Figura 1.

Actividad fisiológica de la fluorodesoxiglucosa en el cerebro. (Tomado de Klein et al. 2019, fig.76.3).



Al bombardear con protones ciertos núcleos objetivos, se produce el ^{18}F , así como otros emisores de positrones. La formación del ^{18}F proviene de la reacción nuclear $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ en la cual protones (p) impactan el oxígeno del blanco objetivo que contiene agua H_2^{18}O (Cruzate, J.A., 2013). En este tipo de reacciones de choque de protones de alta energía sobre un núcleo pesado, también conocidas como reacciones de “espalación” (Russell, 1990), se libera un neutrón energético. El líquido que actúa como blanco se encuentra en una estructura compuesta por diversos componentes metálicos que adquieren actividad radiactiva debido al impacto directo de las partículas cargadas y de los neutrones secundarios liberados (IAEA, Cyclotron Produce Radionuclides: Principles and Practice, 2008).

Desde la perspectiva de la necesidad de garantizar la seguridad radiológica para la protección del personal que opera y da mantenimiento a estos ciclotrones, así como de la gestión adecuada de los desechos radiactivos generados, para la protección de la población, resulta crucial identificar y cuantificar los radioisótopos originados tras el prolongado bombardeo del blanco y sus componentes (O'Donnell, León Vintró, Duffy, & Mitchell, 2004). De allí que la seguridad radiológica exige la determinación de los blindajes necesarios contra las radiaciones generadas durante el bombardeo con partículas cargadas. Para la selección óptima de materiales y grosores empleados en los blindajes, hay una

información que es valiosa. Se trata de la comprensión detallada de la distribución de energía y la intensidad de la radiación generada.

Hasta el momento, no se ha hallado ningún estudio que aborde un análisis sistemático que permita predecir la actividad inducida en los componentes de los blancos, así como la distribución de energía de la radiación secundaria producida durante el bombardeo del blanco de un ciclotrón, con una energía de 16,5 MeV. Frente a esta necesidad, se propuso obtener la información necesaria, principalmente mediante simulaciones, usando el método de Monte Carlo, con un blanco sometido a un haz de partículas incidentes, simplificando significativamente de esa forma la complejidad, tanto de la estructura de los componentes del blanco, como del haz de radiación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ciclotrón

Para el desarrollo de este trabajo se utilizó como estructura de referencia el ciclotrón PETtrace 800 (Figura 2a.), el cual se encuentra ubicado en la Ciudad del Saber, Panamá y es usado para la producción de radiofármacos como producto final. Este, mayormente produce radioisótopos como oxígeno-15, nitrógeno 13, carbono-11 y fluor-18 (López Durán & Drucker Colín, 2004), los cuales, después de un adecuado procesamiento, son transformados en radio trazadores con los que se elaboran algunos radiofármacos.

Por su parte dichos radiofármacos se aplican en pacientes para realizar escaneos con imágenes PET, cuyo enfoque principal es la identificación de anomalías funcionales, en el estudio de disfunciones cerebrales, así como en la detección de tumores y metástasis (Ávila-Rodríguez & Alva-Sánchez, 2010). Además, estos radiofármacos se utilizan en investigaciones relacionadas con cardiología.



Figura 2.

a) Ciclotrón PETtrace. A la izquierda se muestra el blindaje exterior y a la derecha, la parte interna donde se colocan los blancos. b) Brida de salida y entrada



Los blancos de un ciclotrón se elaboran con diversos componentes, cada uno con una función e importancia. Sin embargo, como en este trabajo nos centraremos en el estudio de la actividad que se genera después de irradiado el blanco, solo se mencionarán y utilizarán las partes que se tornan radiactivas, lo suficiente como para poder causar algún daño en la salud debido a su periodo de decaimiento. En primera instancia tenemos una lámina de Havar, la cual se encuentra en la entrada del blanco y tiene un diámetro de 26 mm y un espesor de 25 μm . Seguido a esta lámina hay una cámara de vacío, a la cual le precede una segunda lámina de Havar de 28 mm de diámetro y 50 μm de espesor. Por último, en la salida, encontramos una celda la cual contiene agua enriquecida al 98% con ^{18}O (Martinez-Serrano & Diez de los Rios, 2014). En la Figura 2b se muestra partes del blanco del ciclotrón. El Havar es una aleación de metal con alto contenido de cobalto. Estas láminas al ser irradiadas son altamente activadas por el haz de protones y en menor medida por los neutrones secundarios.

Tomografía por Emisión de Positrones (PET)

La obtención de imágenes por PET es posible solo con un subconjunto de isótopos que se desintegran por la vía de emisión de positrones (β^+). Estos radionucleidos emisores de positrones son átomos inestables que se vuelven estables cuando un protón, dentro del núcleo, se desintegra transformándose en un neutrón con la emisión de un positrón. Recordemos que los positrones tienen el mismo valor numérico que la masa de un electrón, pero están cargados positivamente. Dentro de los siguientes milisegundos después de su emisión, el positrón es aniquilado al colisionar con un electrón de las cercanías. Este evento resulta en la liberación de dos fotones de altas energías (rayos- γ) que viajan en direcciones opuestas con una energía de 511 keV, proveniente de la masa equivalente [$E=mc^2$] de cada partícula beta. Estos fotones de alta energía son altamente penetrantes en tejidos suaves y por lo tanto dejan el cuerpo (tejidos) con una absorción o desviación limitada. Y son estos fotones los que generan las imágenes en los sistemas PET (Klein, et al., 2019).

El rendimiento (Physical Yield)

El rendimiento físico (Y) de un “objetivo” (blanco) que tiene cualquier espesor puede definirse como la relación entre el número de núcleos formados en la reacción nuclear o actividad (A) y el número de partículas (n_p) que inciden en el objetivo (Al Saleh, Al Mugren, & Azzam, 2007).

Es decir:

$$Y = \frac{A}{Q} \quad (1)$$

Por lo tanto Y, puede expresarse como actividad por Coulomb en unidades de GBq/C. Un significado más analítico del rendimiento físico es la pendiente (al inicio de la irradiación) de la curva de actividad creciente en una muestra radiactiva producido en tiempo de irradiación.

Si la muestra es radiactiva con constante de desintegración λ y el número de núcleos producidos presentes en la muestra $N(t)$ satisface

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{dY(t)}{dt} - \lambda N(t) = I_0 y - \lambda N(t) \quad (2)$$

y la solución a esta expresión es

$$N(t) = I_0 y \frac{1 - e^{-\lambda t}}{\lambda} \quad (3)$$



Podemos considerar que la actividad para un material simple por unidad corriente (I_0) en tiempo esta dado por (Otuka & Takács, 2015)

$$\frac{\lambda N(t)}{I_0} = y(1 - e^{-\lambda t}) \equiv A \quad (4)$$

A su vez si despejamos para y se obtendría el rendimiento físico para un blanco con cierto espesor.

Geant4

Geant4 es una herramienta que utiliza Monte Carlo para simular el paso de las partículas a través de diversas formas de materia (Poignant, Penfold, Asp, Takhar, & Jackson, 2016). La misma abarca un amplio espectro de funciones, que van desde el seguimiento y la descripción geométrica hasta la modelación de procesos físicos y la captura de resultados (Carrier, Archambault, Beaulieu, & Roy, 2004). Los procesos físicos disponibles engloban una extensa variedad, como por ejemplo las interacciones electromagnéticas, hadrónicas y ópticas, así como también un conjunto diverso de partículas de vida prolongada, de materiales y de elementos. Este abanico de opciones abarca un rango energético que en algunos casos puede iniciar en 250 eV y expandirse en otros hasta el rango de los TeV (Agostinelli, y otros, 2003).

El diseño y construcción de Geant4 tiene como objetivo principal exponer, de manera transparente, los modelos físicos que se utilizan, a la vez que maneja con destreza geometrías complejas y permite su adaptación fluida para ser empleado de manera óptima

en distintas esferas de aplicación (Howard, y otros, 1998). Esta plataforma tecnológica es fruto de una colaboración, a nivel global, entre expertos en Física y profesionales de la ingeniería de software. Ha sido creado mediante la aplicación de técnicas de ingeniería de software y tecnología orientada a objeto, y su implementación se ha realizado utilizando el lenguaje de programación C++. Su versatilidad ha sido comprobada en diversos campos, desde la Física de partículas y la Física Nuclear hasta el diseño de aceleradores, la ingeniería espacial y la Física Médica.

Lista de física

En el contexto de Geant4, una "lista de física" es una lista de componentes que se refiere a una colección de modelos y procesos físicos predefinidos que se utilizan para describir las interacciones de las partículas con la materia, durante las simulaciones de transporte de partículas. Geant4 permite a los usuarios elegir entre una variedad de listas de física, según sus requisitos de simulación y el tipo de partículas que están estudiando (Apostolakis, y otros, 2008).



La elección de la lista de física puede tener un impacto significativo en la precisión y eficiencia de las simulaciones. Diferentes listas de física están previamente diseñadas para diferentes tipos de experimentos o aplicaciones. Por ejemplo, algunas listas de física pueden estar optimizadas para experimentos de Física de alta energía, mientras que otras podrían ser más adecuadas para aplicaciones médicas o espaciales.

Para validar estas listas de física, previamente diseñadas, el equipo de colaboradores de Geant4 evaluó las características de los modelos físicos y posteriormente comparó los datos simulados con los ya establecidos en la literatura. A su vez, cuando es posible, comparan los resultados con datos experimentales que estén en curso, lo cual aporta una precisión más completa para dichas listas de Geant4 (Apostolakis, Wright, & collaboration, 2007).

Para este trabajo se pueden destacar las siguientes componentes:

“*G4HadronPhysicsQGSP BIC AllHP.hh*”, es uno de los modelos más recientes desarrollado por Geant4, fue creado para evaluar, con alta precisión, la interacción de los protones, por debajo de 200 MeV (Ivanchenko, Ivanchenko, Molina, & Incerti, 2012).

“*G4EmStandardPhysics option3.hh*” fue diseñado para aplicaciones que requieren mayor precisión, para electrones y hadrones.

“*G4DecayPhysics.hh*”, es el principal constructor de decaimientos en eventos físicos, el mismo define una lista estándar de partículas y sus desintegraciones.

“*G4RadioactiveDecayPhysics.hh*” define la desintegración radiactiva de los isótopos.

Simulación en Geant4

Si bien es cierto Geant4 permite el diseño de muchas estructuras complejas, sin embargo, entre más elaborada sea la geometría más tiempo de simulación tomará y si no se cuenta con buen procesador, esto puede llevar a la sobre carga y calentamiento del equipo causando que el mismo se apague. Para el diseño del blanco del ciclotrón, tomando en cuenta estas consideraciones, solo se usaron las partes que más se activan, que son las láminas de Havar y el Agua enriquecida con oxígeno-18, ya que las parte externas que resguardan estas piezas no se activan lo suficiente como para generar grandes cambios en las respuestas de las partículas al interaccionar con el blanco.

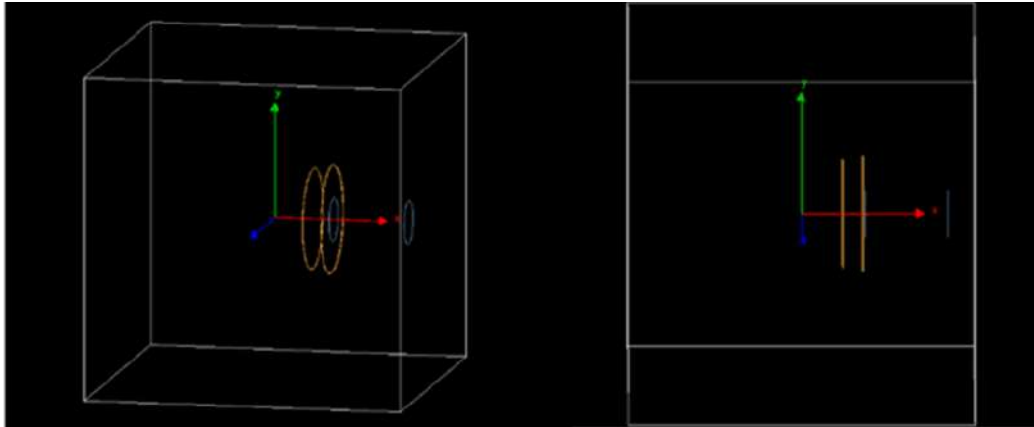
Cabe destacar que para este proyecto se utilizaron medidas de las láminas reales que se encuentran en Radiofarmacia de Centroamérica, S.A (Ciudad del saber, Panamá), sin embargo, la medida de la distancia y el volumen del líquido fueron tomadas de Martínez Serrano & Diez de los Ríos (2014), esto debido a que, en la administración del Ciclotrón de

la Ciudad del Saber, no contaban con una toma reciente de datos, con las láminas en cuestión.



Figura 3.

Diseño del blanco en Geant4.



A simple vista, lo que se puede observar en la imagen superior (Figura 3.) es un recipiente paralelepípedo (hexaedro) que contiene cuatro círculos interiores. Sin embargo, en esta simulación, dicho recipiente representa un "volumen universal", que podría entenderse como un espacio abarcador, y que constituye la base de todo el propósito del estudio. Dentro de este volumen se encuentran alojados todos los otros volúmenes (con diversas formas geométricas) y también contiene el punto de origen del sistema global de coordenadas.

Una de las condiciones que se imponen a este volumen universal es que los límites de los volúmenes internos no pueden tocar los límites del volumen universal. En términos más simples, debe existir un espacio de separación entre los volúmenes contenidos y el volumen universal que los contiene (Allison, y otros, 2006).

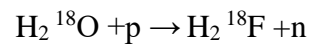
En este caso particular, los volúmenes contenidos, de izquierda a derecha, representan dos láminas de Havar, las cuales tienen diferentes radios y espesores. La primera lámina tiene un radio de 13 mm y un espesor de 25 μm . Junto a esta, a una distancia de aproximadamente 5,0 cm, se encuentra la segunda lámina de Havar, que tiene un radio de 14 mm y un espesor de 50 μm .

Siguiendo con la descripción, junto a la última lámina de Havar, a una distancia de 1,05 cm se encuentra nuestra última forma geométrica o volumen contenido, que es un cilindro. Este tiene un volumen de 1,0 cm^3 y se encuentra lleno de agua enriquecida con Oxígeno-18. En sí, lo que se quería lograr en la simulación, es que cada elemento quede a una distancia igual o parecida a la que se encuentra en el blanco real el cual se muestra en la figura 2.



Una vez definida cada una de las geometrías y los materiales que conforman los volúmenes contenidos, se procedió a definir qué tipo de haz se quería para irradiar, así como su energía, en nuestro caso se utilizó un haz de protones de 16,5 MeV. Antes de iniciar con la simulación se realizó una prueba de las distintas cantidades de protones con los que se quería irradiar. Cabe hacer la observación que para esas primeras pruebas solo se utilizó una lámina de Havar. Se irradió de manera consecutiva, con cantidades diferentes de protones (10, 20, 30, ... hasta llegar a 100 millones), posteriormente se procedió a graficar los datos y por último se comparó con los datos teóricos, obtenidos y reportados en artículos científicos.

Por otra parte, para validar que los datos generados por el agua enriquecida con Oxígeno-18 fueran precisos, se procedió a simular con solamente el volumen de agua y posteriormente se comparó con los datos generados con una tabla recomendada por la agencia (IAEA, Charged particle cross-section database for medical radioisotope production: diagnostic radioisotopes and monitor reactions, 2001), para la sección transversal de la reacción nuclear:

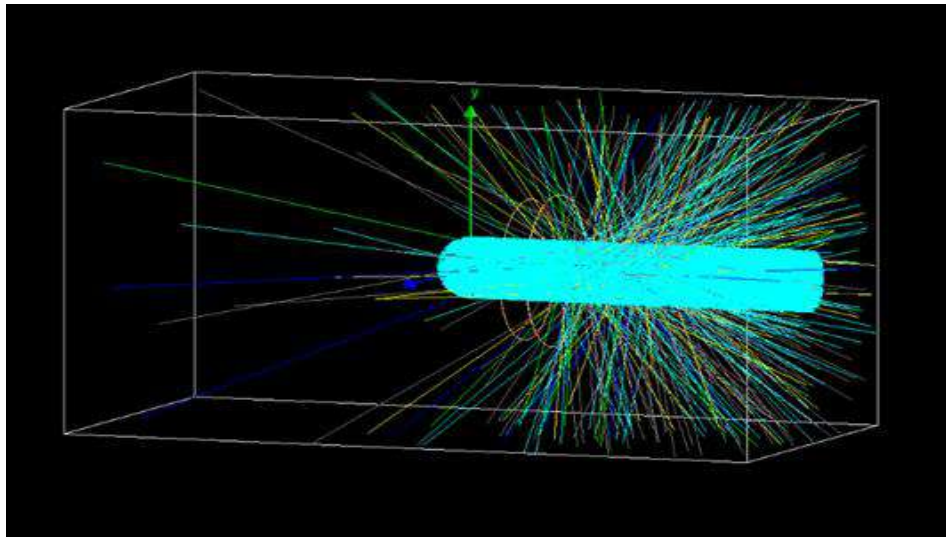


La comparación se hizo calculando del rendimiento físico.

Una vez validados los valores, tanto de las láminas como del agua, se procedió a anexar las dos láminas de Havar y el agua enriquecida con Oxígeno-18, al mismo tiempo, tal como se muestra en la figura a continuación:

Figura 4.

Irradiación de blancos



El proceso de la simulación consistió en enviar un haz de protones cuya forma cilíndrica atravesaba las dos primeras láminas de Havar por el centro. Sin embargo, no llegaba a cubrirlas totalmente (Figura 4). Contrariamente a lo que sucedía con las láminas de Havar, todo el volumen del agua sí era atravesado por el haz de protones. Se hizo así, para que abarcara la mayor cantidad de interacciones de los protones con el agua, tal y como sucede en un Ciclotrón.

Una vez terminadas las secuencias de las corridas, lo primero que se nota es que en cada una de estas aparecía una cantidad de radioisótopos, que dependía de la cantidad de protones y de la energía a la cual se irradiaba. Por otra parte, en las corridas, no solo se creaban nuevos radioisótopos, sino que también se generaban otras partículas. Como ejemplo visual de esto presentamos la figura 4, en la cual, además del haz de protones (color cian) también observamos que hay otras partículas, las cuales se representaban con distintos colores que daba por defecto el software. Por ejemplo, el color rojo representa electrones, el verde rayos gamma, el amarillo neutrones y el azul partículas Alpha. Cabe destacar que estos colores venían ya definidos por el software, sin embargo, estos se podían modificar.

Además de lo generado de manera visual, el software también nos ofrecía una base de datos de la cual obteníamos información, como la cantidad de radioisótopos que se generan después de la interacción de los protones con los blancos. A su vez, este generaba distintos histogramas, gráficos que nos mostraban diversos fenómenos, pero los más importantes para nuestro trabajo eran los espectros secundarios y el espectro de neutrones.

Para poder abrir cada uno de los histogramas, fue necesario utilizar el software ROOT CERN el cual permite el análisis de datos científicos y visualización gráfica de los mismos. Una vez generados los datos por Geant4, estos son exportados a Excel, en el cual se realizaron distintos cálculos, con el fin de obtener datos como: la actividad específica y la tasa de dosis y posteriormente compararlos con los datos teóricos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

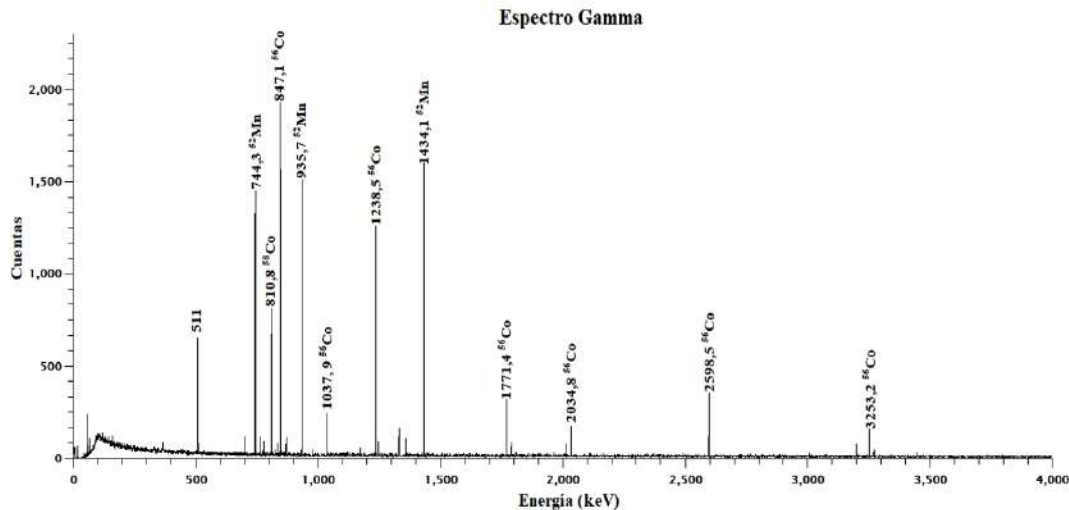
Validar cada parte de la simulación permite que los datos generados se adapten lo más posible a la realidad. Por ello, lo primero que se muestra son los datos obtenidos a partir de una lámina de Havar. Aunque la energía de los protones está en unidades MeV, para la comparación con los datos teóricos, en las gráficas de espectro gama se utilizó keV.

En la Figura 5, se muestra el Espectro Gamma obtenido después de irradiar una lámina de Havar, con 100 millones de protones, a una energía de 16,5 MeV.



Figura 5.

Espectro Gamma generado después de la irradiación de una lámina de Havar.



Como se puede observar, los radioisótopos que más abundan pertenecen a ^{56}Co el cual se produce a través de la reacción nuclear $^{56}\text{Fe} (p, n)^{56}\text{Co}$. Además, podemos observar un pico significativo a 511 keV, que corresponde a una aniquilación electrón-positrón. La aparición de este pico, en este caso, puede deberse al proceso que se inicia con la producción de pares electrón-positrón, que ocurre cuando el rayo gamma de 1 238 keV pasa a través o cerca del campo del núcleo del detector y la posterior aniquilación del positrón.

En términos de protección radiológica es importante conocer cada uno de los radioisótopos que se generan durante las irradiaciones de las láminas, ya que en muchos casos puede que estos tengan una vida media extremadamente larga y antes de desecharlos, habría que dejar que la actividad decaiga (Calandrino, y otros, 2010). Para una lámina típica, se ha estimado que la actividad total caerá por debajo de 1,0 MBq aproximadamente, 2 años después (O'Donnell, León Vintró, Duffy, & Mitchell, 2004). Es importante aclarar que todos los radioisótopos identificados tienen una vida relativamente corta, siendo ^{54}Mn el de periodo más largo (312,3 días).

Todas las energías de los isótopos generados y probabilidades de emisiones gamma fueron tomadas de la Tabla de Isótopos (Firestone, 1999).

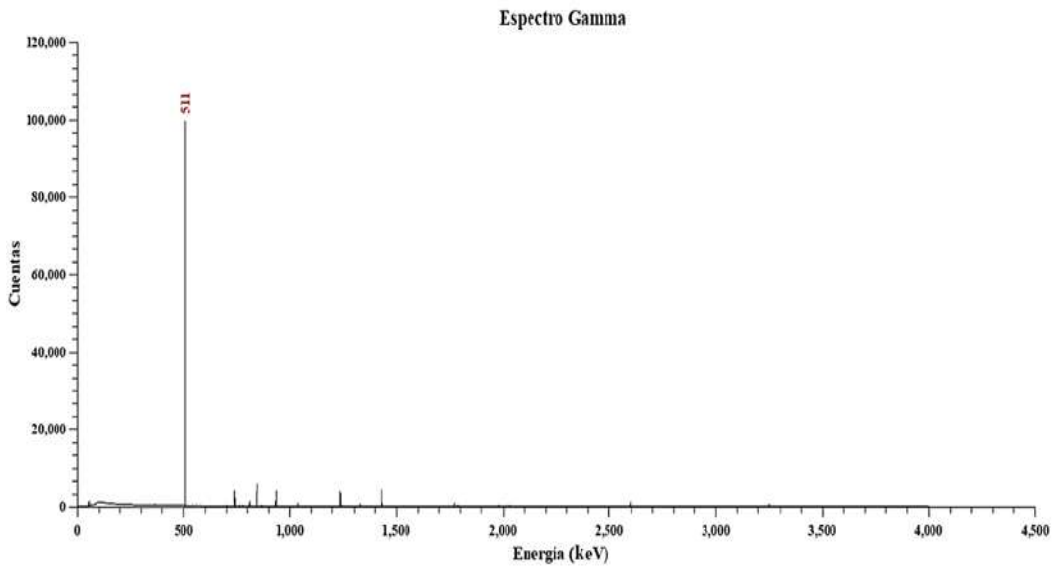
Una vez comprobado que los datos generados de manera simulada con una sola lámina de Havar coincidían con los teóricos, como se dijo en la metodología, se procedió a insertar el volumen de agua enriquecida con 98% de Oxígeno-18 y la lámina de Havar restante. De la



adición de estos dos componentes se obtuvieron dos gráficas, la primera del Espectro Gamma y la segunda del Espectro de Neutrones.

Figura 6.

Espectro Gamma obtenido de la irradiación de todas las geometrías.



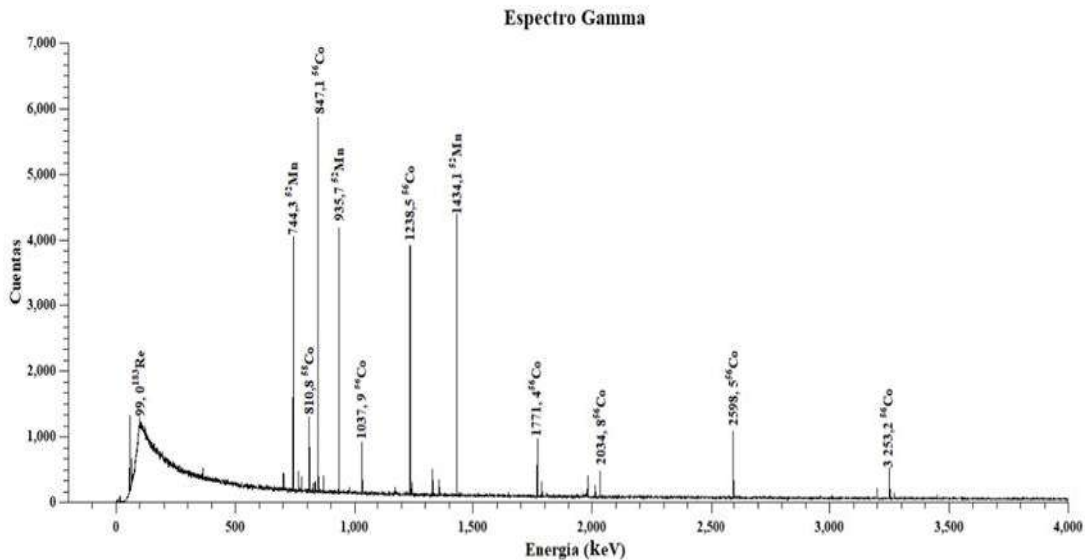
En la siguiente Fig. 6, se muestran el espectro gamma obtenido a partir de la irradiación de dos láminas de Havar y agua (enriquecida con 98% de Oxígeno-18) con 100 millones de protones a una energía de 16,5 MeV. Como se puede notar, la energía correspondiente a 511 keV sobresale evitando la visualización de las otras. Sabemos que se produce debido a que el radioisótopo Flúor-18, emite un positrón (β^+), que interactúa inmediatamente con un electrón libre de la cercanía, lo que provoca la aniquilación de las dos partículas y finalmente da lugar a dos fotones que corresponden a la energía de 511 keV.

Debido a la gran cantidad de aniquilación que se produjo durante la simulación (irradiación de 100 millones de protones), se tomó la decisión de eliminar dicha energía (511 keV), ya que ese resultado no era relevante para el trabajo y como consecuencia de esto, se obtuvo el siguiente gráfico:



Figura 7.

Espectro Gamma obtenido de la irradiación de 2 láminas de Havar y H₂O enriquecida con Oxígeno-18 sin la energía 511 keV.

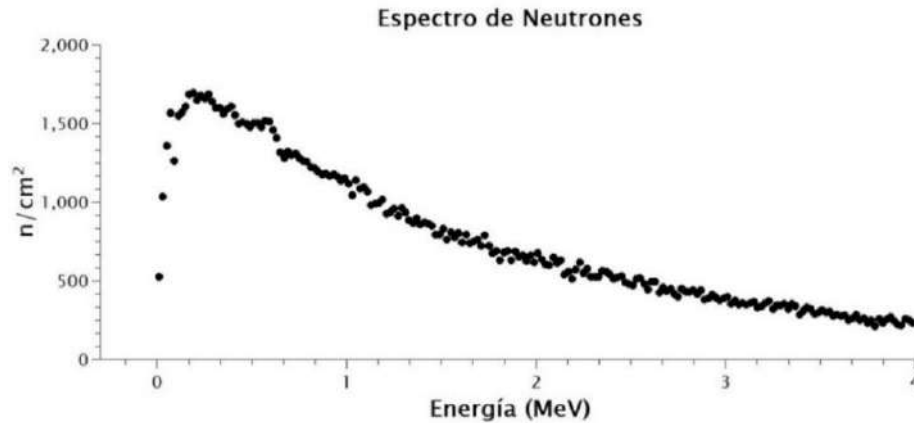


Como se observa en la figura superior, aunque se le añadió H₂O enriquecido con Oxígeno 18 y otra lámina de Havar, el patrón del espectro gamma generado es el mismo que aparece en la figura 5, sin embargo, la cantidad de radioisótopos obtenida a distintas energías aumentó y debido a la aparición del Flúor-18, también aumentó la aniquilación que se produjo.

Por otra parte, como ya se señaló, también se obtuvo un Espectro de Neutrones secundarios (Figura 8). Estos surgen debido a las interacciones nucleares que se dan entre los fotones (de energía mayor a 6,0 MeV) con la materia, por esta misma razón también se les conoce como foto neutrones.

Figura 8

Espectro de Neutrones generados después de las distintas irradiaciones.



Conocer la cantidad de espectro secundario que se produce dentro de los ciclotrones es de particular importancia debido a que el personal operador se encuentra en constante exposición a la radiación neutrónica secundaria, a la cual se le suma también una fuente primaria de fotones. La presencia de esta radiación neutrónica plantea la necesidad de contar con blindajes adicionales a los utilizados para la protección radiológica contra la radiación gamma, pues no son los adecuados para la atenuación y absorción de neutrones (Carelli, Cruzate, Gregori, Papadópolos, & Discacciatti, 2006).

Por otra parte, además de los datos gráficos que se mostraron anteriormente, con Geant4 también se obtuvo información sobre: los radioisótopos que se producen y cuantos se producen a partir de estos pudimos obtener las actividades de los radioisótopos más importantes.

Tabla 1.

Radioisótopos obtenidos después de una irradiación creciente de protones.

Núm. protones	⁵⁶ Co	⁵⁷ Co	⁵⁸ Co	⁶⁰ Co	⁵⁴ Mn
10 000 000	333	715	2 016	1	138
20 000 000	679	1 388	3 999	6	266
30 000 000	1 011	2 096	6 018	9	406
40 000 000	1 370	2 784	8 026	14	550
50 000 000	1 705	3 434	10 155	16	712
60 000 000	2 062	4 108	12 176	21	843
70 000 000	2 395	4 812	14 217	23	975
80 000 000	2 696	5 503	16 260	26	1 129
90 000 000	3 026	6 138	18 226	31	1 260
100 000 000	3 416	6 823	20 236	34	1 390



Con respecto a la eliminación de desechos radiactivos, es importante tener en cuenta que todos los radioisótopos identificados en la tabla 1, tienen una vida media relativamente corta, siendo la más larga cobalto 60 (1925,28 d). La actividad del ^{60}Co prescrita en las Normas Básicas Internacionales de Seguridad (BSS) es de 0,1 MBq (IAEA, International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Source NO 115, 1996). Esto quiere decir que la actividad del Co decaerá por debajo de los 0,1 MBq durante 20 años después de su eliminación. Desde el punto de vista de la gestión de residuos radiactivos, la lámina de Havar usada debería gestionarse durante más de 20 años (MOCHIZUKI, y otros, 2006).

En la tabla 2 se muestra el resultado del cálculo del rendimiento físico del radioisótopo Flúor-18. El objetivo de esto era comprobar que la sección transversal utilizada por GEANT4, para cada uno de los radioisótopos fuera correcta, sin embargo, vemos que difiere un poco con el valor teórico, por lo cual después de una revisión en la página de la Agencia (u Organismo)

Internacional de Energía Atómica (AIEA u OIEA) mejor conocida por sus siglas en inglés como IAEA, nos dimos cuenta de que GEANT4 no tenía los valores de las secciones transversales actualizadas y los mismos, por ser una configuración interna del programa, no se podían alterar, por lo cual se procedió a trabajar con lo obtenido.

Tabla 2.

Obtención del rendimiento físico a partir del número de núcleos generados por cada radioisótopo.

Nº protones $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$	Carga (C)	Nº núcleos 18F	Constante (s^{-1})	Actividad (Bq)	Yield (GBq/C)	Yield (GBq/C) Teórico	
10 000 000	$1,60 \times 10^{-12}$	14 939	$1,05 \times 10^{-4}$	1,57	981,20	1 108	
20 000 000	$3,20 \times 10^{-12}$	30 019	$1,05 \times 10^{-4}$	3,16	985,30	1 108	
30 000 000	$4,81 \times 10^{-12}$	45 033	$1,05 \times 10^{-4}$	4,74	985,93	1 108	
40 000 000	$6,41 \times 10^{-12}$	60 081	$1,05 \times 10^{-4}$	6,32	986,54	1 108	
50 000 000	$8,01 \times 10^{-12}$	75 345	$1,05 \times 10^{-4}$	7,93	989,74	1 108	
60 000 000	$9,61 \times 10^{-12}$	90 532	$1,05 \times 10^{-4}$	9,53	991,03	1 108	
70 000 000	$1,12 \times 10^{-11}$	105 565	$1,05 \times 10^{-4}$	11,11	990,51	1 108	
80 000 000	$1,28 \times 10^{-11}$	120 791	$1,05 \times 10^{-4}$	12,71	991,70	1 108	
90 000 000	$1,44 \times 10^{-11}$	135 865	$1,05 \times 10^{-4}$	14,30	991,52	1 108	
100 000 000	$1,60 \times 10^{-11}$	151 093	$1,05 \times 10^{-4}$	15,90	992,38	1 108	
Promedio					988 ± 3		

La tabla 3 representa el resultado de los cálculos hechos por el programa, de las actividades iniciales que se producen en las láminas del blanco durante un bombardeo de 4 horas diarias de lunes a viernes y dos días de descanso, para hacer unas 125 horas de bombardeo en dos meses (Martinez Serrano & Diez de los Rios, 2014).



Tabla 3.

Actividad inicial para cada día durante 20 horas por 6 semanas y 2 días.

Actividad (GBq)						
Tiempo (min)	⁵⁶ Co	⁵⁷ Co	⁵⁸ Co	⁶⁰ Co	⁵² Mn	⁵⁴ Mn
60	6,59x10 ⁻⁵	3,82x10 ⁻⁵	4,28x10 ⁻⁴	2,38x10 ⁻⁸	1,39x10 ⁻³	6,66x10 ⁻⁰⁶
Semana 1						
240	1,27x10 ⁻²	7,34x10 ⁻³	8,21x10 ⁻²	4,58x10 ⁻⁶	2,64x10 ⁻¹	1,28x10 ⁻³
240	1,27x10 ⁻²	7,34x10 ⁻³	8,21x10 ⁻²	4,58x10 ⁻⁶	2,64x10 ⁻¹	1,28x10 ⁻³
240	1,27x10 ⁻²	7,34x10 ⁻³	8,21x10 ⁻²	4,58x10 ⁻⁶	2,64x10 ⁻¹	1,28x10 ⁻³
240	1,27x10 ⁻²	7,34x10 ⁻³	8,21x10 ⁻²	4,58x10 ⁻⁶	2,64x10 ⁻¹	1,28x10 ⁻³
240	1,27x10 ⁻²	7,34x10 ⁻³	8,21x10 ⁻²	4,58x10 ⁻⁶	2,64x10 ⁻¹	1,28x10 ⁻³
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
Semana 2						
240	1,27x10 ⁻²	7,34x10 ⁻³	8,21x10 ⁻²	4,58x10 ⁻⁶	2,64x10 ⁻¹	1,28x10 ⁻³
240	1,27x10 ⁻²	7,34x10 ⁻³	8,21x10 ⁻²	4,58x10 ⁻⁶	2,64x10 ⁻¹	1,28x10 ⁻³
240	1,27x10 ⁻²	7,34x10 ⁻³	8,21x10 ⁻²	4,58x10 ⁻⁶	2,64x10 ⁻¹	1,28x10 ⁻³
240	1,27x10 ⁻²	7,34x10 ⁻³	8,21x10 ⁻²	4,58x10 ⁻⁶	2,64x10 ⁻¹	1,28x10 ⁻³
240	1,27x10 ⁻²	7,34x10 ⁻³	8,21x10 ⁻²	4,58x10 ⁻⁶	2,64x10 ⁻¹	1,28x10 ⁻³
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
Semana 3						
240	1,27x10 ⁻²	7,34x10 ⁻³	8,21x10 ⁻²	4,58x10 ⁻⁶	2,64x10 ⁻¹	1,28x10 ⁻³
240	1,27x10 ⁻²	7,34x10 ⁻³	8,21x10 ⁻²	4,58x10 ⁻⁶	2,64x10 ⁻¹	1,28x10 ⁻³
240	1,27x10 ⁻²	7,34x10 ⁻³	8,21x10 ⁻²	4,58x10 ⁻⁶	2,64x10 ⁻¹	1,28x10 ⁻³
240	1,27x10 ⁻²	7,34x10 ⁻³	8,21x10 ⁻²	4,58x10 ⁻⁶	2,64x10 ⁻¹	1,28x10 ⁻³
240	1,27x10 ⁻²	7,34x10 ⁻³	8,21x10 ⁻²	4,58x10 ⁻⁶	2,64x10 ⁻¹	1,28x10 ⁻³
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
Semanas del 4-6						
.
.
.
Semana 7						
240	1,27x10 ⁻²	7,34x10 ⁻³	8,21x10 ⁻²	4,58x10 ⁻⁶	2,64x10 ⁻¹	1,28x10 ⁻³
60	3,17x10 ⁻³	1,83x10 ⁻³	2,05x10 ⁻²	1,14x10 ⁻⁶	6,65x10 ⁻²	3,20x10 ⁻⁴

Mientras que la tabla 4 (a) y (b) representa el resultado del cálculo del decaimiento de la actividad inicial durante 20 h diarias de lunes a viernes. Cabe destacar que cuando se irradia un blanco se produce tanto la acumulación de la actividad como el decaimiento de esta debido a las desintegraciones.



Tabla 4 (a).*Decaimiento durante 125 h de la actividad de los radioisótopos.*

Actividad Decaída (GBq)					
⁵⁶ Co	⁵⁷ Co	⁵⁸ Co	⁶⁰ Co	⁵² Mn	⁵⁴ Mn
Semana 1					
1,26x10 ⁻²	7,32x10 ⁻³	8,15x10 ⁻²	4,58x10 ⁻⁶	0,24	1,28x10 ⁻³
2,50x10 ⁻²	1,46x10 ⁻²	0,16	9,16x10 ⁻⁶	0,25	2,55x10 ⁻³
3,74x10 ⁻²	2,19x10 ⁻²	0,24	1,37x10 ⁻⁵	0,65	3,83x10 ⁻³
4,97x10 ⁻²	2,92x10 ⁻²	0,32	1,83x10 ⁻⁵	0,82	5,10x10 ⁻³
6,19x10 ⁻²	3,64x10 ⁻²	0,40	2,29x10 ⁻⁵	0,98	6,37x10 ⁻³
6,13x10 ⁻²	3,64x10 ⁻²	0,40	2,29x10 ⁻⁵	0,86	6,35x10 ⁻³
6,08x10 ⁻²	3,63x10 ⁻²	0,39	2,29x10 ⁻⁵	0,76	6,34x10 ⁻³
Semana 2					
7,29x10 ⁻²	4,35x10 ⁻²	0,47	2,74x10 ⁻⁵	9,27x10 ⁻¹	7,60x10 ⁻³
8,49x10 ⁻²	5,07x10 ⁻²	0,55	3,20x10 ⁻⁵	1,07	8,87x10 ⁻³
9,69x10 ⁻²	5,80x10 ⁻²	0,63	3,66x10 ⁻⁵	1,21	1,01x10 ⁻²
1,09x10 ⁻¹	6,51x10 ⁻²	0,70	4,11x10 ⁻⁵	1,33	1,14x10 ⁻²
1,20x10 ⁻¹	7,23x10 ⁻²	0,78	4,57x10 ⁻⁵	1,43	1,26x10 ⁻²
1,19x10 ⁻¹	7,21x10 ⁻²	0,77	4,57x10 ⁻⁵	1,27	1,26x10 ⁻²
1,18x10 ⁻¹	7,20x10 ⁻²	0,76	4,57x10 ⁻⁵	1,12	1,26x10 ⁻²
Semana 3					
1,30x10 ⁻¹	7,91x10 ⁻²	0,84	5,02x10 ⁻⁵	1,25	1,38x10 ⁻²
1,42x10 ⁻¹	8,63x10 ⁻²	0,81	5,48x10 ⁻⁵	1,36	1,52x10 ⁻²
1,53x10 ⁻¹	9,34x10 ⁻²	0,99	5,94x10 ⁻⁵	1,47	1,63x10 ⁻²
1,65x10 ⁻¹	1,01x10 ⁻¹	1,06	6,39x10 ⁻⁵	1,56	1,76x10 ⁻²
1,76x10 ⁻¹	1,08x10 ⁻¹	1,13	6,85x10 ⁻⁵	1,65	1,88x10 ⁻²
1,74x10 ⁻¹	1,07x10 ⁻¹	1,12	6,85x10 ⁻⁵	1,45	1,88x10 ⁻²
1,73x10 ⁻¹	1,07x10 ⁻¹	1,11	6,84x10 ⁻⁵	1,28	1,88x10 ⁻²



Tabla 4 (b).*Decaimiento durante 125 h de la actividad de los radioisótopos.*

Actividad Decaída (GBq)					
⁵⁶ Co	⁵⁷ Co	⁵⁸ Co	⁶⁰ Co	⁵² Mn	⁵⁴ Mn
Semana 4					
1,84x10 ⁻¹	1,14x10 ⁻¹	1,18	7,30x10 ⁻⁵	1,40	2,00x10 ⁻²
1,95x10 ⁻¹	1,21x10 ⁻¹	1,26	7,76x10 ⁻⁵	1,50	2,12x10 ⁻²
2,06x10 ⁻¹	1,28x10 ⁻¹	1,33	8,21x10 ⁻⁵	1,59	2,25x10 ⁻²
2,17x10 ⁻¹	1,35x10 ⁻¹	1,40	8,67x10 ⁻⁵	1,67	2,37x10 ⁻²
2,28x10 ⁻¹	1,42x10 ⁻¹	1,47	9,12x10 ⁻⁵	1,74	2,49x10 ⁻²
2,26x10 ⁻¹	1,42x10 ⁻¹	1,45	9,12x10 ⁻⁵	1,54	2,49x10 ⁻²
2,24x10 ⁻¹	1,42x10 ⁻¹	1,44	9,12x10 ⁻⁵	1,36	2,48x10 ⁻²
Semana 5					
2,35x10 ⁻¹	1,49x10 ⁻¹	1,51	9,57x10 ⁻⁵	1,47	2,61x10 ⁻²
2,46x10 ⁻¹	1,56x10 ⁻¹	1,58	1,00x10 ⁻⁴	,56	2,73x10 ⁻²
2,57x10 ⁻¹	1,63x10 ⁻¹	1,65	1,05x10 ⁻⁴	1,65	2,85x10 ⁻²
2,67x10 ⁻¹	1,70x10 ⁻¹	1,72	1,09x10 ⁻⁴	1,72	2,98x10 ⁻²
2,78x10 ⁻¹	1,77x10 ⁻¹	1,78	1,14x10 ⁻⁴	1,79	3,10x10 ⁻²
2,75x10 ⁻¹	1,76x10 ⁻¹	1,77	1,14x10 ⁻⁴	1,58	3,09x10 ⁻²
2,73x10 ⁻¹	1,76x10 ⁻¹	1,75	1,14x10 ⁻⁴	1,40	3,08x10 ⁻²
Semana 6					
2,84x10 ⁻¹	1,83x10 ⁻¹	1,82	1,18x10 ⁻⁴	1,50	3,21x10 ⁻²
2,94x10 ⁻¹	1,90x10 ⁻¹	1,88	1,23x10 ⁻⁴	1,59	3,33x10 ⁻²
3,04x10 ⁻¹	1,97x10 ⁻¹	1,95	1,27x10 ⁻⁴	1,67	3,45x10 ⁻²
3,15x10 ⁻¹	2,03x10 ⁻¹	2,01	1,23x10 ⁻⁴	1,75	3,57x10 ⁻²
3,25x10 ⁻¹	2,10x10 ⁻¹	2,08	1,37x10 ⁻⁴	1,81	3,69x10 ⁻²
3,22x10 ⁻¹	2,10x10 ⁻¹	2,06	1,36x10 ⁻⁴	1,60	3,68x10 ⁻²
3,19x10 ⁻¹	2,09x10 ⁻¹	2,04	1,36x10 ⁻⁴	1,41	3,68x10 ⁻²
Semana 7					
3,29x10 ⁻¹	2,16x10 ⁻¹	2,10	1,41x10 ⁻⁴	1,51	3,80x10 ⁻²
3,30x10 ⁻¹	2,18x10 ⁻¹	2,11	1,42x10 ⁻⁴	1,42	3,82x10 ⁻²



Tabla 5.

Promedio de la actividad y actividad específica de los radioisótopos después de transcurridas 125 h.

Actividad Específica (MBq/g)					
⁵⁶ Co	⁵⁷ Co	⁵⁸ Co	⁶⁰ Co	⁵² Mn	⁵⁴ Mn
9,02x10 ⁸	5,95x10 ⁸	5,76x10 ⁹	3,88x10 ⁵	3,90x10 ⁹	1,04x10 ⁸
TOTAL	1,13x10¹⁰ MBq/g				

Actividad (MBq)					
⁵⁶ Co	⁵⁷ Co	⁵⁸ Co	⁶⁰ Co	⁵² Mn	⁵⁴ Mn
3,30x10 ⁸	2,18x10 ⁸	2,11x10 ⁹	1,42x10 ⁵	1,42x10 ⁹	3,82x10 ⁷
TOTAL	4,12x10⁹ MBq				

Contrario a la actividad, la “actividad específica” se define como la actividad por cantidad de átomos de un radioisótopo. El cálculo de esta, para este trabajo, era primordial porque sería nuestra medida patrón y a partir de esta podíamos saber si la actividad calculada era correcta (Tabla 5). Debido a que no teníamos datos experimentales obtenidos por nosotros, se comparó con los datos de Martínez Serrano & Diez de los Rios, 2014. Como resultado de esto, se obtuvo la tabla 6, en la cual podemos observar que nuestros datos discrepan de los datos patrones (medidos) en 2 a 3 órdenes de magnitud, y esto se puede deber a algunas limitaciones con la cual no contábamos al utilizar GEANT4. La primera es el número de protones que se pueden irradiar y finalmente por los paquetes de secciones eficaces transversales (TENDL-3.3) que como ya se dijo no se encuentran actualizados. Estas serían las principales razones para que los resultados obtenidos por simulación difieran con los medidos.

Tabla 6.

Comparación de los datos experimentales con los simulados.

Radioisotopos	Vida Media (d)	Actividad (Bq/g)		Tasa de dosis (μSv/h g)
		Medida*	Geant4	
⁵⁶ Co	77,27	1,26x10 ⁹	9,02x10 ⁸	464,26
⁵⁷ Co	271,79	1,97x10 ⁸	5,95x10 ⁸	24,31
⁵⁸ Co	70,82	2,33x10 ⁹	5,76x10 ⁹	951,94
⁶⁰ Co	1925,28	1,45x10 ⁴	3,88x10 ⁵	0,14
⁵⁴ Mn	312,4	3,34x10 ⁷	1,04x10 ⁸	56,52
⁵² Mn	5,591	---		2 107,51
TOTAL		3,82x10 ⁹	7,36x10 ⁹	1 497,17

Sin embargo, a pesar de lo dicho anteriormente, hay que recalcar que con GEANT4 se obtuvo el mismo comportamiento que la medida real, es decir, el ⁶⁰Co sigue siendo el isótopo que genera menor actividad y el ⁵⁸Co el de mayor actividad. Por otra parte, vemos



que de la misma forma en la que genera esa gran data de actividad, así mismo se recibe la cantidad de irradiación y es por lo cual se calculó a su vez la tasa de dosis. Con esta podemos saber la cantidad dosis que el personal puede recibir sin exponerse a tener riesgos radiactivos a largo plazo.

CONCLUSIONES

Por simulación se logró obtener las actividades de los radioisótopos relevantes, así como también la distribución espectral de la radiación generada por el bombardeo de protones en el ciclotrón. De la comparación de los resultados de la simulación con GEANT4, con los de la medición, se puede afirmar que la actividad inducida en un blanco se puede calcular con el tiempo de decaimiento entre las irradiaciones y la carga. Por otra parte, también es posible realizar, usando Excel, un sistema para predecir la tasa de dosis que se obtiene durante cada irradiación (tabla 6), lo cual, en el área de protección radiológica, puede ser de gran utilidad. Sin embargo, muchas de las secciones eficaces transversales que utiliza el software, no son las apropiadas. A pesar de todo lo mencionado anteriormente, queda evidenciado que la mayoría de los radioisótopos que se producen durante la irradiación de un blanco, como el Havar, no son de gran riesgo para la salud humana por su corto periodo de vida a excepción del Co 60 por su duración de casi 5 años. En efecto, como se ve en los datos obtenidos en la tabla 6, GEANT4 discrepa de los resultados experimentales cuando se trata de calcular las activaciones de manera individual, sin embargo, cuando se realiza un promedio, el margen de error disminuye, como es de esperarse.

AGRADECIMIENTO

Se le agradece a “Radiofarmacia de Centroamérica, S.A.” por permitirnos realizar las mediciones experimentales y observaciones del funcionamiento de los equipos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agostinelli, S., Allison, J., Amako, K., Apostolakis, J., Araujo, H., Arce, P., . . . Cosmo, G. (2003). Geant4 - a simulation toolkit. *Nuclear Instruments and Methods in Physics*, 506(3), 250-303.
- Al Saleh, F. S., Al Mugren, K. S., & Azzam, A. (2007). Excitation functions of (p,x) reactions on natural nickel between proton energies of 2.7 and 27.5 MeV. *Applied Radiation and Isotopes*, 65(1), 104-113.
- Allison, J., Amako, K., Apostolakis, J., Araujo, H., Arce Dubois, P., Asai, M., . . . Donszelmann, M. (2006). Geant4 developments and applications. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 53(1), 270-278.



- Apostolakis, J., Folger, G., Grichine, V., Howard, A., Ivanchenko, V., Kosov, M., . . . Wright, D. H. (2008). Geant4 Physics List for HEP. *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, 833-836.
- Apostolakis, J., Wright, D. H., & collaboration, G. (2007). An Overview of the Geant4 Toolkit . *AIP Conference Proceedings*, 896(1), 1-10.
- Ávila-Rodríguez, M. A., & Alva-Sánchez, H. (2010). Radiofármacos para PET, una nueva perspectiva de la medicina nuclear molecular en México. *El Residente*, 5(3), 103-110.
- Borrajo-Sánchez, J., & Cabrero-Fraile, F. J. (2010). Tomografía por Emisión de positrones (PET): Fundamento y Limitaciones. *Fuel and Energy Abstracts*, 85(4), 129-130.
- Calandrino, R., Del Vecchio, A., Parisi, R., Todde, S., De Felice, P., Savi, A., . . . Mrskova, A. (2010). Measurements and evaluation of the risks due to external radiation exposures and to intake of activated elements for operational staff engaged in the maintenance of medical cyclotrons. *Radiation protection dosimetry*, 139(4), 477-482.
- Carelli, J., Cruzate, J., Gregori, B., Papadóulos, S., & Discacciatti, A. (2006). Caracterización del Espectro de Neutrones al Final del Laberinto de Instalaciones con Aceleradores Médicos. Buenos Aires.
- Carrier, J.-F., Archambault, L., Beaulieu, L., & Roy, R. (2004). Validation of GEANT4, an object-oriented Monte Carlo toolkit, for simulations in medical physics. *Radiation therapy physics*, 31(3), 484-492.
- Firestone, R. B. (1999). *Table of Isotopes* (Wiley ed.).
- Howard, A., Ivantchenko, V., Verderi, M., Apostolakis, J., Ribon, A., Incerti, S., . . . Asai, M. (1998). *Geant4: An object-oriented toolkit for simulation in HEP*. Obtenido de <https://geant4.web.cern.ch/>
- IAEA. (1996). *International Basic Safety Standars for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiotion Source NO 115*. Vienna: IAEA.
- IAEA. (Mayo de 2001). *Charged particle cross-section database for medical radioisotope production: diagnostic radioisotopes and monitor reactions*. Obtenido de <https://www-nds.iaea.org/publications/tecdocs/iaea-tecdoc-1211/>



- IAEA. (2008). Cyclotron Produce Radionuclides: Principles and Practice.
- IAEA. (27 de enero de 2021). *International Atomic Energy Agency*. Recuperado el 15 de 8 de 2023, de <https://www.iaea.org/newscenter/news/cyclotrons-what-are-they-and-where-can-you-find-them>
- Ivantchenko, A. V., Ivanchenko, V. N., Molina, J.-M. Q., & Incerti, S. L. (2012). Geant4 hadronic physics for space radiation environment. *International Journal of Radiation Biology*, 88(1-2), 171-175.
- Klein, J., Vinson, E. N., Brant, W. E., & Helms, C. A. (2019). Brant and Helms. En *Fundamentals of Diagnostic Radiology* (págs. 76-80). Philadelphia: Wolters Kluwer.
- Lameka, K., Farwell, M., & Ichise, M. (2016). Positron emission tomography. *Handbook of Clinical Neurology*, 135, 209-227.
- López Durán, F. A., & Drucker Colín, R. (2004). La radioquímica de la [18-F]-FDG: la primera experiencia en México. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 7(2), 76 – 82.
- Martinez Serrano, J. J., & Diez de los Rios, A. (2014). *Predicting Induced Activity in the Havar Foils of the 18F production targets of a pet cyclotron and derived radiological risk*. Malaga: Health Physics Society. doi:10.1097/HP.0000000000000064
- Martinez-Serrano, J. J., & Diez de los Rios, A. (2014). Predicting induced activity in the Havar foils of the 18F production targets of a PET cyclotron and derived radiological risk. *Health physics*, 107(2), 103-110.
- MOCHIZUKI, S., OGATA, Y., HATANO, K., ABE, J., ITO, k., ITO, Y., . . . ISHIGURE, N. (2006). Measurement of the Induced Radionuclides in Production of Radiopharmaceuticals for Positron Emission Tomography (PET). *Journal of Nuclear Science and Technology*, 348-353.
- O'Donnell, R. G., León Vintrol, L., Duffy, G. J., & Mitchell, P. I. (2004). Measurement of the residual radioactivity induced in the front foil of a target assembly in a modern medical cyclotron. *ScienceDirect*, 60(2-4), 539-542.
- Otuka, N., & Takács, S. (2015). Definitions of radioisotope thick target yields. *Radiochimica Acta*, 103(1), 1-6.



Poignant, F., Penfold, S., Asp, J., Takhar, P., & Jackson, P. (2016). GEANT4 simulation of cyclotron radioisotope production in a solid target. *Physica Medica*, 32(5), 728-734.

Russell, G. J. (22-26 de Octubre de 1990). Spallation Physics - An Overview. Los Alamos. New Mexico: ICANS-XI International Collaboration on Advanced Neutron Sources.





EVALUACIÓN A CORTO PLAZO DE LA BIOMETRÍA Y CRECIMIENTO DE *LUTJANUS GUTTATUS*, *LUTJANUS PERU* Y *LUTJANUS ARGENTIVENTRIS*, BÚCARO, PANAMÁ

BIOMETRIC RELATIONSHIPS AND GROWTH OF *LUTJANUS GUTTATUS*, *LUTJANUS PERU* AND *LUTJANUS ARGENTIVENTRIS*, BÚCARO, PANAMA

Indira L. Durán

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Escuela de Biología, Panamá.
indiraduran@yahoo.es <https://orcid.org/0000-0003-3354-0399>

Italo Goti

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Centro Regional de Azuero, Chitré. italo.goti@up.ac.pa <https://orcid.org/0000-0001-5702-5389>

Juan A. Gómez H

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Panamá.
juanay05@hotmail.com <https://orcid.org/0000-0002-8548-3018>

Fecha de recepción: 11 de marzo de 2024

Fecha de aceptación: 20 de marzo de 2024

DOI [HTTPS://DOI.ORG/10.48204/J.TECNO.V26N2.A5391](https://doi.org/10.48204/J.TECNO.V26N2.A5391)

RESUMEN

Se realizó la evaluación de longitud y el crecimiento de *Lutjanus guttatus*, *L. peru* y *L. argentiventris*, capturados por la flota artesanal que desembarca en la comunidad de Búcaro, Panamá, por un período de seis meses, se describe la composición de tallas, la relación peso vs longitud total, se estimó el crecimiento basado en la estructura de tallas mensuales, para lo cual se describe L_{∞} , coeficiente catabólico k , la edad hipotética t_0 , para la longitud 0, además el índice de evaluación de Φ' y la longevidad $A_{0.95}$, se desarrolló la ecuación de von Bertalanffy para cada especie y el análisis de la progresión modal "VBGF". La longitud total varió entre 204 y 648 mm y el peso osciló entre 85 y 3 373 g, para las tres especies, la relación de estas variables mostró un crecimiento isométrico, la progresión modal indicó dos cohortes definidas de *L. guttatus*, no así en las otras especies. Los resultados son un aporte de línea base para el desarrollo del estudio de la biología pesquera artesanal de la zona del Pacífico centroamericano.

PALABRAS CLAVES

Biometría, crecimiento, longitud, longevidad, pargo



ABSTRACT

The size and growth assessment of *Lutjanus guttatus*, *L. peru*, and *L. argentiventris*, captured by the artisanal fleet that disembarks in the community of Búcaro, Panama, for a period of six months, the size composition is described, the weight vs. height relationship, growth was estimated based on the monthly length structure, for which L_{∞} , catabolic coefficient k , the hypothetical age t_0 for height 0, and the evaluation index of Φ' and the longevity $A_{0.95}$, the von Bertalanffy equation was developed for each species and the analysis of the modal progression "VBGF". The length varied between 204 and 648 mm and the weight ranged between 85 and 3 373 g, in the three species, the relationship of these variables showed an isometric growth, the modal progression indicated two cohorts defined in *L. guttatus*, not so in the other species. The results are a baseline contribution for the development of the study of artisanal fishing biology in the Central American Pacific zone.

KEY WORDS

Biometry, growth, length, longevity, snapper

INTRODUCCIÓN

El recurso pesquero es uno de los productos alimentarios más comercializados del mundo y corresponde a la mitad del valor de las exportaciones de países en desarrollo (FAO, 2016). En Panamá el 90 % de la pesca ocurre en las costas del Pacífico, en la cual se reportan 188 sitios de desembarque, ubicados en playas y puertos localizados en las riberas de los ríos, estuarios, manglares y deltas que tienen acceso por tierra. (FAO, 2018). Solo 44 reportan información de captura artesanal e industrial, a la Autoridad de Recursos Acuáticos de Panamá (ARAP) de especies de alto valor comercial como los Lutjanidae.

Esta familia está representada por más de 8 especies de interés comercial (Robertson & Allen, 2015). La estadística revela que los pargos constituyen el producto de mayor captura, por parte de los pescadores artesanales, sin embargo, presenta una disminución al final de la década del 2010 (Valverde Batista, 2013). La sobrepesca y la falta de medidas de protección marina han hecho que en 40 años algunas especies hayan desaparecido en un 75 % (Pauly *et al.*, 2002).

Investigaciones de Soto-Rojas *et al.* (2018) reportan aspectos biométricos de *L. guttatus*, Costa Rica y en Colombia Correa Herrera & Jiménez Segura (2013); Caicedo *et al.* (2006) en *L. peru*. En Panamá destacan los trabajos de Maté (2006), quien indica la importancia de estas especies en el desembarque artesanal en los Golfos de Chiriquí y Montijo, (Durán & Puentes, 2012) en la región de Azuero. Bonilla Gómez *et al.* (2014) reportan la relación peso-longitud de *L. argentiventris* en el Golfo de Montijo y Miranda & Sánchez (2018) la estructura de tallas de *L. guttatus* en la Bahía de Parita, sin embargo, es poca la información al respecto de la biometría de estos peces en nuestro país.



De acuerdo con Castrejón y Bucarán (2020), en el litoral pacífico, durante el año 2017 se registraron 2 351 embarcaciones artesanales en la cual laboran dos pescadores por embarcación. Según FAO (2014) la pesca artesanal representa el 42 % de la captura nacional, de la cual, la pesca de especies de escama, sin identificar cuál, representa el 92 % de la captura anual. Mientras que, para la pesca industrial, los peces de la familia Lutjanidae representan el tercer grupo de importancia después de los engraulidos (Castrejón & Bucarán, 2020).

Según Durán & Puentes (2012) entre las artes de pesca para lutjanidos, más utilizadas en Panamá, se pueden identificar la línea y anzuelo de mano, que representa el 27 % de las artes y 11% de palangres de hasta 1 000 anzuelos para la pesca artesanal, además de palangreros de mayor cantidad de anzuelos para la pesca industrial (ARAP, 2016).

La estadística de captura de peces en nuestro país suele presentar registros no consistentes, debido a que los datos de desembarco, comercialización y exportación no se segregan por especie de peces, por lo cual, el estudio del crecimiento de las especies aquí reportadas se basa en datos de campo de corto plazo y no de registros estadísticos anuales. Las especies de mayor captura en la flota artesanal de Panamá pertenecen a las familias Serranidae, Sciaenidae, Scombridae, Mugilidae y Lutjanidae. Al respecto de esta última familia, *Lutjanus peru* es la de mayor extracción en el sur de la península de Azuero (Durán & Puentes, 2012). No obstante, después de las corvinas *Cynoscion spp*, los pargos, *L. guttatus* y *L. argentiventris* son más abundantes en las descargas de la flota artesanal del Golfo de San Miguel (MEF-AMP, 2004); las tres especies aquí investigadas presentan el mayor valor comercial de las capturas del Parque Nacional Coiba, de las cuales *L. peru* representa el 55,8 % de los desembarques, mientras que *L. guttatus* contribuye con 3,7 % (Vega *et al.*, 2016).

En la bahía de Parita, *L. argentiventris* y *L. guttatus* contribuyen con 15 a 25 % de la pesca (Vergara, 2017), *L. guttatus* corresponde a la tercera especie en abundancia en esta bahía (Vergara *et al.*, 2021), mientras que en el Golfo de Montijo se destacan *L. guttatus* y *L. peru* (Gómez *et al.*, 2021).

Debido a la importancia de la pesquería, desde el punto de vista de la seguridad alimentaria y la exportación, es necesario recabar información que sirva de línea base para el manejo sostenible y regulación del recurso, de allí el interés de analizar las características biométricas y de crecimiento de *Lutjanus guttatus*, *L. peru* y *L. argentiventris*.

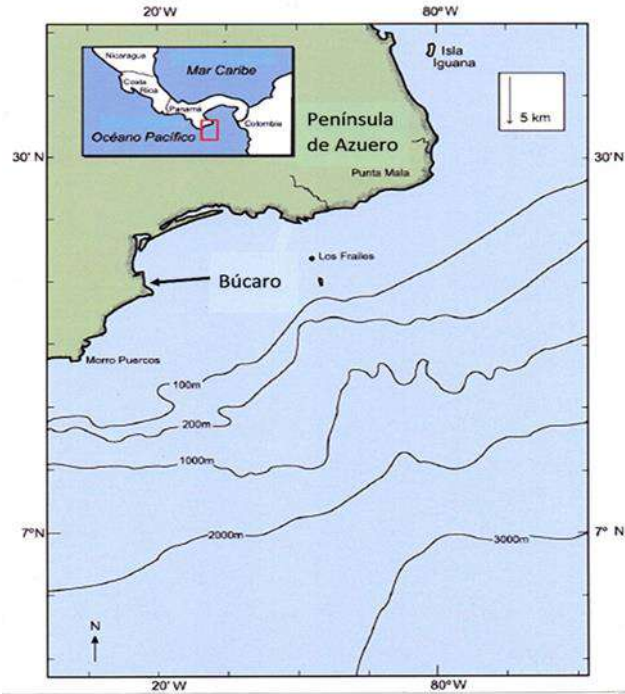
MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio fue realizado en la ensenada de Búcaro, Provincia de Los Santos, Panamá, próximo a la desembocadura del Río Tonosí e Isla de Cañas, a los 7° 21' 03.74" N y 80° 21' 28.83" W (Figura 1).



Figura 1.

Mapa del área de estudio, Búcaro, Los Santos, Panamá Fuente: Modificado de Margulies et al. (2018)



Se realizaron muestreos aleatorios del desembarque de la flota artesanal provenientes de la zona sur de la península de Azuero, por un período de seis meses, tres de temporada lluviosa (octubre, noviembre y diciembre) y tres de seca (enero, febrero y marzo). A las tres especies, *L. guttatus* (pargo de la mancha), *L. peru* (pargo seda) y *L. argentiventris* (pargo amarillo) se le determinó la longitud total al centímetro inferior con un ictiómetro C-THRU flexible y el peso en una balanza granataria con 0,1 g de precisión.

Se analizó la frecuencia de longitud de los ejemplares con un intervalo de 50 mm, se correlacionó con los pesos de cada especie, mediante la regresión, $P = a * T^b$. (Froese, 2006; Chiappa Carrara et al., 2009). El coeficiente b se utilizó en la evaluación de la isometría de las especies, para tal propósito se calcularon los estadísticos “ t ” (Caicedo et al., 2006) y “ t_s ” (Walpole et al., 2012), con significancia de $\alpha = 0,05$ para confirmar la hipótesis de isometría.

El crecimiento se estudió a partir de las variables calculadas según Ford-Walford (Gulland, 1983) y el modelo de von Bertalanffy (Gulland, 1971), longitud asintótica (L_∞) por el método gráfico de Powel (1979) y Wetherall (1986) y el coeficiente k (de León, 2005), mediante la rutina ELEFAN I (Pauly & David, 1981).

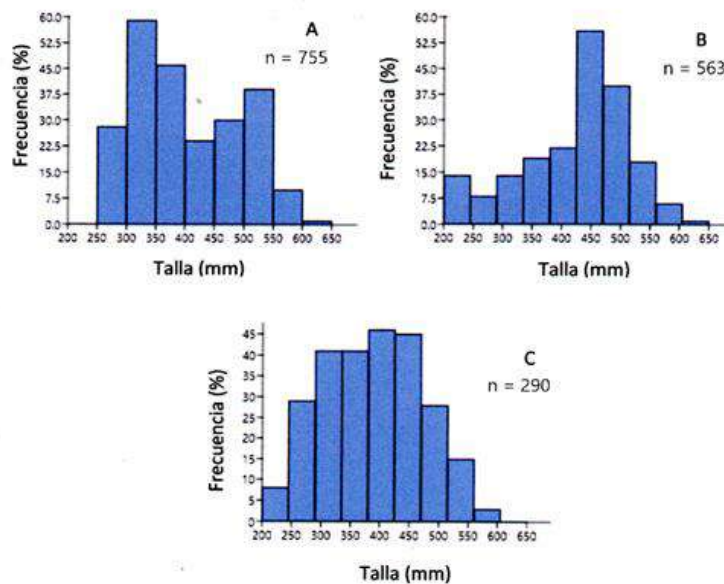
La descomposición de frecuencias de longitudes mensuales se determinó según los métodos: Bhattacharya (1967) y NORMSEP (Hasselblad & Tomlinson, 1971) de las tres especies estudiadas; a partir de esta se determinó la edad hipotética a la cual la longitud es 0, conocido como parámetro de ajuste de la curva de crecimiento en el origen t_0 (Pauly, 1979). Se estableció el índice de evaluación phi prima Φ' (Pauly & Munro, 1984) y la longevidad o edad límite $A_{0,95}$ según Taylor (1960) y Alcaraz García (2012). El análisis de la progresión modal “VBGF” (Bertalanffy, 1938) se desarrolló con el paquete FiSTAT II ver. 1.2.2. (Gayanilo *et al.*, 2005).

RESULTADOS

La longitud mínima alcanzada de *L. guttatus*, fue de 204 mm y la máxima de 610 mm (Figura 2A) con promedio de 400,56 mm; los pesos oscilaron entre 113,4 g hasta 2 721,6 g y media de 841,51 g. En *L. peru*, osciló entre 205 y 648 mm, (Figura 2B) y promedio de 422,81 mm; el peso mínimo registrado fue de 85 g, y el máximo de 3 033,4 g y media 1 061,10 g. En *L. argentiventris*, la longitud mínima fue de 214 mm, y la máxima 604 mm (Figura 2C), con promedio mensual de 386,15 mm; el peso mínimo 141,8 g y máximo de 3 373,6 g y media 951,53 g (Tabla 1).

Figura. 2.

Frecuencia de tallas de *L. guttatus* (A), *L. peru* (B), *L. argentiventris* (C), Búcaro, Panamá.



La relación peso-longitud de las tres especies presentó un ajuste altamente significativo (Tabla 1), las cuales están descritas en la figura 3A. *L. guttatus*, 3B. *L. peru* y 3C *L. argentiventris*

Tabla 1.

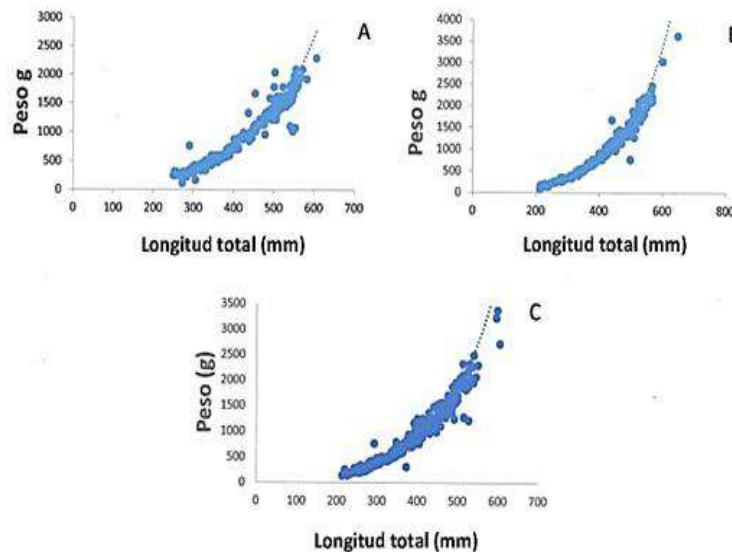
Relación peso – longitud de las tres especies estudiadas

Especie	Relación Peso – Longitud	R ²
<i>L. guttatus</i>	Peso = 0,0001 Longitud ^{2,7074}	0,9394
<i>L. peru</i>	Peso = 0,000001 Longitud ^{2,9133}	0,9783
<i>L. argentiventris</i>	Peso = 0,00001 Longitud ^{2,9234}	0,9599

Se comprobó la significancia “t” de la variable b, en los ejemplares estudiados, las cuales resultaron significativas en todos los casos, el tipo de crecimiento somático se comprobó con la prueba t_s, y mostró que no existe diferencia estadística significativa de 3, que corresponde al valor de isometría. Los valores estadísticos obtenidos en las tres especies (t_s = -168,54, *L. guttatus*, t_s = -60,87 *L. peru*, t_s = -51,71 *L. argentiventris*), indican ser isométricos.

Figura. 3.

Relación peso-longitud de L. guttatus (A), L. peru (B) y L. argentiventris (C), Búcaro, Panamá.



La variación de la longitud media mensual L_{∞} , comparada entre ambos métodos, NORMSEP y Bhattacharya, mostró valores entre 288,55 mm y 530 mm en *L. guttatus*, en *L. peru* varió entre 231,15 mm y 530,00 mm y en *L. argentiventris* estuvo entre 271,33 mm y 462 mm (Tabla 2).

Tabla 2.

Longitud media mensual (mm) de las tres especies de Lutjanidae calculada según los métodos de NORMSEP y Bhattacharya.

Meses	<i>L. guttatus</i>		<i>L. peru</i>		<i>L. argentiventris</i>	
	NORMSEP	Bhattacharya	NORMSEP	Bhattacharya	NORMSEP	Bhattacharya
Octubre	288,55	355,47	272,80	231,15	283,19	280,95
Noviembre	318,39	411,52	255,34	253,00	340,88	292,92
Diciembre	370,31	485,05	264,80	265,15	409,39	283,36
Enero	424,08	353,62	268,60	267,97	422,38	271,33
Febrero	430,00	318,93	277,60	280,12	453,57	271,33
Marzo	530,00	491,34	530,00	491,34	462,75	302,97

El valor final de L_{∞} para las tres especies varió entre 658,50 mm y 696,50 mm. El coeficiente de k fue igual para todas, $k = 0,51$, mientras que la edad hipotética, t_0 , estuvo entre -0,6178 y -0,8379 (Tabla 3).

Tabla 3.

Variables de crecimiento de las tres especies de Lutjanidae según el método "VBGF.

	<i>L. guttatus</i>	<i>L. peru</i>	<i>L. argentiventris</i>
L_{∞}	658,50	696,50	660
k	0,51	0,51	0,51
t_0	-0,6178	-0,8379	-0,6591

Las ecuaciones de Ford-Walford y la relación longitud total - edad de von Bertalanffy, resultaron semejantes entre las especies (Tabla 4).

Tabla 4.

Ecuaciones de crecimiento aplicada a las tres especies de Lutjanidae y calculadas según los métodos de Ford-Walford y von Bertalanffy.

	Ford-Walford	Von Bertalanffy
<i>L. guttatus</i>	$L_{(t+1)} = - 438,09 + 1,66 L_t$	$L_t = 658,5 (1 - e^{-0,51(t+0,6178)})$
<i>L. peru</i>	$L_{(t+1)} = - 463,37 + 1,66 L_t$	$L_t = 696,5 (1 - e^{-0,51(t+0,8379)})$
<i>L. argentiventris</i>	$L_{(t+1)} = - 439,09 + 1,66 L_t$	$L_t = 660,0 (1 - e^{-0,51(t+0,6590)})$

El índice Φ' , varió entre 5,34 y 5,39, la edad límite teórica $A_{0,95}$ según Taylor (1960) fue similar en las tres especies y superior al método de Alcaraz García (2012), con excepción de *L. guttatus*, (Tabla 5).

Tabla 5.

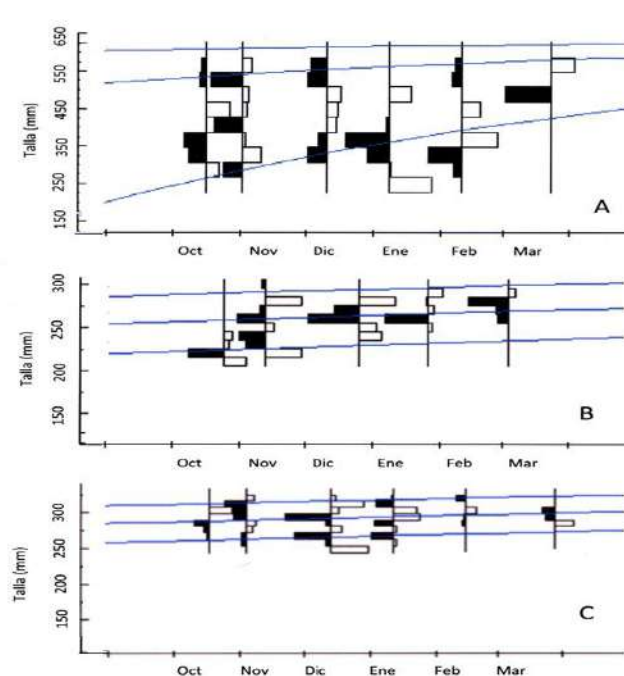
Índice de evaluación de crecimiento (Φ') y edad límite alcanzada en L_{∞} ($A_{0,95}$) de las tres especies de Lutjanidae.

Índice	<i>L. guttatus</i>	<i>L. peru</i>	<i>L. argentiventris</i>	Referencia
Φ'	5,34	5,39	5,35	
$A_{0,95}$	5,26	5,04	5,22	Taylor, 1960
$A_{0,95}$	5,93	4,06	4,06	Alcaraz García, 2012

El análisis de la progresión modal, mediante el método de “VBGF”, indicó la presencia de dos cohortes en *L. guttatus* (Figura 4A), sin embargo, en las otras dos especies no se observó una clara variación de la moda, por lo que no es posible la definición de cohortes (Figura 4B y 4C). La curva de crecimiento se ajustó al modelo de von Bertalanffy, y mostró una variación constante, sin oscilaciones, durante el período de estudio.

Figura 4.

Programación modal de *L. guttatus* (A), *L. peru* (B) y *L. argentiventris* (C), Búcaro, Panamá.



DISCUSIÓN

Debido a que el recurso pesquero sufre altos niveles de explotación, se requiere la evaluación de variables como longitud y peso, relación de estas, crecimiento y progresión modal, que se desconocen y son relevantes para la elaboración de planes y políticas de manejo de especies como los Lutjanidae, los cuales ayudan a la toma de decisiones para el manejo sostenible y responsable del recurso, además de la obligatoriedad de cumplir la normativa establecida en el Decreto Ejecutivo 49 de 1992 que prohíbe el uso de redes agalleras y trasmallos en la captura (GO, 1992).

La interpretación y análisis de los datos en el presente estudio se fija dentro del contexto de selectividad del arte de pesca utilizado, el cual nos brinda información para ejemplares mayores de 200 mm.

Las investigaciones escasas, logística deficiente y censos de capturas incompletos se han convertido en una dificultad para monitorear el recurso a lo largo del Golfo de Montijo, zona cercana al presente estudio, aunque en el área existen algunos registros de abundancia de esta pesquería. En ese sentido investigaciones sobre el ciclo biológico, abundancia, tallas de

capturas y otros aspectos relevantes de estas especies, ayudan a la toma de decisiones para el manejo sostenible y responsable del recurso, de allí la importancia de analizar las relaciones biométricas de los pargos *Lutjanus guttatus* (pargo de la mancha), *L. peru* (pargo seda) y *L. argentiventris* (pargo amarillo), especies de interés comercial en el Pacífico veraguense (Gómez *et al.*, 2021).

La longitud de *L. guttatus*, es superior a lo reportado por Maravilla (2001), con 158 a 458 mm en El Salvador, Andrade Rodríguez (2003) 104 a 490 mm en Guatemala y dentro del intervalo reportado por Sarabia-Méndez *et al.* (2010) en Costa Rica, 160 a 620 mm. El peso es mayor que el indicado por Maravilla (2001) 29 a 2212,5, y dentro del intervalo de valores de Sarabia-Méndez *et al.* (2010), con 60 a 2760 g. Durán *et al.* (2020) indican que esta especie, en Panamá, presenta una longitud de primera madurez de 396,60 mm en hembras y 361,60 mm en machos, la mayoría de los ejemplares capturados superan estas tallas.

En *L. peru*, la longitud es inferior a los valores de Gutiérrez (1990), con 240 a 820 mm en Costa Rica y Barbosa-Ortega (2016) en México, 231 a 754 mm. *L. argentiventris* presenta valores inferiores a los reportados por Rojas *et al.* (2004) en Colombia, 200 a 700 mm, pero dentro del intervalo señalado por García-Contreras *et al.* (2009) en México, 160 a 660 mm.

La relación peso vs longitud total en *L. guttatus* muestra índice de crecimiento inferior al indicado por Sarabia-Méndez *et al.* (2010) con 2,96, Andrade (2003) 2,897, Soto-Rojas *et al.* (2009) en el Golfo de Nicoya, Costa Rica, 2,867 y Bystrom (2012) en la costa pacífica de Costa Rica, indica valores de 2,79. En *L. peru*, el valor es inferior al de Saucedo-Lozano *et*



al. (1998) en Chiapas, México, reporta un índice de 3,04, lo que resulta ser superior a los mostrados por Gallardo-Cabello *et al.* (2010) 2,82 en Michoacán, México y Barbosa-Ortega (2016), en bahía de la Ventana, Baja California Sur, México, con 2,84. En *L. argentiventris* es superior al indicado por De la Hoz *et al.* (2015) 2,83 en Colombia, e inferior a la reportada por Bonilla-Gómez *et al.* (2014) en el golfo de Montijo, 3,07.

El crecimiento isométrico, calculado para *L. guttatus* en este estudio coincide con González Ochoa (2010) en el golfo de California, pero difiere de Puentes *et al.* (2014) con 2,90 y De la Hoz (2015), quien indica un índice de 2,74, ambos en Colombia. En *L. peru* se reporta isometría por Gallardo-Cabello *et al.* (2010) con índice igual a 2,82, De la Hoz *et al.* (2015), 2,92 y Barbosa Ortega (2016) con 2,83 en México y diferente a lo indicado por Lucano Ramírez *et al.* (2001) 2,95 para esta especie en México; Rojas *et al.* (2004), en Colombia, reporta un valor de 3,12 y De la Hoz (2015) 2,83 en *L. argentiventris*. Cabe destacar que solo De la Hoz *et al.* (2015), Barbosa Ortega (2016) y Lucano Ramírez *et al.* (2001) determinaron la significancia estadística del índice “b” para confirmar la isometría.

En diversos estudios se ha utilizado varios métodos para determinar el crecimiento de los peces, entre los cuales se puede señalar, el análisis de los *annulus* en el hueso urohial (González & Eslava, 1999), las escamas (Gallardo Cabello *et al.*, 2010) y en otolitos (Andrade, 2003, Amezcua *et al.*, 2006, García Contreras *et al.*, 2009, Moore, 2019). Caicedo *et al.* (2006) enfatizan que el uso del modelo de von Bertalanffy es considerado uno de los métodos más efectivo y práctico, por lo que se utiliza en el presente estudio.

El crecimiento de los organismos está íntimamente relacionado con la fisiología de los organismos, tema desarrollado a través de la teoría de la tasa metabólica de Pütter en 1920 (Kearney, 2020), concepto base bajo el cual se desarrolló el modelo de crecimiento de von Bertalanffy (Bertalanffy, 1957), creado para datos recopilados para más de un año, debido a que estima el crecimiento relacionado con las variaciones de las transformaciones bioquímicas y los cambios de estación climática en las zonas templadas, particularmente en peces. El modelo teóricamente es efectivo si se utiliza información de más de un año, lo que asegura que las variaciones fisiológicas, que se marcan en las estructuras de aposición, en especial los otolitos, que sirven para confirmar que los indicadores matemáticos acompañan las marcas anuales de incremento, relacionados con el aumento de la talla, tal es el caso del estudio del crecimiento de los peces *Sebastes mentella* y *S. fasciatus* en Canadá (Campana *et al.*, 2016).

Hay que resaltar que el método ha sido utilizado en zonas tropicales, donde no se producen con la misma fuerza efectos metabólicos a través de las temporadas climáticas del año, aún más, se ha utilizado para el estudio de invertebrados que viven entre un año y poco más de 30 meses, como es el caso de cangrejos de manglar *Scylla serrata* en Bangladesh (Zafar *et*

al., 2006), la almeja *Asaphis deflorata* en Venezuela (Prieto et al., 2009), camarones marinos *Litopenaeus vannamei* y *L. stylirostris* en México (Aragón-Noriega, 2016) y camarón de agua dulce *Macrobrachium brasiliensis* en Brasil (Nogueira et al., 2022).

De acuerdo al método antes indicado, la estructura de tallas de las especies estudiadas a través de los histogramas de frecuencia representa individuos de tamaño mediano, así la especie *L. guttatus*, muestra frecuencia bimodal, reflejo de la existencia de dos cohortes; mientras que se observa distribución unimodal en *L. peru* y *L. argentiventris*, con individuos de mayor tamaño con respecto a la primera especie. Ramos-Cruz (2001) reporta longitudes máximas de 600 mm, en esta última especie en México, similares a este estudio. La fluctuación de los datos encontrados en esta investigación, indica que las tallas máximas no sobrepasan 650 mm.

Otro de los indicadores de crecimiento, el valor L_{∞} resulta ser más bajo, en las tres especies, que lo reportado en la literatura, para *L. guttatus* con valores de 664 mm (Andrade, 2003), +659 mm (Soto-Rojas et al., 2009) y 966 mm (Sarabia-Méndez et al., 2010); en *L. peru*, con valores de 833,40 mm (Gutiérrez, 1990) y 811,20 mm (Gallardo-Cabello et al., 2010) y en *L. argentiventris* 950 mm (Rojas et al., 2004) y 735 mm (García Contreras et al., 2009).

El estado de condición del individuo representado por el coeficiente k en *L. guttatus*, resulta ser superior a lo reportado por Andrade (2003) y Flores (2013), ambos con coeficiente de 0,13 y Sarabia-Méndez et al. (2010) 0,22; en *L. peru*, está entre 1,46 (Gutiérrez, 1990) y 0,24 (Gallardo-Cabello et al., 2010). *L. argentiventris* presentó valor superior a Rojas et al. (2004) con 0,20 y García Contreras et al. (2009) quienes reportan valor de 0,097.

Hay que señalar que la selectividad del arte de pesca afecta los índices k y L_{∞} obtenidos, como ocurre en este estudio, que pueden variar si se capturan individuos de longitudes menores a las reportadas, Cubillos et al. (2009) y Zúñiga (2009) advierten la posibilidad de subestimar el valor de estos índices al carecer de longitudes pequeñas.

La edad hipotética para la longitud 0 en *L. guttatus* presenta valores inferiores al mostrado por Andrade (2003) $t_0 = 0$ y Sarabia-Méndez et al. (2010) con -0,10, pero superior al indicado por Soto-Rojas et al. (2009) -2,66; en *L. peru*, el valor es inferior al de Gallardo-Cabello et al. (2010) -0,39 y en *L. argentiventris* es inferior a Rojas et al. (2004) -0,72. Alarcón et al. (2017) señalan que valores negativos de t_0 indican un crecimiento exponencial rápido de los ejemplares pequeños, si los comparamos con los adultos.

El índice de Φ' es semejante en las tres especies, hecho esperado debido a que estas pertenecen a la misma familia, tal como lo señala Pauly & Munro (1984). Los valores obtenidos resultan superiores a los reportados en la literatura, de 3,40 para *L. guttatus*,

(Puentes *et al.*, 2014), 3,01 y 3,23 en *L. peru* (Yarzhombek, 2007; Gallardo-Cabello *et al.*, 2010) y *L. argentiventris* registra en la base de datos FishBase (Ver. 12/2020), 2,86; por lo que el indicador Φ' obtenido sirve de referencia para futuras evaluaciones de la biología pesquera de los Lutjanidae en la costa pacífica de Centroamérica.

Al igual que en el índice anterior, el de longevidad de Taylor (1960) es semejante en las tres especies, no obstante, Sarabia-Méndez *et al.* (2010) reporta valor de 13,54 años en *L. guttatus*, Gallardo-Cabello *et al.* (2010), 12 años para *L. peru* y Alcaraz García (2012), en el Golfo de México, entre 8 y 10 años en *L. argentiventris*. Los valores de t_0 , Φ' y $A_{0,95}$ encontrados en este estudio sugieren especies de longevidad corta y crecimiento rápido, contrario a lo reportado por Kamukuro *et al.* (2005) en *L. fulviflamma* en Tazania. Según Heupel *et al.* (2010), ejemplares con las características descritas en este estudio los torna vulnerables a la pesca, lo que implica la posibilidad de una disminución en las longitudes de captura, que reduce la variabilidad genética, la población y la permanencia en la pesquería (Kenchington, 2003; Cerdeneras-Ladrón de Guevara *et al.*, 2014; Mendoza-Ureche *et al.*, 2019).

Las curvas de progresión modal muestran dos cohortes para *L. guttatus*, no así en las otras dos especies, debido posiblemente a tres factores, estrecha variación de longitudes, cantidad de ejemplares capturados y período de colecta corto, lo que imposibilita la definición de cohortes en *L. peru* y *L. argentiventris*. Esta limitación del método no permite diferenciar sucesiones temporales de moda, cuando las longitudes no varían entre meses (Díaz, 2013). La longevidad calculada con los datos obtenidos en el presente estudio sugiere la posibilidad de obtener mayor cantidad de cohortes en *L. guttatus*, en ese sentido, Csirke (1989), indica que, en especies con longevidad de seis años, se espera que estén compuestas por seis grupos de edad.

CONCLUSIONES

Los ejemplares capturados están dentro del intervalo de longitud semejante en las tres especies, mientras que la especie *L. guttatus* mostró una estructura bimodal.

Las variables de crecimiento representadas por L_∞ y t_0 fueron inferiores a ejemplares reportados en otros estudios, contrario para el coeficiente k . El índice de Φ' resultó ser muy parecido entre las especies, de acuerdo con lo esperado, por ser del mismo género. La longevidad $A_{0,95}$ muestra crecimiento rápido y longevidad corta y una progresión modal que permite identificar dos cohortes en *L. guttatus*, no así en las otras.

La formulación de medidas de manejo ha resultado difícil desarrollarlas, toda vez que no existe suficiente información de las capturas en el área, sin embargo, estudios a



mayor plazo podrían proporcionar suficiente información para establecer políticas de manejo de este recurso, lo que hace difícil evaluar los posibles impactos que se generen por la extracción de estas especies.

Los resultados sirven de línea base de la biología pesquera artesanal de estas especies, por lo que se recomienda ser utilizado con precaución debido a la selectividad del arte de pesca, período de colecta e intervalo de clases y confirmarlos con investigaciones a más largo plazo, para poder aplicarse en programas de manejo del recurso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alarcón, M., Eslava, N., González, L.W. & Guevara, F. (2017). Crecimiento y mortalidad del pez *Canthidermis sufflamen* (Perciformis: Balistidae) de los archipiélagos Los Frailes, y Los Testigos, Venezuela. *Rev. Biol. Trop.* 65(3), 858-867. <https://doi.org/10.15517/rbt.v65i3.23715>
- Alcaraz García, Z.T. (2012). *Edad, Crecimiento y Mortalidad natural del bonito Euthynnus alletteratus (Rafinesque, 1810) en el suroeste del Golfo de México*. Tesis de Maestría. Universidad Veracruzana. 53 p.
- Amezcuca, F., Soto-Ávila, C. & Green-Ruiz, Y. (2006). Age, growth, and mortality of the spotted rose snapper *Lutjanus guttatus* from the southeastern Gulf of California. *Fish. Res.* 77: 293-300. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2005.10.012>
- Andrade Rodríguez, H.A. (2003). *Age determination in the snapper Lutjanus guttatus (Pisces, Lutjanidae) and investigation of fishery management strategies in the pacific coast of Guatemala*. Master Thesis. Univ. Trømsø, Norway. 45 p.
- Aragón-Noriega, E. (2016). Crecimiento individual de camarón blanco *Litopenaeus vannamei* (Boo9ne, 1931) y camarón azul *Litopenaeus stylirostris* (Stimpson, 1874) (Decapoda: Penaidae) con un enfoque multi-modelo. *Lat. Am. J. Aquat. Res.*, 44(3): 480-486. <https://www.scielo.cl/pdf/lajar/v44n3/art06.pdf>
- ARAP. (2016). Plan de acción para la pesca sostenible. Autoridad de los Recursos Acuáticos de Panamá, 96 p.
- Barbosa-Ortega, W.A. (2016). *Estructura de las capturas y talla de madurez del Huachinango Lutjanus peru (Perciformes: Lutjanidae) en la bahía de la Ventana, B.C.S., México*. Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional. La Paz. 89 p.



- Bertalanffy, L. von. (1938). A quantitative theory of organic growth. *Hum. Biol.* 10(2), 181-213. <https://www.jstor.org/stable/41447359>.
- Bertalanffy, L. von. (1957). Quantitative laws in metabolism and growth. *Quart. Rev. Biol.*, 32(3), 217-231. <https://www.doi.org/10.2307/2815257>
- Bhattacharya, C.G. (1967). A simple method of resolution of distribution into Gaussian components. *Biometrics* 23(1), 115-135. <https://doi.org/10.2307/2528285>.
- Bonilla-Gómez, J.L., Robles, Y.A. & Vega, A.J. (2014.) Length-weight relationship and biological information of the yellow snapper *Lutjanus argentiventris* from a tropical estuary: Río Caté, Gulf of Montijo, Panama. *J. Appl. Ichthyol.*, 30, 227-229. <https://doi.org/10.1111/jai.12258>.
- Bystrom, A. (2012). *Analysis of Bejuco's bottom longline spotted snapper fishery, Pacific coast, Costa Rica*. Programa de restauración de tortugas marinas. 60 p.
- Caicedo, J.A., Rubio, E.A., Zapata, L.A. & Giraldo, A. (2006). Estimación del crecimiento de *Lutjanus peru* (Pisces: Lutjanidae) basado en capturas artesanales experimentales realizadas en el Parque Nacional Natural Gorgona y su área de influencia, océano Pacífico colombiano. *Invest. Mar.*, 34(2): 163-168. <https://doi.org/10.4067/S0717-71782006000200015>.
- Campana, S.E., Valentin, A.E., MacLellan, S.E. & Groot, J.B. (2016). Image-enhanced burnyt otoliths, bomb radiocarbon and the growth dynamics of redbfish (*Sebastes mentella* and *S. fasciatus*) off the eastern coast of Canada. *Mar. Fresh. Res.*, 67: 925-936. <https://www.doi.org/10.1071/MF15002>
- Castrejón, M. & Bucarán, S.J. (2020). *Diagnóstico integral del sector pesca y acuícola de la República de Panamá*. Banco Interamericano de Desarrollo, 158 p.
- Cerdeneras-Ladrón de Guevara, G., Ramírez-Antonio, E., Ramos-Carrillo, S., González-Medina, G., Anislado-Tolentino, V., López-Herrera, D. & Karam-Martínez, S. (2014). Impacto de la actividad pesquera sobre la diversidad biológica. *Rev. Iberoam. Cienc.* 1(1), 95-114.
- Chiappa-Carrara, X., Galindo de Santiago, M.C. & Cervantes Sandoval, A. (2009). *Introducción a los modelos matemáticos de crecimiento con aplicaciones en sistemas biológicos*. UMDI-SISAL, Fac. Ciencias, UNAM, México. 148 P.



- Correa Herrera, T & Jiménez Segura, L.F. (2013). Biología reproductiva de *Lutjanus guttatus* (Perciformes: Lutjanidae) en el Parque Nacional Natural Utría, Pacífico colombiano. *Rev. Biol. Trop.*, 61(2), 829-840.
- Csirke, J. (1989). Introducción a la dinámica de poblaciones de peces. *FAO Doc. Tec.* 192, 79 p.
- Cubillos, L. A, Aguayo, M., Neira, M., Sanhueza, S. & Castillo-Jordán, C. (2009). Verificación de la edad y crecimiento del besugo *Epigonus crassicaudus* (de Buen, 1959) admitiendo error en la determinación de la edad. *Rev. Biol. Mar. Oceanogr.*, 44(2), 417-427.
- De León, M.E. (2005). *Variabilidad temporal de los parámetros poblacionales de la langosta Espinosa del Caribe Panulirus argus (Latreille, 1804) en aguas de Cuba*. Tesis de Doctorado. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, La Paz, México. 71 p.
- De la Hoz, J., Duarte, L.O. & Manjarrés-Martínez, L. (2015). *Aspectos biológico-pesqueros de especies capturadas en aguas marinas y continentales de Colombia. Relaciones biométricas e indicadores basados en tallas*. Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca, Bogotá. 36 p.
- De la Hoz, J., Duarte, L.O. & Manjarrés-Martínez, L. (2015). *Aspectos biológico-pesqueros de especies capturadas en aguas marinas y continentales de Colombia. Relaciones biométricas e indicadores basados en tallas*. Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca, Bogotá. 36 p.
- Díaz, E. (2013). Estimación del crecimiento del jurel *Trachurus murphy* capturado en el Perú, a partir del análisis de las frecuencias de tallas. *Rev. peru. Biol.*, 20(1), 61-66.
- Durán, I.L. & Puentes, V. (2012). *Resultados de gestión en Panamá. Proyecto de pesca BID-CMAR. Panamá*. Corredor Marino del Pacífico Este Tropical. 99 p.
- Durán, I.L., Gómez, V.A., Goti, I. & Gómez, J.A. (2020). Biología reproductiva del pargo de la mancha *Lutjanus guttatus* (Teleostei: Lutjanidae) en la ensenada de Búcaro, borde externo de la ecorregión Panamá. *AquaTechnica*, 2(3), 137-149.
<https://doi.org/10.33936/at.v2i3.3085>
- FAO. (2014). Contribución de la pesca y la acuicultura a la seguridad alimentaria y el ingreso familiar en Centroamérica, Panamá Oficina subregional para Mesoamérica, 91 p.



- FAO. (2016). El estado mundial de la pesca y la acuicultura. Contribución a la seguridad alimentaria y la nutrición para todos. 23 pp. <http://www.fao.org/3/a-i5555s.pdf>. 17/11/2020.
- FishBase. Ver. 12/2020. <https://www.fishbase.de/>. 18/01/2021.
- Flores, H. (2013). Cultivo de pargo manchado *Lutjanus guttatus* (Steindachner, 1869), una oportunidad para Colombia. *Rev. Cient. Sabia*, 2, 26-38.
- Froesse, R. (2006). Cube law, condition factor and weight-length relationships: history, meta-analysis and recommendations. *J. Appl. Ichth.*, 22, 241–253.
<https://doi.org/10.1111/j.1439-0426.2006.00805.x>.
- Gallardo-Cabello, M., Sarabia-Méndez, M., Espino-Barr, E. & Anislado-Tolerino, V. (2010). Biological aspects of *Lutjanus peru* in Bufadero Bay, Michoacán, México: growth, reproduction and condition factors. *Rev. Biol. Mar. Oceanogr.*, 45(2), 205-215.
- García-Contreras, O.E., Quiñónez-Vásquez, C., Morán-Angulo, R.E. & Valdez-Pineda, M.C. (2009). Age, growth, and age structure of Amarillo snapper off the coast of Mazatlán, Sinaloa, Mexico. *North Am. J. Fish. Manag.*, 29, 223-230.
<https://doi.org/10.1577/M06-025.1>
- Gayanilo, F.C., Sparre, P. & Pauly, D. (2005). FAO-ICLARM stock assessment tools II (FiSAT II). Revised version. User's guide. *FAO Computerized information series* 8. 168 p.
- Gómez, V.A., Sánchez, B. & Gómez, J.A. (2021). Biometría de *Lutjanus peru* (Pargo seda) y *Lutjanus guttatus* (Pargo de la mancha) (Pisces: Lutjanidae) en el golfo de Montijo, Pacífico de Panamá. *Tecnociencia*, 23(1), 125-142.
- González, L.W. & Eslava, N. (1999). Edad de crecimiento del pargo colorado, *Lutjanus purpureus* Püey, 1867 (Teleostei: Lutjanidae) de la región oriental de Venezuela. *Rev. Biol. Mar. Oceanogr.*, 34(1), 99-107.
- González Ochoa, O.A. (2010). *Estructura poblacional y genética del pargo Lunarejo Lutjanus guttatus y del chupalodo Porichthys analis (Pisces) presentes en la fauna de acompañamiento del camarón en el Golfo de California*. Tesis de Doctorado, Centro de Investigaciones Biológicas del Nordeste, La Paz, México. 164 p.
- GO. (1992). Decreto Ejecutivo No. 49. Gaceta Oficial 22093, 3-4.



- Gulland, J.A. 1971. *Manual de métodos para la evaluación de las poblaciones de peces*. FAO/Ed. Acribia. 153 p.
- Gulland J.A. (1983). Fish Stock Assessment. A manual of basic methods. *John Wiley & Sons*, Chichester. 223 p.
- Gutiérrez, R. (1990). Tasas de crecimiento, mortalidad, reclutamiento, rendimiento y biomasa relativos por recluta de *Lutjanus peru* (Perciformes: Lutjanidae) en el Pacífico Noroeste de Costa Rica. *Rev. Biol. Trop.*, 38(2B), 441-447.
- Hasselblad, V. & Tomlinson, P.K. (1971). NORMSEP. Normal distribution separator. In: N.J. Abramson (Comp.), Computer programs for fish stock assessment. *FAO. Fish. Tech. Pap.*, 101:11(1)2.1-11(1)2.10.
- Heupel, M.R., Williams, A.J., Welch, D.J., Davies, C.R., Penny, A., Kritzer, P.J., Marriott, R.J. & Mapstone, B.D. (2010). Demographic characteristics of exploited tropical lutjanids: a comparative analysis. *Fish. Bull.*, 108(4), 420-432.
- Kamukuro, A.R., Hecht, T. & Mgaya, Y.D. (2005). Effects of exploitation on age, growth and mortality of the blackspot snapper, *Lutjanus fulviflamma*, at Mafia Island, Tanzania. *Fish. Mang. Ecol.*, 12: 45-55. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2400.2004.00418.x>
- Kenchington, E.L. (2003). The effects of fishing on species and genetic diversity. 235-253. In: Sinclair and Valdimarsson, G. (Eds.). *Responsible fisheries in the marine ecosystem*, Chapter 154. CABI Publishing, Rome. 448 p. <https://doi.org/10.1079/9780851996332.0235>
- Kearney, M.R. 2020. What is the status of metabolic theory one century after Pütter invented the von Bertalanffy growth curve? *Biol. Rev.*, 96(2), 557-575. <https://doi.org/10.1111/brv.12668>
- Lucano-Ramírez, G., Villagrán-Santa. C.M., Ruiz-Ramírez, S. & López Murillo, T. (2001). Características reproductivas del huachinango en la costa sur de Jalisco. *Cienc. Mar.* (5): 21-27. <https://www.yumpu.com/es/document/read/14638348/caracteristicas-reproductivas-del-huachinango-capturado-por-la->
- Maravilla, E.A. (2001). *Época reproductiva, hábitos alimentarios, edad y crecimiento del pargo mancha Lutjanus guttatus (Steindachner, 1869) (Pisces: Lutjanidae). Los Cóbanos y Puerto de la Libertad*. Tesis de licenciatura. Universidad de El Salvador. San Salvador. 73 p.



- Margulies D., Scholey, V.P., Wexler, J.B., & Mauser, E. (2018). Síntesis de las investigaciones en el Laboratorio de Achotines. Novena Reunión. Documento SAC-09-14. *Comisión Interamericana del Atún Tropical*. 18 p.
- Maté, J. (2006). Análisis de la situación de la pesca en los golfos de Chiriquí y de Montijo. The Nature Conservancy, *Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales*, Panamá. 68 p.
- MEF-AMP. (2004). Consultoría para elaborar el Plan de Manejo Costero Integral en el Golfo de San Miguel y Zonas Adyacentes, en el marco del programa de Desarrollo Sostenible del Darién. Arden & Price Consulting / University of Miami. Productos N° 3 A, 8, 9 A y B, 17.
- Mendoza-Ureche, R., Quintero-Galvis, J.R. & Narváez-Barandica, C. (2019). Baja variabilidad y diferenciación genética poblacional en la “lisa”, *Mugil incilis* (Teleostei: Mugilidae) del Caribe colombiano. *Rev. Biol. Trop.*, 67(3), 501-517.
- Miranda, H. & Sánchez, E. (2018). Análisis de talla, contenido estomacal y gonadal en las principales especies de interés comercial capturado en la bahía de Parita, Panamá. *Guacamaya*, 3(1), 45-60
- Moore, B.R. (2019). Age-based life history of humpback red snapper, *Lutjanus gibbus*, in New Caledonia. *J. Fis. Biol.*, 95(6):1-11. <https://doi.org/10.1111/jfb.14142>
- Nogueira, C.S., Porto, A.C.F., Barros-Alves, S. Jacobucci, G.B. & Almeida, A.C. (2022). Growth and longevity of the freshwater prawn *Macrobrachium brasilense* (Decapoda: Palaemonidae). *Rev. Mex. Biod.*, 93, e933751. 8 p. <https://revista.ib.unam.mx/index.php/bio/article/view/3751/4424>
- Pauly, D. (1979). Theory and management of tropical multispecies stocks. A review, with emphasis on the southeast Asian demersal fisheries. *ICLARM Studies and Reviews* 1. 35 p.
- Pauly, D. & David, N. (1981). ELEFAN I, a BASIC program for the objective extraction of growth parameters from length-frequency data. *Berichte der Deutschen Wissenschaftlichen Kommission für Meeresforschung*, 28(4), 204-211.
- Pauly, D., Christensen, V., Guénette, S., Pitcher, T.J., Sumaila, U.R., Walters, C.J., Watson, R. & Zeller, D. (2002). Towards sustainability in world fisheries. *Nature*, 418, 689-695.



- Pauly, D. & Munro, J.L. (1984). Once more on the comparison of growth in fish and invertebrates. *Fishbyte*, 2(1): 21.
- Powell, D.G. (1979). Estimation of mortality and growth parameters from the length frequency of a catch. Rapp. P.-V. Réun. Cons. Int. Explor. Mer., 175, 167–169.
- Prieto, A., Marcano, J., Barrios, A. & González, L. (2009). Producción somática y mortalidad en una población de la almeja, *Asaphis deflorata*, en la localidad de Cauratinga, golfo de Paria, estado Sucre, Venezuela. *Zootecnia Trop.*, 27(4), 419-426. <https://ve.scielo.org/pdf/zt/v27n4/art07.pdf>
- Puentes, V., Escobar, F.D., Polo, C. & Alonso, J.C. (2014). Estado de los principales recursos pesqueros de Colombia, 2014. Serie Recursos pesqueros de Colombia. Oficina de generación del conocimiento y la Información. *Autoridad Nacional de la Acuicultura y Pesca*. 244 p.
- Ramos-Cruz, S. (2001). Evaluación de la pesquería de huachinango *Lutjanus peru* en la zona costera de Salina Cruz, Oaxaca, México, durante 1995. *Cienc. Pesq.*, 15, 151-157.
- Robertson, D.R. & Allen, G.R. (2015). Peces costeros del Pacífico Oriental Tropical: sistema de información en línea. Versión 2.0. *Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales, Panamá*. <https://biogeodb.stri.si.edu/sfstep/es/pages>
- Rojas, P.A., Gutiérrez, C.F. Puentes, V., Villa, A.A. & Rubio, E.A. (2004). Aspectos de la biología y dinámica poblacional del pargo coliamarillo *Lutjanus argentiventris* en el Parque Nacional Natural Gorgona, Colombia. *Invest. Mar.*, 32(2), 23-36. <https://doi.org/10.4067/S0717-71782004000200003>
- Sarabia-Méndez, M., Gallardo-Cabello, M., Espino-Barr, E. & Anislado-Tolentino, V. (2010). Características de la dinámica poblacional de *Lutjanus guttatus* (Pisces: Lutjanidae) en Bahía Bufadero, Michoacán, México. *Hidrobiológica*, 20(2), 147-157.
- Saucedo-Lozano, M., González-Sansón, G. & Chiapa-Carrara, X. (1998). Alimentación natural de juveniles de *Lutjanus peru* (Nichols y Murphy, 1922) (Lutjanidae: Perciformes) en la costa de Jalisco y Colima, México. *Cienc. Mar.*, 25(3), 381-400.
- Soto Rojas, R.L., Mejía Arana, F., Palacios, J.A. & Hiramatsu, K. (2009). Reproducción y crecimiento del pargo de mancha *Lutjanus guttatus* (Pisces: Lutjanidae) en el Golfo de Nicoya, Costa Rica. *Rev. Biol. Trop.*, 57(1-2), 125-131.



- Soto-Rojas, R.L., Hernández-Noguera, L.A. & Vega-Alpizar, J.L. (2018). Parámetros poblacionales y hábitos alimenticios del pargo mancha (*Lutjanus guttatus*) en el Área Marina de Pesca Responsable Paquera-Tambor, golfo de Nicoya, Costa Rica. *Uniciencia*, 32(2), 96-110.
- Taylor, C.C. (1960). Temperature, growth and mortality - The Pacific cockle. *J. Conseil int. Explor. Mer.*, 26(1): 177-124. <https://doi.org/10.1093/icesjms/26.1.117>
- Valverde Batista, R.A. (2013). Producción y comercialización de la pesca artesanal o de pequeña escala en Panamá. *Centros*, 2 (1), 115-131.
- Vega, A.J, Robles, Y.A. & Maté, J.L. (2016). *La pesca artesanal en el Parque Nacional Coiba y zona de influencia. Biología y pesquería de sus principales recursos, con recomendaciones de manejo*. Fundación MarViva, Panamá, 67 p.
- Vergara, Y. (2017). *Caracterización de la pesca artesanal en la Bahía de Parita y análisis de desembarques en los puertos de Boca de Parita y El Agallito, Provincia de Herrera, Panamá*. Tesis de Maestría. Universidad de Panamá, Santiago. 139 p.
- Vergara, Y.A., Robles, Y.A. & Vega, A.J. (2021). Composición de los desembarques en la pesca artesanal en los puertos de Boca Parita y El Agallito, Pacífico panameño. *Rev. Mar.*, 13(2), 69-82. DOI: <http://dx.doi.org/10.15359/revmar.13-2.5>
- Walpole, R.E., Myers, R.H., Myers, S.L. & Ye, K. (2012). Probability and Statistics for Engineers and Scientist. *Pearson Education*. 791 p.
- Wetherall, J.A. (1986). A new method for estimating growth and mortality parameters from length frequency data. *Fishbyte*, 4, 12-14.
- Yarzhombek, A.A. (2007). Compilation of studies on the growth of Acanthopterygii. Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (VNIRO). 86 p.
- Zúñiga, M. (2009). *Dinámica poblacional del Dorado (Coryphaena hippurus) en Baja California Sur, México: implicaciones para su manejo*. Tesis de Doctorado, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Instituto Politécnico Nacional, La Paz, Baja California Sur, México. 203 p.
- Zafar, M., Nurul Amin, S.M. & Rahman, M.M. (2006). Population dynamics of mud crab (*Scylla serrata*) in the southeastern Coastal region of Bangladesh. *Asian Fish. Sci.*, 19, 43-50. <https://www.doi.org/10.33997/j.afs.2006.19.1.005>





CREACIÓN DE HERRAMIENTA EN LÍNEA, ÚTIL PARA ABORDAR UN PROBLEMA DE VALORES EN LA FRONTERA DEL TIPO DIRICHLET

CREATION OF ONLINE TOOL, USEFUL TO HANDLE A DIRICHLET'S BOUNDARY VALUE PROBLEM

Ramiro A. Villarreal G.

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

ramiro.villarreal@up.ac.pa

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

Fecha de recepción: 24 de septiembre de 2023

Fecha de aceptación: 20 de marzo de 2024

DOI [HTTPS://DOI.ORG/10.48204/J.TECNO.V26N2.A5396](https://doi.org/10.48204/J.TECNO.V26N2.A5396)

RESUMEN

Se programó una herramienta digital para utilizarse en línea y gratuita, a través de la plataforma Geogebra. Dicha herramienta resuelve numéricamente la ecuación de Laplace con valores en la frontera (del tipo Dirichlet) para una malla rectangular de 6×6 , en la que 20 valores están en la frontera y 25 valores están en el interior, todos distribuidos de manera uniforme en coordenadas cartesianas. El método numérico utilizado para resolver la ecuación diferencial fue el método de diferencias finitas, en el cual se apreció que, para calcular cada valor del campo escalar " $u_{i,j}$ " dentro de la malla rectangular, se realizó el promedio de los valores adyacente al valor en cuestión, es decir

$$u_{i,j} = \frac{u_{i+1,j} + u_{i,j+1} + u_{i-1,j} + u_{i,j-1}}{4}$$

Por otro lado, para plantear el grado de aproximación entre el modelo analítico " MA " (la ecuación de Laplace) y el modelo numérico " MD " (método de diferencias finitas) se realizó una expansión en serie de Taylor, hasta el quinto término, de un valor arbitrario " $u(x,y)$ " del campo escalar, con lo que dicho planteamiento llega al siguiente resultado

$$MA = MD + TD$$

En donde el término " TD " es denominado "término de discrepancia", ya que el mismo marcó la diferencia cuantitativa entre dichos modelos matemáticos. Su forma analítica obtenida fue la siguiente

$$TD = - \left(\frac{\partial^4 u(x,y)}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 u(x,y)}{\partial y^4} \right) \frac{h^2}{12}$$



El término “ h ” representó la forma en que había sido seccionado la malla. Adicional a esto, si el campo escalar variaba de manera suave y las condiciones en la frontera eran homogéneas, se podía obtener una solución general para la ecuación diferencial de Laplace. En dicha solución, se generaron constantes (k, A, B, θ) que dependían de las condiciones de frontera, con lo que se desveló, para un sistema físico estable en concreto, la dependencia del TD con el cuadrado de h .

$$TD = h^2 f(k, A, B, \theta, x, y)$$

Resaltó a la vista, el hecho de que al hacer el término h más pequeño, este término de discrepancia se volvió irrelevante y consecuentemente, ambos modelos, analíticos y numérico, mostraron su aproximación.

Para resolver el sistema lineal de ecuaciones de primer grado, se utilizó la regla de Cramer. Para la creación del algoritmo se utilizó el software Geogebra Clásico, Versión 6.0.801.0, el cual es gratuito. El link para acceder a esta herramienta digital es la dirección web, <https://www.geogebra.org/m/rmwrxxsa>. El objetivo de la creación de esta herramienta estuvo basado en el estudio de sistemas físicos bajo condiciones de equilibrio o estables, tales como: el flujo térmico estable sobre una lámina conductora, una distribución estática de potencial eléctrico sobre una superficie, una distribución de presión que describe el flujo estable de un fluido, etc.

PALABRAS CLAVES

Ecuación de Laplace, Dirichlet, sistemas físicos estables, diferencias finitas.

ABSTRACT

A digital tool was programmed to be used online and free, through the Geogebra platform. This tool numerically solves the Laplace equation with values on the boundary (of the Dirichlet type) for a 6×6 rectangular mesh, in which 20 values are on the boundary and 25 values are inside, all distributed uniformly in Cartesian coordinates. The numerical method used to solve the differential equation was the finite difference method, in which it was noted that, to calculate each value of the scalar field “ $u_{i,j}$ ” within the rectangular mesh, the average of the values adjacent to the value in question, that is

$$u_{i,j} = \frac{u_{i+1,j} + u_{i,j+1} + u_{i-1,j} + u_{i,j-1}}{4}$$

On the other hand, to establish the degree of approximation between the analytical model “ MA ” (the Laplace equation) and the numerical model “ MD ” (finite difference method), a Taylor series expansion was carried out, up to the fifth term, of an arbitrary value “ $u(x,y)$ ” of the scalar field, with which said approach arrives at the following result

$$MA = MD + TD$$

Where the term “ TD ” is called “discrepancy term” since it marked the quantitative difference between said mathematical models. Its analytical form obtained was the following

$$TD = - \left(\frac{\partial^4 u(x,y)}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 u(x,y)}{\partial y^4} \right) \frac{h^2}{12}$$

The term “ h ” represented the way the mesh had been sectioned. In addition to this, if the scalar field varied smoothly and the boundary conditions were homogeneous, a general solution to the Laplace differential equation could be obtained. In this solution, constants (k, A, B, θ) were generated that depended on the boundary



conditions, which revealed, for a specific stable physical system, the dependence of the TD on the square of h .

$$TD = h^2 f(k, A, B, \theta, x, y)$$

It clearly highlighted the fact that by making the term h smaller, this discrepancy term became irrelevant and consequently, both models, analytical and numerical, showed their approximation.

To solve the linear system of first degree equations, Cramer's rule was used. To create the algorithm, the Geogebra Classic software, Version 6.0.801.0, which is free, was used. The link to access this digital tool is the web address, <https://www.geogebra.org/m/rmwrxxsa>. The objective of the creation of this tool was based on the study of physical systems under equilibrium or stable conditions, such as: stable thermal flow over a conductive sheet, a static distribution of electrical potential on a surface, a pressure distribution that describes the stable flow of a fluid, etc.

KEY WORDS

Laplace equation, Dirichlet, stable physical systems, finite differences.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas físicos, en estado estable (Espinoza 2003), se caracterizan por tener una distribución de valores o magnitudes físicas (por ejemplo: temperatura, presión, potencial eléctrico, etc.) que no varían en el tiempo. Si se analiza una parte (en el espacio) de este tipo de sistemas en la que no incluya, ni fuentes ni sumideros, la ecuación de Laplace puede modelar este fenómeno físico de manera completa (Segundo 2010). Al tratarse de una ecuación diferencial parcial elíptica (Pacheco *et. al.* 2018), la solución de la misma debería estar asociada a un campo o un potencial (depende del sistema) correspondiente a las magnitudes físicas antes mencionadas. Sin embargo, hay casos en los que debido a las características del sistema o para evitar medir de manera invasiva, solo se pueden obtener datos de las fronteras de dicho sistema, pero el interés también está enfocado en conocer su comportamiento interno. Todo lo anterior describe un problema de valores en la frontera (Zill & Cullen 2009). Por otro lado, la forma en que se miden u obtienen los valores en dichos límites externos, también define el tipo de problema de valor en la frontera. Por ejemplo, al plantear la ecuación de Laplace en coordenadas rectangulares en dos dimensiones,

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

Tal que,
$$u = u(x, y) \quad (2)$$

Como se mencionó anteriormente, el hecho de no haber ni fuentes ni sumideros, lleva a plantear, sin lugar a duda, el carácter continuo de la función " u ". Por lo que se puede conocer, sin ambigüedad, valores de " u " en las fronteras. Un tipo de problema en la frontera en que solo se conocen valores de " u " ($u = f(x, y)$) en los límites externos, es denominado



“problema de Dirichlet” (Nakamura 1992). Sin embargo, si se tiene información acerca de cómo cambia esta función “ u ” con respecto a algunas de estas variables espaciales ($\partial u/\partial x=g(x,y)$ o $\partial u/\partial y=h(x,y)$), en algunos lugares de la frontera, entonces este tipo de problema es denominado “problema de Neumann” (Nakamura 1992). El interés de este artículo se basa en crear una herramienta en línea, la cual, haga el planteamiento del problema con valores en la frontera del tipo Dirichlet en dos dimensiones, para el mismo ser resuelto por algún método numérico, de modo que se pueden ingresar dichos valores en la frontera y el mismo, calcule y muestra los valores de “ u ” en el interior del sistema físico en condiciones estables. Vale la pena mencionar que los usos de esta herramienta pueden ser tanto académicos como investigativos, dependiendo, si el mismo se adapta a los parámetros impuestos por los profesores o investigadores.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ecuaciones de diferencias

Para resolver la ecuación diferencial parcial, por métodos numéricos, se utilizó el método de diferencias finitas (Pérez & Gutiérrez 2001), ya que dispone de numerosos métodos de solución eficientes, fáciles de vectorizar, por lo que se adapta a la simetría cartesiana (Nakamura 1992), también debe hacerse énfasis, en que el método usado fue directo no iterativo.

Ahora bien, posterior a plantear las expresiones (1) y (2), se procedió a realizar las segundas derivadas parciales utilizando diferencias centrales (Zill & Cullen 2009). Debe tenerse presente que este método es válido en este modelo, debido al hecho de que “ $u(x,y)$ ” se definió continua y por ende, los límites por la izquierda y por la derecha convergen, así como también sus primeras derivadas (Stewart 2002).

Como primer paso, se calculó las primeras derivadas con el método de incrementos

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{u(x+h,y) - u(x,y)}{h} \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{u(x,y+h) - u(x,y)}{h} \quad (4)$$

Finalmente, se complementó el método de diferencias centrales

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\left[\frac{u(x+h,y) - u(x,y)}{h} \right] - \left[\frac{u(x+h-h,y) - u(x-h,y)}{h} \right]}{h} \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\left[\frac{u(x,y+h) - u(x,y)}{h} \right] - \left[\frac{u(x,y+h-h) - u(x,y-h)}{h} \right]}{h} \quad (6)$$



Con lo cual se obtuvo

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{u(x+h,y) - 2u(x,y) + u(x-h,y)}{h^2} \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{u(x,y+h) - 2u(x,y) + u(x,y-h)}{h^2} \quad (8)$$

Al Reemplazarse los resultados (7) y (8) en la expresión (1), pero teniendo en cuenta al límite de “ h ”, se obtuvo lo siguiente

$$\frac{u(x+h,y) - 2u(x,y) + u(x-h,y)}{h^2} + \frac{u(x,y+h) - 2u(x,y) + u(x,y-h)}{h^2} = 0 \quad (9)$$

Multiplicando la expresión (9) por “ h^2 ”

$$u(x+h,y) + u(x,y+h) - 4u(x,y) + u(x-h,y) + u(x,y-h) = 0 \quad (10)$$

Y al discretizar “ h ”, se puede manejar los diferentes valores de “ u ” con subíndices de la siguiente forma

$$u_{i+1,j} + u_{i,j+1} - 4u_{i,j} + u_{i-1,j} + u_{i,j-1} = 0 \quad (11)$$

Para darle una mejor interpretación a la expresión (11), se construyó la siguiente malla 6×6 (figura 1). En dicha malla, los valores en color turquesa representan los valores que toma la función “ u ” en las regiones que no son fronteras del sistema. Por consiguiente, los valores en color amarillo representan los valores que toma la función “ u ” en las fronteras de dicho sistema físico. Por otro lado, se tomó la expresión (11) y se acomodó de la siguiente forma

$$u_{i,j} = \frac{u_{i+1,j} + u_{i,j+1} + u_{i-1,j} + u_{i,j-1}}{4} \quad (12)$$

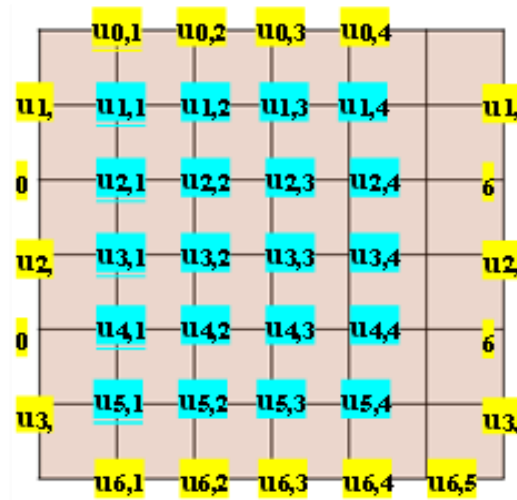
$$\text{Aquí, se realizó el ajuste } i = 1, 2, \dots, 5 \quad \text{y} \quad j = 1, 2, \dots, 5 \quad (13)$$

Se puede apreciar que para calcular un valor interior “ $u_{i,j}$ ” en la malla, el procedimiento es equivalente a calcular el promedio de los valores adyacentes más cercanos a dicho punto “ $u_{i,j}$ ” (Zill & Cullen 2009).



Figura 1.

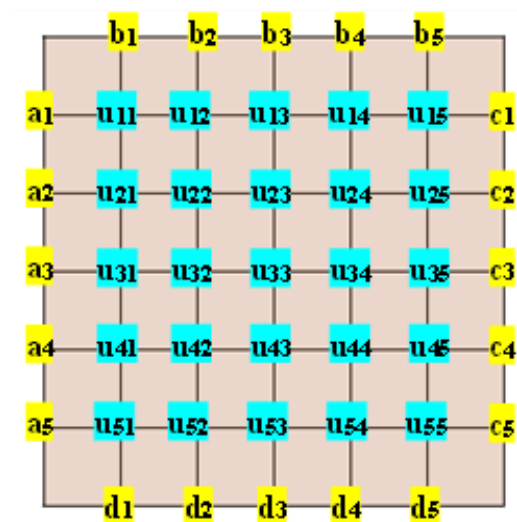
La malla 6×6 representa los valores de la función “ u ” en una distribución discreta y uniforme.



Con objetivo de mostrar la malla de la figura 1 más simple a la vista, se presenta la misma de la siguiente forma.

Figura 2.

Malla de la figura 1 mostrada de forma más simple.

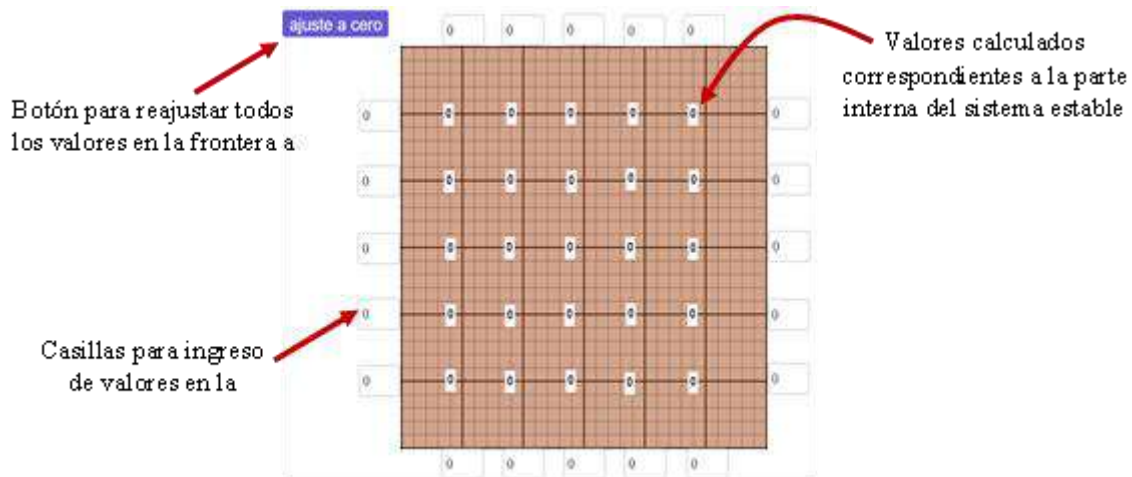


Determinante (Matriz)

El programa utiliza la fórmula de Leibniz para calcular determinantes y posteriormente, este valor es almacenado en una variable que genera el software automáticamente. Como ya se mencionó, utilizando la regla de Cramer, se calculó los valores interiores del sistema estable, para lo cual fue necesario dichos valores generados automáticamente. Finalmente, se diseñó el siguiente formato de presentación para esta herramienta en línea.

Figura 3.

Diseño o formato de presentación de esta herramienta en línea.



Término de discrepancia entre el modelo analítico y el modelo numérico

Las expresiones (7), (8) y (11) generaron suspicacia, esto, debido al hecho de que inicialmente se planteó “ h ” como una variable continua y tendiente a cero, pero posteriormente se adapta el resultado final a una malla, la cual, es de carácter discreto (Méndez *et. al.* 2015). Por lo que se supuso un factor o término que defina la equivalencia o igualdad, entre la ecuación analítica (expresión 1) y la ecuación en diferencias (expresión 11). Según Solorza *et. al.* (2009), este término se puede visualizar utilizando una expansión en serie de Taylor, de la siguiente forma. Primero se planteó dicha expansión de la función “ $u(x, y)$ ” de manera parcial, es decir, se buscó la convergencia alrededor del punto “ x_0 ” con “ y ” constante, para después buscar la convergencia alrededor del punto “ y_0 ” con “ x ” constante, lo que sería

$$u(x, y) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\partial^i u(x_0, y)}{\partial x^i} \frac{(x-x_0)^i}{i!} \quad (14)$$

En donde se hizo el siguiente ajuste de variable



$$x = x_0 + h \quad (15)$$

Con lo que se obtuvo

$$u(x_0 + h, y) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\partial^i u(x_0, y) h^i}{\partial x^i i!} \quad (16)$$

Posterior a esto, se procedió a mostrar de forma explícita los tres primeros términos de esta serie y el resto se dejó reducido con el signo de suma discreta. Adicional a esto, se deseaba plantear una derivada por método de incrementos (Stewart 2002) utilizando algunos términos de dicha serie. Para tal fin, se realizaron los siguientes pasos

$$u(x_0 + h, y) = u(x_0, y) + \frac{\partial u(x_0, y)}{\partial x} h + \frac{\partial^2 u(x_0, y) h^2}{\partial x^2 2!} + \sum_{i=3}^{\infty} \frac{\partial^i u(x_0, y) h^i}{\partial x^i i!} \quad (17)$$

Despejando y dividiendo entre “h”

$$\frac{\partial u(x_0, y)}{\partial x} + \frac{\partial^2 u(x_0, y) h}{\partial x^2 2!} = \frac{u(x_0+h, y) - u(x_0, y)}{h} - \sum_{i=3}^{\infty} \frac{\partial^i u(x_0, y) h^{i-1}}{\partial x^i i!} \quad (18)$$

Al seguir los pasos equivalentes para la variable “y”, se obtiene

$$\frac{\partial u(x, y_0)}{\partial y} + \frac{\partial^2 u(x, y_0) h}{\partial y^2 2!} = \frac{u(x, y_0+h) - u(x, y_0)}{h} - \sum_{i=3}^{\infty} \frac{\partial^i u(x, y_0) h^{i-1}}{\partial y^i i!} \quad (19)$$

Se planteó de nuevo la expresión (14) pero se realizó ahora el siguiente ajuste de “x”

$$x = x_0 - h \quad (20)$$

$$u(x_0 - h, y) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\partial^i u(x_0, y) (-1)^i h^i}{\partial x^i i!} \quad (21)$$

$$u(x_0 - h, y) = u(x_0, y) - \frac{\partial u(x_0, y)}{\partial x} h + \frac{\partial^2 u(x_0, y) h^2}{\partial x^2 2!} + \sum_{i=3}^{\infty} \frac{\partial^i u(x_0, y) (-1)^i h^i}{\partial x^i i!} \quad (22)$$

Una vez más se utilizó el método por incrementos, dando como resultado

$$\frac{\partial u(x_0, y)}{\partial x} - \frac{\partial^2 u(x_0, y) h}{\partial x^2 2!} = \frac{u(x_0, y) - u(x_0 - h, y)}{h} + \sum_{i=3}^{\infty} \frac{\partial^i u(x_0, y) (-1)^i h^{i-1}}{\partial x^i i!} \quad (23)$$

Así como en la expresión (19) se puede llegar a la siguiente equivalencia para “y”

$$\frac{\partial u(x, y_0)}{\partial y} - \frac{\partial^2 u(x, y_0) h}{\partial y^2 2!} = \frac{u(x, y_0) - u(x, y_0 - h)}{h} + \sum_{i=3}^{\infty} \frac{\partial^i u(x, y_0) (-1)^i h^{i-1}}{\partial y^i i!} \quad (24)$$

Se procedió ahora, a restar las expresiones (18) y (23), además de dividir el resultado entre “h”. Con lo que se llegó al siguiente resultado



$$\frac{\partial^2 u(x_0, y)}{\partial x^2} = \frac{u(x_0+h, y) - 2u(x_0, y) + u(x_0-h, y)}{h^2} - \sum_{i=3}^{\infty} \frac{\partial^i u(x_0, y)}{\partial x^i} \frac{h^{i-2}}{i!} [(-1)^i + 1] \quad (25)$$

Se pudo apreciar de la expresión (25), que todos los términos de la serie que tienen una “ i ” impar, son anulados. Por otro lado, se obtuvo un resultado similar al restar las expresiones (19) y (24), para posteriormente, tal como antes, restarle “ h ”.

$$\frac{\partial^2 u(x, y_0)}{\partial y^2} = \frac{u(x, y_0+h) - 2u(x, y_0) + u(x, y_0-h)}{h^2} - \sum_{i=3}^{\infty} \frac{\partial^i u(x, y_0)}{\partial y^i} \frac{h^{i-2}}{i!} [(-1)^i + 1] \quad (26)$$

Al sumar las expresiones (25) y (26), para aplicarla sobre puntos arbitrarios $P(x, y)$, se llegó a lo siguiente

$$\frac{\partial^2 u(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(x, y)}{\partial y^2} = \frac{u(x+h, y) + u(x, y+h) - 4u(x, y) + u(x-h, y) + u(x, y-h)}{h^2} - \sum_{i=3}^{\infty} \left(\frac{\partial^i u(x, y)}{\partial x^i} + \frac{\partial^i u(x, y)}{\partial y^i} \right) \frac{h^{i-2}}{i!} [(-1)^i + 1] \quad (27)$$

El modelo analítico que describe este sistema estable es la ecuación de Laplace, por lo que, para referirse a dicha ecuación se utilizó las letras

$$MA = \frac{\partial^2 u(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(x, y)}{\partial y^2} \quad (28)$$

De forma similar, para hacer referencia al modelo discreto (diferencias finitas) correspondiente a este sistema estable, se utilizó las siguientes letras

$$MD = \frac{u(x+h, y) + u(x, y+h) - 4u(x, y) + u(x-h, y) + u(x, y-h)}{h^2} \quad (29)$$

El término faltante, fue denominado “término de discrepancia”, el cual se le asignó las letras

$$TD = - \sum_{i=3}^{\infty} \left(\frac{\partial^i u(x, y)}{\partial x^i} + \frac{\partial^i u(x, y)}{\partial y^i} \right) \frac{h^{i-2}}{i!} [(-1)^i + 1] \quad (30)$$

Al reescribir de nuevo estos tres términos bajo esta simbología, se tiene lo siguiente

$$MA = MD + TD \quad (31)$$

El término TD es un factor que construye la aproximación de la ecuación en diferencias finitas a la ecuación de Laplace (Solorza *et. al.* (2009)). Se supone que, si “ h ” tiende a cero, entonces ambos términos de la derecha en la expresión (31), también deben tender a cero. Para analizar el comportamiento de dicho término de discrepancia, se utilizó el primer término no nulo de esta serie de potencias, lo que sería



$$TD = -2 \left(\frac{\partial^4 u(x,y)}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 u(x,y)}{\partial y^4} \right) \frac{h^{4-2}}{4!} \quad (32)$$

$$TD = - \left(\frac{\partial^4 u(x,y)}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 u(x,y)}{\partial y^4} \right) \frac{h^2}{12} \quad (33)$$

Para continuar este análisis, se recurrió al uso de la solución general (real) de la ecuación de Laplace, por lo que, las constantes en esta solución analítica dependen de las condiciones en la frontera y esto, sería de gran ayuda en la interpretación de algún sistema estable bajo condiciones de frontera del tipo Dirichlet. Por otro lado, para simplificar esta interpretación del fenómeno, se supusieron condiciones homogéneas en la frontera, permitiendo aplicar el método de separación de variables, lo que conduce a la siguiente solución general

$$u(x, y) = [Ae^{kx} + Be^{-kx}] \cos(ky - \theta) \quad (34)$$

Ahora bien, al realizar las derivadas parciales de orden cuatro y sumando las mismas, se obtuvo respectivamente

$$\frac{\partial^4 u(x,y)}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 u(x,y)}{\partial y^4} = 2k^4 [Ae^{kx} + Be^{-kx}] \cos(ky - \theta) \quad (35)$$

Al haber introducido este desarrollo analítico en el término de discrepancia, mostrada en la expresión (33), se obtuvo

$$TD = - \frac{k^4 h^2}{6} [Ae^{kx} + Be^{-kx}] \cos(ky - \theta) \quad (36)$$

Los parámetros k , A , B y θ son definidos por las condiciones de contorno, sin embargo, el parámetro h no depende de dichas condiciones de fronteras, ya que fue impuesta con el fin de describir el modelo discreto de la ecuación de Laplace, utilizando el método de diferencias finitas. Bajo esta perspectiva, el término en cuestión depende de estos parámetros, antes mencionados, la posición en la malla y del cuadrado de h , es decir

$$TD = h^2 f(k, A, B, \theta, x, y) \quad (37)$$

Fue evidente de que, al subdividir la malla en secciones más pequeñas, es decir, utilizar una h más pequeña, hace que el modelo discreto se aproxime más al modelo continuo. Por otro lado, el conjunto de puntos $P(x, y)$ tomarán valores discretos. Adicional a esto, si la longitud de los lados de la malla mostrada en la figura 1 es " L ", las coordenadas cartesianas de dichos

puntos se escriben de la siguiente forma

$$x_i = ihL \quad y_j = jhL \quad (38)$$



Para esta configuración se impuso

$$h = 1/6 \quad \Rightarrow \quad 0 \leq i \leq 6 \quad 0 \leq j \leq 6 \quad (39)$$

Con el objetivo de hacer una representación cuantitativa del comportamiento del término de discrepancia sobre toda la malla, se procedió a realizar mapas de contorno con la ayuda del software Surfer versión 13.6.618, en el cual se ajustó los parámetros mencionados de la siguiente forma

Figura 4.

Con este ajuste el término de discrepancia varía en un rango entre -0,75 y 0,4.

Tabla 1

Ajuste No. 1

Parámetro	Valor ajustado
k	$2\pi/3$
L	1
A	1
B	1
θ	0

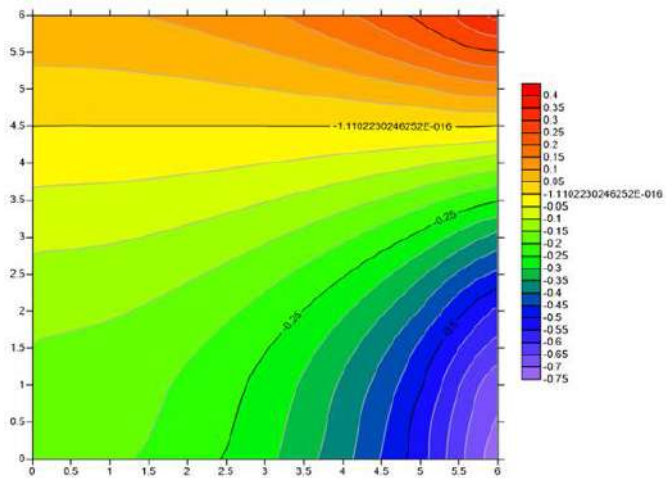


Figura 5.

Con este ajuste el término de discrepancia varía en un rango entre -0,145 y 0,005.

Tabla 2

Ajuste No. 2

Parámetro	Valor ajustado
k	$2\pi/4$
L	1
A	1
B	1
θ	0

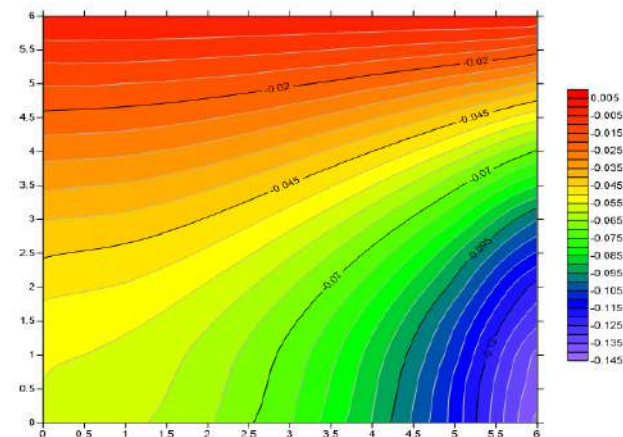


Figura 6.

Con este ajuste el término de discrepancia varía en un rango entre -0,044 y -0,006.

Tabla 3
Ajuste No. 3

Parámetro	Valor ajustado
k	$2\pi/5$
L	1
A	1
B	1
θ	0

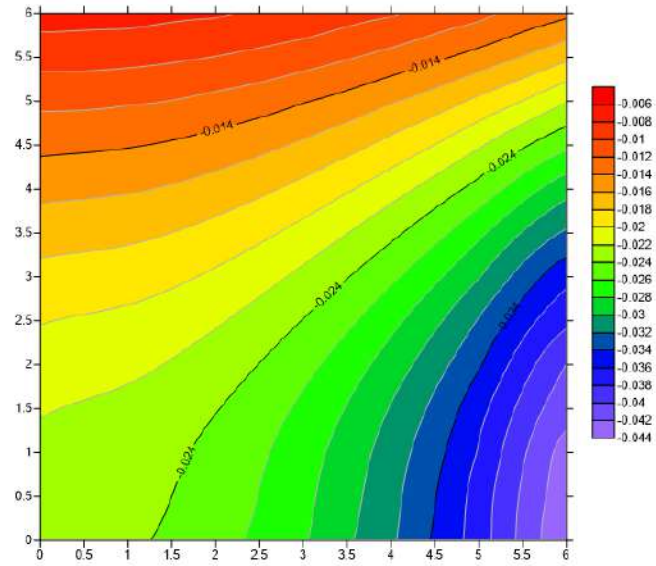
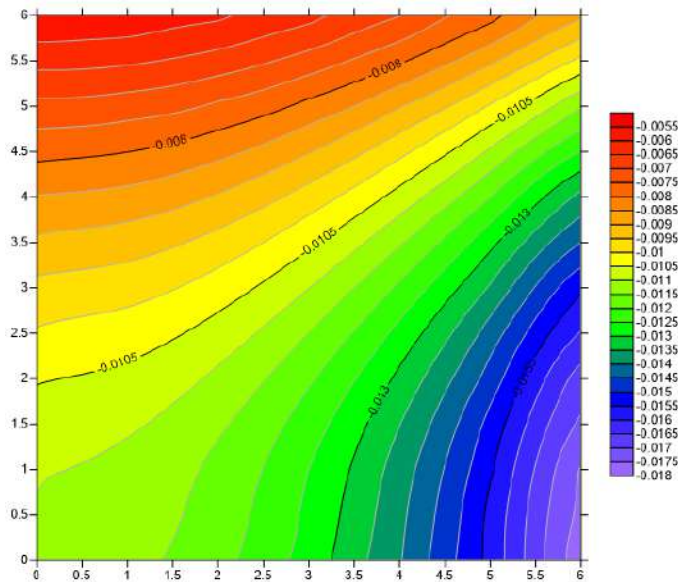


Figura 7.

Con este ajuste el término de discrepancia varía en un rango entre -0,018 y -0,0055.

Tabla 4
Ajuste No. 4

Parámetro	Valor ajustado
k	$2\pi/6$
L	1
A	1
B	1
θ	0



Reporte de la regresión plana del tipo: $Z = \alpha X + \beta Y + \gamma$

Fitted Parameters

α	β	γ
Parameter Value: -0,000898073241222	0,00113539084511	-0,0116905003197
Standard Error: $6,74678242859 \times 10^{-5}$	$6,74678242859 \times 10^{-5}$	0,000316452146312

Inter-Parameter Correlations

α	β	γ
α : 1,000	-0,000	-0,640
β : -0,000	1,000	-0,640
γ : -0,640	-0,640	1,000

ANOVA Table

Source	df	Sum of Squares	Mean Square	F
Regression:	2	0,000410746991881	0,000205373495941	230,194484779
Residual:	46	$4,10399963419 \times 10^{-5}$	$8,92173833519 \times 10^{-7}$	
Total:	48	0,000451786988223		

Coefficient of Multiple Determination (R^2): 0,909160738552

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se programó una herramienta en línea y gratuita, en la plataforma Geogebra. La cual está disponible en el siguiente link <https://www.geogebra.org/m/rmwrxxsa>. Esta herramienta resuelve la ecuación de Laplace por método directo, no por método iterativo, lo que ahorra mucha más memoria (Nakamura 1992). El sistema físico estable a tratar debe abordarse en coordenadas cartesianas. Por otro lado, se deben introducir 20 valores en la frontera para calcular 25 valores en el interior de dicho sistema físico. En la expresión (12), se aprecia que para calcular cada valor interior se recurre al valor promedio de los valores adyacentes más cercanos a dicho punto interior. Por lo que las proximidades entre los puntos afectan la veracidad de los valores calculados (Bayron *et. al.* 2006). Por consiguiente, el tamaño de la malla está relacionado con la precisión de los valores interiores calculados, ya que en la ecuación (31) se planteó un término de discrepancia TD que influye en la aproximación de la ecuación en diferencias que representa a la ecuación de Laplace. Tal como se aprecia en la



expresión (33), dicho término está en función del parámetro “ h ” y de la derivada parcial de orden cuatro de la función “ u ”, la cual representa al sistema físico. Se pudo notar que, si la función “ u ” cambia de manera suave, el TD depende en gran parte del parámetro “ h ”. Sin embargo, con el objetivo de hacer más explícito el comportamiento del TD bajo las condiciones impuestas en el sistema discreto y tomando en cuenta la solución general de la ecuación de Laplace, se pudo apreciar, a través de una gráfica de barras (figura 8), cómo varía dicho término de discrepancia al variar el parámetro k , esto, unificando los resultados mostrados en los ajustes 1, 2, 3 y 4 e introducidos en la tabla 5.

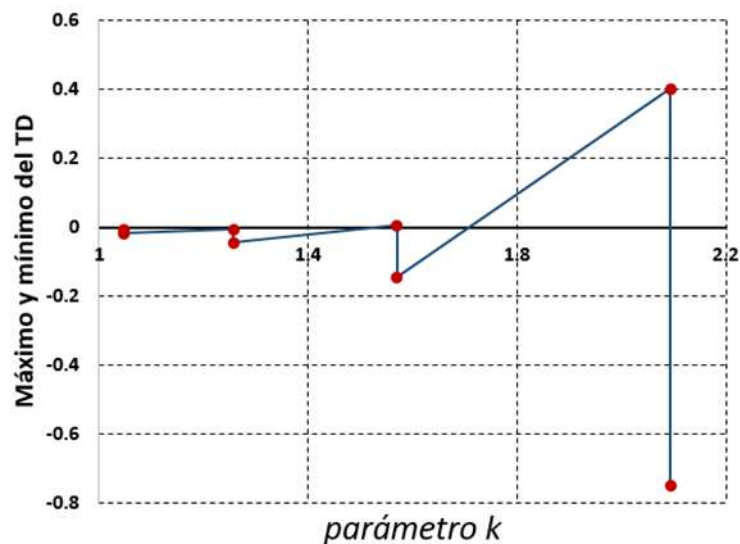
Tabla 5

Valores máximos y mínimos tomados por el término de discrepancia en función de los valores correspondientes del parámetro k

	Parámetro k			
	$2\pi/3$	$2\pi/4$	$2\pi/5$	$2\pi/6$
Valor mínimo	-0,75	-0,145	-0,044	-0,018
Valor máximo	0,4	0,005	-0,006	-0,0055

Figura 8.

Valores máximo y mínimo del TD vs valores del parámetro k .



CONCLUSIONES

Esta herramienta en línea proyecta un uso de carácter académico o investigativo. Sin embargo, tiene que haber una correspondencia entre las limitaciones de este simulador y los parámetros o condiciones impuestos por un profesor o un investigador para el estudio de un sistema físico estable. En este caso, fácilmente se pudo apreciar que mientras el parámetro “ h ” sea menor, el término de discrepancia se irá reduciendo, de manera que mejora la aproximación del método numérico. Por otro lado, existen ventajas siempre que se utilicen simuladores, ya que utilizar directamente medidores en algunos casos acarrea un método invasivo al sistema o un alto costo en equipos. Resulta evidente que el carácter discreto de las soluciones numéricas limita el conocimiento total del sistema, ya que los sistemas físicos son de carácter continuo en la distribución de sus valores, en la mayoría de los casos (Tifa De Jesús & Toribio, J. 2021). Pero hay algunos casos, en que el conocimiento de algunos valores particulares del sistema físico, ayudan a describir la forma en que deben abordarse los mismos para su estudio más adecuado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bayron, J., Cossio, J., y Vélez, C. (2006), "Existencia de soluciones para un problema de Dirichlet sublineal." *Matemáticas: Enseñanza Universitaria*, Vol. XIV, núm.1, pp.29-34. ISSN: 0120-6788.
- Espinoza, M. (2003), “Dos contribuciones sobre la estabilidad y el determinismo de los sistemas”. *Revista Límite de filosofía y psicología*, ISSN 0718-1361, ISSN-e 0718-5065, No. 10, pp. 5-32.
- Méndez, L., Orozco, G. y Fonseca F. (2015), “Discretización en diferencias finitas de la ecuación de Laplace y Poisson. Aplicación a un anillo circular (dona)”. *Revista Ciencia en Desarrollo*, ISSN 0121-7488, 6(2).
- Nakamura, S. (1992). *Métodos Numéricos Aplicados con Software*. Prentice-Hall. México.
- Pacheco, M., Honorato, y G., Mercado, A. (2018). El problema de Dirichlet para elipsoides [Tesis de Grado]. Universidad de Valparaíso, Chile.
- Pérez, A. & Gutiérrez, J. (2001), “Ecuaciones en diferencias. Planteamiento general”. *Revista de Comunicación Vivat Academia*, ISSN: 1575-2844, IV(31), pp. 1-21.
- Poole, D. (2011). *Álgebra lineal. Una introducción moderna*. Tercera Edición. Editorial CENGAGE Learning.



Ríos I., D., Ríos I., S., Martín J., J. (2000). *Simulación. Métodos y aplicaciones*. Editorial RA-MA.

Segundo, G. (2010), “Solución numérica de la ecuación de Laplace”, Editorial ANEP CFE Instituto de Profesores “Artigas”.

Solorza, S., Yee-Romero, C., Jordan-Aramburo, A. y Cardeña-Sánchez, S. (2009). El término de error en los esquemas de diferencias finitas. *Educatio Siglo XXI*, 4 (1), 168-173.

Stewart, J. (2002). *Cálculo. Trascendentes tempranas*. Cuarta Edición. Editorial Thomson Learning.

Tifa De Jesús, P. N., & Toribio, J. (2021), “Solución equivalente del problema de Dirichlet usando transformada de Legendre y funciones de Green, representada por la fórmula integral de Poisson”. *Latin-American Journal of Physics Education*. ISSN 1870-9095, 15(4), pp. 4301 (1-5).

Zill, D. G., Cullen, M. R., (2009). *Ecuaciones diferenciales con problemas con valores en la frontera*. Séptima edición. Editorial CENGAGE Learning.





DISTRIBUCIÓN Y CONSERVACIÓN DE PRIMATES PANAMEÑOS USANDO MÁXIMA ENTROPÍA

DISTRIBUTION AND CONSERVATION OF PANAMANIAN PRIMATES USING MAXIMUM ENTROPY

Pedro Méndez-Carvajal

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

pedro.mendezc@up.ac.pa

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

Fecha de recepción: 18 de mayo de 2023

Fecha de aceptación: 10 de abril de 2024

DOI [HTTPS://DOI.ORG/10.48204/J.TECNO.V26N2.A5400](https://doi.org/10.48204/J.TECNO.V26N2.A5400)

RESUMEN

La conversión del hábitat natural para el desarrollo urbano está restringiendo los rangos de especies de primates que dependen de los ambientes forestales, aumentando su riesgo de extinción. Si bien Panamá respalda la mayor diversidad de primates en Mesoamérica, muchas de sus nueve especies y 13 subespecies son motivo de preocupación para la conservación, incluidas cuatro especies endémicas en Peligro Crítico. Sin embargo, su distribución y estado actual son poco conocidos. Se utilizó más de 15 años de datos de observación de presencia (transectos y conteos de ruta, fototrampeo, y registros de ciudadanos científicos) que representan 2,000 puntos de presencia, 1,415 fueron seleccionados como ubicaciones útiles para desarrollar modelos de distribución para las subespecies de primates en Panamá. Utilizando el software Maximum Entropy (MaxEnt), se creó un conjunto de modelos que utilizan variables climáticas, y también integramos una medida derivada de satélite de la productividad primaria, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), así como medidas de densidad de población humana, para ver si estos modelos mejorados eran más efectivos. Los modelos funcionaron bien, aunque diferentes variables climáticas predijeron mejor la distribución de diferentes subespecies. La superposición de los mejores modelos de hábitat para cada subespecie nos permitió identificar áreas cruciales para dirigir esfuerzos de conservación en la diversidad de primates en Panamá.

PALABRAS CLAVES

Biogeografía, MaxEnt, Mesoamérica, Neotrópico, Panamá, Primates.



ABSTRACT

The conversion of natural habitat for urban development is restricting the ranges of primate species that depend on forest environments, increasing their risk of extinction. While Panama supports the highest diversity of primates in Mesoamerica, many of the nine species and 13 subspecies are of conservation concern, including four endemic Critically Endangered species. Yet their distribution and status are poorly understood. I used over 15 years of presence data from surveys (transects and road counts, camera-trapping, and citizen science records) representing 2,000 presence points, 1,415 were selected as useful locations to develop species distribution models for the primate sub-species in Panama. Using Maximum Entropy (MaxEnt) software, I created a set of models using climatic variables, and integrated a satellite-derived measure of primary productivity, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), as well as measures of human population density, to see if this improved model performance. The models performed well, although different climate variables best predicted the distribution of different subspecies. Overlaying the best habitat suitability models for each subspecies allowed us to identify core areas for the conservation of primate diversity in Panama.

KEY WORDS

Biogeography, Mesoamerica, MaxEnt, Neotropic, Panama, Primates.

INTRODUCCIÓN

Comprender la capacidad de distribución geográfica de la vida silvestre es un componente importante de los programas efectivos de conservación (Boubli y De Lima, 2009; Vidal-García y Serio-Silva, 2011; Marcer *et al.*, 2013). Sin embargo, el estudio de la distribución de especies es un desafío, principalmente debido a la falta de información sobre su presencia o ausencia, los costos de desarrollar estudios sistemáticos y el hecho de que muchos lugares de interés son remotos y de difícil acceso (Vidal-García y Serio-Silva, 2011). Estos desafíos se pueden superar combinando los datos de observación disponibles con algoritmos matemáticos y sistemas de información global (SIG), que pueden ayudarnos a identificar los requisitos clave de hábitats, la riqueza y la densidad de especies. Esto puede ayudar a identificar áreas apropiadas para la protección y liderar los esfuerzos para una gestión eficaz de conservación (Willems y Hill, 2009; Carvalho *et al.*, 2010; Chetan *et al.*, 2014; Holzman *et al.*, 2015). Los aspectos a evaluar con modelos de distribución de especies (SDM), incluyen la tendencia a la riqueza y el endemismo que se presenta en un país, haciendo más gráfica la información para las actividades de conservación. La riqueza de especies ha sido importante para correlacionarla con los patrones de comportamiento animal, la diversidad y productividad de las plantas y la estacionalidad, pero, sobre todo, la presencia de especies adaptadas, asociadas con la riqueza de árboles y los promedios de lluvia (Kay *et al.*, 1997). Esta información es importante para comprender la dinámica demográfica de los consumidores primarios, incluyendo las especies de primates (Therborgh, 1986). El endemismo, describe el estado ecológico de una especie considerada única en una ubicación geográfica específica, está relacionado con la capacidad de tolerar estrés en un hábitat, pero con menor competencia, especies sensibles a cambios de vegetación (Walck *et al.*, 2001).



Este conocimiento es importante para enfocar esfuerzos de conservación en áreas claves, y reducir los costos al identificar "puntos calientes" para cada especie (Myers *et al.*, 2000).

Los cambios que ocurren en los paisajes boscosos debido al uso de la tierra son especialmente preocupantes, dado que estos bosques proporcionan hábitat para una gran cantidad de especies de animales (Whitmore, 1998; Wright *et al.*, 2000). Entre las especies afectadas se encuentran los primates no humanos, amenazados a nivel mundial en un 60% según la UICN (Cotton *et al.*, 2016). Estudios recientes han utilizado datos de SDM para detectar las condiciones ambientales que limitan la presencia de primates y protegen estas especies o hábitats (Fourcade *et al.*, 2014). Por ejemplo, se han utilizado SDM para ayudar en acciones de conservación al gibón oriental *Hoolock leuconedys*, cuya población ha disminuido un 30 % en los últimos años (Brockelman y Geissmann, 2008). En India, se usó SDM para identificar áreas potenciales para estudios de población de primates y mejorar los planes de manejo de conservación basados en hábitats potenciales (Sarma *et al.*, 2015). Los datos de distribución también pueden ayudar a identificar características del hábitat de una especie, como la variación topográfica, que potencialmente aísla a los organismos. Otro estudio en la India proporcionó evidencia de las variables ecológicas y las características topográficas que afectan la dispersión de las especies de langures del género *Semnopithecus* (Chetan *et al.*, 2014). En una escala más amplia, se demostró que la distribución del cercopiteco verde *Chlorocebus pygerythrus* en el África subsahariana se alineaba con las predicciones de los modelos de presupuesto de tiempo, ambos impulsados por la variación en el Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI) (Willems y Hill, 2009). NDVI es una medida de detección remota de producción fotosintética que identifica la densidad relativa y la salud de la vegetación en un lugar específico. El uso de SDM en la evaluación de la conservación ha sido cuestionado porque se percibe que conlleva dificultades tanto en la evaluación de la presencia (detectabilidad y precisión) como en la obtención de datos de presencia actualizados (Campbell *et al.*, 2016). Un muestreo inadecuado puede generar problemas de interpretación (Carneiro *et al.*, 2016). Un problema adicional es que las bases de datos disponibles para algunos países tienen entre cinco y 10 años, lo que hace que las conclusiones puedan ser desactualizadas. Algunos autores sugieren correcciones por sesgo de muestreo para evaluar modelos regionales y globales (El-Gabbas y Dormann, 2018). Sin embargo, los proyectos de monitoreo a largo plazo pueden mitigar estos sesgos al realizar censos frecuentes año tras año.

A pesar de estas preocupaciones, se ha aplicado modelos de distribución a varias especies de primates en el Neotrópico, con estudios relacionados con la descripción de nichos fundamentales o la combinación de factores ecológicos para enfocar esfuerzos de conservación en áreas prioritarias. Por ejemplo, se utilizó MaxEnt (Phillips *et al.*, 2006) para vincular las densidades de población del tití de orejas blancas *Callithrix aurita* y su idoneidad de hábitat en Brasil, generando información adecuada para la gestión de su conservación (Norris *et al.*, 2011).



En Ecuador, NDVI ha mejorado tales enfoques, usando vocalizaciones y registros de caza para mapear áreas fuera de las zonas protegidas de Ecuador que aún son hábitats potenciales para el mono araña negro *Ateles fusciceps* (Peck *et al.*, 2011). De manera similar, después de que se redescubriera el mono choro de cola amarilla *Oreonax flavicauda* en los bosques tropicales de los Andes peruanos, la combinación de variables antrópicas en un análisis de espacios y una evaluación de riesgos SIG permitió proponer nuevos límites para las áreas protegidas en función de la composición del hábitat (Leo-Luna, 1987; Buckingham y Shane, 2009). En el sureste de México, los investigadores utilizaron MaxEnt y puntos de datos de presencia de especies para identificar ubicaciones potenciales para realizar más estudios de primates, lo que les permitió generar mapas de distribución más precisos de las especies nativas de primates, que podrían usar como foco para futuras actividades de conservación (Vidal-García y Serio-Silva, 2011). Luego para las mismas aproximaciones, los estudios reforzaron la precisión de sus datos de distribución de especies de primates mexicanos con información de ciudadanos científicos y expertos (Calixto-Pérez *et al.*, 2018). En Argentina, se utilizó MaxEnt para modelar y actualizar el mapa de distribución potencial de primates e identificar zonas importantes de convergencia en los rangos de especies entre los monos aulladores *Alouatta caraya* y *A. guariba* (Holzman *et al.*, 2015). Más recientemente, se ha utilizado SDM para probar si los factores antrópicos mejoran la interpretación de los modelos en combinación con variables ambientales seleccionadas. Para evitar la pérdida de biodiversidad y evitar cambios abruptos en los hábitats de los primates, Kamilar y Tecot (2016) demostraron que los factores antrópicos pueden cambiar la distribución de las especies de lémures (*Eulemur* spp.) en Madagascar, donde los lémures han disminuido en un 94 %, lo que los ha llevado a clasificarlos como el grupo en mayor peligro crítico de extinción entre los mamíferos del mundo (Schwitzer *et al.*, 2014). Existe información limitada sobre la distribución de los primates panameños, aunque el 75% de las especies de primates en Panamá están catalogadas como amenazadas (Cotton *et al.*, 2016; Méndez-Carvajal, 2019). Este estudio prueba 23 variables en tres conjuntos de factores (variables climáticas, cobertura forestal y densidades humanas) que pueden influir en las especies de primates panameños para determinar cómo se afectan en el modelo de distribución de especies. El objetivo fue modelar la distribución de especies de los primates de Panamá para evaluar el efecto del clima, las variables antrópicas y definir la idoneidad del hábitat para cada subespecie de primate panameño, así como obtener mapas de riqueza y endemismo de especies de manera que se pueda enfocar esfuerzos comunitarios y científicos en su conservación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para comprender el papel de las variables climáticas en la distribución de los primates panameños, desarrollamos tres tipos de modelos. Se utilizó 15 años de datos de presencia a largo plazo para evaluar la dispersión actual de primates panameños e identificar hábitats de alta prioridad. Los datos se actualizaron mediante visitas cada año a los sitios y se contó con ciudadanos científicos para verificar aquellos puntos que no pudimos volver a visitar. El



primer modelo involucró solo variables climáticas (19 variables WorldClim). El segundo modelo añadió variables de teledetección (cobertura forestal; NDVI y EVI) (Randin *et al.*, 2020). El tercer modelo agregó efectos antrópicos a las otras variables (población humana; pueblos indígenas y habitantes locales). Este estudio es una aproximación con SDM de primates no humanos en Panamá utilizando el algoritmo MaxEnt, utilizando también la primera base de datos del proyecto de monitoreo de primates a largo plazo liderado por la Fundación Pro-Conservación de los Primates Panameños (FCPP) desde 2001 hasta el 2016, ofreciendo la información más actualizada y precisa relacionada con los primates del Istmo.

Área de estudio

Panamá está ubicado en Centroamérica, con coordenadas generales 07°12'07" y 09°38'46" N; y 77°09'24" y 83°03'07" W. Panamá tiene 12 zonas de vida, con predominio del Bosque Húmedo Tropical Lluvioso (Tosi, 1971). El bosque panameño juega un papel importante como conector entre América del Norte y América del Sur, y su diversidad de primates no humanos en Mesoamérica es equivalente a lo que representa Brasil para América del Sur (Méndez-Carvajal, 2014).

Datos de ubicación de especies

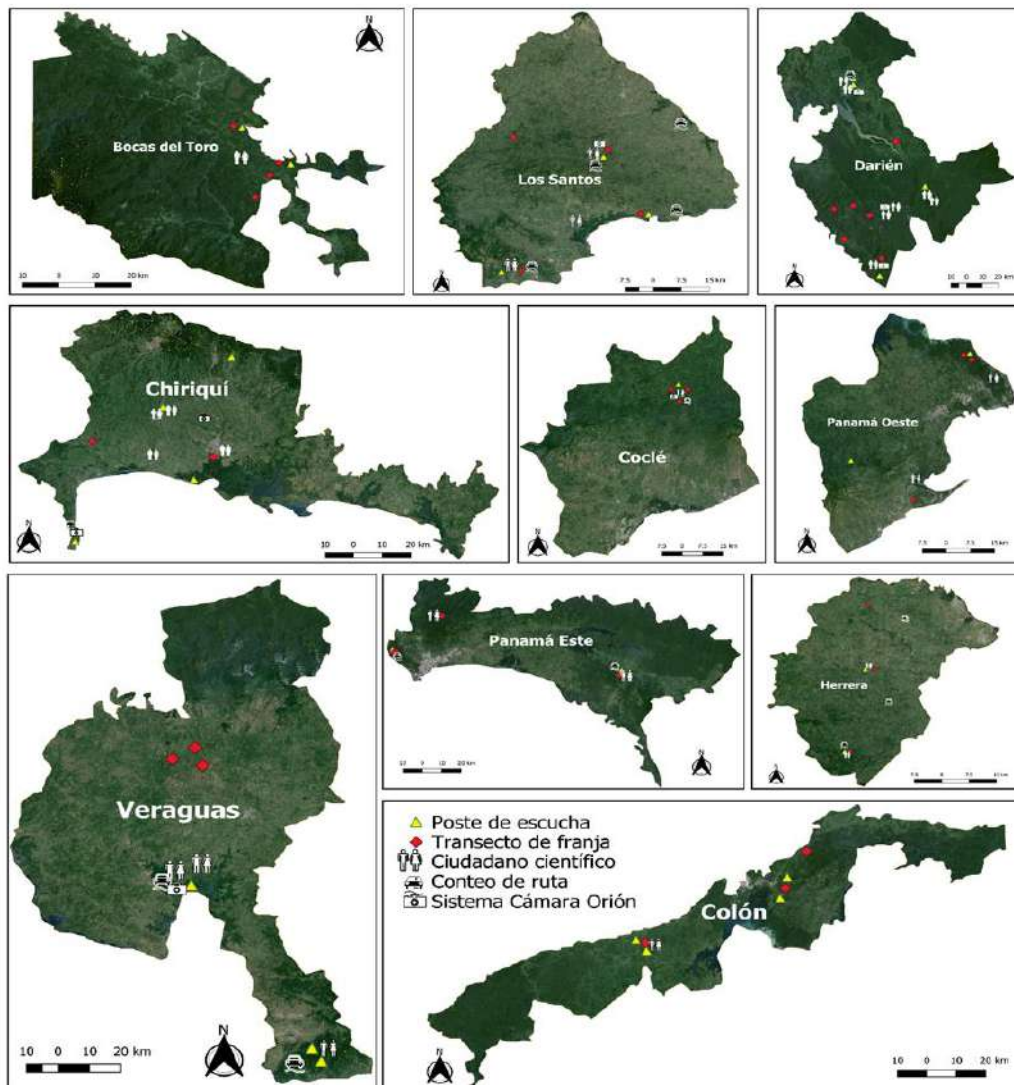
La presencia de especies de primates se determinó por observación directa a partir de múltiples métodos implementados por el autor con la ayuda de voluntarios de FCPP en Panamá (Méndez-Carvajal, 2019). Los métodos se seleccionaron en función de la matriz de vegetación; (1) *Conteo de Ruta*: se condujo un vehículo a 15 km/hr en caso de haber carreteras secundarias y caminos de piedra con cerca viva en zonas fragmentadas del país (Ogutu *et al.*, 2006; Méndez-Carvajal, 2013); (2) *Transectos de Franja* (Rudran, 1996): cuando las observaciones se realizaron en bosques continuos de más de 40 m de ancho se aplicó este método para bosques de galería, cercas vivas anchas, parches de bosques o reservas naturales. Las búsquedas se realizaron a pie o a caballo, y los transectos se estandarizaron para un ancho de 40 m (20 m a cada lado del transecto) para todos los hábitats muestreados, transectos nunca menores a 1 km siguiendo a Ross y Reeve (2003); (3) *Postes de Escucha*: se utilizaron para detectar monos aulladores y arañas por sus vocalizaciones repetitivas en zonas de bosque montano y llanuras (Brockelman y Ali, 1987); (4) *Visitas ad hoc*: se hicieron visitas a una variedad de lugares para detectar signos de presencia (hojas masticadas, vocalizaciones, huellas, heces, olores) (Rabinowitz, 2003); (5) *Sistema de Cámaras Orión (SCO)*: se colocaron cámaras trampa en estrato medio del bosque en 13 áreas diferentes a lo largo de Panamá para detectar mamíferos arborícolas (Méndez-Carvajal, 2014); (6) *Ciudadanos Científicos*: un porcentaje de los datos de ubicación fueron recopilados por un grupo cooperativo de biólogos voluntarios, como parte de las estrategias de conservación establecidas por FCPP en Panamá desde 2010 (Méndez-Carvajal *et al.*, 2013). Se completó un total de 12,500 horas de esfuerzo de búsqueda durante 15 años. Otras ubicaciones se contrastaron con datos basados en literatura antigua y gris, y de la biblioteca de tesis de la Universidad de Panamá. Los censos y encuestas se realizaron con permiso



científico (A-70-14-15 y A-70-14-16) del Ministerio de Ambiente de Panamá, y fueron evaluados por el programa doctoral de Antropología de la Universidad de Durham, Reino Unido, bajo los lineamientos del Comité de Proceso de Ética en Investigación en Ciencias de Vida Silvestre de Reino Unido (Fig. 1).

Figura 1.

Diferentes métodos de detección de primates utilizados en las provincias de Panamá para obtener datos de presencia/ausencia y conteos poblacionales (Méndez-Carvajal, 2019). Mapas elaborados por Karol Gutiérrez-Pineda.



Datos Ambientales

Se extrajeron 19 variables ambientales usando World Clim-Global Climatic Data para Panamá (1950-2000) de DIVA-GIS (www.worldclim.org), con resolución de 30's igual a 1 km² (Hijmans y Graham, 2006), altitud de un modelo de elevación digital usando Shuttle Radar Topography Mission-Nasa. Se agregó capas de sensores remotos para el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y el Índice de Vegetación Mejorada (EVI) como contribuyentes para la productividad del bosque primario (fotosíntesis) (AVHRR; Cracknell, 2001). Los datos fueron extraídos de Modis13C1, procesados en 1 km a 0.05 grados con proyección de rejilla solo en tierra por cada 16 días calendario para la República de Panamá. Se separó la información de NDVI y EVI de abril de 2015-16 (como menor productividad), julio (como mes de transición) y septiembre (como mes de mayor productividad). De 19 variables climáticas, se seleccionaron nueve para el modelo inicial usando el resultado de SDMtoolbox (<http://sdmtoolbox.org/>) para eliminar variables altamente correlacionadas; cinco variables se relacionaron con la temperatura (Temperatura media anual, Rango diurno medio, Isotermalidad, Estacionalidad de temperatura, Rango anual de temperatura), cuatro fueron sobre precipitación (Precipitación anual, Estacionalidad de la precipitación, Precipitación del trimestre más cálido; Precipitación del trimestre más frío). En un segundo modelo, integramos NDVI y EVI (mes más productivo en fotosíntesis, mes menos productivo y mes de transición entre ambos), nuevamente eliminando del análisis las variables altamente correlacionadas. El tercer modelo integrado fueron los datos de población humana, obtenidos de World Population (<http://www.worldpop.org.uk>), versión alfa 2015 que estima el número de personas por píxel ("ppp") con los totales nacionales ajustados para que coincidan. Estimaciones de la división de población de la ONU (<http://esa.un.org/wpp/>) y restantes sin ajustar. Resolución espacial: 0.0008333333 grados decimales (100m en el ecuador), Proyección: Geográfica, WGS84.

Parámetros de datos demográficos de primates y detección

Se recopiló 2,000 puntos de ubicación en total, seleccionando 1,415 como puntos con menos área superpuesta para usar en el modelo de distribución de especies, uno de los principales pasos a considerar para una evaluación efectiva (Soberon y Peterson, 2004; Lozier *et al.*, 2009). Se utilizaron los puntos de ubicación de la siguiente manera; 55 (*A. zonalis*), 318 (*S. o. oerstedii*), 92 (*S. geoffroyi*), 92 (*A. p. palliata*), 119 (*A.p.aequatorialis*), 20 (*A. c. coibensis*), 346 (*A.c.trabeata*), 152 (*A. g. azuerensis*), 17 (*A. g. panamensis*), 30 (*A. f. rufiventris*), 63 (*C. capucinus*) y 111 (*C. imitator*). Estudios previos han demostrado que con un mínimo de cinco puntos de ubicación se puede realizar un enfoque de MaxEnt (Chetan *et al.*, 2014).

Parámetros para el modelo de Máxima Entropía

Se ejecutó el software MaxEnt para el modelado del hábitat adecuado de las especies (Elith *et al.*, 2011). MaxEnt toma como entrada un conjunto de capas o variables ambientales como elevación, precipitación, y un conjunto de ubicaciones de ocurrencia georreferenciadas, y



produce un modelo del rango de la especie dada (Phillips *et al.*, 2006; Willems y Hill, 2009). MaxEnt utiliza un algoritmo basado en el principio bayesiano para calcular la probabilidad de presencia asumiendo que todos los píxeles tienen la misma probabilidad, y coincide con la suposición empírica de un 50 % de probabilidad de presencia/ausencia (Willems y Hill, 2009; Elith *et al.*, 2011; Jiménez-Valverde *et al.*, 2011; Franklin *et al.*, 2013). De la configuración básica, seleccionamos la prueba aleatoria del 25%, con regularización múltiple, lo que significa que se probó el 75% de los datos para cada taxón, contrastando con 10,000 puntos de fondo, 3 repeticiones como submuestra. La configuración experimental estaba usando 1 subproceso, con 10 umbrales lineales, 15 umbrales de bisagra, y como configuración avanzada seleccionamos 3,000 como una interacción máxima con un umbral de convergencia de 0.00001 y 10 como relación de muestra, con un valor predeterminado de 0.5. Usamos esta configuración después de varias pruebas, siguiendo a Willems y Hill (2009) y Holzman *et al.* (2015). La relevancia de cada variable se constató mediante la correlación de Jackknife y Pearson, para probar cómo las variables influyen o no en la distribución de las especies (Brown, 2014). El rendimiento del modelo se comparó utilizando los valores del Área Bajo la Curva (AUC), superiores a 0.80. Considerando funciones lineales, cuadráticas, producto, umbral, articuladas y funciones para ampliar las probabilidades de análisis. Las variables se ingresaron en un Sistema de Información Geográfica (GIS, ArcGIS Desktop 10.3; ESRI, 2015); esta información se usó para crear las características abióticas y las capas ambientales. Los datos se volvieron a muestrear a la base de datos de 30 equivalente a celdas de 1 km². Se realizaron análisis estadísticos aplicando SDMtoolbox (Brown, 2014) y MaxEnt 3.3.3k (Phillips *et al.*, 2006) para combinar las salidas y convertir formatos de archivo (Shanee *et al.*, 2015).

RESULTADOS

Modelo MaxEnt de distribución de especies

De las 13 subespecies de primates no humanos en Panamá, no hubo datos para *A. g. grisescens*, esta subespecie no fue redescubierta hasta el 2021 por la ayuda de ciudadanos científicos y nuestra confirmación en Homenaje, Ipetí-Colono, serranía del Majé (Méndez-Carvajal *et al.*, 2021; 2024). Con las 12 subespecies restantes ejecutamos el Modelo 1, obteniendo valores de AUC para las variables climáticas entre 0.74 (*A. zonalis*) y 0.99 (*A. c. coibensis*), con una media de 0.90 (SD±0.07). La Estacionalidad de las precipitaciones fue la variable más importante para los miembros de la familia Atelidae: *A. c. coibensis*, *A. c. trabeata* y *A. g. azuerensis* (valores AUC 44.9-55.2), mientras que el rango de Temperatura diurna media fue el mejor predictor de la presencia de Aotidae, Atelidae, Cebidae y Calithirichidae: *A. zonalis*, *A. f. rufiventris*, *A. p. aequatorialis*, *C. capucinus*, *S. geoffroyi* y *S. o. oerstedii* (valores AUC 59.6-78.5). La Estacionalidad de la temperatura fue la mejor variable predictora para *C. imitator* y *S. geoffroyi* (valores AUC 41.9-61.4). La evaluación de la relación entre los puntos de presencia de prueba y los puntos de entrenamiento sugirió que la predicción fue deficiente para *A. c. coibensis*, *A. p. aequatorialis*, *A.p.palliata*, *A. f.*



rufiventris, *A. g. panamensis*, *C. capucinus*, *C. imitator*. Sin embargo, el Modelo 1 predijo bien las otras subespecies. Excluirlos del modelo provocó la mayor caída en el rendimiento. Para las otras subespecies, los valores de AUC para la prueba de Jackknife tuvieron valores <0.80 , lo que significa que esta variable es una influencia clave en su presencia. Sin embargo, la estacionalidad de la precipitación fue más importante para *S. o. oerstedii* y *C. imitator*, Modelo 1; AUC 0.965. La omisión frente al área predicha mostró una fracción del área de 0.045, lo que confirma un enfoque deficiente para el primer modelo de *A. f. rufiventris*. Tratando de mejorar la precisión del Modelo 1, se agregó sensores remotos de cobertura boscosa. El Modelo 2, que incorpora NDVI, no mejoró los valores de AUC de la prueba principal bajándolos a 0.66 (*A. g. panamensis*) con una media general de $0.88 \text{ SD} \pm 0.09$. La Precipitación anual y el Rango diurno medio se volvieron menos importantes con la inclusión de las variables de teledetección. El NDVI de transición y el NDVI máximo tuvieron algunas de las contribuciones porcentuales más bajas, pero el NDVI mínimo fue importante para *A. c. coibensis* y *A. g. panamensis*. A pesar de esto, la relación entre los puntos de prueba y entrenamiento en general mejoró el Modelo 1 con el Modelo 2, con valores de AUC de 0.891 ± 0.029 . El Modelo 2 también mejoró ligeramente al Modelo 1 en términos de precisión, con una omisión media más alta superpuesta al valor aleatorio de ausencia.

El Modelo 2 para la familia Atelidae, en particular *A. c. coibensis*, siguió siendo deficiente para predecir la probabilidad de presencia, aunque el área de la fracción fue menor que en el Modelo 1. Los resultados del Modelo 2 para *A. p. aequatorialis*, *A. p. palliata* y *A. f. rufiventris* fueron similares a los del Modelo 1, con puntos de entrenamiento y prueba más cercanos a la omisión prevista pero aún por debajo de la línea de no discriminación. Sin embargo, el Modelo 2 mejoró los resultados para *A. g. panamensis*, *C. capucinus* y *C. imitator*, aumentando la tasa positiva del área bajo la curva justo hasta el punto de la línea uniforme. El Modelo 2 mostró influencia para la mayoría de las subespecies, excepto para *A. g. panamensis*, *C. imitator* y *S. geoffroyi*. La evaluación de Jackknife para cada variable en el Modelo 2 confirmó la importancia de las variables Precipitación anual, Rango diurno medio y Estacionalidad de la temperatura para todas las especies excepto *A. c. coibensis*, *A. c. trabeata*, *A. g. azuerensis*, *C. capucinus* y *S. o. oerstedii* donde los valores de AUC para la Temperatura media anual fueron inferiores a 0.45. La omisión gráfica frente al área predicha mostró que la fracción del área predicha era la misma que para el Modelo 1, pero con una desviación estándar más alta, lo que sugiere la necesidad de un modelo mejor que el 1 y el 2 para evaluar claramente la idoneidad del hábitat. El Modelo 2 también mejoró ligeramente al Modelo 1 en términos de precisión, con una omisión media más alta superpuesta al valor aleatorio de ausencia. Luego incorporamos un tercer conjunto de variables para mejorar la precisión, este incluye al ser humano.

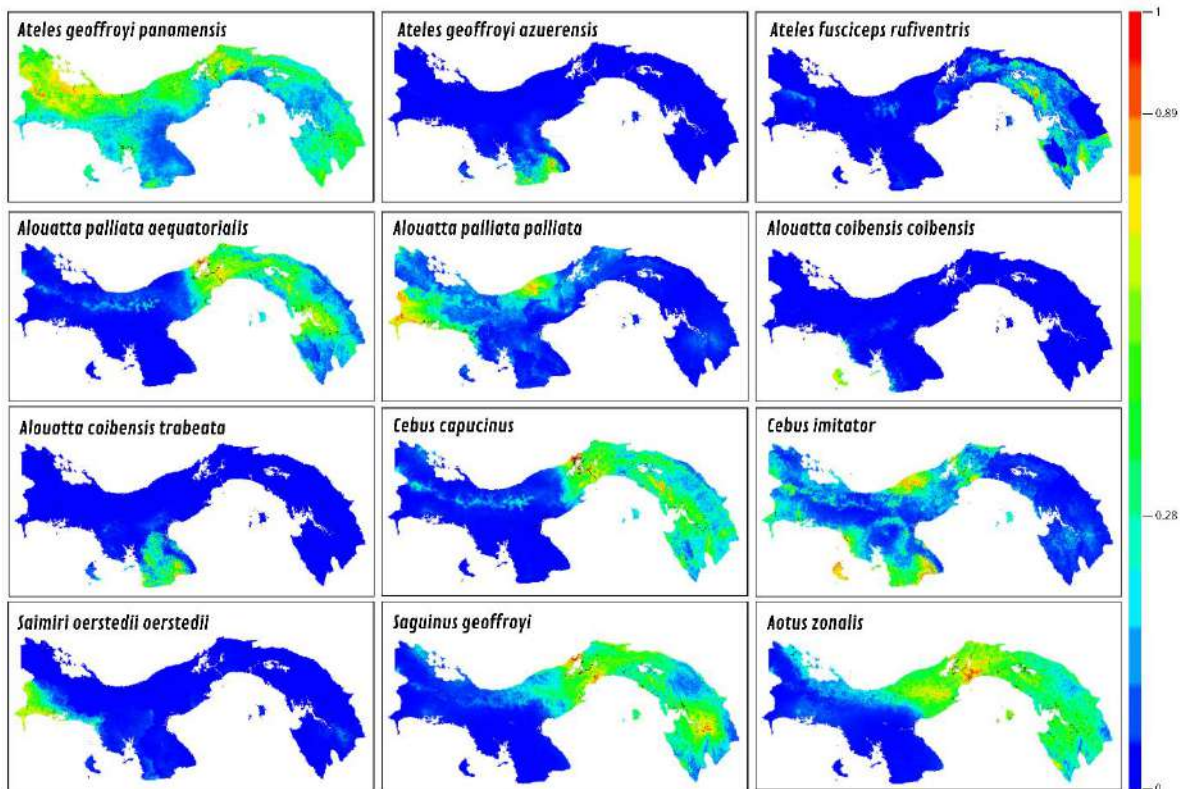
En el Modelo 3, la inclusión de efectos antrópicos mejoró los resultados de AUC para las familias Aotidae, Atelidae, y Cebidae, incluyendo especies como *A. c. trabeata*, *A. p. palliata*, *A. zonalis* y *S. o. oerstedii*. El AUC disminuyó o se mantuvo igual para *A. c.*



coibensis, *C. capucinus* y *C. imitator* con una media general de 0.88 (SD±0.10). Los valores de AUC para las variables ambientales disminuyeron cuando se agregaron factores antrópicos. El cambio más fuerte observado fue en *A. p. palliata*, donde la estacionalidad de la temperatura cambió del valor AUC 52 a 29.1. El Modelo 3 mostró que no todas las especies de primates se ven drásticamente afectadas por la densidad de población humana, con un AUC que oscila entre 0.7 y 10.4. La suma de los valores de contribución para las dos variables antrópicas fue de 54.9% para *A. f. rufiventris*, 46.6% para *S. o. oerstedii* y 28.9% para *A. p. palliata*. En contraste, la contribución combinada de *A. c. coibensis*, *A. g. azuerensis* y *A. g. panamensis* fue inferior al 5%, con todas las demás subespecies intermedias entre estos valores. La inclusión de valores antrópicos mejoró el desempeño del Modelo 1 y 2 con los datos de prueba de omisión promedio que excedieron el valor aleatorio de ausencia. El Modelo 3 mejoró la probabilidad de presencia para todas las subespecies, aunque la subespecie *A. c. trabeata* no se movió de la línea uniforme. Los valores de AUC para la prueba Jackknife fueron > 0.80 AUC. El gráfico de omisión frente al área predicha fue similar al de los Modelos 1 y 2. La prueba de Jackknife destacó que las variables antrópicas, en particular la presencia de poblaciones indígenas, eran importantes para limitar *A. c. coibensis*, *A. c. trabeata*, *A. p. aequatorialis*, *A. p. palliata*, *A. f. rufiventris*, *A. g. azuerensis*, *C. capucinus* y *C. imitator* con valores AUC 0.70-0.90 para áreas indígenas (Fig. 2 y 3).

Figura 2.

Mapas con Modelaje 3, muestran los hábitats idóneos mejor definidos y la distribución potencial para las especies de primates en Panamá, donde lo rojo y amarillo simbolizan hábitats idóneos para estas subespecies según la escala anexa.



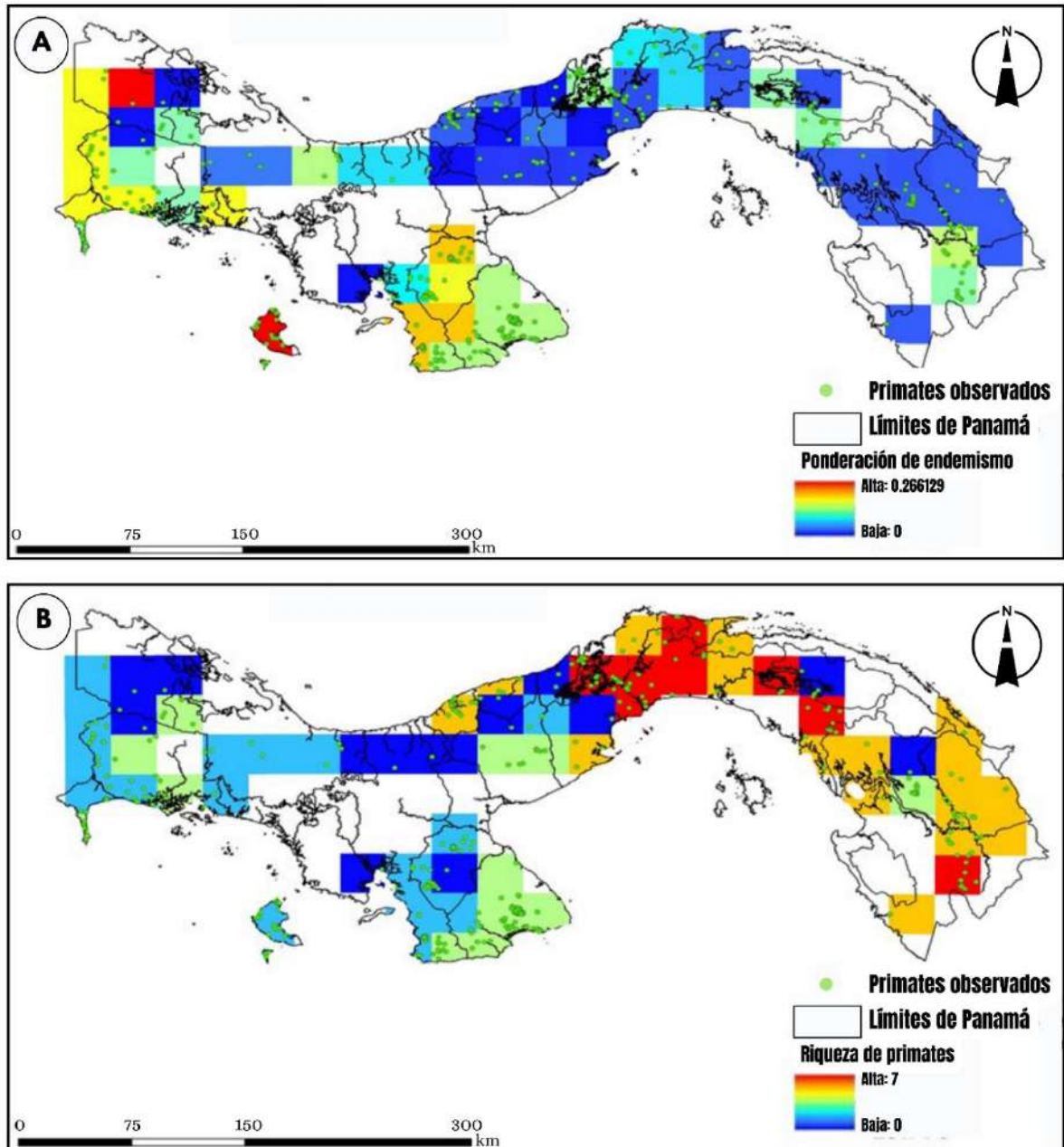
Diversidad de especies y endemismo

Con base en los resultados obtenidos para cada género, el programa identificó las áreas que son más relevantes en cuanto a endemismo de especies de primates y en cuanto a diversidad y simpatria, para la conservación directa en función de la idoneidad del hábitat (Fig. 3).



Figura 3.

(A) Mapa de endemismo, donde los cuadrantes rojos y amarillos simbolizan las áreas de mayor endemismo de primates en Panamá; (B) Mapa de diversidad, donde los cuadrantes rojos y amarillos simbolizan las áreas de mayor simpatría de especies de primates en Panamá



DISCUSIÓN

Modelado de distribución de especies

Los modelos de distribución de especies que utilizan datos biogeográficos y ecológicos son importantes para evaluar el estado de conservación de las especies de primates (Wittmann *et al.*, 2016; Calixto-Pérez *et al.*, 2018; Randin *et al.*, 2020). El Modelo 1 identificó seis variables relacionadas con la presencia de primates, tres fueron particularmente importantes: Rango diurno medio, Estacionalidad de la temperatura y Estacionalidad de la precipitación. Estas variables pueden tener un impacto directo en la disponibilidad de alimentos, patrones de dispersión, cambios en la estructura del grupo (van Schaik, 1983) y cambios marginales en la población (Sexton *et al.*, 2009). Estos hallazgos difieren ligeramente de otros estudios de especies de primates con masa corporal similar en el Neotrópico. Se ha reportado que los grupos *A. palliata*, *A. pigra* y *A. geoffroyi* están limitados por la Temperatura media del trimestre más cálido y la Precipitación durante el trimestre más frío en México (Vidal-García y Serio-Silva, 2011). Estas variables fueron excluidas de mi análisis debido a la correlación con otras variables, aunque ninguna se correlacionó fuertemente con las de estacionalidad identificadas como importantes en el Modelo 1. En contraste, mis resultados para *C. imitator* son similares a los de *C. albifrons* en Ecuador (Campos y Jack, 2013). En este trabajo se encontró extensiones de lluvia correlacionadas con la mortalidad del mono aullador cuando la temporada de lluvia se extiende como sucede en la península de Azuero para *A. c. trabeata* (Méndez-Carvajal, 2013). En isla Coiba se encontró bajas densidades y bajas proporciones en la relación hembras: crías para *A.c.coibensis* (Méndez-Carvajal, 2012a: 2019), lo que sugiere que la población está disminuyendo (Clarke, 1982). Otras muertes de primates en IBC, zona del Canal de Panamá, se han relacionado empíricamente con la cantidad de lluvia durante largos períodos (Méndez-Carvajal, 2013; 2014). La lluvia extrema afecta la abundancia de insectos y por lo tanto indirectamente afecta a *C. imitator* en su población, y por hipotermia a los monos aulladores (Milton y Giacalone, 2014). Aunque las variables ambientales contribuyeron a más del 0.85 de los valores de AUC de ganancia de entrenamiento en Modelo 1, se sugiere mejorarlo. El Modelo 2 tuvo un rendimiento similar al Modelo 1 para algunas subespecies (*A. palliata* spp. y *A. f. rufiventris*) y solo mejoró ligeramente el rendimiento para *A. g. panamensis* y *Cebus* spp. Entre las tres capas de NDVI seleccionadas para nuestro estudio, la más importante en los modelos fue NDVI en el punto de productividad anual mínima (abril), lo que sugiere que esta es una restricción clave para los primates. En el Modelo 3 fue el más completo, las variables antrópicas mejoraron el rendimiento de los modelos anteriores y fueron las variables más importantes para casi todas las subespecies, incluyendo *A. g. panamensis*, una de las cuatro subespecies de monos araña considerada En Peligro Crítico (Méndez-Carvajal *et al.*, 2022). El EVI y NDVI (Modelo 2), y los efectos antrópicos (Modelo 3), fueron importantes en el modelaje de distribución de varias subespecies donde la cobertura forestal se ve afectada por prácticas del ser humano, tal cual lo sugiere Shanee *et al.* (2015).



Efectos de variables en la distribución de primates en Panamá

Los efectos de la estacionalidad de la temperatura sugieren que los primates están afectados por el calentamiento global por actividades humanas como la deforestación. Las especies en Panamá que mejor predicen esta variable son *A. zonalis* y *A. palliata*, que también tienen una de las mayores áreas de idoneidad predicha, cubriendo todo el Tabasará panameño, Veraguas, Coclé, Colón (cordillera occidental de Panamá), Panamá, San Blas y Darién (la cordillera oriental), incluyendo las áreas protegidas de la Cuenca del Canal de Panamá y el Parque Nacional Darién. Las temperaturas y las precipitaciones han ido cambiando en Panamá, un ejemplo de los efectos de esto es en la península de Azuero, donde individuos de monos aulladores mueren cada año cuando se retrasa la temporada de lluvias y las altas temperaturas persisten por períodos cada vez más prolongados (Méndez-Carvajal, 2005; 2019). Las muertes de primates han ido en aumento en la región, y los informes de más de 50 monos aulladores que murieron casi al mismo tiempo en México, Honduras, Nicaragua, Panamá y otros países de Sudamérica generaron especulaciones a principios de 2016, se pensó que estas muertes se debieron principalmente a la tala de vegetación y posible virus por exposición humana (García-Nisa, 2016). Posteriormente en 2020, la pandemia de Covid-19 afectó al mundo entero, por lo que quizá la vigilancia zoonótica con nuestros monos debe tomarse mucho más en cuenta como indicadores en un trabajo mancomunado con las autoridades de salud y del ambiente.

Se ha sugerido que los efectos climáticos son la razón principal de la ausencia de *A. zonalis* en varios lugares donde solía ser abundante. En Panamá, se informó que este primate era abundante en el bosque del Darién a principios del siglo XX (Anthony, 1916). Sin embargo, *A. zonalis* ahora no se detecta o es escaso en algunas áreas boscosas (por ejemplo, Chagres) (Svensson *et al.*, 2010), Cordillera Majé, algunas partes de Pirre, Cana y el Parque Nacional Darién (Méndez-Carvajal, 2014; 2019). Recientemente se han encontrado individuos de *A. zonalis* muertos en bosques protegidos en Donoso-Colón y el Parque Nacional Soberanía (Méndez-Carvajal *et al.*, 2023). La temperatura y la precipitación pueden cambiar los patrones de actividad circadiana en primates, como en *A. azarae*, el mono búho de Argentina (Fernández-Duque, 2016). Esos dos factores también pueden aumentar la incidencia de brotes de enfermedades infecciosas (Harvell *et al.*, 2002). En Panamá, las variables ambientales más predictivas de la presencia de *A. zonalis* fueron el Rango anual de temperatura y el Rango diurno medio (>0.75 AUC), lo que significa que son vulnerables a la reducción del bosque y la luminosidad. Esto contrasta con los resultados para otra especie del mismo género, *A. miconax* en Perú, donde la Precipitación del cuarto más húmedo fue la variable más relevante (Shanee *et al.*, 2015). La diferencia entre estas dos especies podría estar relacionada con la latitud, la influencia de la deforestación y la alta humedad que generalmente se presenta en Panamá, ya que el país es estrecho y está fuertemente influenciado por los mares en ambos lados, a diferencia del área de distribución de *A. miconax* (Méndez-Carvajal, 2019). El *S. oerstedii* está restringido a una pequeña porción de la parte occidental de la provincia de Chiriquí y la costa del Pacífico oriental de Costa Rica



en Panamá (Méndez-Carvajal, 2019). Su rango observado en nuestros modelos coincide con el calculado por Rodríguez-Vargas (2003), donde la península Burica alberga la población principal, con meta-poblaciones periféricas aisladas en el norte de Chiriquí. Sin embargo, el modelo detectó hábitat idóneo para zonas más al suroeste de Veraguas. Si evaluamos esta distribución aislada y pequeña, el modelo detecta claramente una mala idoneidad del hábitat para esta especie (0.62%-0.92% AUC). Esto apoya la idea de que las modificaciones del paisaje por la agricultura humana y las presiones climáticas alteran la dispersión de especies, tal cual resaltan Dale *et al.* (2001). El modelo detectó Rango anual de temperatura como la variable más limitante para *Saimiri* lo que significa que la fragmentación en las zonas de su dispersión amenaza la presencia de este primate en zonas agrícolas (con >0.90 AUC).

Para los géneros *Saguinus* y *Cebus*, el Rango diurno medio (0.75 y 0.90 AUC), fue influyente. Esta variable está relacionada con las variaciones de temperatura diurna que se producen cuando la energía solar calienta la superficie terrestre (Qu *et al.*, 2014). En el bosque, esta variable podría afectar los componentes ácidos de las frutas, cambiando directamente sus propiedades químicas, así como los patrones de actividad de los primates forrajeros (Janmaat *et al.*, 2006). Estas temperaturas pueden cambiar según los vientos locales, el tipo de suelo, el agua corporal, las nubes y el vapor. En Panamá, las dispersiones de *Cebus* y *Saguinus* incluyen el Parque Nacional Darién, San Blas, el lado este de Colón y la provincia de Panamá, pero *Saguinus* se extiende hasta Coclé y la parte noroccidental de Veraguas. Por otro lado, especies del género *Cebus* mostraron la mayor probabilidad de presencia (0.92), particularmente en la zona norte de la provincia de Colón (incluyendo el Parque Nacional San Lorenzo), la provincia de Los Santos (El Valle de Tonosí), la provincia de Veraguas (Golfo de Montijo), las áreas de manglares, y el bosque protegido del Parque Nacional Isla Coiba. Hubo una probabilidad moderada de presencia en 0.62 para áreas cercanas a pueblos, campos agrícolas y vegetación ribereña para las provincias de Bocas del Toro y Chiriquí. Todas estas áreas difieren en temperatura y experimentan los efectos antrópicos más fuertes debido a la urbanización, la producción de cultivos y las carreteras primarias y secundarias. El aumento de la densidad de población humana cambia el paisaje de bosque a tierras agrícolas, pueblos o uso industrial que reduce la conectividad del bosque tal cual sugieren Kamilar y Tecot (2016). Donde los monos son parte de la dieta indígena local, esto también es perjudicial para su supervivencia (Peck *et al.*, 2011). La principal variable ambiental relacionada con la presencia de *C. imitator* fue la Estacionalidad de la temperatura (0.75 AUC), que influye en la cadena trófica de los ecosistemas, es decir, relaciones planta-polinizador (Takemoto *et al.*, 2014). Se encontró una influencia de la población humana y comunidades indígenas sobre *C. capucinus* y *C. imitator* con >70 AUC, similar a Ecuador y Perú, donde variables similares estaban afectando a *C. albifrons* (Campos y Jack, 2013). Los habitantes están reduciendo sus poblaciones locales de primates al dispararles para el consumo y también porque consideran que los monos son plagas que se alimentan de sus cultivos (Riley *et al.*, 2023). En cuanto al clima, Panamá reportó la reducción poblacional de más del 70% de *C. imitator* en IBC, en la Cuenca del Canal de



Panamá, debido a la disminución de los picos de artrópodos por las altas precipitaciones pluviales (Milton y Giacalone, 2014).

Se prevé que especies del género Atelidae se encuentren en el bosque tropical seco de la península de Azuero en el suroeste de Panamá, dentro de las provincias de Herrera, Los Santos y sureste de Veraguas. Azuero es un área altamente fragmentada y las variables climáticas están relacionadas con los cambios de lluvia. La Precipitación del trimestre más cálido, que es el promedio de los tres meses más cálidos del año, fue la variable más importante en estos modelos, afectando su estabilidad. Esta variable tiene un efecto marcado: todos los años se encuentran individuos muertos o con altos niveles de deshidratación, especialmente en la estación seca entre febrero y mayo (Méndez-Carvajal, 2013). Otros estudios relacionan la distribución de atelidos con el Rango de temperatura anual, incluyendo *A. caraya* en Argentina (Holzmann *et al.*, 2015). Para *A. g. panamensis*, el rango pronosticado se extiende a todo el lado del Caribe y Cordillera Central, con AUC de 0.62-1.0, incluyendo toda la Cordillera de San Blas, algunas áreas cercanas a la frontera norte de Darién, provincia de Panamá (Parque Nacional Chagres), provincia de Colón (Parque Nacional Portobelo, Parque Nacional San Lorenzo), provincia de Coclé (Parque Nacional Omar Torrijos), norte de la provincia de Veraguas (Parque Nacional Santa Fe), Provincias de Chiriquí y Bocas del Toro (Bosque de Protección Palo Seco, Parque Internacional La Amistad). Los factores que limitan la idoneidad del hábitat de esta subespecie son la cubierta forestal, particularmente en la estación seca, expresada por EVI de abril de 2015, que también se correlaciona con la estacionalidad de las precipitaciones (ambas con AUC > 0.75). Las áreas más importantes para conservar con base en las AUC más altas son, de oeste a este: Parque Internacional Palo Seco y La Amistad, Cauchero, Rambala, Buri en Bocas del Toro y el Parque Nacional Chagres en las provincias de Colón y Panamá. Observaciones en México encontraron a la variable Precipitación del cuartil más frío como la principal variable relacionada con la idoneidad del hábitat para *A. geoffroyi* (Vidal-García y Serio-Silva, 2011). La subespecie *A. g. panamensis* ha experimentado presiones antrópicas, pero en el modelo estos efectos aún son pequeños. Sufre presión de cacería en la parte occidental cerca de Bocas del Toro, ya que esta zona tiene tres grupos indígenas diferentes: el pueblo Bri-Bri cerca de Costa Rica (río Sixaola), el pueblo Naso (El Empalme) y el pueblo Ngäbe-Buglé, en partes de Palo Seco, Piedra Roja, Jadeberi, Cerro Tolica y Chichica. Estos pueblos usan *A. g. panamensis* como recurso proteico y mantienen crías de la especie como mascota (Smith, 2005). En la parte central de la cordillera de Talamanca y cerca de la extensa selva de Coclé y Colón, la actividad minera está fragmentando el Corredor Biológico Mesoamericano en un área muy sensible que aún conecta la vegetación primaria entre América del Norte y América del Sur. Los únicos lugares donde esta especie se ve menos afectada por actividad humana son el Parque Nacional Chagres, Parque Nacional Portobelo, la Cordillera de San Blas y el río Mamóní, Reserva Cocobolo (parte este de Panamá).



Los monos del género *Ateles* están distribuidos en diferentes partes de Panamá, el modelo detectó dos tipos de variables ambientales que influyen en su población: Isotermalidad (rango medio diurno/rango anual de temperatura) con 0.80 AUC, y Estacionalidad de temperatura (AUC = 0.82), pero también incluye población humana, en particular los indígenas Emberá-Wounaan (0.92 AUC), limitan su dispersión debido a la pérdida de hábitat y la cacería para consumo (Méndez-Carvajal, 2012). Para *A. c. coibensis* incluye grupos pequeños cuya dispersión está restringida a dos islas, Coiba y Jicarón a unos 24 km de la costa en el Pacífico occidental de Panamá, con posibilidades de presencia en otras islas y Golfo de Montijo. Ambas islas tienen bosque húmedo tropical protegido, y el modelo identificó la Precipitación del trimestre más frío (0.95-0.98 AUC), como la variable más importante para esta subespecie, lo que significa que un cambio abrupto en el mes más frío será la variable más determinante de una mortalidad inesperada por hipotermia. Se esperaba esta influencia ya que la isla más grande (Coiba), tiene una baja densidad de monos aulladores y las limitaciones climáticas se sugirieron como una de las causas naturales que restringen su tasa poblacional (Méndez-Carvajal, 2012a).

Mapas de diversidad de especies y su conservación

Los mapas obtenidos coinciden con los hábitats que tienen más vegetación remanente adecuada para *Alouatta* y *Ateles*. Para *A. c. trabeata*, las principales áreas que necesitan protección son: Santa María, París, Parita, Reserva Lavadero en Ocú, Reserva Forestal El Montuoso (Herrera). Las especies de *Ateles* no están presentes en la RF El Montuoso, pero el área podría ser un sitio viable para esfuerzos de reintroducción de *A.g. azuerensis* si se lleva a cabo el procedimiento correcto. Esas áreas deben ser regeneradas con vegetación nativa y se debe promover la conexión del bosque usando puentes aéreos entre caminos, a su vez, combinar estas actividades con programas de educación ambiental. Los mapas de diversidad marcan como zonas de conservación los pueblos de Mariato, Torio, Arenas, Pixvae, El Parque Nacional Cerro Hoya, Quebro (Veraguas), y señalan regiones más relevantes para Los Santos como Canajaguas, Mensabé, Valle Rico, La Miel, Oria y el sur de Los Santos en El Valle de Tonosí, Pedasí, La Zahína, y Venao, incluyendo la Reserva Forestal La Tronosa, estas deben permanecer casi intocables, mientras que la educación ambiental, conexión por puentes aéreos y la reforestación con especies nativas deben mantenerse activas en estas áreas.

Los primates de las familias Atelidae y Cebidae se distribuyen a ambos lados del lago Gatún en la Cuenca del Canal de Panamá, en el centro de Panamá y Cerro Azul, Bayano, serranía de San Blas, serranía del Majé, y Reserva Natural Privada Cerro Chucantí. Las principales áreas importantes para conservar *A. palliata*, *C. capucinus* y *A. f. rufiventris* en el este de Panamá son Bayano, Piriati, Cordillera Majé, Cordillera Pirre y Cordillera Sapo. Todos los ecosistemas cercanos a estas montañas ya están amenazados. En Darién, las áreas detectadas con las condiciones de hábitat más adecuadas están siendo fragmentadas por las actividades humanas incluyendo la extracción de madera legal e ilegal, incendios, la siembra de palma



de aceite, y la inmigración masiva de personas desde Colombia, rompiendo el tapón del Darién panameño (Méndez-Carvajal, 2019; *et al.*, 2021). Lugares de urgente protección deben establecerse en Cémaco, Tuquesa, Gariche, Boca de Sábalo, Boca de Pavarando, río Chucunaque, río Balso y río Sambú ya que estos hábitats tienen las variables más adecuadas para la supervivencia en Darién de *C. capucinus*, *A. p. aequatorialis* y *A. f. rufiventris*. En provincias como Chiriquí, Bocas del Toro, Veraguas norte, Coclé y Colón, es necesario proteger a las especies de las familias Atelidae y Cebidae, con atención enfocada en Miguel de la Borda, Reserva Chorogo, y La Concepción, Puerto Armuelles (Chiriquí), Puerto Viejo (Bocas del Toro). Es necesario visitar y hacer censos respectivos en las islas tanto de la costa Caribe como de la costa Pacífica, tomando en cuenta los falsos positivos de presencia de especies por traslocación debido a turismo mal llevado y tráfico ilegal. Islas como Bastimentos y otras en el Golfo de los Mosquitos se deben visitar para confirmar la presencia de *A. p. palliata*, *A. zonalis* y *S. o. oerstedii* (según la predicción de los mapas), e identificar cualquier amenaza antrópica.

CONCLUSIÓN

Probamos el uso de modelos de hábitats idóneos de especies para predecir la presencia de los monos en Panamá. Los resultados sugieren que los usuarios de modelajes de distribución de especies mejorarían sus resultados al considerar factores adicionales a las variables ambientales. La adición de datos de cobertura boscosa con sensores remotos mejora los modelos de idoneidad, pero se debe tomar en cuenta que la fotosíntesis se detecta tanto en bosque continuo como en pastizales. Los datos poblacionales indígenas ayudaron a identificar lugares donde necesitamos esfuerzos urgentes de censos y de conservación en Panamá enfrentando la realidad del uso de los primates como fuente de proteína. En términos de conservación, estos resultados mostraron que la tasa más alta de endemismo se encuentra en las provincias de Bocas del Toro, Chiriquí, Veraguas, Los Santos, y Herrera, incluyendo isla Coiba. Mientras que la mayor diversidad de taxas se da en provincias de Panamá, Colón y Darién. Según estos modelos, hay dos perspectivas; una es atender a especies endémicas con un grado más alto de vulnerabilidad y endemismo, la otra es enfocar esfuerzos en zonas de alta simpatria de subespecies. Las variables limitantes para cada subespecie son diferentes, unas pueden ser más resilientes a cambios climáticos, otras quizá más amenazadas por efectos antrópicos directos y de permanencia por lo que actos con mayor cooperación gubernamental y ciudadana serán cruciales. Los estudios de distribución de especies deben guardar prudencia y dedicar tiempo y metodología correcta si realmente se quiere evaluar la distribución de una especie. El uso de genética molecular para determinar límites de simpatria entre subespecies de igual fenotipo debe incorporarse. De preferencia no nos conformemos con la detección in situ, busquemos el historial. La conservación ideal para Panamá debe ser para todo el país, ya que todas las subespecies representan un valor cultural y aportan con su papel ecológico a la supervivencia de nuestras culturas y poblaciones humanas. La vigilancia zoonótica debe aplicarse con autoridades de salud y ONG's conservacionistas, debe



sustentarse apoyándose de la etnoprimatología, si queremos que realmente las comunidades sean aliados en la conservación.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación de Panamá (Senacyt), y al Instituto para la Formación y Aprovechamiento de los Recursos Humanos (Ifarhu) del Gobierno de Panamá, por otorgarme la beca doctoral. A Jo Setchell, Kris Kovarovic, Russ Hill, y Marco Nebbia de Durham University y Anna Nekarís de Oxford Brookes University, Reino Unido. Agradecimientos a la Universidad de Panamá, Servicio Nacional de Fronteras de Panamá, y Ministerio de Ambiente. Mis reconocimientos por datos complementarios a Yaguará Panamá, CREA, Adopta Bosque Panamá, ANCON, Fundación Rapaces y Bosques, y ciudadanos científicos parte del “programa ojo al mono” de FCPP. Agradecimientos a Karol Gutiérrez-Pineda por la ayuda en los diseños de las figuras. Por consultas en uso de MaxEnt a Sam Shanee y Francisca Vidal-García. Por fondos de investigación a: Idea Wild, Rufford Small Grants (6), Mohamed bin Zayed Species Conservation Fund (5), Primate Conservation Inc., St Mary’s College Research Grant, Anthropology Department of Durham University, Wild Future, Re:wild, Primate Society of Great Britain, International Primatological Society Conservation Grants, y Primate Action Funds. A revisores de Tecnociencia por sus comentarios.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anthony, H. E. (1916). Panama mammals collected in 1914-1915. *Bulletin of the American Museum of Natural History*.
- Boubli, J.P. & M.G. De Lima. (2009). Modeling the geographical distribution and fundamental niches of *Cacajao* spp. and *Chiropotes israelita* in Northwestern Amazonia via a maximum entropy algorithm. *International Journal of Primatology*, 30(2), 217-228.
- Brockelman, W.Y. & R. Ali. (1987). ‘Methods of surveying and sampling forest primate populations’, pp. 23-63 in C.W. Marsh and R.A. Mittermeier (eds). *Primate Conservation in Tropical Rainforests*. New York: Alan R. Liss.
- Brockelman, W.Y. & T. Geissmann. (2008). *Hylobates lar*. IUCN Red List of Threatened Species.
- Brown, J.L. (2014). SDMtoolbox: a python-based GIS toolkit for landscape genetic, biogeographic and species distribution model analyses. *Methods in Ecology and Evolution*, 5(7), 694-700.



- Buckingham, F. & S. Shane. (2009). Conservation priorities for the Peruvian yellow-tailed woolly monkey (*Oreonax flavicauda*): a GIS risk assessment and gap analysis. *Primate Conservation*, 24(1), 65-71.
- Calixto-Pérez, E., J. Alarcón-Guerrero, G. Ramos-Fernández, P. A.D., Días, A. Rangel-Negrín, M. Améndola-Pimenta... & E. Martínez-Meyer. (2018). Integrating expert knowledge and ecological niche models to estimate Mexican primates' distribution. *Primates*, 59, 451-467.
- Campos, F.A. & K.M. Jack. (2013). A potential distribution model and conservation plan for the critically endangered Ecuadorian capuchin, *Cebus albifrons aequatorialis*. *International Journal of Primatology*, 34(5), 899-916.
- Campbell, G., J. Head, J. Junker, K.A.I. Nekaris, S. Wich & A. Marshall. (2016). Primate abundance and distribution: background concepts and methods. *An introduction to primate conservation*. 79-110.
- Carneiro, J., J. De Sousa E Silva Jr., I. Sampaio, A. Pissinatti, T. Hrbek, M. Rezende Messias, ... & H. Schneider. (2016). Phylogeny of the titi monkeys of the *Callicebus moloch* group (Pitheciidae, Primates). *American Journal of Primatology*, 78(9), 904-913.
- Carvalho, S.B., J.C. Brito, E.J. Crespo & H.P. Possingham. (2010). From climate change predictions to actions—conserving vulnerable animal groups in hotspots at a regional scale. *Global Change Biology*, 16(12), 3257-3270.
- Clarke, M. R. (1982). Socialization, infant mortality, and infant-nonmother interactions in howling monkeys (*Alouatta palliata*) in Costa Rica. University of California, Davis, USA.
- Cracknell, A.P. (2001). The exciting and totally unanticipated success of the AVHRR in applications for which it was never intended. *Advances in Space Research*, 28(1), 233-240.
- Chetan, N., K.K. Praveen & G.K. Vasudeva. (2014). Delineating ecological boundaries of Hanuman langur species complex in peninsular India using MaxEnt modeling approach. *PloS one*, 9(2), e87804.
- Cotton, A., F. Clark, J.P. Boubli & C. Schwitzer. (2016). IUCN red list of threatened primate species. In: *An introduction to primate conservation* (pp. 31-38). Oxford, England: Oxford University Press.



- Dale, V. H., L.A. Joyce, S. McNulty, R.P. Neilson, M.P. Ayres, M.D. Flannigan, ... & B.M. Wotton. (2001). Climate change and forest disturbances: climate change can affect forests by altering the frequency, intensity, duration, and timing of fire, drought, introduced species, insect and pathogen outbreaks, hurricanes, windstorms, ice storms, or landslides. *BioScience*, 51(9),723-734.
- Elith, J., S.J. Phillips, T. Hastie, M. Dudík, Y.E. Chee & C.J. Yates. (2011). A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and distributions*, 17(1), 43-57.
- El-Gabbas, A. & C.F. Dormann. (2018). Improved species-occurrence predictions in data-poor regions: using large-scale data and bias correction with down-weighted Poisson regression and Maxent. *Ecography*, 41(7), 1161-1172.
- Fernández-Duque, E. (2016). Social monogamy in wild owl monkeys (*Aotus azarae*) of Argentina: the potential influences of resource distribution and ranging patterns. *American Journal of Primatology*, 78(3), 355-371.
- Fourcade, Y., J. O. Engler, D. Rödder & J. Secondi. (2014). Mapping species distributions with MaxEnt using a geographically biased sample of presence data: a performance assessment of methods for correcting sampling bias. *PloS one*, 9(5), e97122.
- Franklin, J., F.W. Davis, M. Ikegami, A.D. Syphard, L.E. Flint, A.L. Flint, L. Hannah. (2013). Modeling plant species distributions under future climates: how fine scale do climate projections need to be? *Global Change Biology*, 19(2), 473-483.
- García-Nisa, I. (2016). Las misteriosas muertes de los monos de Azuero. *Boletín APE*, 23(1),1-2. Barcelona.
- Harvell, C. D., C.E. Mitchell, J.R. Ward, S. Altizer, A.P. Dobson, R.S. Ostfeld & M. D. Samuel. (2002). Climate warming and disease risks for terrestrial and marine biota. *Science*. 296(5576), 2158-2162.
- Hijmans, R.J. & C.H. Graham. (2006). The ability of climate envelope models to predict the effect of climate change on species distributions. *Global change biology*, 12(12), 2272-2281.
- Holzmann, I., I. Agostini, K. DeMatteo, J.I. Areta, M.L. Merino & M.S. Di Bitetti. (2015). Using species distribution modeling to assess factors that determine the distribution of two parapatric howlers (*Alouatta* spp.) in South America. *International Journal of Primatology*, 36(1), 18-32.



- Janmaat, K. R., R.W. Byrne & K. Zuberbühler. (2006). Primates take weather into account when searching for fruits. *Current Biology*, 16(12), 1232-1237.
- Jiménez-Valverde, A., A.T. Peterson, J. Soberón, J.M. Overton, P. Aragón & J.M. Lobo. (2011). Use of niche models in invasive species risk assessments. *Biological Invasions*, 13(12), 2785-2797.
- Kamilar, J. M., & Tecot, S. R. (2016). Anthropogenic and climatic effects on the distribution of *Eulemur* species: an ecological niche modeling approach. *International Journal of Primatology*, 37, 47-68.
- Kay, R. F., Madden, R. H., Van Schaik, C., & Higdon, D. (1997). Primate species richness is determined by plant productivity: implications for conservation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 94(24), 13023-13027.
- Leo-Luna, M. (1987). Primate Conservation in Peru: a case study of yellow-tailed monkey. *Primate Conserv*, 8, 122-123.
- Lozier, J.D., P. Aniello & M.J. Hickerson. (2009). Predicting the distribution of Sasquatch in western North America: anything goes with ecological niche modelling. *Journal of Biogeography*, 36(9), 1623-1627.
- Marcer, A., L. Sáez, R. Molowny-Horas, X. Pons & J. Pino. (2013). Using species distribution modelling to disentangle realised versus potential distributions for rare species conservation. *Biological conservation*, 166, 221-230.
- Méndez-Carvajal, P. G. (2005). Population Survey of the Azuero Howler Monkey (*Alouatta palliata trabeata*) in Herrera Province, Republic of Panama. *Neotropical Primates*, 13(3), 1-6.
- Méndez-Carvajal, P. G. (2012). Censo preliminar de primates en la Reserva Natural Chucantí, provincia de Darién, República de Panamá. *Mesoamericana*, 16(3), 22-29.
- Méndez-Carvajal, P. G. (2012a). Population Study of Coiba howler monkeys (*Alouatta coibensis coibensis*) and Coiba capuchin monkeys (*Cebus capucinus imitator*), Coiba Island National Park, Republic of Panama. *Journal of Primatology*, 1(2), 1-4.
- Méndez-Carvajal, P.G. (2013). Population size, distribution and conservation status of howler monkeys (*Alouatta coibensis trabeata*) and spider monkeys (*Ateles geoffroyi azuerensis*) on the Azuero Peninsula, Panama. *Primate Conservation*, 26(1), 3-15.



- Méndez-Carvajal, P., I. Ruiz-Bernard, Y. González, K. Sánchez, V. Franco, S. Silva & G. De León. (2013). Strategies for the conservation of two critically endangered, endemic primates in Panama. *Primate Conservation*, 2013(27), 13-21.
- Méndez-Carvajal, P. G. (2014). The Orion Camera System, a new method for deploying camera traps in tree canopy to study arboreal primates and other mammals: a case study in Panama. *Mesoamericana*, 18(1), 9-23.
- Méndez-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 dissertation), Durham University, Durham, UK.
- Méndez-Carvajal, P. G., I.G. de Huertas, K.M. Gutiérrez-Pineda, R.S. Moreno, M.A. Peñafiel, A. Girón-Rengifo, ... & P.A. González-Hernández. (2020). Potencial regenerativo de bosques de galería en base a diversidad y abundancia de mamíferos en la Reserva Forestal El Montuoso y afluentes del río La Villa, Herrera, Panamá. *Mesoamericana*, 24(1): 58-76.
- Méndez-Carvajal, P. G., A. Batista, O. Jaramillo, B. Rodríguez-Beitía & K.M. Gutiérrez-Pineda. (2021). Biodiversity assessment at the southeastern side of Darien National Park, Panama: Diversity of southwestern Darien. *Mesoamericana*, 25(1), 22-36.
- Méndez-Carvajal, P. G., González-Hernández, P. A., Hernández-Jaramillo, A., & Shanee, S. (2023). Field surveys and conservation status of the Panamanian owl monkey (*Aotus zonalis*). In Owl Monkeys: Biology, Adaptive Radiation, and Behavioral Ecology of the Only Nocturnal Primate in the Americas (pp. 601-622). Cham: Springer International Publishing.
- Méndez-Carvajal, P.G., Moreno, R., & Gutiérrez-Pineda, K. M. (2024). Diversidad de mamíferos en la Reserva Natural Privada Cerro Chucantí, Darién, Panamá. *Tecnociencia*, 26(1), 129-150.
- Milton, K., D.M. Windsor, D. W. Morrison & M.A. Estribi. (1984). Fruiting phenologies of two neotropical Ficus species. *Ecology*, 63(3), 752-762.
- Milton, K. & J. Giacalone. (2014). Differential effects of unusual climatic stress on capuchin (*Cebus capucinus*) and howler monkey (*Alouatta palliata*) populations on Barro Colorado Island, Panama. *American Journal of Primatology*, 76(3), 249-261.
- Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., Da Fonseca, G. A., & Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403(6772), 853-858.



- Norris, D., F. Rocha-Mendes, R. Marques, R. de Almeida Nobre & M. Galetti, (2011). Density and spatial distribution of buffy-tufted-ear marmosets (*Callithrix aurita*) in a continuous Atlantic forest. *International Journal of Primatology*, 32(4), 811-829.
- Ogutu, J.O., N. Bhola, H.P. Piepho & R. Reid. (2006). Efficiency of strip-and line-transect surveys of African savanna mammals. *Journal of Zoology*. 269(2), 149-160.
- Peck, M., J. Thorn, A. Mariscal, A. Baird, D. Tirira, & D. Kniveton. (2011). Focusing conservation efforts for the critically endangered brown-headed spider monkey (*Ateles fusciceps*) using remote sensing, modeling, and playback survey methods. *International Journal of Primatology*, 32(1), 134-148.
- Phillips, S.J., R.P. Anderson & R.E. Schapire. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological modelling*, 190(3), 231-259.
- Qu, Y., P.G. Ericson, Q. Quan, G. Song, R. Zhang, B. Gao & F. Lei. (2014). Long-term isolation and stability explain high genetic diversity in the Eastern Himalaya. *Molecular Ecology*. 23(3), 705-720.
- Rabinowitz, A. (2003). *Manual de Capacitación para la Investigación de Campo y la Conservación de la Vida Silvestre*. Wildlife Conservation Society, Bronx, New York. Pp. 310.
- Randin, C. F., M.B. Ashcroft, J. Bolliger, J. Cavender-Bares, N. C. Coops, S. Dullinger, ... & D. Payne. (2020). Monitoring biodiversity in the Anthropocene using remote sensing in species distribution models. *Remote sensing of environment*, 239, 111626.
- Riley, E. P., Loría, L. I., Radhakrishna, S., & Sengupta, A. (2023). Shared ecologies, shared futures: Using the ethnoprimateological approach to study human-primate interfaces and advance the sustainable coexistence of people and primates. In *Primates in Anthropogenic landscapes: Exploring primate behavioural flexibility across human contexts* (pp. 203-224). Cham: Springer International Publishing.
- Rodríguez-Vargas, A. R. (2003). Analysis of the hypothetical population structure of the squirrel monkey (*Saimiri oerstedii*) in Panamá. In *Primates in Fragments: Ecology and Conservation* (pp. 53-62). Boston, MA: Springer US.
- Ross, C. & N. Reeve. (2003). Survey and census methods: population distribution and density. *Field and laboratory methods in primatology*, pp.90-109.



- Rudran, R. (1996). Observational techniques for nonvolant mammals. In Wilson, D. E., Cole, F. R., Nichols, J. D., Rudran, R., & Foster, M. S. (Eds.). *Measuring and Monitoring Biological Diversity: Standard Method for Mammals*, pp. 81-104.
- Sarma, A. D., Molla, A. R. & G. Pandurangan. (2015). Distributed computation in dynamic networks via random walks. *Theoretical Computer Science*, 581, 45-66.
- Schwitzer, C., R.A. Mittermeier, S.E. Johnson, G. Donati, M. Irwin, H. Peacock, ... & P.C. Wright. (2014). Averting lemur extinctions amid Madagascar's political crisis. *Science*, 343(6173), 842-843.
- Sexton, J. P., P.J. McIntyre, A.L. Angert & K.J. Rice. (2009). Evolution and ecology of species range limits. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst*, 40, 415-436.
- Shanee, S., N. Allgas, N. Shanee & N. Campbell. (2015). Distribution, ecological niche modelling and conservation assessment Of the Peruvian night monkey (Mammalia: Primates: Aotidae: *Aotus miconax* Thomas, 1927) in northeastern Peru, with notes on the distributions of *Aotus* spp. Gray, 1870. *Journal of Threatened Taxa*, 7(3), 6947-6964.
- Smith, D. A. (2005). Garden game: shifting cultivation, indigenous hunting and wildlife ecology in western Panama. *Human Ecology*, 33, 505-537.
- Soberón, J. & T. Peterson. (2004). Biodiversity informatics: managing and applying primary biodiversity data. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 359(1444), 689-698.
- Svensson, M.S., R. Samudio, S.K. Bearder & K.A.I. Nekaris. (2010). Density estimates of Panamanian owl monkeys (*Aotus zonalis*) in three habitat types. *American Journal of Primatology*, 72, 187-192.
- Takemoto, K., S. Kanamaru & W. Feng. (2014). Climatic seasonality may affect ecological network structure: Food webs and mutualistic networks. *Biosystems*. 121, 29-37.
- Terborgh, J. (1986). The social systems of New World primates: an adaptationist view. *Primate ecology and conservation*, 199-211.
- Tosi, J.A. (1971). *Forest Environments in Tropical Life Zones: A Pilot Study*. Pergamon Press, Oxford.



- van Schaik, C. P. (1983). Why are diurnal primates living in groups?. *Behaviour*, 87(1-2), 120-144.
- Vidal-García, F. & J.C. Serio-Silva. (2011). Potential distribution of Mexican primates: modeling the ecological niche with the maximum entropy algorithm. *Primates*, 52(3), 261-270.
- Walck, J. L., J.M. Baskin & C.C. Baskin. (2001). Why is *Solidago shortii* narrowly endemic and *S. altissima* geographically widespread? A comprehensive comparative study of biological traits. *Journal of Biogeography*, 28(10), 1221-1237.
- Whitmore, T. C. (1998). Potential impact of climatic change on tropical rain forest seedlings and forest regeneration. *Potential Impacts of Climate Change on Tropical Forest Ecosystems*. 289-298.
- Willems, E.P. & R.A. Hill. (2009). A critical assessment of two species distribution models: a case study of the vervet monkey (*Cercopithecus aethiops*). *Journal of Biogeography*, 36(12), 2300-2312.
- Wittmann, M. E., M.A. Barnes, C.L. Jerde, L.A. Jones & D.M. Lodge. 2016. Confronting species distribution model predictions with species functional traits. *Ecology and Evolution*, 6(4), 873-879.
- Wright, S. J., H. Zeballos, I. Domínguez, M.M. Gallardo, M.C. Moreno & R. Ibáñez, R. 2000. Poachers alter mammal abundance, seed dispersal, and seed predation in a Neotropical Forest. *Conservation Biology*, 14(1), 227-239.





COMUNICACIÓN CORTA

PRIMER REPORTE DE ECTOPARÁSITOS DIGÉNEOS DE LA FAMILIA DIDYMOZOIDAE EN EL MERO *Epinephelus labriformis* (SERRANIDAE: EPINEPHELINAE) EN EL GOLFO DE PANAMÁ

FIRST REPORT OF DIGENEUS ECTOPARASITES OF THE FAMILY DIDYMOZOIDAE IN THE GROUPEP *Epinephelus labriformis* (SERRANIDAE: EPINEPHELINAE) IN THE GULF OF PANAMA

Luis Carlos Rodríguez

Universidad de Panamá, Panamá.

luiscarlos1426@gmail.com

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

Andrew J. Sellers

Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales, Panamá.

andrew.sellers@mail.mcgill.ca

<https://orcid.org/0000-0001-5799-4040>

Claudia Rengifo

Universidad de Panamá, Panamá

claudia.rengifo@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0003-0254-1815>

Fecha de recepción: 25 de enero de 2024

Fecha de aceptación: 10 de abril de 2024

DOI [HTTPS://DOI.ORG/10.48204/J.TECNO.V26N2.A5402](https://doi.org/10.48204/J.TECNO.V26N2.A5402)

RESUMEN

La familia de trematodos Didymozoidae parasita a una gran cantidad de peces marinos, entre ellos a los serránidos. En Panamá, el mero *Epinephelus labriformis* es un pez de importancia comercial, siendo escasa la información que se tiene sobre parásitos asociados a este. Como parte de un proyecto que busca conocer la parasitofauna en algunos meros del Pacífico panameño, el presente estudio muestra parte de información generada sobre este tema. Se colectaron y procesaron 83 peces de la especie *E. labriformis*, provenientes del archipiélago de Las Perlas, Golfo de Panamá; de los cuales 14 presentaron formas parasitarias identificadas morfológicamente dentro de la familia Didymozoidae. Estos resultados nos permiten reportar por primera vez la presencia de estos trematodos en este pez en aguas panameñas.



PALABRAS CLAVES

Digéneos, ectoparásitos, meros, serránidos.

ABSTRACT

The Didymozoidae trematode family parasitizes a diverse range of marine fishes, including serranids. In Panama, the grouper *Epinephelus labriformis* holds commercial significance, and there is limited information available regarding parasites associated with this species. As part of a project aimed at understanding the parasitofauna in certain groupers from the Panamanian Pacific, this study presents partial information on the subject. A total of 83 specimens of *E. labriformis* were collected and processed from the Las Perlas archipelago in the Gulf of Panama, of which 14 exhibited morphologically identified parasitic forms within the Didymozoidae family. These results allow us to report, for the first time, the presence of these trematodes in this fish species in Panamanian waters.

KEY WORDS

Digeneans, ectoparasites, grouper fish, serranids.

INTRODUCCIÓN

Los digéneos pertenecientes a la familia Didymozoidae son un grupo de trematodos que parasitan peces marinos, principalmente a los scombridos; aunque se han reportado también en especies de las familias Sphyraenidae, Serranidae y Platycephalidae (Anderson & Cribb, 1994; Cruz-Lacierda et al., 2001; Lozano-Cobo et al., 2022). Estos trematodos suelen infectar varias partes anatómicas de los peces, como son las agallas, donde se han descrito en forma de capsulas, con el macho y la hembra dentro (Lester, 1980; Cruz-Lacierda et al., 2001; Bárcenas-de los Santos, et al., 2021; Lozano-Cobo et al., 2022). También se ha reportado su capacidad de causar lesiones considerables en el hospedero, lo que incide negativamente en la salud del pez (Polinas et al., 2018; Chong, 2022).

Los serránidos son una de las familias de peces más diversas y de gran importancia comercial a nivel global. Por ello, se han realizado muchos estudios sobre su fauna parasitaria (De Benedetto et al., 2021). Entre los diversos géneros de esta familia, destaca el género *Epinephelus* el cual ha sido ampliamente estudiado por ser un valioso recurso comercial (Cribb et al., 2002; Justine, 2010; Polinas et al., 2018; De Benedetto et al., 2021; Hussein et al., 2021). En Panamá, el mero *Epinephelus labriformis* está incluido en la lista de peces de importancia comercial (ARAP, 2011). Sin embargo, pese a tener importantes atributos comerciales, es poca la información disponible sobre la fauna parasitaria asociada a éste. En este sentido, la presente nota, tiene como finalidad reportar por primera vez la presencia de trematodos de la familia Didymozoidae en *E. labriformis* del archipiélago de Las Perlas, Golfo de Panamá.

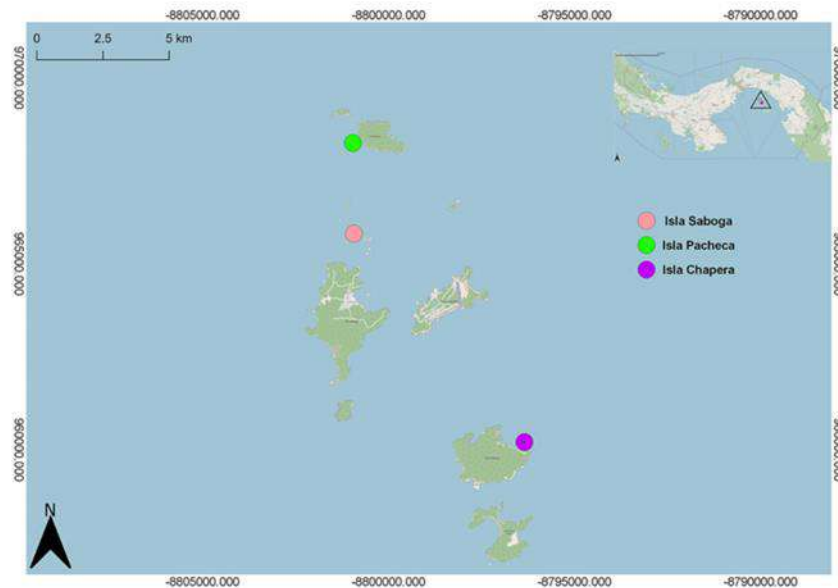


MATERIALES Y MÉTODOS

Se capturaron 83 individuos de *E. labriformis*, como parte de un estudio más amplio enfocado en evaluar el efecto del afloramiento en la abundancia y prevalencia de parásitos en peces serránidos del Pacífico panameño. Los peces fueron colectados alrededor de las islas Chapera, Pacheca y Saboga, en el archipiélago de Las Perlas (fig.1).

Figura 1.

Sitios de colecta de E. labriformis en el archipiélago de Las Perlas, Golfo de Panamá. Imagen creada con el programa QGis ver.3.28.3.



PROCESAMIENTO DE PECES Y COLECCIÓN DE PARÁSITOS

Para el procesamiento de los peces, se utilizaron las técnicas estándar descritas por Klimpel et al., (2019), para la toma de datos morfométricos, disecciones de los peces y la posterior revisión y fijación de los parásitos encontrados. Se revisaron todas las partes externas de los individuos, así como las agallas; las cuales fueron removidas y colocadas al estereoscopio para su observación detallada. Las formas parasitarias encontradas fueron preservadas en solución de formalina al 10% + agua de mar y etanol al 70% para la evaluación morfológica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De los 83 peces evaluados, 14 presentaron formas parasitarias, reportando un total de 18 parásitos pertenecientes a la familia Didymozoidae; todos ubicados en las agallas (fig. 2).



Los trematodos presentes tenían forma de saco o capsula, considerando en este caso, que su contenido podría ser las formas de macho y hembra característico de este grupo de parásitos (Lester, 1980; Cruz-Lacierda et al., 2001). Dichas cápsulas presentaron dos variaciones: el morfotipo A, el cual mostró una coloración amarillenta clara con pigmentos alrededor del saco y una pequeña protuberancia saliente del mismo. El morfotipo B fue el que mayormente se observó en los peces, caracterizándose por tener forma ovalada de color naranja (fig. 3), lo que sugiere que podría tratarse de distintas especies de la misma familia.

Figura 2.

Cápsula de trematodos de la familia Didymozoidae encontrados en agallas de E. labriformis

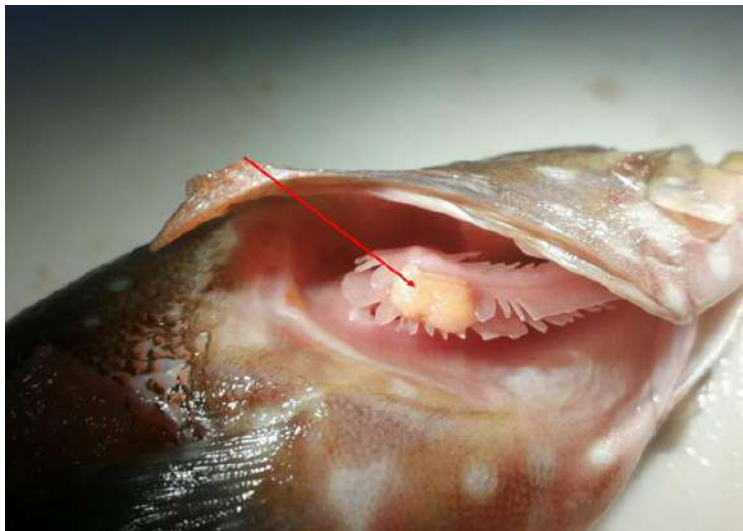


Figura 3.

Variación en la morfología de las cápsulas en los didymozoidos encontrados en agallas de E. labriformis.



La presencia de parásitos pertenecientes a la familia Didymozoidae en el género *Epinephelus*, ha sido reportado globalmente, reconociéndose la existencia de una gran cantidad de especies capaces de infectar a estos peces. Trabajos como los Abdul-Salam et al. (1990), reportan a estos trematodos en el Golfo Árabe y Tudkaew et al. (2008) en Tailandia. Por su parte, Cribb et al. (2002) realizaron una extensa revisión de las familias de parásitos que infectan a los meros de la subfamilia Epinephelinae. Otros trabajos, como los de Justine (2010) y Justine et al. (2010), presentaron una revisión sobre la fauna parasitaria encontrada en los peces de Nueva Caledonia, mostrando algunos didymozoidos sin identificar en varias especies de *Epinephelus*. Por otro lado, se han encontrado algunos trabajos centrados en estudiar la histopatología y ecología de estos parásitos en *Epinephelus* (Cruz-Lacierda et al., 2001; Lyaghat et al., 2011; Polinas et al., 2018; De Benedetto et al., 2021). El reporte de esta familia de trematodos en peces de aguas panameñas brinda importantes aportes al conocimiento sobre la parasitofauna presente en este pez de importancia comercial tanto a nivel local como regional.

Basados en una exhaustiva revisión bibliográfica, podemos afirmar que esta nota corresponde al primer reporte de trematodos de la familia Didymozoidae en *E. labrifomis* en Panamá; aportando así nueva información sobre la parasitofauna de este mero, la cual a nivel global es muy escasa.

AGRADECIMIENTOS

Al equipo del Torchin Lab. en el Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales, por todo el apoyo brindado a lo largo del proyecto. A Natasha Hinojosa y Javiera Mora por su gran ayuda en la colecta de los peces. A Senaida Tenorio y Juan Carrera por su colaboración en la revisión parasitológica y al Dr. Anindo Choudhury por toda la ayuda y asesoramiento brindado durante el entrenamiento en parásitos acuáticos. El Lic. Luis Carlos Rodríguez es becario del Programa de Maestrías financiada por la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT). La Dra. Claudia Rengifo es financiada por el Sistema Nacional de Investigación (SNI-SENACYT).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdul-Salam, J. et al. (1990) "Gonapodasmius epinepheli n. sp. (Didymozoidae) from the grouper *Epinephelus tauvina* from the Arabian Gulf", *Systematic parasitology*, 17(2), pp. 67–74. <https://doi.org/10.1007/BF00009792>
- Anderson, G. R. & Cribb, T. H. (1994) "Five new didymozoid trematodes (Platyhelminthes, Digenea) from Australian platycephalid fishes", *Zoologica scripta*, 23(2), pp. 83–93. <https://doi.org/10.1111/j.1463-6409.1994.tb00377.x>.



- ARAP. (2011). Guía para la Identificación de Peces de Interés Comercial para el Pacífico de Panamá. Dirección de Investigación y Desarrollo. Documento Técnico de Pesca. Ciudad de Panamá, Panamá. 98 pp.
- Bárceñas de los Santos, N. Y. *et al.* (2021) “Helminth fauna of *Scomberomorus sierra* (Actinopterygii: Scombridae) in southeastern Gulf of California, Mexico”, *Helminthologia*, 58(4), pp. 403–407. <https://doi.org/10.2478/helm-2021-0035>.
- Chong, R. S.-M. (2022) “Digenetic trematode infections”, in *Aquaculture Pathophysiology*. Elsevier, pp. 569–590.
- Cribb, T. H. *et al.* (2002) “The trematodes of groupers (Serranidae: Epinephelinae): knowledge, nature and evolution”, *Parasitology*, 124(7), pp. 23–42. <https://doi.org/10.1017/s0031182002001671>.
- Cruz-Lacierda, E. R. *et al.* (2001) “Occurrence and histopathogenesis of a didymozoid trematode (*Gonapodasmius epinepheli*) in pond-reared orange-spotted grouper, *Epinephelus coioides*”, *Aquaculture (Amsterdam, Netherlands)*, 201(3–4), pp. 211–217. [https://doi.org/10.1016/s0044-8486\(01\)00668-8](https://doi.org/10.1016/s0044-8486(01)00668-8).
- De Benedetto, G. *et al.* (2021) “Parasite fauna of the dusky grouper (*Epinephelus marginatus*, Lowe 1834) from the central Mediterranean Sea”, *Animals: an open access journal from MDPI*, 11(9), p. 2523. <https://doi.org/10.3390/ani11092523>.
- Hussein, N. *et al.* (2021) “First record of *Merlucciotrema praeclarum* from *Caesio lunaris* (Perciformes: Caesionidae) and *Cyatholecithochirium* sp. from *Epinephelus tauvina* (Perciformes: Serranidae) from the Red Sea in Egypt”, *SVU- International Journal of Veterinary Sciences*, 4(4), pp. 43–55. <https://doi.org/10.21608/svu.2021.89827.1138>.
- Justine, J. L. (2010) “Parasites of coral reef fish: how much do we know? With a bibliography of fish parasites in New Caledonia”, *Belgian journal of zoology*, 140, pp. 155–190.
- Justine, J.-L. *et al.* (2010) “An annotated list of parasites (Isopoda, Copepoda, Monogenea, Digenea, Cestoda and Nematoda) collected in groupers (Serranidae, Epinephelinae) in New Caledonia emphasizes parasite biodiversity in coral reef fish”, *Folia parasitologica*, 57(4), pp. 237–262. <https://doi.org/10.14411/fp.2010.032>.
- Klimpel, S. *et al.* (2019) *Parasites of marine fish and cephalopods: A practical guide*. Springer International Publishing.



- Lester, R. J. G. (1980) “Host-parasite relations in some didymozoid trematodes”, *The journal of parasitology*, 66(3), p. 527. <https://doi.org/10.2307/3280759>.
- Lozano-Cobo, H. *et al.* (2022) “Finding a needle in a haystack: larval stages of Didymozoidae (Trematoda: Digenea) parasitizing marine zooplankton”, *Parasitology research*, 121(9), pp. 2661–2672. <https://doi.org/10.1007/s00436-022-07593-6>.
- Lyaghat, M. *et al.* (2011) “Identification and Histopathological Study of Trematode, *Gonapodasmius epinepheli* in Orange Spotted Grouper, *Epinephelus coioides* (First report from Persian Gulf, Iran)”, *Journal of Advanced Veterinary Research*, 1(2), pp. 47–51.
- Polinas, M. *et al.* (2018) “Ecological and histopathological aspects of *Didymodictinus* sp. (Trematoda: Didymozoidae) parasite of the dusky grouper, *Epinephelus marginatus* (Osteichthyes: Serranidae), from the western Mediterranean Sea”, *Journal of fish diseases*, 41(9), pp. 1385–1393. <https://doi.org/10.1111/jfd.12836>.
- Tudkaew, J. *et al.* (2008) *Gonapodasmius epinepheli* observed in cage cultured orange spotted grouper (*Epinephelus coioides*) in Southern Thailand: geographical distribution of parasite and host response, *Thaiscience.info*. Disponible en: <https://www.thaiscience.info/Journals/Article/SONG/10617704.pdf>





SHORT COMMUNICATION

THE *ONCILLA LEOPARDUS TIGRINUS ONCILLA* (SCHREBER, 1775): REPORTING ITS OCCURRENCE AT CHUCANTÍ PRIVATE NATURAL RESERVE, DARIEN, PANAMA

LA *ONCILLA LEOPARDUS TIGRINUS ONCILLA* (SCHREBER, 1775): REPORTANDO SU PRESENCIA EN LA RESERVA NATURAL PRIVADA CHUCANTÍ, DARIEN, PANAMÁ

Pedro Méndez-Carvajal

Universidad de Panamá, Departamento de Fisiología y Comportamiento Animal, Panamá.

mendez55.pm@gmail.com

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

Karol Gutiérrez-Pineda

Universidad de Panamá, Departamento de Fisiología y Comportamiento Animal, Panamá.

gutierrezpinedakm@gmail.com

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

Fecha de recepción: 28 de junio de 2023

Fecha de aceptación: 10 de abril de 2024

DOI [HTTPS://DOI.ORG/10.48204/J.TECNO.V26N2.A5404](https://doi.org/10.48204/J.TECNO.V26N2.A5404)

ABSTRACT

This study reports the occurrence of *Leopardus tigrinus oncilla* from eastern Panama. This is only the third such report of its presence across Panama, which expands the known distribution of this species to nearly the entire country. The presence of *L. t. oncilla* in Chucantí Private Natural Reserve confirms the importance of the Darien cloud forest for the conservation of this elusive felid.

KEYWORDS

Mammals, Cloud forest, Northern tiger cat, Darien, Panama, Central America

RESUMEN

Este estudio reporta la ocurrencia de *Leopardus tigrinus oncilla* en el este de Panamá. Este es el tercer informe de su presencia en Panamá, lo que amplía la distribución conocida de esta especie a casi todo el país. La presencia de *L. t. oncilla* en la Reserva Natural Privada Chucantí confirma la importancia del bosque nuboso del Darién para la conservación de este evasivo felino.



PALABRAS CLAVES

Mamíferos, Bosque nuboso, Gato tigre del norte, Darién, Panamá, América Central

INTRODUCTION

The oncilla also called “northern tiger cat” (*Leopardus tigrinus oncilla*) is a little known and poorly studied felid subspecies from Central America, only reported on two sites in Panama (de Oliveira *et al.*, 2020; Meyer *et al.*, 2015; Rodgers & Kapheim, 2017). It is currently considered Vulnerable (VU) according to the latest IUCN Red List assessment (Payan & Oliveira, 2016; Pineda-Guerrero, 2018). This felid used to be considered a single unique subspecies until genetic studies split them between *L. t. oncilla* (Northern tiger cat) and *L. gutulus* (Southern tiger cat) (O’Brien & Koepfli, 2013; Payan & Oliveira, 2016). This northern subspecies has been reported from Costa Rica (3,625 m a.s.l.), Panama (3,475 m a.s.l.), and Colombia (4,800 m a.s.l.), confirming a preference for cloud forest (de Oliveira *et al.*, 2008; Pineda-Guerrero, 2018; Rodgers & Kapheim, 2017; Rogan, 2021). In Panama, it has been genetically detected via scat from Chiriqui highlands, Barú Volcano National Park (Rodgers & Kapheim, 2017), and via camera traps studies from Darien National Park (Meyer *et al.*, 2015). Despite several biodiversity studies throughout the country, including the Panama Canal Watershed (Méndez-Carvajal, 2012), Cerro Hoya National Park (Fort *et al.*, 2014), El Montuoso Forest Reserve (Méndez-Carvajal *et al.*, 2020), Central Panama (Meyer *et al.*, 2015), and southeastern Darien (Méndez-Carvajal *et al.*, 2021), where the oncilla have not been detected. Although it has been difficult to assess *L. t. oncilla* due to its cryptic behaviour, some population densities have been published, encouraging additional studies to better understand the species’ conservation status, distribution, and threats (de Oliveira *et al.*, 2020). In this study, we evaluate the presence of *L. t. oncilla* in Darien-Panama at the Chucantí Private Natural Reserve (CPNR), considered a hotspot for endemism and diversity.

METHODS

Study area

The Chucantí Private Nature Reserve (CPNR; N 08°47’16”, W 078°27’01”) is located in the Darién province, Republic of Panama (Laurance, 2008). The average temperature falls between 24.0-27.2 °C, with approximately 1,940.5 mm of precipitation annually (Gutiérrez-Pineda *et al.*, 2021). The site is a mixture of montane and submontane forest (Méndez-

Carvajal, 2012). It has a high degree of plant diversity and endemism, largely dominated by the families Rosaceae, Magnoliaceae, Gentianaceae and Fabaceae (Ortiz *et al.*, 2016; Flores *et al.*, 2017; Mijango-Ramos *et al.*, 2020) (Fig. 1). This study was carried out under scientific permission No. SE/A-53-18 and ARB-0028-2021.

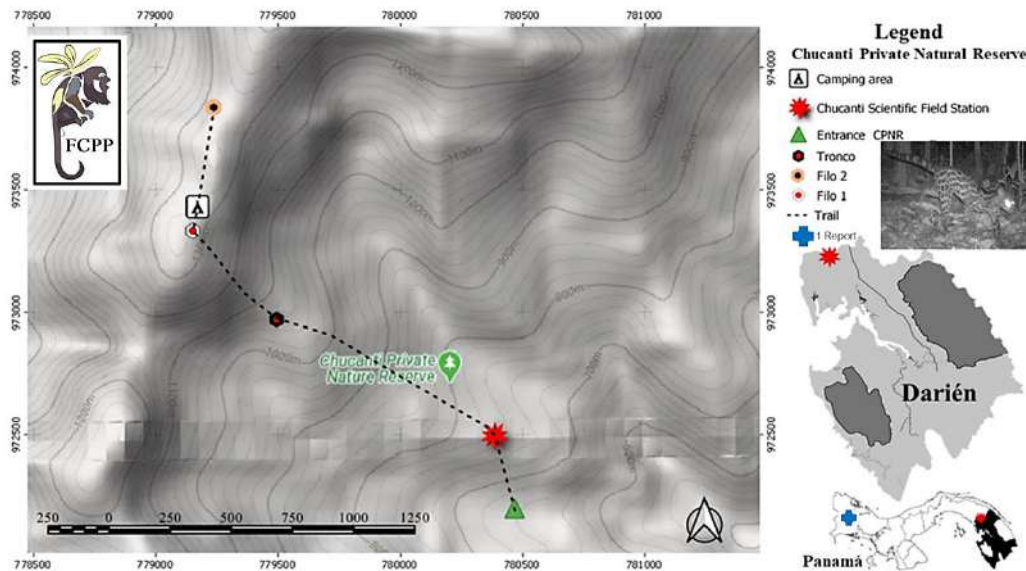


Data collection for terrestrial mammals

Data were generated by a long-term monitoring project that utilized three camera traps (Cuddeback and Bushnell Trophy Cam models) at the ground-level of the forest, which operated from December 2012 to May 2014 (Méndez-Carvajal in prep.). Camera traps were positioned along the first two kilometers of the trail on the left-hand side. The cameras were located as follows: station 1 "Tronco" (800 m.a.s.l; N 08°47'36.69" W 78°27'33"), station 2 "Filo 1" and station 3 "Filo 2" (1,375 m.a.s.l; N 08°48' 05.01" or W 78°27'42.038"). The cameras were spaced 1 km apart along the 3 km trail (Gutiérrez-Pineda *et al.*, 2021) (Figure. 1).

Figure 1.

Map of the study area and location of Chucantí Private Nature Reserve, Agua Fria, Chepigana, Darién province, Republic of Panama.



Data analysis

We calculated the frequency of detection of the number of species per month. Having acquired more than 11 photographic events with intervals ≥ 30 min apart, we were able to generate circadian activity graphs (Mosquera-Muñoz, 2014). All statistics were analyzed using PAlentological STatistics software (PAST 4.02).

RESULTS

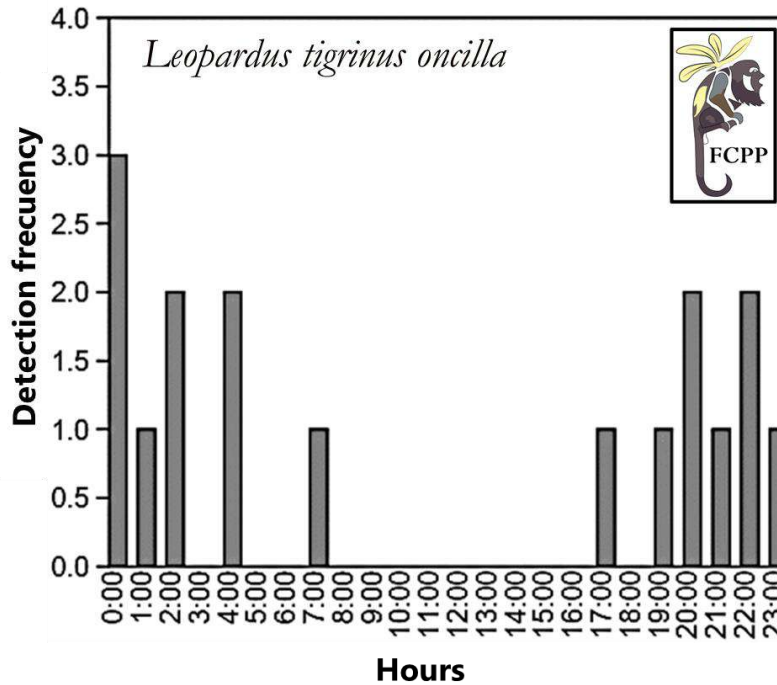
We detected *Leopardus tigrinus oncilla* between 19 terrestrial mammal species across 38, 592 trapnight/hours. Particularly, *L. t. oncilla* appeared at the three sites sampled (Tronco,



Filo1 and Filo 2) from 800 to 1,375 m.a.s.l. in the cloud forest. *L. t. oncilla* appeared to be mostly active between 17:00 to 04:00, confirming a marked nocturnal activity (Table 1).

Figure 2.

Circadian activity of L. t. oncilla at Chucanti Private Natural Reserve, Agua Fría, Chepigana, Darien, Republic of Panama.



Identification of *L. t. oncilla* was based on tail position, orbital distance between eyes, small body size compared at the same position using a natural reference for different felines photographed at the same station, frontal extension between ears and eyes are short (Figure 3). IDs were confirmed by Tadeu de Oliveira, a specialist on this taxon.



Figure 3.

Photo-capture of L. t. oncilla at Chucanti Private Natural Reserve, Darien province, Panama.



DISCUSSION

This study reports the eastern-most distribution for *L. t. oncilla* in Panama. This species may have been missed on previous mammal diversity studies, possibly due to short study periods and reduced effort within the central provinces of Panama, as noted by Fort *et al.* (2014). Updating biogeographical information helps improve distribution knowledge and identify potential conservation areas as priorities (Loyola *et al.*, 2008; Méndez-Carvajal *et al.*, 2021). Our results showed that *L. t. oncilla* is sympatric with five other wild feline species as *Panthera onca*, *Puma concolor*, *Leopardus pardalis*, *Leopardus wiedii*, and *Herpailurus yagouaroundi* in Chucanti, making this area a unique zone in Panama. Furthermore, due to this high felid sympatry, this is one of the few areas in *L. t. oncilla*'s entire distribution where such an interspecific ecological niche study could be undertaken. Chucanti Private Natural Reserve is an ideal place to examine ecological problems related to the co-existence of species with similar morphological adaptations and diet (Tokeshi, 2009). The number of prey species at Chucanti are well defined for big cats such as *Panthera onca* and *Puma concolor*, which also made few appearances on our camera traps over two consecutive years. In fact, these large cats were captured less than their regular prey, including *Cuniculus paca*, *Mazama temama*, *Odocoileus virginianus*, *Pecari tajacu*, and *Crax rubra*, as reported in Darien by Arosemena (2017) and Moreno (2006).



Interestingly, *L. t. oncilla* may maintain a different activity pattern compared to sympatric margay (*L. wiedii*) and ocelots (*L. pardalis*). According to the principle of intraguild predation proposed in Polis *et al.* (1989), the felids of Chucanti could be segregating themselves by habitat, where small felids are expected to have smaller ranges and large cats increase their habitat range, as reported for de Oliveira & Pereira (2014). It is important to note that there are reports of social predators such as coyotes (*Canis latrans*) near Chucanti (Bermúdez *et al.*, 2012), though we did not detect this species within the main reserve possibly due to the presence of a *P. onca* and *P. concolor*. Social predators, such as coyotes, tend to put more pressure on small mammals in habitats where they dominate, impacting mammal diversity. The *L. t. oncilla* are considered victims of intraguild predators, and for areas fragmented or with human presence, pressures may increase if hunting dogs, and feral cats are nearby. In Chucanti, hunting dogs were detected on the same trails, while there has also been evidence of domestic cats infected with *Rickettsia felis* around the scientific station, which could lead to zoonotic disease transmission and threaten wildlife populations (Bermúdez *et al.*, 2012; Vieira *et al.*, 2018).

CONCLUSION

This study confirmed the presence of one of the least known Neotropical felid species in eastern Panama. The presence of *L. t. oncilla* in the area between Chiriquí to Darien, supports the potential for this species having a broader distribution in Panama. This study also supports Chucanti Private Natural Reserve as an important site to study the effects of sympatric felines on mammal populations as it is the only known habitat in Panama with six feline species. Although previously reported from other habitats, both hunting pressure and the presence of domestic canids and felines can cause threaten population stability. Finally, our study reinforces the importance of long-term biodiversity monitoring for expanding our understanding of cryptic and elusive species with low densities across landscapes.

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank the Fundación Pro-Conservación de los Primates Panameños (FCPP), Primatology Research Group of the University of Panama (GIP-UP), Yaguará Panamá S.A., ADOPTA Bosque Panamá for supporting this study at a logistical level. This long-term study was funded by Idea Wild, Mohamed bin-Zayed Species Conservation Fund (project # 1025476 and 12055182); II Rufford Small Grant for Nature Conservation (project #16021) and Re:wild (2023). Our thanks to the students of the different primatology courses carried out by FCPP-GIP-UP, who kept the monitoring project year after year in the reserve to the present. To the park rangers of the reserve Juan Camaño, Arcelio Castillo. Special thanks to Tadeu de Oliveira, wildcat specialist from Maranhão State University (UEMA), Brazil and member of the IUCN Red List of Threatened Species, who kindly helped to confirm the ID of some of the *L.t.oncilla* pictures. We thank Timothy M. Eppley, for English edition and review on previous version of this manuscript as well editors from Tecnociencia. We thank Ricardo Moreno and Guido Berguido as collaborators in this project.



BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

- Arosemena, M. (2017). El uso de trampas cámaras como herramienta de evaluación y conservación de mamíferos silvestres. *Visión Antataura*. 1(2): 89-90.
- Flores, R., C. Black, C. & A. Ibáñez (2017). A new species of Heliconia (Heliconiaceae) with pendent inflorescence, from Chucantí Private Nature Reserve, eastern Panama. *PhytoKeys*. (77): 21.
- Fort, J. L., C.K. Nielsen, E.R. I.C., Donoso, R. Samudio & G. A. Durán (2014). First camera survey of wild felids in Cerro Hoya National Park, Panama. *Cat News*. 60: 36-37.
- Gutiérrez-Pineda, K. M., G. Berguido & P.G. Méndez-Carvajal (2021). Diversidad ecológica de aves caminadoras en la Reserva Natural Privada Cerro Chucantí, Darién, Panamá. *Mesoamericana*. 25(1): 1-14.
- de Oliveira, T.G., J. Schipper & J.F. Gonzalez-Maya (2008). *Leopardus tigrinus* ssp. *oncilla*. In: IUCN 2009. *IUCN Red List of Threatened Species*. Version 2009.2. <www.iucnredlist.org>. Downloaded on 09 January 2010.
- de Oliveira, T.G. & J.A. Pereira (2014). Intraguild predation and interspecific killing as structuring forces of carnivoran communities in South America. *Journal of Mammalian Evolution*. 21: 427-436.
- de Oliveira, T.G., B.C. Lima, L. Fox-Rosales, R.S. Pereira, E. Pontes-Araujo & A.L. de Sousa (2020). A refined population and conservation assessment of the elusive and endangered northern tiger cat (*Leopardus tigrinus*) in its key worldwide conservation area in Brazil. *Global Ecology and Conservation*. 22: e00927.
- Bermúdez, S., R. Miranda, Y. Zaldívar, P. González, G. Berguido, D. Trejos, ... & M. Labruna (2012). Detección de *Rickettsia* spp. en ectoparásitos de animales domésticos y silvestres de la Reserva Natural Privada Cerro Chucantí y comunidades aledañas, Panamá, 2007-2010. *Biomédica*. 32(2): 189-195.
- Rodgers, T. W. & K.M. Kapheim (2017). A High-Elevation Record of the Little Spotted Cat (*Leopardus tigrinus oncilla*) from Western Panama. *The Southwestern Naturalist*. 62(3): 225-227.
- Rogan, J. E. (2021). First Locality Record of Melanistic *Oncilla* (*Leopardus tigrinus*) in Monteverde, Costa Rica. *Neotropical Biology and Conservation*. 16(3): 427-434.

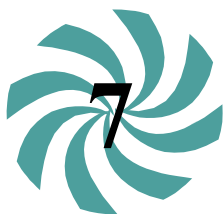


- Laurance, W. F. (2008) Adopt a forest. *Biotropica*. 40(1): 3-6.
- Loyola, R. D., G. de Oliveira, J.A.F. Diniz-Filho & T.M. Lewinsohn (2008). Conservation of Neotropical carnivores under different prioritization scenarios: mapping species traits to minimize conservation conflicts. *Diversity and Distributions*. 14(6): 949-960.
- Méndez-Carvajal, P.G. (2012). Censo preliminar de primates en la Reserva Natural Chucantí, provincia de Darién, República de Panamá. *Mesoamericana*. 16(3): 22-29.
- Méndez-Carvajal, P. G., I.G. de Huertas, K.M. Gutiérrez-Pineda, R.S. Moreno, M.A. Peñafiel, A.S. Girón-Rengifo... & P.A. González-Hernández (2020). Potencial regenerativo de bosques de galería en base a diversidad y abundancia de mamíferos en la Reserva Forestal El Montuoso y afluentes del río La Villa, Herrera, Panamá. *Mesoamericana*. 24(1): 58-76.
- Méndez-Carvajal, P. G., A. Batista, O. Jaramillo, B. Rodríguez-Beitía & K.M. Gutiérrez-Pineda (2021). Biodiversity assessment at the southeastern side of Darien National Park, Panama: Diversity of southwestern Darien. *Mesoamericana*. 25(1): 22-36.
- Meyer, N. F., H.J. Esser, R. Moreno, F. van Langevelde, Y. Liefting, D.R. Oller, ... & P.A. Jansen (2015). An assessment of the terrestrial mammal communities in forests of Central Panama, using camera-trap surveys. *Journal for Nature Conservation*. 26: 28-35.
- Mijango-Ramos, Z., M.S. de Stapf, C. Vergara & J. Mendieta (2020). Diversidad de Árboles y Arbustos en la Reserva Privada Cerro Chucantí en Darién, Panamá. *Tecnociencia*. 22(1): 17-36.
- Moreno, R. (2006). Parámetros poblacionales y aspectos ecológicos de los felinos y sus presas en Cana, Parque Nacional Darien, Panamá. Tesis de Maestría. Instituto Internacional en Conservación y manejo de Vida Silvestre, Heredia, Costa Rica. 136 pp.
- Mosquera-Muñoz, D. M., G. Corredor, P. Cardona & I. Armbrrecht (2014). Fototrampeo de aves caminadoras y mamíferos asociados en el piedemonte de Farallones de Cali. *Bol. Cient. Mus. Hist. Nat. U. de Caldas*. 18 (2): 144-156.
- O'Brien, S. J. & K.P. Koepfli (2013). Evolution: a new cat species emerges. *Current Biology*. 23(24): R1103-R1105.



- Ortiz, O. O., R.M. Baldini, G. Berguido & T.B. Croat (2016). New species of *Anthurium* (Araceae) from Chucantí nature reserve, eastern Panama. *Phytotaxa*. 255(1): 47-56.
- Payan, E. & T.G. de Oliveira (2016). *Leopardus tigrinus*. The IUCN Red List of Threatened Species 2016: e.T54012637A50653881. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2016-2.RLTS.T54012637A50653881.en>. Accessed on 10 April 2023.
- Pineda-Guerrero, A. (2018). Nuevo registro de *Leopardus tigrinus* (Carnivora: Felidae) en la Reserva Forestal Protectora Bosque Oriental de Bogotá, Colombia. *Mammalogy Notes*. 5(1-2): 15-17.
- Polis, G.A, C.A. Myers, R.D. Holt. (1989). The ecology and evolution of intraguild predation: Potential competitors that eat each other. *Annu. Rev Ecol Systemat*. 20:297-330.
- Tokeshi, M. (2009). Species coexistence: ecological and evolutionary perspectives. John Wiley & Sons.
- Vieira, F. E. G., D.L.F. Caetano, F.R. Barbosa, G.S. de Oliveira, J.N.K. de Souza-Serafim, J. N. K. & J.P. Sasse. (2018). Parasitismo gastrointestinal em *Leopardus trigrinus* (Schreber, 1775) (Carnivora; Felidae) e carnívoros domésticos no norte do estado do Paraná, Brasil. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*. 1(2): 373-385.





SIMPLE AND LOW-COST SYNTHESIS OF $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ CATHODE MATERIALS BY MECHANICAL ACTIVATION USING A Fe^{3+} PRECURSOR

SÍNTESIS SIMPLE Y DE BAJO COSTO DE MATERIALES DE CÁTODOS DE $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ MEDIANTE ACTIVACIÓN MECÁNICA UTILIZANDO UN PRECURSOR DE Fe^{3+}

Juan Antonio Jaén

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

juan.jaen@up.ac.pa

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

Ian Mendoza

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

ian.mendoza5.im@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0007-0958-5470>

Eduardo Chung

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

eduardo.chungng@up.ac.pa

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

Fecha de recepción: 7 de marzo de 2024

Fecha de aceptación: 25 de abril de 2024

DOI [HTTPS://DOI.ORG/10.48204/J.TECNO.V26N2.A5405](https://doi.org/10.48204/J.TECNO.V26N2.A5405)

ABSTRACT

An easy and low-cost synthesis of monoclinic $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ based on a carbothermal process and a short-time preliminary milling of a reactant mixture in a planetary mill was investigated. Monoclinic $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ is prepared using Fe^{3+} (Fe_2O_3) as a precursor. For this purpose, commercial hematite and one obtained through a green route were used. This material is studied and compared with $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ obtained using Fe^{2+} ($\text{FeC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) as a precursor. In all cases, citric acid was used as a reducing agent and as an *in situ* conductive additive. Mössbauer spectroscopy was used as the central technique in this study.

KEYWORDS

Königsberg bridges, graphic schema theory, mathematical education



RESUMEN

Se investigó la síntesis del $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ monoclínico mediante un proceso carbotérmico posterior a una molienda preliminar de corta duración de la mezcla de los reactantes, en un molino planetario, como una forma fácil y de bajo costo para obtenerlo. El $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ monoclínico se preparó usando Fe^{3+} (Fe_2O_3) como precursor. Para esto, se utilizó una hematita comercial y una obtenida mediante una ruta verde. Se examinaron y se compararon con $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ obtenido usando Fe^{2+} ($\text{FeC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) como precursor. En todos los casos se utilizó ácido cítrico como agente reductor *in situ* y como un aditivo conductor. Se usó espectroscopía Mössbauer como técnica central en este estudio.

PALABRAS CLAVES

Puentes de Königsberg, teoría de grafos, Educación Matemática

INTRODUCTION

$\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ has been considered an attractive cathode material for rechargeable lithium batteries since it possesses high theoretical capacity (approximately $331 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$), good thermal stability and cycling performance, nontoxicity, environmental friendliness, and is of low cost (Nytén et al., 2005; Guirish & Shao, 2015; Fujita et al., 2018). Many synthesis procedures have been proposed and used, such as the solid-state method, sol-gel technique, hydrothermal/solvothermal/supercritical fluid techniques, microwave method, spray pyrolysis/combustion/hydro-chemical techniques, polyol process and ionothermal techniques (Guirish & Shao, 2015; Ferrari et al., 2014). The mechanical activation reaction method is appropriate for large-scale production, but the impurities such as iron oxides, metallic iron, and lithium silicates, the larger particle size of the final product, and agglomerations could not be easily avoided. This has negative effects on the electrochemical performances of the products. The carbothermal reduction method is an efficient synthetic method to obtain metal or low-valent metallic oxide, and it has been applied to the synthesis of LiFePO_4/C and $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$.

Most of the recent synthesis procedures are designed to optimize the intrinsic and extrinsic properties of $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ by applying grain size reduction, morphology control, doping with some transition metal cations in Fe and Si sites, and conductive carbon coating, among others (Yi et al., 2017). Unfortunately, there remain difficulties in synthesizing a single-phase material. The potential and the low-cost advantage are not realized if expensive Fe^{2+} precursor compounds are used as the starting materials in the synthesis procedures. There are, however, some examples where $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ cathode material is successfully synthesized from Fe_2O_3 (Table 1).

In the present study, an easy and low-cost synthesis of $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ was investigated using a Fe^{3+} precursor based on short-time preliminary milling of a reactant mixture in a planetary mill followed by calcination.



EXPERIMENTAL METHODS

Synthesis

$\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ was synthesized by ball milling-assisted solid-state reaction using $\text{FeC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (iron II oxalate), 500 mesh commercial Fe_2O_3 (hematite), and synthesized hematite by a green route.

- **Using Iron II oxalate as a precursor**

Dehydrated Iron II oxalate (Aldrich Chemistry, 99%), lithium silicate (GFS Chemicals, $\geq 99.5\%$), and typically 1.50 g of citric acid ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) with 15% w/w was ball milling using low energy for 36 hours with two different rpm's (250 and 300) and hardened steel balls per gram of mixture 15:1 mass ratio. Solid-state reactions were carried out at 400°C for 2 hours and two different calcination temperatures (700°C and 750°C) for different calcination times in an inert Argon gas atmosphere.

- **Using Commercial Hematite 500 Mesh as a precursor**

500 mesh hematite (Applichem CAS1309-37-1) was ball milled at low energy (15:1 mass ratio) for 24 hours with 250 rpm, before mixing with other components. Then, a mixture of hematite, lithium silicate, and citric acid in stoichiometric amounts with 32% w/w was ground and mixed in an agate mortar. The mixture was calcinated at 400°C for 4 hours followed by calcination at 750°C for 10 hours, all in an Argon gas inert atmosphere. Also, a paste was formed by adding methanol to the reaction mixture and was ball milled for 24 hours using low energy conditions (250 rpm, ball/mass ratio 15:1) and then calcinated for 2 hours at 400°C , followed by 10 hours of calcination at $700^\circ\text{C}/750^\circ\text{C}$, all in an inert atmosphere of Argon gas.

- **Using Hematite obtained by a green route.**

The above procedure was repeated using hematite obtained by a green route (Freire et al., 2023). When heating the amorphous iron oxide precipitated from the methanolic *Caesalpinia coriaria* (Jacq.) Willd. fruits extract, hematite is obtained.

Characterization techniques

XRD measurements were performed in X-ray diffraction (PANalytical X'Pert powder diffractometer, $\text{Cu K}\alpha$ radiation) in the range of $10^\circ \leq 2\theta \leq 80^\circ$ at intervals of 0.02° in Bragg-Brentano geometry. The attenuated total reflection Fourier transform infrared (ATR-FTIR) spectra were recorded in the $4000\text{-}300\text{ cm}^{-1}$ range on an FTIR Frontier de Perkin Elmer spectrophotometer with ATR. A resolution of 2 cm^{-1} was used to obtain all the spectra. The room temperature Mössbauer spectra for all samples were collected in a spectrometer working at the standard transmission geometry by moving the vibrator with a triangular reference signal. A $^{57}\text{Co/Rh}$ source of 10 mCi (925 MBq) of nominal activity was used. The spectrometer was regularly calibrated by collecting the RT Mössbauer spectrum of a standard



α -Fe foil. All spectra were fitted by using a Lorentzian or Voigt-based routine of the Recoil software (University of Ottawa, Canada).

Table 1.

Summary of $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ cathode material is successfully synthesized from Fe_2O_3 .

Synthesis method	Raw materials	Annealing conditions	Phase structure	Impurities	References
Ball milling (400 rpm, 10h) / heat treatment	Li_2CO_3 , Fe_2O_3 , $(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_4\text{Si}$ and Sucrose (10 wt%)	600 °C, 12 h (N_2)	Orthorhombic $\text{Pmn}2_1$	Li_2SiO_3 , Fe_3O_4	Zhang et al., 2013
Sol-gel (hydrothermal)	$\text{LiCH}_3\text{COO}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, Synthetic Fe_2O_3 (cubic, spherical, and commercial nano), tetraethyl orthosilicate, and citric acid	350 °C, 2h / 700 °C, 10 h (Ar)	Monoclinic $\text{P}2_1$	None	Yi et al., 2017
Solid state (ground in an agate mortar)	Li_2SiO_3 , Fe_2O_3 , and glucose (19 and 38 wt.%)	700 °C, 7 h (Ar)	Monoclinic $\text{P}2_1/\text{n}$	Li_2SiO_3 , Fe_3O_4 , FeO , Fe	Kalantarian et al., 2017
Sol-gel	Lithium acetate, iron(III) nitrate, tetra-ethyl orthosilicate (TEOS) ethylene glycol and citric acid	700 °C, 7 h (Ar)	Monoclinic $\text{P}2_1/\text{n}$	Halite (NaCl)	Kalantaria et al., 2017
Sol-gel	Synthetic Fe_2O_3 microsphere, $\text{LiCH}_3\text{COO}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and tetra-ethyl orthosilicate (TEOS)	700 °C, 7 h (Ar)	Orthorhombic $\text{Pmn}2_1$	None	Qu et al., 2012; Qu et al., 2013



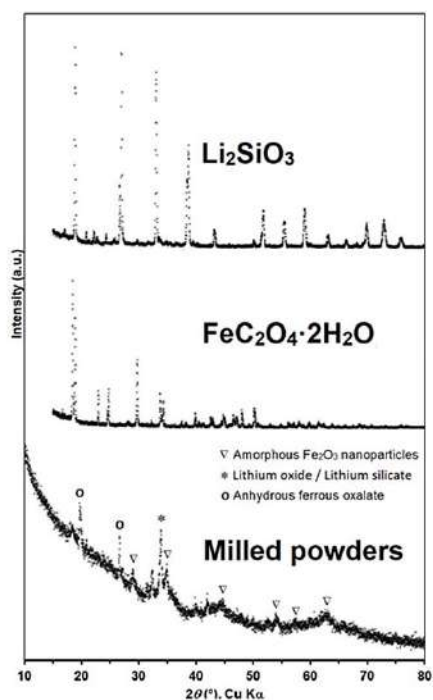
RESULTS AND DISCUSSION

$\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ using $\text{FeC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ as precursor

The XRD pattern of powders obtained from mechanical milling is shown in Fig. 1.

Figure 1.

Diffraction patterns of the precursors a) Li_2SiO_3 and b) $\text{FeC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, and c) the mixture of milled powders using the oxalate precursor technique.

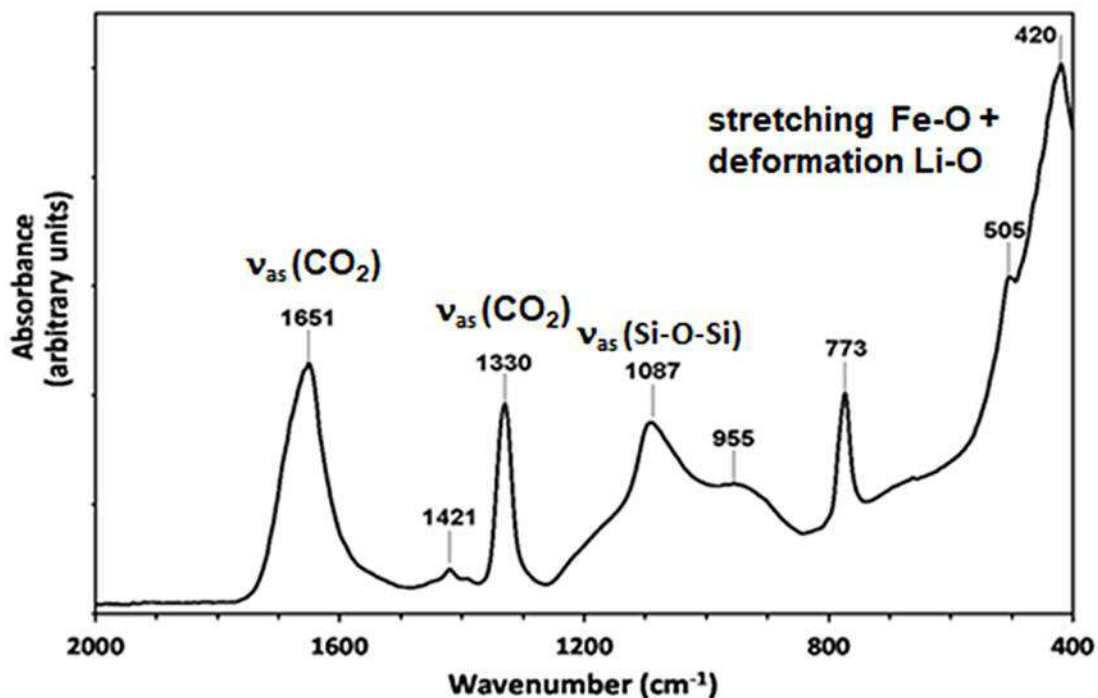


The transformation of the precursors Li_2SiO_3 and $\text{FeC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ is clearly seen, whose diffractograms are given in Fig. 1 (a) and (b). New weak and broad reflections are assigned to a mixture of anhydrous ferrous oxalate FeC_2O_4 (Brown & Bevan, 1966; Hermanek et al., 2007), Li_2SiO_3 , and a phase designated as amorphous nanoparticles of Fe_2O_3 in correspondence with the Mössbauer data that is provided later. According to the X-ray, milling results in the amorphization and initial interaction of precursor materials, with the formation of an intermediate product of reduced particle size.

The transmission Mössbauer spectrum of the ball milled sample, exhibited in Fig. 2a, was fitted using a two-component model. The less intense doublet had a quadrupole splitting (QS) of $2.11 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ and isomer shift (IS) of $1.23 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ (see Fig. 2a).

Figure 2.

ATR-FTIR spectrum of the milled powders using the oxalate precursor technique.



This quadrupole splitting value was consistent with an electron configuration of high spin for the Fe (II) cation and the isomer shift value was in the range expected for Fe (II) in octahedral or quasi-octahedral environments (Drago, 1965). This doublet was assigned to anhydrous ferrous oxalate, in accordance with studies on the thermal decomposition of $\text{FeC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Cari et al., 1975; Smrčka et al., 2016). The second doublet was fitted by using an IS of $0.36 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ and QS of $0.76 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, typical of high spin Fe^{3+} ions in octahedral coordination, which could be assigned to amorphous nanoparticles of Fe_2O_3 (Smrčka et al., 2016; Milivojevi et al., 2014; Machala et al., 2007). Thus, Mössbauer suggests an amorphous character for this phase of Fe_2O_3 . If the crystal size is about 5-6 nm, XRD will not distinguish the nanocrystals of iron oxide (III), but Mössbauer will.

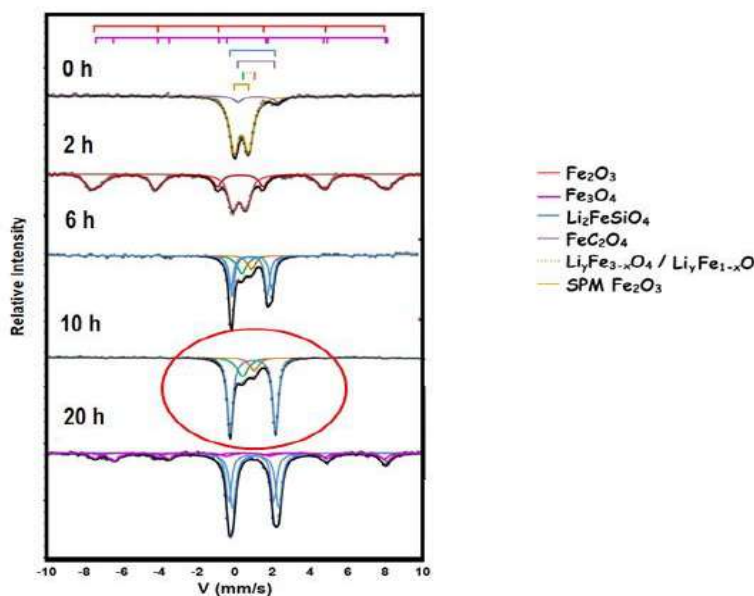
Figure 2 shows the infrared FTIR-ATR spectrum of the powders (oxalate technique) after the mechanical milling of the precursors. This profile is not related to those of the precursors. Several of the observed bands can be assigned to the oxalate anion since they coincide with well-known data on vibratory frequencies of spectroscopic studies of a large variety of metal oxalates (Dinnebier et al., 2003; Begun & Fleter, 1963). The peaks at 1651 cm^{-1} 1330 cm^{-1}

and 773 cm^{-1} are interpreted as a result of vibrational modes of iron oxalate (II) (FeC_2O_4) in the solid state in which the oxalate anion is placed in a C_{2h} symmetry site in the crystal structure. The peaks at 1651 cm^{-1} and 1330 cm^{-1} corresponded to asymmetric vibrations ν_{as} (CO_2) the peak at 773 cm^{-1} was due to the asymmetric flex δ (CO_2) (Dinnebier et al., 2003;). The rest of the spectrum of this spectrum could be associated with the presence of amorphous iron oxide (Raman et al., 1991) and Li_2SiO_3 (Zhang et al, 2008; Cruz & Bulbulian, 2005; Yang et al., 2013). The signal at 955 cm^{-1} may be related to vibrations O-Si-O, while the absorption at 505 cm^{-1} can be due to a stretching band Fe-O and deformation Si-O-Li.

Figure 3 shows the evolution of the room temperature Mössbauer spectra of the milled powders heat-treated at $705\text{ }^\circ\text{C}$ for different times. The spectrum of the sample heated for two hours (see Figure 2b) consisted of a slightly asymmetric doublet and a sextet with broad lines. The doublet had hyperfine parameters ($IS = 0.24\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ and $QS = 0.69\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$) typical of the superparamagnetic Fe_2O_3 . The broadened sextet with $B = 47.9\text{ T}$, $IS = 0.28\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, and $QS = -0.01\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ resulted from the heat treatment, which induces more crystalline Fe_2O_3 .

Figure 3.

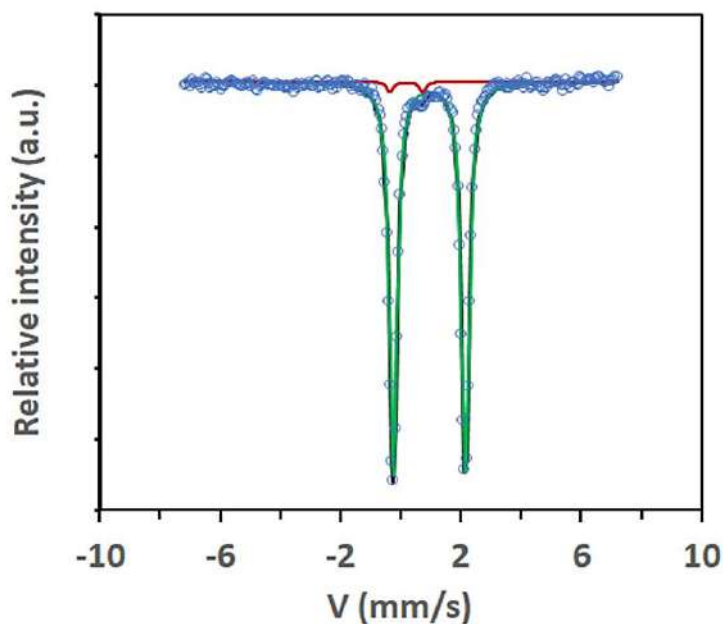
Mössbauer spectra at room temperature powders milled (oxalate precursor) and thermally treated at $705\text{ }^\circ\text{C}$ in Ar atmosphere for a) 0 h, b) 2 hours, c) 6 hours, d) 10 hours, and e) 20 hours



The thermal treatment at 705°C for periods longer than 6 hours results in samples whose Mössbauer spectra have a central doublet, clearly of high spin Fe²⁺ in the tetrahedral coordination. The similarity in the position of the spectral lines of the doublet suggests similar local environments for the Fe. However, the values of the quadrupole splitting are significantly different between the samples. According to (Mali et al., 2011), the values of the quadrupole splitting can be strongly correlated with the degree of distortion of the FeO₄ tetrahedra in the orthosilicates. In the sample heated for 6 hours, it was fitted with two quadrupole sites with QS values of 1.88 mm·s⁻¹ and 2.19 mm·s⁻¹. The doublet in the spectra of samples heated for 10 hours, has a QS ~ 2.42 mm·s⁻¹, which coincided with those of the monoclinic structure *P2₁/n* of the lithium iron orthosilicate, Li₂FeSiO₄ (Jugović et al., 2014; Lv et al., 2011; Sirisopanaporn et al., 2010; Dominko, 2008). It is noteworthy that by carefully controlling the experimental conditions, the purity of the ball-milled synthesized orthosilicate Li₂FeSiO₄ can be improved. A sample obtained using 300 RPM during milling, exhibits a Mössbauer spectrum consisting of two sets of Fe²⁺ and Fe³⁺ doublets as depicted in Figure 4, a prominent one belonging to the lithium iron orthosilicate doublet (CS = 0.947(1) mm/s and QS = 2.400(2) mm/s) and a very small one (CS = 0.29(5) mm/s and QS = 0.88(9) mm/s) which is attributed to delithiated lithium iron orthosilicate Li_{2-x}FeSiO₄ (Kyu Lee et al., 2013; Nyttén et al., 2006).

Figure 4.

Mössbauer spectrum at room temperature of a lithium iron orthosilicate obtained using 300 rpm during ball milling.



The delithiated orthosilicate $\text{Li}_{2-x}\text{FeSiO}_4$ is in very small quantities, so is difficult to clearly observe it in the XRD. It is interesting to point out that neither Fe^0 impurities nor other iron oxides (lithiated magnetite and lithiated wustite) were observed in the spectrum of some samples heated for 20 hours, which in turn exhibited a smaller contribution to two magnetic sextets that may be attributed to non-stoichiometric magnetite, $\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$.

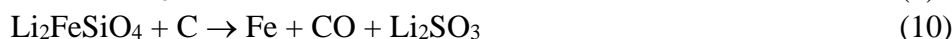
The milling causes the dehydration of ferrous oxalate and simultaneously, an atmosphere is generated that leads to the formation of amorphous nanoparticles of Fe_2O_3 , like what happens during the thermal decomposition of oxalate. It is interesting to observe that from the pure divalent state of Fe^{2+} in FeC_2O_4 , it converts to the trivalent state Fe^{3+} in mechanical milling, even in an argon atmosphere. The transformations can be described by the equations.



The formation of other oxides is induced during the first part of the heat treatment at 400 °C.



Frequently, the formation of metallic iron is observed after heat treatment.



In the above discussion, it should be emphasized that the amorphous nanoparticles Fe_2O_3 react with Li_2SiO_3 after the intermediate step at 410 °C, so that the product of the solid-state reaction at temperatures around 705 °C is the orthosilicate $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$, the monoclinic polymorph (space group: $P21/n$).

$\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ using commercial Fe_2O_3 as precursor

The spectrum of the product obtained without milling is shown in Figure 5 (a). Three contributions is clearly observed. One doublet indicative of iron ions in a trivalent oxidized state ($\text{CS}_1=0.59 \pm 0.02$ mm/s, $\text{QS}_1 = 0.64 \pm 0.02$ mm/s, the second doublet with Mössbauer parameters $\text{CS}_2=0.83 \pm 0.02$ mm/s, $\text{QS}_2 = 0.76 \pm 0.02$ mm/s), and a third one, belonging to a



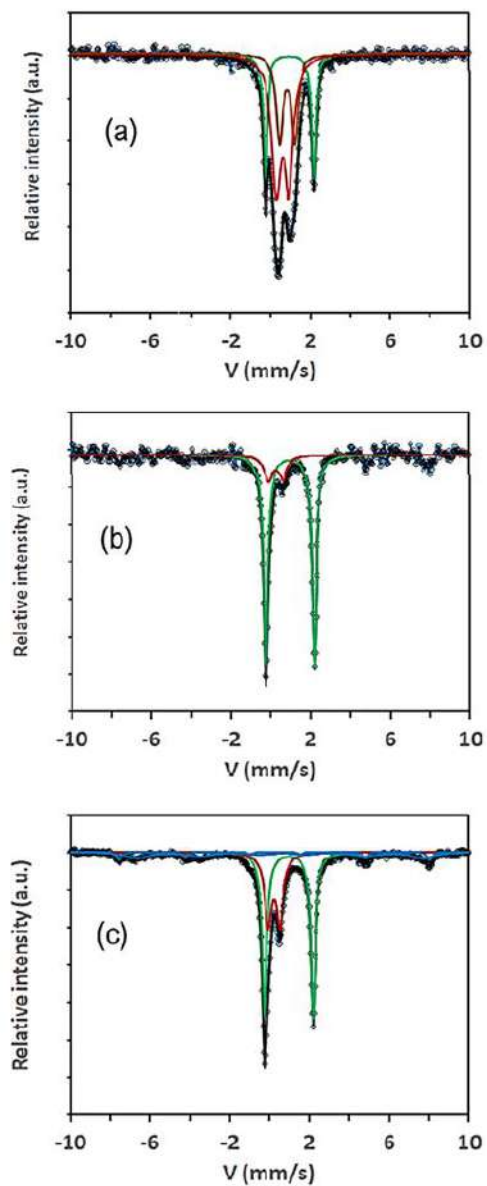
divalent oxidized state contributing with 24% to the spectral area, with $CS = 0.959(4)$ mm/s and $QS = 2.449(9)$ mm/s. The last doublet evidently is due to the formation of the lithium iron orthosilicate phase through a solid-state reaction. When ball milling is used in the synthesis procedure,

When the reaction mixture is ball-milled at 250 rpm, the Mössbauer spectrum typically consists of two doublets (Figure (5b)). One doublet indicative of iron ions in a trivalent oxidized state ($CS_1=0.265(5)$ mm/s, $QS_1 = 0.73(8)$ mm/s, while the majority phase exhibiting a doublet with Mössbauer parameters $CS_2=0.958(4)$, $QS_2 = 2.431(7)$ is attributed to the divalent oxidized phase of lithium iron orthosilicate, Li_2FeSiO_4 (Jugović et al., 2014; Lv et al., 2011; Sirisopanaporn et al., 2010; Dominko. 2008). This result demonstrates that by introducing milling in the synthesis procedure leads to the desired formation of Li_2FeSiO_4 . As in the case of samples obtained using oxalate precursors, the small area contribution may come from delithiated orthosilicate $Li_{2-x}FeSiO_4$. In this last spectrum, traces of a magnetic components are observed. A sufficient electric conductivity is expected, with electrochemical performance comparable with Li_2FeSiO_4 prepared from Fe^{2+} precursor.



Figure 5.

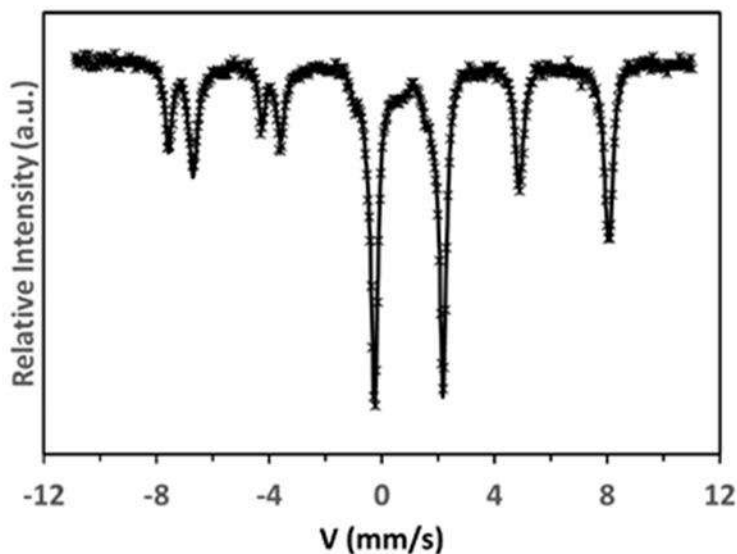
Mössbauer spectrum at room temperature of a lithium iron orthosilicate obtained using hematite as a precursor of (a) unmailed sample, (b) ball-milled sample (250 rpm) prepared with commercial Fe_2O_3 , and (c) ball-milled sample (250 rpm) prepared with green route Fe_2O_3 .



One should carefully observe the experimental synthesis conditions. This is illustrated in Figure 6, which shows the room-temperature Mössbauer spectrum of a sample obtained using a reduced amount of citric acid, 1.14 g instead of 1.50 g. Because of the reducing power diminishes, large concentrations of magnetite are obtained. Decreasing the grinding time (e.g., 10 h) also causes the formation of magnetite, although in a much smaller quantity.

Figure 6.

Mössbauer spectrum at room temperature of a sample obtained using commercial Fe_2O_3 as a precursor, a ball-milling procedure (250 rpm), and only 1.14 g of citric acid.



$\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ using green route obtained Fe_2O_3 as the precursor.

As expected, the products obtained using hematite synthesized by a green route are quite similar to those using commercial hematite. The Mössbauer spectrum of a ball milled at 250 rpm sample also exhibits two doublets. The doublet corresponding to the lithium iron orthosilicate phase, the majority phase, has hyperfine parameters $CS = 0.959(2)$ mm/s; $QS = 2.439(4)$ mm/s. The subspectrum of the delithiated orthosilicate, $\text{Li}_{2-x}\text{FeSiO}_4$, has parameters $CS = 0.216(5)$ mm/s; $QS = 0.589(8)$ mm/s, but in this case, it appears in a greater proportion due to the smaller particle size. Delithiation occurs on the surface of the particle, so the surface/bulk ratio is greater in these samples. The spectrum also shows the contribution of some magnetite in the sample.

CONCLUSION

Ball mill-assisted solid-state carbothermal synthesis of $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ using Fe_2O_3 in an inert atmosphere is feasible. A homogeneous, crystalline $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ is formed after brief annealing at temperatures of 700°C - 750°C , but preliminary milling is required to improve the amounts of orthosilicate formed,

Obtaining impurities such as Fe_xO , Fe_3O_4 , and delithiated $\text{Li}_{2-x}\text{FeSiO}_4$ continues to be a problem. Improving the synthesis procedure is required. For example, controlling the amount of citric acid is necessary to ensure the reduction of Fe^{3+} to Fe^{2+} . The added carbon, in the form of citric acid, acts as a reducing and covering agent, resulting in the formation of fine particulate $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$.

The carbothermal synthesis of $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ using low-cost and readily available Fe_2O_3 and a previous low-energy mechanical alloying process is a convenient and ecologically clean method with a reduced material cost.

BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

- Begun, K.M., & W.H. Fletcher. 1963. Vibrational spectra of aqueous oxalate ion. *Spectrochim Acta.* 19: 1343-1349
- Brown, R.A., & S.C. Bevan. 1966 The thermal decomposition of ferrous oxalate dehydrate. *J Inorg Nucl Chem* 28: 387-391
- Carić S., J. Marinkov, & A. Slivka. 1975. Mössbauer Study of the Thermal Decomposition of $\text{FeC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. *Phys Stat Sol* 31(1): 263–
- Cruz D., S. Bulbulian. 2005. Synthesis of Li_4SiO_4 by a Modified Combustion Method. *J Am Ceram Soc* 88(7): 1720-1724
- Dinnebier R., S. Vensky S, M. Panthöfer, & M. Jansen. 2003. Molecular Structures of Alkali Oxalates: First Proof of a Staggered Oxalate Anion in the Solid State. *Inorg Chem* 42(5): 1499–1507
- Dominko, R. 2008. Li_2MSiO_4 (M = Fe and/or Mn) cathode materials. *J Power Sources* 184(2): 462–468
- Drago, R.S. 1965. *Physical Methods in Inorganic Chemistry*. Reinhold Publ, New York
- Ferrari S., D. Capsoni, S. Casino, M. Destro, C. Gerbaldi, & M. Binia. 2014. Electrochemistry of orthosilicate-based lithium battery cathodes: a perspective. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 16:10353-10366



- Freire, A., E. Chung, I. Mendoza, & J.A. Jaén. 2023. Green synthesis of iron oxide nanoparticles using *Caesalpinia coriaria* (Jacq.) Willd. fruits extract. *Hyperfine Interact* 244, 6. <https://doi.org/10.1007/s10751-023-01817-6>
- Fujita Y., T. Hira, K. Shida, M. Tsushida, J. Liao, & M. Matsuda. 2018. Microstructure of high battery-performance $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ composite powder synthesized by combining different carbon sources in spray-freezing/freeze-drying process. *Ceram. Int.* 44: 11211–11217
- Guirish H.N., & G. Shao. 2015. Advances in high-capacity Li_2MSiO_4 (M = Mn, Fe, Co, Ni, ...) cathode materials for lithium-ion batteries. *RSC Adv.* 5:98666-98686
- Hermanek M., R. Zboril, I. Medrik, J. Pechousek, & C. Gregor. 2007. Catalytic Efficiency of Iron (III) Oxides in Decomposition of Hydrogen Peroxide: Competition between the Surface Area and Crystallinity of Nanoparticles. *J Am Chem Soc* 129(35): 10931-10936
- Jugović D, M. Milović, VN Ivanovski, M. Avdeev, RB. Dominko, B. Jokić, & D. Uskokovi. (2014) Structural study of monoclinic $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ by X-ray diffraction and Mössbauer spectroscopy. *J Power Sources* 265: 75-80. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.04.121>
- Kalantarian M. M., M. Oghbaei, S. Asgari, L. Karimi, S. Ferrari, D. Capsoni, M. Bini, & P. Mustarelli. 2017. Electrochemical Characterization of Low-Cost Lithium-Iron Orthosilicate Samples as Cathode Materials of Lithium-Ion Battery. *Adv. Ceram. Prog* 3, 19-25.
- Lee K, S.J. Kim, T. Kouh, & C.S. Kim. 2013. Mössbauer analysis of silicate $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ and delithiated $\text{Li}_{2-x}\text{FeSiO}_4$ ($x=0.66$) compounds. *J. Appl. Phys.* 113, 17E306. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4799153>
- Lv D., W. Wen, X. Huang, J. Bai, J. Mi, S. Wu, & Y. Yang. 2011. A novel $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ composite: Synthesis, characterization and high storage capacity. *J Mater Chem* 21: 9506-9512
- Machala L., R. Zboril, & A. Gedanken. 2007. Amorphous Iron (III) Oxides. *J Phys Chem* 111: 4003-4018 Decomposition of $\text{FeC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. *Phys Stat Sol* 31(1): 263–268
- Mali G., C. Sirisopanaporn, C. Masquelier, D. Hanzel, & R. Dominko. 2011. $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ polymorphs probed by ^6Li MAS NMR and ^{57}Fe Mössbauer spectroscopy. *Chem Mater* 23: 2735–27448



- Milivojević D., B. Babić-Stojić, V. Jokanović, Z. Jagličić, D. Makovec, & N. Jović. 2014. Magnetic properties of ultrasmall iron-oxide nanoparticles. *J Alloys Compd* 595: 153-157
- Nytén A., S. Kamali, L. Hågström, T. Gustafsson, & J.O. Thomas. 2006. The lithium extraction/insertion mechanism in $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$. *J. Mater. Chem.*, 16, 2266–2272
- Nytén A., A. Abouimrane, M. Armand, T. Gustafsson T, & J.O. Thomas. 2005. Electrochemical performance of $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ as a new Li-battery cathode material. *Electrochem Commun* 7:156–160
- Qu L., S. Fang, Z. Zhang, L. Yang, & S. Hirano. 2013. $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ with good performance as cathode material for Li-ion battery *Mater. Lett.* 108, 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2013.06.072>
- Qu, L., S. Fang, L. Yang, & S. Hirano. 2012. $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ cathode material synthesized by template-assisted sol–gel process with Fe_2O_3 microsphere. *Journal of Power Sources*, 217, 243–247. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.05.093>
- Raman A., B. Kuban, & A. Razvan. 1991. The Application of Infrared Spectroscopy to the Study of Atmospheric Rust Systems-I Standard Spectra and Illustrative Applications to Identify Rust Phases in Natural Atmospheric Corrosion Products. *Corros Sci* 32(12): 1295-1306
- Sirisopanaporn C., A. Boulinea, D. Hanzel, R. Dominko, B. Budic, A.R. Armstrong, P.G. Bruce, & C. Masquelier. 2010. Crystal structure of a new polymorph of $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$. *Inorg Chem* 49: 7446–7451
- Smrčka D., V. Procházka, P. Novák, J. Kašlík, & V. Vlastimil. 2016. Iron oxalate decomposition process by means of Mössbauer spectroscopy and nuclear forward scattering. *AIP Conf Proc* 1781-1789
- Yang H., Y. Zhang, X. Cheng. 2013. Effect of Vanadium Substitution on Structure of $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ Composites. *J Electrochem* 19(6): 565-570
- Yi, L., G. Wang, Y. Bai, M. Liu, X. Wang, M. Liu, & X. Wang. 2017. The effects of morphology and size on performances of $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ cathode materials. *Journal of Alloys and Compounds*, 721, 683–690. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.06.059>
- Zhang B., M. Nieuwoudt, & A. Eastal. 2008. Sol Gel Route to Nanocrystalline Lithium Metasilicate Particles. *J Am Ceram Soc* 91(6): 1927–193



Zhang, Z., X. Liu, S. Ma, & H.Y. Zhao. 2013. Preparation of $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{c}$ composite cathode materials for lithium-ion batteries by Carbothermal Reduction Method. *Adv. Mater. Res.* 724-725, 838–843. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.724-725.838>





ANÁLISIS DETALLADO DE LOS PROCEDIMIENTOS EMPLEADOS POR LEONHARD EULER PARA RESOLVER EL PROBLEMA DE LOS PUENTES DE KÖNIGSBERG, SU RELACIÓN CON EL ORIGEN DE LA TEORÍA DE GRAFOS Y LOS OBJETIVOS DE LA EDUCACIÓN MATEMÁTICA

DETAILED ANALYSIS OF THE PROCEDURES USED BY LEONHARD EULER TO SOLVE THE KÖNIGSBERG BRIDGE PROBLEM, ITS RELATIONSHIP WITH THE ORIGIN OF GRAPH THEORY AND THE OBJECTIVES OF MATHEMATICAL EDUCATION

Darío Herrera Díaz

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Matemática, Panamá. dario.herrera@up.ac.pa , <https://orcid.org/0000-0003-4792-3374>

Fecha de recepción: 27 de febrero de 2024

Fecha de aceptación: 3 de mayo de 2024

DOI [HTTPS://DOI.ORG/10.48204/J.TECNO.V26N2.A5407](https://doi.org/10.48204/J.TECNO.V26N2.A5407)

RESUMEN

Se analizan minuciosamente los procedimientos que empleó Leonhard Euler para demostrar la irresolubilidad del problema de los puentes de Königsberg y para determinar la posibilidad de recorrer cualquier configuración de aguas y puentes. Simultáneamente, se presenta la formalización matemática de estos procedimientos en el contexto de la Teoría de Grafos. El análisis de contenido reveló que Euler empleó, principalmente, tres objetivos, en la actualidad, de la Educación Matemática para la solución del problema de los puentes de Königsberg, a saber: la modelización, la búsqueda de patrones y la argumentación; mientras que, las ideas empleadas por él, para determinar si es posible recorrer cualquier configuración de aguas y puentes, dieron origen al primer teorema de la Teoría de Grafos.

PALABRAS CLAVES

Königsberg, puentes, grafos, objetivos, Educación Matemática.

ABSTRACT

Leonhard Euler's procedures for proving the unsolvability of the Königsberg bridge problem and for determining the possibility of traversing any configuration of waters and bridges are analyzed in detail. At the same time, the mathematical formalization of these procedures is presented within the context of Graph Theory.



The content analysis revealed that Euler primarily employed three current objectives of Mathematical Education for solving the Königsberg Bridges problem, namely: modeling, pattern seeking, and argumentation. Meanwhile, the ideas he used to determine the possibility of traversing any configuration of waters and bridges gave rise to the first theorem of Graph Theory

KEY WORDS

Königsberg, bridges, graphs, objectives, Mathematical Education.

INTRODUCCIÓN

Los intentos por parte de los habitantes de una ciudad, a principios del siglo XVIII, de caminar por las cuatro zonas en que esta quedaba dividida, por un río que la atravesaba, y de pasar, una sola vez, por cada uno de los siete puentes que conectaban las regiones, dio origen a lo que en la actualidad se conoce como el problema de los puentes de Königsberg.

El matemático suizo Leonhard Euler demostró, recurriendo al razonamiento lógico deductivo, que el problema de los puentes de Königsberg es irresoluble, y el análisis empleado por él dio origen a la rama de la Matemática denominada, hoy en día, Teoría de Grafos (Hevia, 1996; Nottoli, 1998; Núñez, 2004; Pérez-Alcazar & Castro-Chadid, 2006; Paoletti, 2011; Espitia, 2020).

Este trabajo examina detenidamente los procedimientos desarrollados por Euler en su artículo titulado “Solutio Problematis ad Geometriam Situs Pertinensis”, el cual está dividido en 21 párrafos (Euler, 1736). En dicho artículo Euler demostró la irresolubilidad del problema de los puentes de Königsberg y proporcionó lineamientos para recorrer cualquier configuración de aguas y puentes. Además, se detalla la formalización matemática actual de los resultados presentados por Euler, destacando los objetivos de la Educación Matemática que se encuentran en estos y las demostraciones de los corolarios que se desprenden del primer teorema de la Teoría de Grafos.

DESARROLLO

1. Origen del problema de los siete puentes de Königsberg

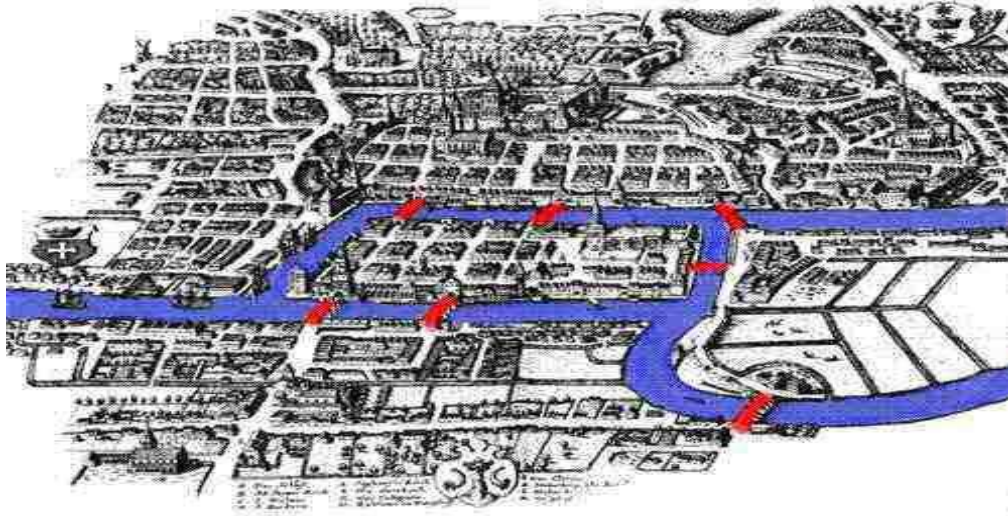
Hasta 1945, la ciudad de Königsberg constituía parte de la nación de Prusia; posteriormente paso a denominarse Kaliningrado y, en la actualidad, es territorio de la Federación de Rusia. La ciudad está dividida en cuatro áreas por un río denominado Pregel, en los tiempos de Königsberg, y Pregolya, hoy en día.

Para el siglo XVIII, las cuatro áreas que formaban Königsberg se conectaban a través de siete puentes denominados, según Paoletti (2011): puente de Herrero, puente de Conexión, puente rde, puente de Comerciante, puente de Madera, puente Alto y puente de Miel (ver Figura 1).



Figura 1

Una vista de Königsberg que muestra los siete puentes sobre el río Pregel



Nota. Tomado de “*La solución de Leonard Euler al problema del puente de Königsberg*”, por T. Paoletti, 2011, Mathematical Association of America.

Se cuenta que, a manera de entretenimiento, los habitantes de Königsberg trataban de encontrar un camino que les permitiera recorrer las cuatro zonas de la ciudad, atravesando cada uno de los siete puentes una y sólo una vez (Grimaldi, 1998; Núñez, 2004; Pickover, 2009; Paoletti, 2011). De aquí surge el problema de los puentes de Königsberg (o el problema de los siete puentes de Königsberg), es decir: *¿Será posible caminar por todas las zonas de la ciudad cruzando cada uno de los siete puentes exactamente una vez?*

2. Procedimiento desarrollado por Euler para resolver el problema de los siete puentes de Königsberg

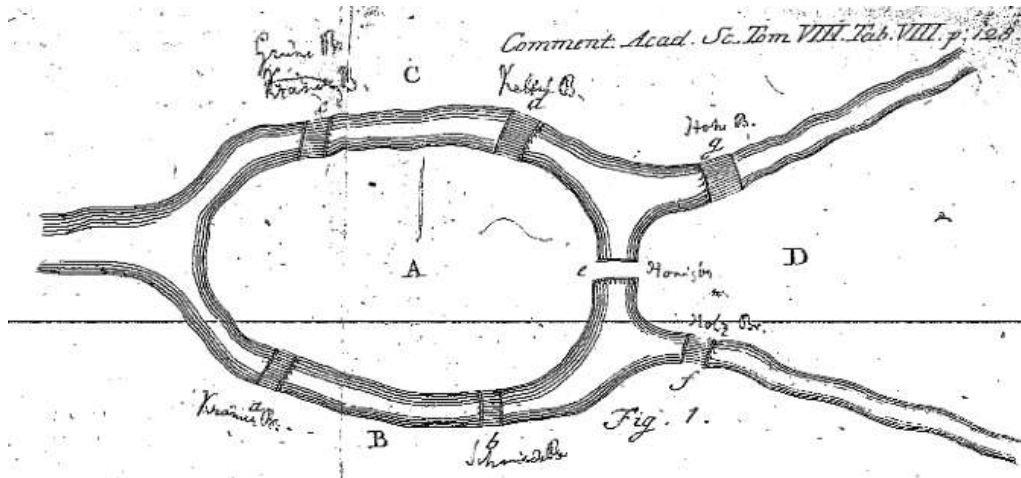
Euler, al poco tiempo de enterarse del problema de los siete puentes de Königsberg, presentó un informe a la Academia rusa de San Petersburgo, en donde demostró que el mismo es irresoluble (Núñez, 2004). Posteriormente, en 1736, proporcionó un método general para resolver problemas del mismo tipo. En los veintiún párrafos del artículo *Solutio Problematis ad Geometriam Situs Pertinens* (La solución de un problema relacionado con la geometría de la posición), Euler procede como sigue:

- I. Proporciona un esquema del problema (ver Figura 2)



Figura 2

“Modelo matemático” creado por Euler para el problema de los puentes de Königsberg



Nota. Figura 1 de Euler en Solutio problematis ad geometriam situs pertinentis. Tomado de “La solución de Leonard Euler al problema del puente de Königsberg”, por T. Paoletti, 2011, Mathematical Association of America.

- II. Las cuatro regiones de Königsberg las representó mediante las letras mayúsculas A, B, C y D .
- III. Los siete puentes los representó mediante las letras minúsculas a, b, c, d, e, f y g .
- IV. Las rutas o caminos las representa mediante una sucesión de letras, así:
 - i. AB simboliza un viaje que comenzó en la región A y terminó en la región B , por el puente a o b (un puente, dos letras).
 - ii. ABD representa la ruta que va de A a B , y posteriormente de B a D ; atravesando dos puentes (dos puentes, tres letras).
 - iii. $ABDC$ representa la ruta que va de A a B , de B a D , y de D a C ; atravesando tres puentes (tres puentes, cuatro letras).
 - iv. $CADBA$ representaría el siguiente camino: de la región C a la A (por el puente c o d), de la región A a la D (por el puente e), de la región D a la B (por el puente f), y de la región B a la A (por el puente a o b). Obsérvese que se atraviesan cuatro puentes y en la representación del camino hay cinco letras.

Por i, ii, iii , y iv , Euler llega a la conclusión: la sucesión de letras que represente un camino que recorra la ciudad de Königsberg, cruzando los siete puentes una sola vez, debe consistir en ocho letras.

Vemos, pues, que Euler crea un modelo matemático para el problema de los puentes de Königsberg, al prescindir del significado real o físico de los elementos de este, asociando las

regiones de la ciudad y los puentes (objetos no matemáticos) con letras mayúsculas y minúsculas, respectivamente (“objetos matemáticos”). También, recurre a la búsqueda de patrones para determinar la sucesión de letras (cantidad de letras) que representan las rutas o caminos, es decir, a través de la secuencia lógica *i, ii, iii, y iv* de IV llega a la conclusión que, la cantidad de letras que representa un camino excede en uno a la cantidad de puentes involucrados en la ruta (cruzando cada puente una sola vez).

Hoy en día, la modelización y la búsqueda de patrones son dos objetivos de la Educación Matemática que facilitan el conocimiento matemático y el desarrollo del pensamiento en general (Hernández et al., 2001; Lupiañez, 2005; Planas & Alsina, 2009; Alsina, 2020).

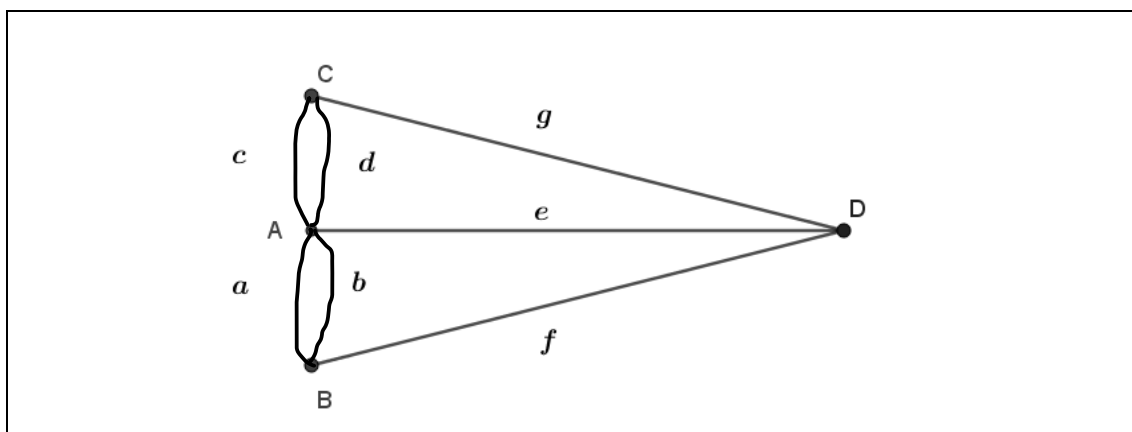
Las ideas empleadas por Euler, en la solución de los puentes de Königsberg, se formalizan en la Teoría de Grafos. En vez de utilizar letras mayúsculas para las regiones y letras minúsculas para los puentes, se utilizan puntos y líneas, respectivamente; lo que da origen a la definición de grafo.

Definición 1. Un Grafo $G = (V, E)$ consiste en un conjunto no vacío V llamado conjunto de vértices (nodos, puntos) y un conjunto E de pares ordenados o no ordenados de elementos de V , denominado el conjunto de aristas, tales que hay un mapeo del conjunto E al conjunto de pares ordenados o no ordenados de elementos de V . Si cada arista se asocia con un par no ordenado de vértices, entonces G se llama grafo no dirigido.

El modelo matemático de Euler (ver Figura 2) se transforma en lo que hoy conocemos como un grafo, (ver Figura 3), (Grimaldi, 1998).

Figura 3

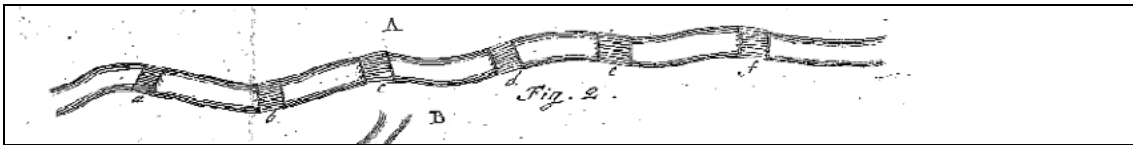
Grafo asociado al problema de los puentes de Königsberg



- V. Euler deduce que, en una sucesión que represente un camino, el número de ocurrencias de cada letra, que simboliza una región, depende del número impar de puentes que conducen a cada una de estas masas de tierra. Para explicar su deducción, recurre a un caso más simple de masa de tierra y puentes (ver Figura 4).

Figura 4

“Modelo matemático” creado por Euler para un problema de una sola región, a la cual conducen cualquier número de puentes



Nota. Figura 2 de Euler en *Solutio problematis ad geometriam situs pertinentis*. Tomado de “La solución de Leonard Euler al problema del puente de Königsberg”, por T. Paoletti, 2011, Mathematical Association of America.

Apoyándose en este modelo (Figura 4), Euler evalúa las condiciones en la que se recorre la región A. Para tal efecto, denotemos AaB la ruta que va de A a B por el puente a , BbA la ruta que va de B a A por el puente b y así sucesivamente. Los resultados de la evaluación se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1

Deducciones del modelo creado por Euler para un problema de una sola región

Ruta	Número de puentes que se cruzan	Número de apariciones de la letra A
AaB	1	1
$AaBbAcB$	3	2
$AaBbAcBdAeB$	5	3

De donde infiere que:

- i. Si el puente a es el único que conectara con la región A, entonces A aparecería una vez en la representación del camino buscado. La ruta iniciaría o terminaría en A, dando lugar a una sola aparición de la letra A.
- ii. Si hubiese tres puentes que condujeran a la región A (digamos a, b , y c), entonces A aparecería dos veces en la representación del camino buscado. Si la ruta inicia en A,



- iii. al salir (primera aparición de A) por el puente, digamos a , tendríamos que regresar (segunda aparición de A) por el puente b e inmediatamente salir por el puente c . En caso contrario, al entrar (primera aparición de A) por el primer puente, saldríamos por el segundo puente, para finalmente volver a entrar (segunda aparición) por el tercer puente, y finalizar el recorrido.
- iv. Por i, ii , y como hay cinco puentes que conducen a la región A (véanse las Figura 2 o Figura 3), entonces la letra A aparecería tres veces en la representación del camino buscado. Si iniciamos en A y salimos (primera aparición de A) por el primer puente, posteriormente regresaríamos (segunda aparición de A) por el segundo puente e inmediatamente saldríamos por el tercer puente, luego volveríamos a regresar a la región A por el cuarto puente (tercera aparición de A) para salir por el quinto puente. En caso contrario, la ruta buscada terminaría en la región A .

Por i, ii y iii , Euler concluye:

- v. *Si el número de puentes, m , que conducen a un área es impar, por ejemplo, a la región A , entonces la letra A debe aparecer $\frac{m+1}{2}$ veces en la representación del camino buscado.*
- vi. Como hay tres puentes que conducen a cada una de las regiones B, C y D ; estas letras deben aparecer dos veces, cada una, en la representación del camino buscado y, por iii y iv , la ruta quedaría simbolizada por nueve letras. Esto contradice lo establecido en IV.

Por lo anterior, no es posible caminar por todas las zonas de la ciudad de Königsberg cruzando cada uno de los siete puentes exactamente una vez.

En este punto, se observa como Euler justifica la respuesta al problema, es decir, elabora argumentos que explican sus afirmaciones. Igualmente, en la actualidad, la Educación Matemática tiene como uno de sus objetivos fundamentales que los estudiantes empleen la argumentación, ya sea para justificar los procedimientos matemáticos al resolver problemas o bien para participar en la reconstrucción del conocimiento matemático (Hernández et al., 2001; Lupiañez, 2005; Llinares, 2013; Ríos-Cuesta, 2021)

Lo expuesto en V queda formalizado en la Teoría de Grafo como sigue:

Definición 2. El grado de un vértice en un grafo no dirigido es el número de aristas incidentes en él, con la excepción de que un lazo en un vértice contribuye dos veces al grado de ese vértice. El grado de un vértice se denota por medio de $grad(v)$.



La definición corresponde al número de ocurrencias de la letra A (en una sucesión que represente un camino), dependiendo del número de puentes que conducen a la región que representa.

Definición 3. Una trayectoria es una sucesión de vértices con la propiedad de que cada vértice es adyacente al siguiente y tal que en la correspondiente sucesión de aristas todas las aristas son distintas. Es permitido que un vértice aparezca en una trayectoria más de una vez.

Definición 4. Un circuito es una trayectoria que comienza y termina en el mismo vértice.

Definición 5. Un grafo es conexo si cualesquiera dos de sus vértices se puede unir por una trayectoria.

Definición 6. Una trayectoria de Euler es una trayectoria que recorre todas las aristas de un grafo conexo. Análogamente, un circuito de Euler es un circuito que recorre todas las aristas de un grafo conexo.

Teorema 1. Existencia de trayectorias de Euler.

- a. Si un grafo tiene más de dos vértices de grado impar, entonces no puede tener una trayectoria de Euler
- b. Si un grafo conexo tiene exactamente dos vértices de grado impar, entonces tiene por lo menos una trayectoria de Euler. Cualquier trayectoria de Euler debe iniciar en uno de los vértices de grado impar y terminar en el otro.

Teorema 2. Existencia de circuitos de Euler

- a. Si en un grafo algún vértice tiene grado impar, entonces no puede tener un circuito de Euler
- b. Si todos los vértices de un grafo conexo tienen grado par, entonces hay por lo menos un circuito de Euler.

En el grafo asociado al problema de los puentes de Königsberg (Figura 3) se tiene en total cuatro vértices de grado impar; por lo tanto, no existe una trayectoria de Euler, y menos un circuito de Euler. Luego, es imposible recorrer las cuatro zonas cruzando los siete puentes una sola vez.

3. Procedimiento desarrollado por Euler para determinar si es posible recorrer cualquier configuración de aguas y puentes

Primero determina el número de ocurrencias de una letra, en la representación de un camino buscado, cuando esta representa una región a la cual se puede llegar por un número par de puentes. Procede como sigue:



Sea A una región a la que se llega por un número par de puentes.

Caso I: A es el punto de partida.

- Dos puentes que conectan a la región: A aparecerá dos veces, uno como punto de partida y otro como punto final.
- Cuatro puentes que conectan a la región: A aparecerá tres veces; uno como punto de partida, otro como punto de llegada y salida, y finalmente, el tercero como punto de llegada.

De donde se infiere que el número de ocurrencias de A es:

$$\frac{\text{números de puentes que conducen a } A}{2} + 1$$

Caso II: A no es el punto de partida.

- Dos puentes que conectan a la región: A aparecerá una vez, el viaje tendría que entrar por un puente y salir inmediatamente por el único otro puente disponible.
- Cuatro puentes que conectan a la región: A aparecerá dos veces, ya que se procede como el punto anterior

De donde se infiere que el número de ocurrencias de A es:

$$\frac{\text{números de puentes que conducen a } A}{2}$$

Como se puede partir de una sola área, Euler adopta la fórmula obtenida para el segundo caso. Ahora, para determinar si era posible realizar un recorrido a través de masas de tierra divididas por ríos y conectadas por un número impar o par de puentes, usando cada puente una vez y solo una vez, Euler proporcionó el siguiente procedimiento:

- I. Al número total de puentes le suma uno, es decir, si P es el número total de puentes, Euler colocó $P + 1$ al inicio de un “cuadro”.
- II. En una primera columna colocó las letras mayúsculas que representan las distintas regiones o masas de tierra. Denotémoslas por: A_1, A_2, \dots, A_n .
- III. Forma una segunda columna con el número de puentes que conducen a cada región. Escribiremos $P(A_i)$ para indicar el número de puentes que conducen a la región A_i .
- IV. Señala con un asterisco aquellas letras de las que salen un número par de puentes.
- V. Si el número de la segunda columna es impar, lo aumenta en una unidad, y el resultado lo divide entre dos. Si el número de dicha columna es par, lo divide entre dos. Lo que Euler calcula es el número de ocurrencias de las letras que representan las distintas regiones. Así, si denotamos por $N(A_i)$ el número de ocurrencias de la letra A_i se tiene que,



$$N(A_i) = \begin{cases} \frac{P(A_i)+1}{2} & \text{si } P(A_i) \text{ es impar} \\ \frac{P(A_i)}{2} & \text{si } P(A_i) \text{ es par} \end{cases}$$

- VI. Crea una tercera columna con los números obtenidos en el paso anterior.
- VII. Si la suma de la última columna es menor o igual al número colocado al inicio, $(P + 1)$, entonces el problema tendría solución.

En este punto se introduce los que se conoce como la suma de Euler (denotada por E): Suma de los números de ocurrencias de todas las letras que representan las áreas de la configuración. Es decir,

$$E = \sum_{i=1}^n N(A_i)$$

La solución al problema de Königsberg, aplicando el método antes descrito, procede como sigue.

Ejemplo 1. Solución, por el método general, al problema de Königsberg

Como hay siete puentes en Königsberg, el número de puentes más uno es igual a **8**. El trabajo realizado por Euler, en el párrafo 14 (Euler, 1736), lo resumimos en la Tabla 2.

Tabla 2

Método general aplicado al problema de Königsberg

Letras que representan las distintas regiones	Número de puentes que conducen a la región	Número de apariciones de la letra en el camino buscado
<i>A</i>	5	3
<i>B</i>	3	2
<i>C</i>	3	2
<i>D</i>	3	2

Como la suma de la tercera columna (**9**) es mayor que el número colocado al inicio, el recorrido es imposible atravesando cada puente una sola vez.

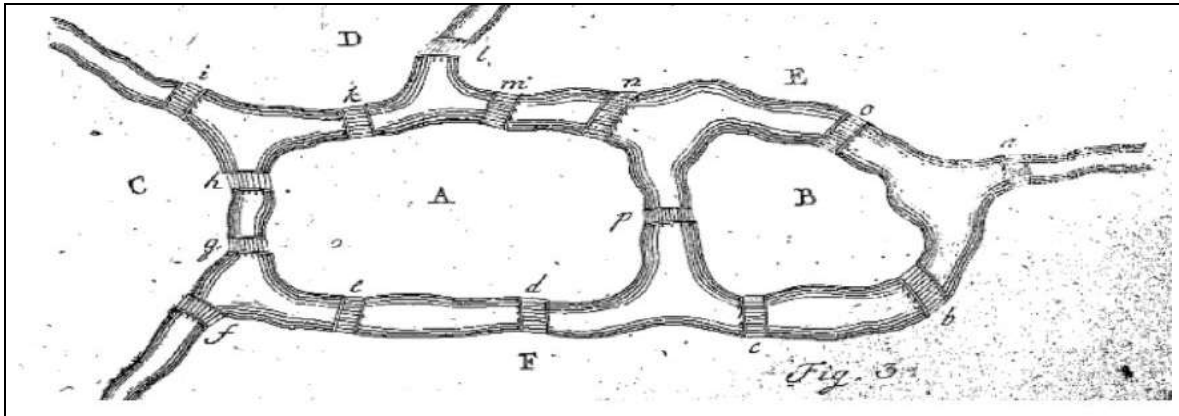
Ejemplo 2. Solución a un problema creado por Euler



Euler aplica su método general para determinar si es posible recorrer las regiones de la figura proporcionada por él, atravesando los 15 puentes una sola vez (ver Figura 5).

Figura 5

“Modelo matemático” creado por Euler para cualquier configuración de aguas y puentes



Nota. Figura 3 de Euler en Solutio problematis ad geometriam situs pertinentis. Tomado de “La solución de Leonard Euler al problema del puente de Königsberg”, por T. Paoletti, 2011, Mathematical Association of America.

Como hay 15 puentes, el número de puentes más uno es igual a 16. Ordenando los datos en la tabla 3.

Tabla 3

Método general aplicado a un problema creado por Euler

Letras que representan las distintas regiones	Número de puentes que conducen a la región	Número de apariciones de la letra en el camino buscado
A*	8	4
B*	4	2
C*	4	2
D	3	2
E	5	3
F*	6	3

Como la suma de la tercera columna (16) es igual al número colocado al inicio, el recorrido es posible atravesando cada puente una sola vez.



Posteriormente, Euler señala que:

- La suma de los números en la segunda columna es igual al doble del número total de puentes (lema del apretón de manos), y de acuerdo con Hevia (1996) este es el primer teorema de la Teoría de Grafos. Se tiene entonces que:

Teorema 3: En una configuración de aguas y puentes:

$$\sum_{i=1}^n P(A_i) = 2P$$

Demostración:

Cada puente se cuenta dos veces en la sumatoria, uno por cada masa de tierra al que está unido.

Consecuencias del teorema 3:

- Como la suma de todos los puentes que conducen a cada región es par, es imposible que haya un número impar de regiones con un número impar de puentes. Esta afirmación se deduce del teorema anterior ya que una suma impar de números impares es también impar, mientras que la suma de números pares es par. Se ha obtenido un corolario del teorema 3.
- Si a todas las regiones llega un número par de puentes, la tercera columna sumara uno menos que el número total de puentes más uno. Entonces, la ruta que recorre todos los puentes de la configuración inicia y termina en la misma región. En efecto,

$$\sum_{i=1}^n P(A_i) = 2P$$

$$\frac{\sum_{i=1}^n P(A_i)}{2} = P$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{P(A_i)}{2} = P$$

$$\sum_{i=1}^n N(A_i) = P$$

$$E = P$$

Para demostrar que la ruta inicia y termina en una misma región, supongamos que se inicia en una región A , pero no termina en A ; entonces el número de puentes que conducen a A debe ser impar, lo que es imposible.



- Si hay dos masas de tierra con un número impar de puentes, el viaje siempre será posible, si el viaje comienza en una de las regiones con un número impar de puentes. En efecto: Sean A_1, \dots, A_{n-2} las regiones a las que se llegan por un número par de puentes y A_{n-1}, A_n las dos regiones a las que se llega por un número impar de puentes. Entonces,

$$\sum_{i=1}^n P(A_i) = 2P$$

$$\sum_{i=1}^{n-2} P(A_i) + P(A_{n-1}) + P(A_n) = 2P$$

$$\sum_{i=1}^{n-2} P(A_i) + P(A_{n-1}) + 1 + P(A_n) + 1 = 2P + 2$$

$$\frac{\sum_{i=1}^{n-2} P(A_i)}{2} + \frac{P(A_{n-1}) + 1}{2} + \frac{P(A_n)}{2} = P + 1$$

$$\sum_{n=1}^n N(A_i) = P + 1$$

$$E = P + 1$$

- Si hay cuatro o más masas con un número impar de puentes, entonces es imposible que haya un camino. Si se considera, por ejemplo, cuatro masas de tierra y se procede como en el caso anterior se llega a:

$$E = (P + 1) + 1$$

Dependiendo del resultado de la suma de la tercera columna, Euler señala que:

- Si la suma es igual al número colocado al inicio, el recorrido debe iniciar en una zona marcada con asterisco, es decir, una zona a la que se puede llegar por un número impar de puentes.
- Si la suma es menor que el número colocado al inicio, el recorrido debe iniciar en una zona marcada con asterisco, es decir, una región a la que se puede llegar por un número par de puentes.

CONCLUSIONES

Los procedimientos desarrollados por Euler para probar que el problema de los puentes de Königsberg es irresoluble, y la generalización de estos a cualquier configuración de aguas y puentes trajo consigo el desarrollo de una rama de la Matemática, entre otras, denominada Teoría de Grafos. Además, muestran cómo es posible construir o reconstruir el conocimiento matemático a partir de nociones elementales (v.gr. encontrar un camino) y un proceso de modelización (al prescindir del significado real o físico de los elementos del problema). La argumentación “euleriana” nos lleva al momento de abordar un problema a: reconocer algo



familiar (todas las regiones de la ciudad de Königsberg estaban conectadas por un número impar de puentes), reconocer patrones (número de apariciones de una letra, dependiendo del número de puentes que conecta a la región que representa), establecer casos (número de puentes que conducen a una región sea par o impar, si el recorrido inicia o no en una región determinada). La modelización, búsqueda de patrones y argumentación son objetivos fundamentales de la Educación Matemática contemporánea presentes en el artículo “Solutio Problematis ad Geometriam Situs Pertinensis” publicado por Euler en 1736. Euler empleó estos objetivos para demostrar la irresolubilidad del problema de los puentes de Königsberg. Además, en este artículo se introduce el lema del apretón de manos y sus respectivos corolarios, herramientas que permiten determinar de manera eficiente la posibilidad de recorrer cualquier configuración de aguas y puentes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alsina, A. 2020. *Revisando la educación matemática infantil: una contribución al Libro Blanco de las Matemáticas*. Edma 0-6: Educación Matemática en la infancia, 9(2): 1-20. Disponible en: <https://dugi-doc.udg.edu/bitstream/handle/10256/18962/032488.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Visitado el 3 de marzo de 2023.
- Espitia, D. 2020. *Historia de puentes y conexiones: Una introducción a la teoría de redes*. Revista Orinoquia Ciencia y Sociedad, IV: 18-23. Disponible en: <http://revistaorinoquia.unitropico.edu.co/wp-content/uploads/2020/10/4.pdf>. Visitado el 6 de agosto de 2021.
- Euler, L. 1736. *Solutio problematis ad geometriam situs pertinensis*. Commentarii Academice Scientiarum Imperialis Petropolitane, 8: 28-140. Disponible en: <file:///G:/Ensayos%20de%20Dar%C3%ADo/Los%20puentes%20de%20konigsberg/Euler%20Koenigsberg%20bridges%20%20Maze%20texts.html>. Visitado el 8 de septiembre de 2021.
- Grimaldi, R.1998. *Matemáticas discretas y combinatoria: Una introducción con aplicaciones*. 3th ed. México: Editorial Pearson.
- Hernández, H., Delgado, R., Fernández, B., Valverde, L. & Rodríguez, T. 2001. *Cuestiones de didáctica de la Matemática: Conceptos y Procedimientos en la Educación Polimodal y Superior*. 2th ed. Rosario: Homo Sapiens Ediciones.
- Hevia, H. 1996. *El problema de los siete puentes de Königsberg: Leonhard Euler y la Teoría de Grafos*. Educación Matemática, 8 (1): 108-115.



- Llinares, S. 2013. *Innovación en la Educación Matemática: más allá de la tecnología*. Modelling in Science Education and Learning, 6(1): 7-19. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/100643/1819-5668-1-SM.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Visitado el 3 de marzo de 2023.
- Lupiañez, J. 2005. Objetivos y fines de la Educación Matemática: Capacidad y Competencias Matemáticas. Didáctica de la Matemática. Pensamiento numérico:1-12. Disponible en: <http://funes.uniandes.edu.co/593/1/LupianezJ05-2799.PDF> . Visitado el 2 de febrero de 2023.
- Núñez, J. 2004. *Siete puentes, un camino: Königsberg*. Suma, 45: 69-78.
- Nottoli, H. 1998. *Teoría de grafos: Aplicaciones al diseño arquitectónico*. Educación Matemática, 10 (3): 109-127.
- Paoletti, T. 2011. *La solución de Leonard Euler al problema del puente de Königsberg*. Mathematical Association of America. Disponible en: file:///G:/Ensayos%20de%20Dar%C3%ADo/Los%20puentes%20de%20konigsberg/La%20soluci%C3%B3n%20de%20Leonard%20Euler%20al%20problema%20del%20puente%20de%20Konigsberg%20_%20Asociaci%C3%B3n%20Matem%C3%A1tica%20de%20Am%C3%A9rica.html Visitado el 6 de agosto de 2021.
- Pérez-Alcazar, J.H. & Castro-Chadid, I. 2006. *Didáctica Euleriana*. Universitas Scientiarum, 11(1): 59-83. Disponible en: <http://funes.uniandes.edu.co/3715/1/CuellarTeoriaGeometria2013.pdf> Visitado el 6 de agosto de 2021.
- Pickover, C. 2009. *El libro de las Matemáticas: De Pitágoras a la 57° dimensión, 250 hitos de la historia de las Matemáticas*. Madrid: Editorial Ilus Books.
- Planas, N. & Alsina, A. 2009. *Educación Matemática y buenas prácticas: Infantil, Primaria, secundaria y educación superior*. Barcelona: Editorial GRAÓ.
- Ríos-Cuesta, W. 2021. *Argumentación en educación matemática: elementos para el Diseño de estudios desde la revisión bibliográfica*. Revista Amazonia Investiga, 10(41): 96-105. Disponible en: <file:///G:/Ensayos%20de%20Dar%C3%ADo/Los%20puentes%20de%20konigsberg/Sobre%20Educacion%20Matem%C3%A1tica/Dialnet-ArgumentacionEnEducacionMatematica-8038405.pdf> Visitado el 3 de marzo de 2023.





PROSPECCIÓN CON SERPIENTES EN CUATRO DISTRITOS DE LA PROVINCIA DE CHIRIQUÍ CON APLICACIÓN DEL SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

SNAKE SURVEY IN FOUR DISTRICTS OF THE PROVINCE OF CHIRIQUI WITH THE APPLICATION OF THE GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM (GIS)

Marcelo Mack Prado

Universidad de Panamá, Centro para Investigaciones y Respuestas en Ofidología (CEREO), Panamá.

marmack24@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-3975-251X>

Víctor Martínez

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

victor.martinezc@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0003-4515-7725>

Arsenio Araúz.

Ministerio de Educación Panamá, Colegio Secundario de Volcán, Chiriquí.

arsenioarauz@yahoo.es

<https://orcid.org/0009-0008-4587-6512>

Kathania Herrera L.

Ministerio de Educación Panamá, Centro Educativo de Formación Integral Bilingüe China, Panamá

kathania.herrera@meduca.edu.pa

<https://orcid.org/0009-0003-9041-4425>

Fecha de recepción: 21 de diciembre de 2023

Fecha de aceptación: 7 de mayo de 2024

DOI [HTTPS://DOI.ORG/10.48204/J.TECNO.V26N2.A5409](https://doi.org/10.48204/J.TECNO.V26N2.A5409)

RESUMEN

Este estudio se centra en evaluar la diversidad de serpientes en los Distritos de Alanje, Bugaba, Boquerón y Renacimiento, en la provincia de Chiriquí, República de Panamá, considerando las influencias antropogénicas en los microhábitats. Además, abordamos la relación entre las fragmentaciones de los hábitats y la biodiversidad de serpientes, destacando la importancia de comprender el impacto humano en estas comunidades.

El muestreo lo desarrollamos a lo largo de dos años en las estaciones seca, lluviosa y las transiciones entre ambas, evaluando de forma aleatoria las áreas. Los 82 ejemplares pertenecen a 6 familias, siendo Colubridae y Viperidae las más representadas.



La proporción de especies no venenosas y venenosas fue de 7:4, resultando una prevalencia de las primeras. La curva de acumulación de especies sugiere que se alcanzó la saturación de especies al muestrear aproximadamente 50 ejemplares. Los resultados reflejan alta diversidad de serpientes en la región, con índices de biodiversidad que respaldan la variación en los hábitats prospectados.

La abundancia de especies como *Bothrops asper* es la de mayor peligro para la salud humana, así como la identificación de especies vulnerables resaltan la importancia de su conservación.

Los resultados proporcionan una visión adecuada de la diversidad de serpientes en los Distritos prospectados y demuestran la necesidad de continuar monitoreando y conservando estas poblaciones en el contexto de cambios ambientales y antropogénicos.

PALABRAS CLAVES

Prospección, serpiente, Sistema de Información Geográfica, georreferencia

ABSTRACT

This study focuses on evaluating the diversity of snakes in the Districts of Alanje, Bugaba, Boquerón, and Renacimiento, in the province of Chiriquí, Panama, considering anthropogenic influences on microhabitats. The research addresses the relationship between habitat fragmentation and snake biodiversity, highlighting the importance of understanding the human impact on these communities. Sampling was carried out over two years in different seasons, assessing random areas. Eighty-two specimens belonging to six families were identified, with Colubridae and Viperidae being the most represented. The ratio of non-venomous to venomous species was 7:4, indicating a prevalence of the former. The species accumulation curve suggests that species saturation was reached when approximately 50 individuals were sampled.

The results reflect high snake diversity in the region, with biodiversity indices that support the variability in the habitats studied. The abundance of medically important species such as *Bothrops asper* and the identification of vulnerable species highlight the importance of conservation.

This study provides a detailed overview of snake diversity in Chiriqui and establishes the need to continue monitoring and conserving these populations in a context of environmental and anthropogenic change.

KEY WORDS

Prospecting, snake, geographic information system, georeferencing.

INTRODUCCIÓN

Las modificaciones de origen antropogénico en ambientes naturales causa afectaciones en la estructura y composición de la vegetación, lo que afecta las condiciones ambientales de los microhábitats (Saunders *et al.*, 1991). A su vez, estos cambios generan, entre otros, la disminución de presas, poblaciones de serpientes, y en algunos casos causar extinciones (Prior & Weatherhead 1996, Gibbons *et al.*, 2000, Keller & Heske 2000, Dickerson 2001).



El análisis de la diversidad en grupos de animales es importante al tratar de evidenciar los efectos de las actividades antropogénicas en las comunidades ecológicas y comparar sus efectos en diferentes hábitats (Whittaker, 1972). Para las especies de serpientes, el mayor factor de amenaza es el impacto humano por la pérdida del hábitat, y las interacciones con los parámetros ambientales (Filippi & Luiselli, 2000).

Por su parte, la fragmentación de los bosques está relacionada con efectos negativos en la biodiversidad, y de hecho se considera causa de sus principales amenazas (Betts *et al.*, 2019; Kuipers *et al.*, 2021). Según Haddad *et al.* (2015), la fragmentación de los hábitats reduce la biodiversidad entre 13 y el 75%, lo que afecta las funciones clave de los ecosistemas al disminuir la biomasa y alterar los ciclos de nutrientes.

Para Panamá, varios estudios sobre reptiles y anfibios han aportado conocimientos sobre la riqueza, diversidad de especies, y distribución tanto a nivel nacional como regional. En el último Taller sobre el destino de la conservación de la herpetofauna en Panamá, se registraron 399 especies, de las cuales 228 fueron reptiles y 171 anfibios, lo cual representa el 4% de la biodiversidad global para ambos grupos. Esta cifra ha variado a la fecha por las numerosas descripciones recientes de nuevas especies (Young *et al.*, 2006). En tiempos recientes, los escasos inventarios referentes a la herpetofauna en la provincia de Chiriquí son referidos al Corregimiento de Los Algarrobos, Distrito de Dolega, como resultado de muestreos esporádicos (Lotzkat & Hertz, 2010).

Por otra parte, diversos investigadores consideran que algunas especies de reptiles pueden ser útiles para identificar posibles cambios ambientales (Muñoz *et al.*, 1996, Hager 1998, Hofer *et al.*, 2000) por tanto, es importante conocer la problemática del impacto de las actividades agrícola y ganadera sobre las serpientes, y los factores que desmejoran los hábitats porque favorecen la incidencia de encuentros y ataques por ellas, lo que permitirá adecuados manejos de los recursos naturales, aunado a la conservación de las serpientes (Chará, 2003).

MATERIALES Y MÉTODOS

El muestreo fue realizado en los Distritos de Alanje, Bugaba, Boquerón y Renacimiento, de la provincia de Chiriquí. Durante enero 2022 a diciembre del 2023 realizamos tres visitas a los Distritos precitados de noviembre a diciembre en temporada de lluvias y de enero a febrero en la seca.

Los muestreos fueron aleatorios en cada Distrito, y duraron 4 horas, tanto en horario diurno como nocturno. Las búsquedas fueron visuales y generalizadas.



Utilizamos tenazas y ganchos herpetológicos, guantes y bolsas de tela. La georreferenciación la realizamos con GPS marca Garmin GPSMAP 65, esto fue registrado en el programa ArcGis pro-3.1. También registramos la altura en metros sobre el nivel del mar, determinamos el tipo de perturbación antropogénica en cada área objeto del estudio.

En los casos donde los habitantes y estudiantes del Colegio Secundario de Volcán alertaran sobre serpientes, las ubicábamos, atrapábamos y documentamos fotográficamente. Todos los ejemplares obtenidos, fueron almacenados en vasijas de vidrio con alcohol en el Laboratorio de Biología del Colegio de Volcán. Ahí, anotamos fecha de colecta, colector y lugar de colecta. Posteriormente, fueron enviadas al Centro para Investigaciones y Respuestas en Ofidiología, donde realizábamos el registro de la georreferencia a cada serpiente.

Calculamos el Índice de Biodiversidad General usando el programa de Rstudios, en cada sitio de muestreo, lo que permitió hacer el análisis de diversidad de especies encontradas por área, según estuvieran asociados a zonas boscosas, zonas de cultivos, y viviendas.

RESULTADOS

Colectamos 82 ejemplares, 14 especies no venenosas y 8 venenosas, que pertenecen a 6 familias. Anomalepididae (1), Boidae (1), Colubridae (5), Dipsadidae (7), Elapidae (2) y Viperidae (6).

Presentamos las Figuras 1 y 2, donde resaltamos con símbolos a color, los cuatro Distritos donde trabajamos, las ubicaciones por categoría de Serpiente Venenosa y No Venenosa de cada especie encontrada. Las especies no venenosas pertenecen a las familias Anomalepididae, Boidae, Colubridae y Dipsadidae; mientras que las venenosas a Elapidae y Viperidae. La mayor diversidad correspondió a los distritos de Bugaba y Renacimiento.

En la curva de acumulación de especies, Figura 3, establecemos que la planificación del trabajo de muestreo, y la estimación del esfuerzo muestral, alcanzo la mejor representatividad de especies y el total de especies que estarían presentes en los distritos muestreados.

También representamos números totales de especies encontradas en función del esfuerzo de muestreo, en este caso, el número de ejemplares muestreados. la curva alcanza su asíntota para ambas especies (venenosas y no venenosas), Cuando se han muestreado 50 ejemplares aproximadamente, lo que sugiere que después de recolectar 50 ejemplares (ya sean venenosos o no venenosas) es probable que hayamos encontrado la mayoría de las especies presentes en la zona de muestreo.

La asíntota, es el límite teórico al que se aproxima la curva a medida que se incrementa el esfuerzo de muestreo. La densidad de especies en este punto es de 15 ejemplares. Esto podría interpretarse como alto nivel de diversidad en el área de estudio, ya que se están encontrando,



en promedio, 15 especies diferentes por cada 50 ejemplares muestreados. Esto puede deberse a factores como reducida distribución geográfica, la preferencia específica de hábitats, vulnerabilidad a factores ambientales y cambios producido por los cultivos desarrollados en la zona.

Figura 1.
Ubicación de las especies venenosas por Distrito.

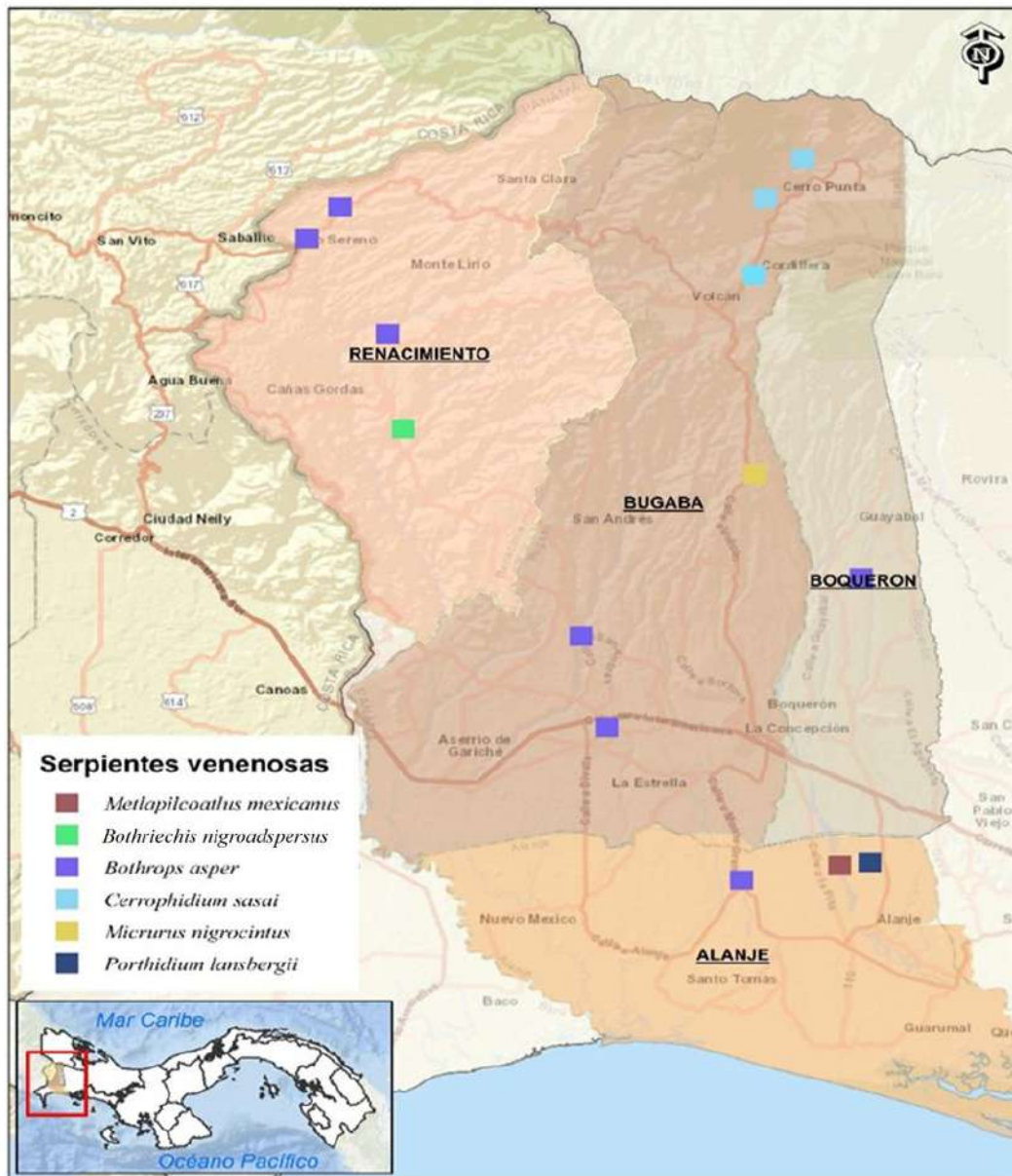
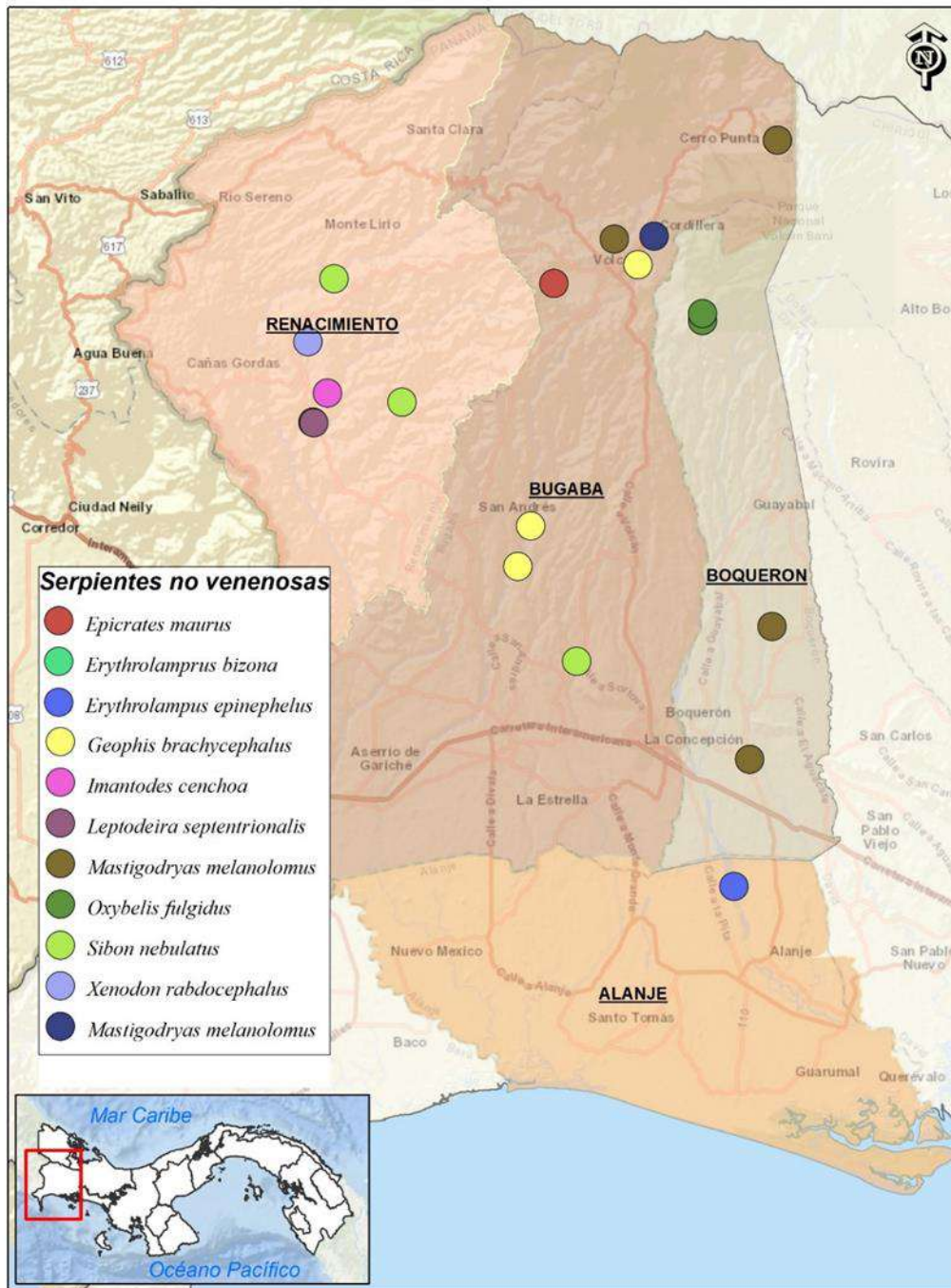


Figura 2.
Ubicación de las especies no venenosas por Distritos.

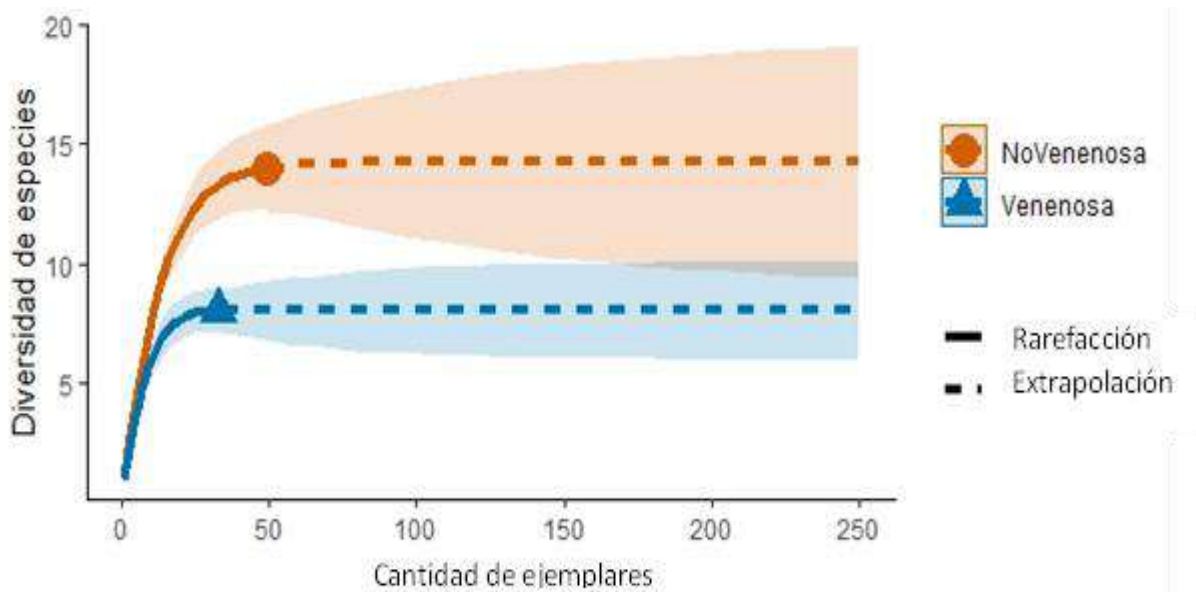


Las especies por familias con 1-3 ejemplares fueron Colubridae: *Phrynonax poecilonotus*, *Oxybelis fulgidus*, Elapidae: *Micrurus alleni*, *Micrurus nigrocinctus*, Viperidae: *Bothriechis nigroadspersus*. *Bothriechis lateralis* y Anomalepidae: *Anomalepis mexicanus*.

Las especies por familias con representación moderada (4-5 ejemplares) fueron Boidae: *Epicrates maurus*, Dipsadidae: *Erythrolamprus bizona*, *Geophis brachycephalus*, *Leptodeira ornata*, *Leptodeira rhombifera*, *Mastigodryas melanolomus*, *Tantilla ruficeps* y Viperidae: *Bothriechis nigroadspersus*. Estas especies, parecieran tener presencia más estable y mejores adaptaciones a la variedad más amplia de condiciones ambientales.

La proporción de especies no venenosas y venenosas fue 7:4, significando que, por cada 7 especies, no venenosas, se obtuvieron 4 especies venenosas. Con porcentaje de ejemplares de 59.76% no venenosas y 40.24% venenosas.

Figura 3.
Curva de rarefacción para acumulación de especies.



Cuadro 1.*Abundancia relativa de especies*

Familia	Nombre	Abundancia	A. relativa
Anomalepididae	<i>Anomalepis mexicanus</i>	3	0.037
Boidae	<i>Epicrates maurus</i>	4	0.049
Colubridae	<i>Mastigodryas melanolomus</i>	5	0.061
	<i>Oxybelis fulgidus</i>	2	0.024
	<i>Phrynonax poecilonotus</i>	1	0.012
	<i>Sibon nebulatus</i>	2	0.024
	<i>Tantilla ruficeps</i>	4	0.049
Dipsadidae	<i>Erythrolamprus bizona</i>	4	0.049
	<i>Erythrolamprus epinephelus</i>	3	0.037
	<i>Geophis brachycephalus</i>	5	0.061
	<i>Imantodes cenchoa</i>	3	0.037
	<i>Leptodeira ornata</i>	5	0.061
	<i>Leptodeira rhombifera</i>	5	0.061
Elapidae	<i>Ninia maculata</i>	3	0.037
	<i>Micrurus alleni</i>	3	0.037
	<i>Micrurus nigrocinctus</i>	3	0.037
Viperidae	<i>Bothriechis lateralis</i>	3	0.037
	<i>Bothriechis nigroadspersus</i>	4	0.049
	<i>Bothrops asper</i>	10	0.122
	<i>Cerrophidion sasai</i>	4	0.049
	<i>Metlapilcoatlus mexicanus</i>	4	0.049
	<i>Porthidium lansbergii</i>	2	0.024
TOTAL		82	



Figura 4.
Cantidad de serpientes no venenosas por familia

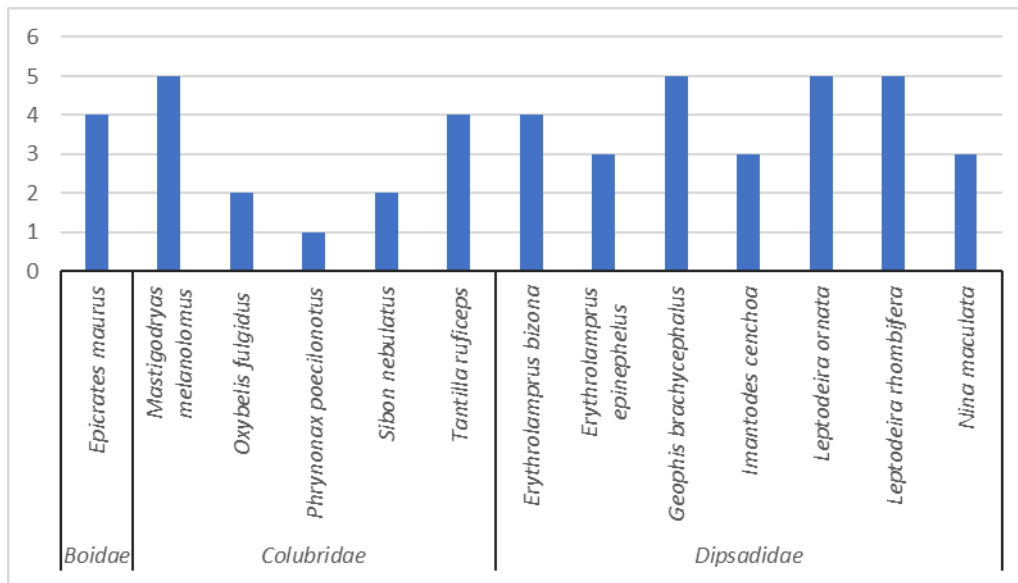
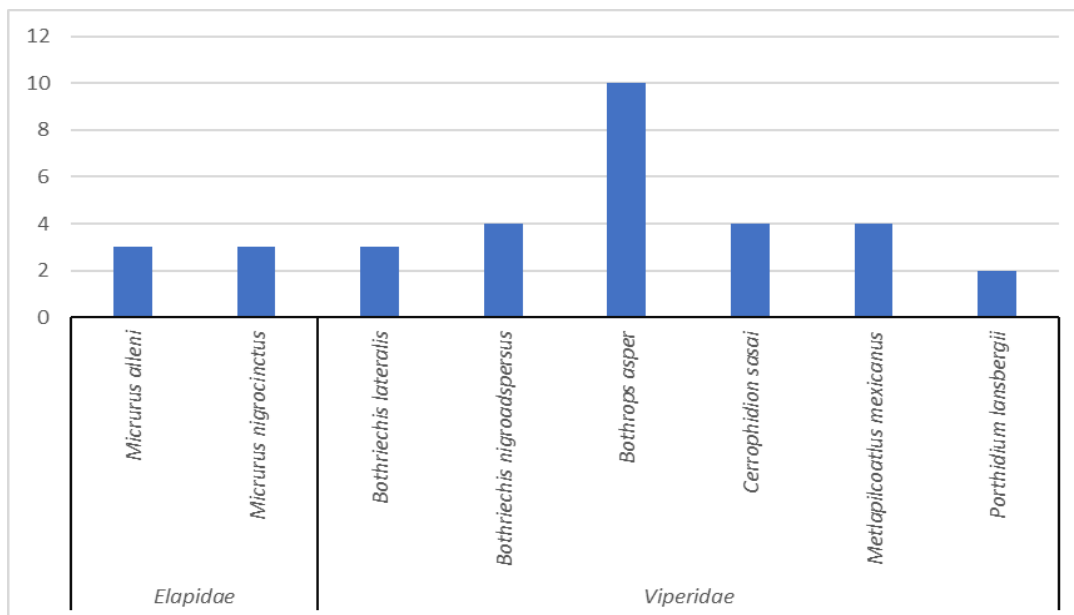


Figura 5.
Cantidad de serpientes venenosas por familia.



DISCUSIÓN

En la provincia de Chiriquí, habitan diversas especies de serpientes tanto venenosas como no venenosas, en este trabajo muestreamos cuatro (4) Distritos, con duración de 2 años y produjo como resultado, 14 géneros de serpientes no venenosas y 8 venenosas correspondientes a 6 familias, contando con diversidad muy representativa debido a que, de cada 7 especies no venenosas, capturamos 4 especies venenosas.

Encontrando 82 ejemplares 59.76% fueron no venenosas y el 40.24% venenosas, pese a la influencia antropogénica, registramos adecuada diversidad de serpientes, con poco tiempo de muestreo, demostrado por investigaciones y muestreo como el de Myers & Rand 1969, donde registraron entre 100 a 118 especies solo con 2 muestreos por temporada seca y lluviosa.

En este caso, el valor de $H' = 2.99$ indica alta diversidad de especies de serpientes, y valor de $D = 0.944$ indica alta probabilidad de que dos serpientes seleccionadas al azar sean de la misma especie, indicando menor diversidad del hábitat. Que según Lotzkat & Hertz 2010, alrededor de Los Algarrobos, con índices similares de diversidad, la naturaleza todavía se beneficia del paisaje heterogéneo de agricultura extensiva, sin industria ni demasiado desarrollo urbano.

En lista publicada por Camarillo-Rangel, 1993 se mencionan de 82 especies registradas incluyeron 44 especies adicionales en zonas cultivables en México y mencionan que esto se debe al bosque mesófilo de montaña que es el tipo de vegetación que tiene altos valores de riqueza de herpetofauna y tiene gran importancia en términos de conservación, por su ubicación geográfica, sus condiciones ambientales y su historia biogeográfica, le permiten albergar herpetofauna integrada por mezcla de especies variadas Camarillo-Rangel, 1993; Carvajal-Cogollo 2008, Urbina-Cardona et al., 2008; Ramírez-Bautista et al., 2014.

Para esta prospección los 82 ejemplares de serpientes no superan las 237 especies de reptiles en general reportadas por Young et al. (1999) para Chiriquí, significando que las poblaciones conocidas de la cercanía a la Ciudad de David se encuentran aisladas por las tierras bajas del pacífico del Oriente de Panamá, así como las ampliaciones de distribución según Lotzkat & Hertz, 2010.

La serpiente venenosa más reportada fue *Bothrops asper* con 10 ejemplares, la especie de menos encuentro fue *Porthidium lansbergii* con 2 ejemplares, la especie *Bothriechis nigroadpersus*, *Bothriechis lateralis* y *Cerrophidium sasai* 4 ejemplares cada uno y con índice de vulnerabilidad Ambiental Medio para *B. nigroadpersus* y Alto para *B. lateralis* y *C. sasai*, según Batista & Miranda, 2020, (Figura 4 y 5).



CONCLUSIONES

Se concluye que de 82 ejemplares de serpientes que pertenecen a seis (6) familias diferentes, podemos indicar alta diversidad de especies en los distritos muestreados y sugiere que las serpientes no venenosas son más prevalentes en los distritos muestreados.

La Curva de Rarefacción para Acumulación de Especies sugiere que después de recolectar 50 ejemplares, es probable que se haya encontrado la mayoría de las especies presentes en la zona de muestreo. Esto indica que el esfuerzo de muestreo fue suficiente para capturar la diversidad de especies en los distritos muestreados.

Según la proporción de especies, no venenosas y venenosas concluimos que, aunque las serpientes no venenosas son más prevalentes, todavía hay cantidad significativa de serpientes venenosas presentes en los distritos muestreados.

Basándonos en los índices de diversidad calculados, concluimos que existe alta diversidad de serpientes, e indica homogeneidad en los hábitats de las zonas de muestreos.

En conclusión, aunque la diversidad de serpientes en la zona es significativa y la distribución en el muestreo realizado es bastante uniforme, consideramos importante continuar los muestreos para evaluar su evolución y establecer estrategias de conservación basado en el impacto de las actividades humanas (urbanización y agricultura) en los Distritos muestreados, aunque esto representa desafíos de conservación que deben abordarse para mantener la salud y la estabilidad de las poblaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Camarillo-Rangel, J. L. (1993). Algunos aspectos biogeográficos de los anfibios y reptiles de la zona xerófila de Hidalgo. En M. A. Villavicencio, Y. Marmolejo-Santillán y B. E. Pérez (Eds.), Investigaciones recientes sobre flora y fauna de Hidalgo, México (pp. 415–432). Pachuca, Hidalgo: Centro de Investigaciones Biológicas, División de Investigación, Universidad Nacional Autónoma de Hidalgo.

Chará, J. (2003). Manual para la Evaluación Biológica de Ambientes Acuáticos en Microcuencas Ganaderas. CIPAV. Cali, CO. 76 p.; Pedraza, G; Giraldo, L; Hincapié, D. 2007. Efecto de los corredores ribereños sobre el estado de quebradas en la zona ganadera del río La Vieja, Colombia. *Agroforestería en las Américas* 45:72-78.

Dickerson, N. (2001) Riparian Habitat Management for Reptiles and Amphibians on Corps of Engineers Projects. ERDC TN-EMRRP-SI-22 August 2001.



- Dunn, E. R., & Dowling, H. G. (1957). The Neotropical Snake Genus *Nothopsis* Cope. *Copeia*, 1957(4), 255–261. <https://doi.org/10.2307/1439148>.
- Dunn, E.R. (1947). Snakes of the Lerida Farm (Chiriqui Volcano, western Panama). *Copeia* 1947: 153-157.
- Elizondo, L., Martínez Cortés, V. & Yáñez, F. (2007). Reptiles en la Reserva Forestal La Tronosa: Diversidad y Estado de Conservación. *Tecnociencia*. 9(1):51-64.
- Filippi, E. & Luiselli, L. (2000). Status of the Italian snake fauna and assessment of conservation. *Biological Conservation* 93:219-225.
- Gibbons, J.W., Scott, D.E. Ryan, T.J. Buhlmann, K.A.. Tuberville, T.D Metts, B.S.. Greene, J.L Mills, T. Leiden, Y. Poppy S. & Winner, C.T. (2000). The global decline of reptiles, de´ja` vu amphibians. *Bioscience* 50: 653–661.
- Haddad, N. M., Brudvig, L. A., Clobert, J., Davies, K. F., Gonzalez, A., Holt, R. D., Townshend, J. R. (2015). Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth’s ecosystems. *Science Advances*, 1(2), 1-10. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500052>.
- Heyer, W.R.; Donnelly, M.A.; McDiarmid, R.W.; Hayek, L.A. & Foster, M.S. (1994). Measuring and monitoring Biological Diversity. Standard Methods for Amphibians. Smithsonian Institution Press, Washington, and London.
- Hofer, U., L.F. Bersier & D. Borcard. 2000. Ecotones and gradients as determinants of herpetofaunal community structure in the primary forest of Mount Kupe, Cameroon. *Journal of Tropical Ecology* 16: 517-533.
- Keller, L. & Heske, E. (2000). Habitat Use by Three species of Snakes at the Middle Fork Fish and Wildlife area Illinois. *Journal of Herpetology* 34:558-564.
- Kuipers, K. J. J., Hilbers, J. P., Garcia-Ulloa, J., Graae, B. J., May, R., Verones, F., Huijbregts, M. A. J., & Schipper, A. M. (2021). Habitat fragmentation amplifies threats from habitat loss to mammal diversity across the world’s terrestrial ecoregions. *One Earth*, 4(10), 1505–13.
- Lotzkat, S. (2010). Reptiles de Los Algarrobos y las tierras bajas de Chiriquí. http://www.senckenberg.de/root/index.php?page_id=13315.
- Martínez Cortés, V. & Rodríguez, A. (2005). Datos Preliminares Sobre los Anfibios y Reptiles de Bahía Honda e Isla Canales de Tierra (Veraguas, Panamá). Capítulo X. Pp. 571-622. En: S. Castroviejo y A. Ibáñez (Eds.). Estudios Sobre la Biodiversidad



de la Región de Bahía Honda (Veraguas, Panamá). Biblioteca de Ciencias, 20. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Instituto de España. Real Academia de Ciencias Exactas, físicas y Naturales. 835.

Martínez Cortés, V., Rodríguez, A. & Garibaldi, C. (2004b). Inventario de Reptiles en los Bosques Fragmentados de la Reserva Forestal El Montuoso. Pp. 119-137. En: C. Garibaldi (Ed.). Diversidad Biológica y Servicios Ambientales de los Fragmentos de Bosques en la Reserva Forestal El Montuoso, Panamá. Instituto de Ciencias Ambientales y Biodiversidad (ICAB). Universidad de Panamá y Agencia Japonesa de Cooperación Internacional (JICA). 210p.

Martínez Cortés, V. (2000a). Componente de Herpetología. Pp. 87-97. En: R. Alvarado, E. González & D. Hernández (Eds.). Informe Final de la Evaluación Ecológica Rápida en el Parque Nacional G. D. Omar Torrijos Herrera (El Copé, Panamá). 169.

Martínez Cortés, V. (2000b). Herpetofauna encontrada en las Serranías de "Pirre" y "Sapo", Parque Nacional Darién. Pp. 42-53. En: Garibaldi, C. (Ed.). Informe Final del Proyecto de Evaluación de la Biodiversidad en los Bosques del Parque Nacional Darién. Proyecto: ICAB-BIODARIEN-ANAM-PNUD-GEF. p.192.

Martínez Cortés, V., Rodríguez, A. & Rodríguez, H. (1999a). Inventario Herpetofaunístico Preliminar en Isla Leones. Golfo de Montijo, Provincia de Veraguas, República de Panamá. *Scientia*. 14:79-94.

Martínez Cortés, V. (1999b). Caracterización de la herpetofauna del Parque Nacional Cerro Hoya. Pp. 95-112. En: R. Alvarado y D. Hernández (Eds.). Parque Nacional Cerro Hoya. Proyecto de Desarrollo Sostenible del Parque Nacional Cerro Hoya y su Zona de Vecindad. Autoridad Nacional del Ambiente (ANAM) y ECO-GTZ, Alemania.

Martínez Cortés, V. (1994b). Diversidad Herpetofaunística en los Cerros "Narices" y "La Anselma". Provincia de Veraguas. Distrito de Santa Fé. *Scientia* (Panamá). 9(1):59-80.

Martínez Cortés, V. & Rodríguez, A. (1992). Del Primer Inventario en "Cerro Tute". Amphibia: Caudata y anura. Reptilia: Squamata. Sauria y Serpentes. *Scientia*. 7(2):29-53.

Martínez Cortés, V. 1983a. Panamá: Nuevo ámbito de distribución para la Serpiente Venenosa *Bothrops picadoi* (Dunn). *ConCiencia* (Panamá). 10:26-27.

Martínez Cortés, V. (1983b). The Bushmaster, *Lachesis muta muta* (Linnaeus) (Ophidia: Viperidae) in Panama. *Rev. Biol. Trop.* (Costa Rica). 30:100-101.



- Monteza Moreno, C. M., Ramos, C., Martínez Cortés, V. & Sasa, M. (2020). On the identity of hoge-nosed pit vipers from western Panama. A review of specimens of *Porthidium lansbergii* (Schlegel,1841). In lower Central America. *Tecnociencia*. 22 (2). 27-44.
- Pérez Santos, C. & V. Martínez Cortés. 1997. Serpientes del Parque Nacional de Coiba (Panamá). Pp. 445-456. En: S. Castroviejo (Ed.). Flora y Fauna del Parque Nacional de Coiba (Panamá). Agencia Española de Cooperación Internacional (AECI). 534p.
- Saunders, D., Hobbs, R. & Margules C. (1991). Biological consequences of ecosystem fragmentation: A review. *Conservation Biology* 5: 18-32.
- Slevin, J.R. (1942). Notes on a collection of reptiles from Boquete, Panama, with the description of a new species of *Hydromorphus*. *Proceedings of the California Academy of Sciences*, 4th series, 23(32): 463-480.
- Trotman J.L, & Gerra Hils, E. (2019). Datos sobre los Anfibios y Reptiles de la Estación Bilógica Alto Chiquero, Parque Nacional Volcán Barú, Panamá. Taller: Introducción a la Herpetología Mesoamericana y sus aplicaciones. 1: 15 –19.
- Walters, V. (1953). Notes on reptiles and amphibians from el Volcan de Chiriquí, Panamá. *Copeia* 1953: 125-127.
- Whittaker, R. (1972). Evolution and measurement of species diversity. *Taxon* 21:213-251.





LAS AVES DE LA RESERVA HÍDRICA DEL CERRO TUREGA, DISTRITO DE PENONOMÉ, PROVINCIA DE COCLÉ, PANAMÁ

THE BIRDS OF THE CERRO TUREGA WATER RESERVE, PENONOMÉ DISTRICT, COCLÉ PROVINCE, PANAMA

Marlenys E Aguilar

Universidad de Panamá, Centro Regional Universitario de Coclé, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Panamá.

eilym9406@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0009-4477-6699>

Jacobo Araúz G.

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

jacobo.arauz@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0003-4143-8300>

Ana María Jiménez

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

ana.jimenez@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0002-6419-4655>

Ricardo Pérez

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

ricardolabs2013@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-4250-3381>

Fecha de recepción: 24 de julio de 2023

Fecha de aceptación: 13 de mayo de 2024

DOI [HTTPS://DOI.ORG/10.48204/J.TECNO.V26N2.A5411](https://doi.org/10.48204/J.TECNO.V26N2.A5411)

RESUMEN

Se realizó el primer estudio sobre las aves de la Reserva Hídrica del Cerro Turega (RHCT), ubicada en la Cordillera Central, provincia de Coclé, Panamá. La Reserva forma parte de la cadena montañosa de la parte central del istmo de Panamá y forma parte del Corredor Biológico Mesoamericano. Se efectuaron muestreos entre febrero y mayo de 2021 con el fin de estudiar la riqueza y diversidad de aves en la RHCT. La toma de datos se realizó durante 32 días, y se utilizaron tres redes de niebla de 12 m de largo y 2.5 m de alto, abiertas desde las 7:00 am hasta las 11:00 am. En hora de la tarde, entre 1:00 a 5:00 pm se hicieron búsquedas generalizadas y conteos por punto. La reserva posee una vegetación leñosa y de rastrojo, área intervenida con cultivos agrícolas y reducto boscoso. Se registraron 476 individuos de 100 especies, incluidos en 29 familias y



10 órdenes. Entre las especies con mayor abundancia estuvieron la chachalaca cabecigrís (*Ortalis cinereiceps*), eufonia piquigruesa (*Euphonia lanirostris*), mielero patirrojo (*Cyanerpes cyaneus*), tangara dorsirroja (*Ramphocelus dimidiatus*), golondrina alirrasposa sureña (*Stelgidopteryx ruficollis*), amazilia colirrufa (*Amazilia tzacatl*) y calzonario de buffon (*Chalybura buffonii*). Se registraron nueve migratorias, incluidas en cinco familias y dos órdenes, entre ellas el gavilán aludo (*Buteo platypterus*), elanio tijereta (*Elanoides forficatus*), tangara escarlata (*Piranga olivácea*), reinita pechicastaña (*Setophaga castanea*), reinita collareja (*Cardellina canadensis*), reinita trepadora (*Mniotilta varia*), vireo verdiamarillo (*Vireo flavoviridis*). Se identificaron 43 especies consideradas amenazadas, distribuidas en 12 familias y siete órdenes. En cuánto aves amenazadas observadas registramos loro cabeciazul (*Pionus menstruus*), tucancillo collarejo (*Pteroglossus torquatus*), tucán pico iris (*Ramphastos sulfuratus*). Entre las principales presiones sobre la reserva están la deforestación y el uso de agroquímicos para los sembradíos. Este estudio pionero brinda información para futuras investigaciones que se realicen en la zona y áreas aledañas, pues ahora se conoce que la RHCT posee las condiciones de hábitat apropiadas para aves residentes y migratorias.

PALABRAS CLAVES

Aves residentes, Cerro Turega, aves migratorias, aves amenazadas, diversidad biológica

ABSTRACT

The first study was carried out on the birds of the Cerro Turega Water Reserve (RHCT), located in the Central Mountain Range, province of Coclé, Panama. The Reserve is part of the mountain chain of the central part of the isthmus of Panama and is part of the Mesoamerican Biological Corridor. Sampling was carried out between February and May 2021 in order to study the richness and diversity of birds in the RHCT. Data collection was carried out for 32 days, and three fog nets 12 m long and 2.5 m high were used, open from 7:00 am to 11:00 am. In the afternoon, between 1:00 to 5:00 pm, generalized searches and counts were carried out by point. 476 individuals of 100 species were recorded, included in 29 families and 10 orders. Among the most abundant species were the Grey-headed Chachalaca (*Ortalis cinereiceps*), Thick-billed Euphonia (*Euphonia lanirostris*), Red-legged Honeycreeper (*Cyanerpes cyaneus*), Crimson-backed Tanager (*Ramphocelus dimidiatus*), Southern Rough-winged Swallow (*Stelgidopteryx ruficollis*), Rufous-tailed Hummingbird (*Amazilia tzacatl*) and White-vented Plumeleteer (*Chalybura buffonii*). Among the species observed, nine are migratory, included in five families and two orders. Some migratory birds present: Broad-winged Hawk (*Buteo platypterus*), Swallow-tailed Kite (*Elanoides forficatus*), Scarlet Tanager (*Piranga olivácea*), Bay-breasted Warbler (*Setophaga castanea*), Canada Warbler (*Cardellina canadensis*), Black-and-white Warbler (*Mniotilta varia*), Yellow-green vireo (*Vireo flavoviridis*) among other species. In addition, 43 species considered threatened were identified, distributed in 12 families and seven orders. As endangered birds observed, we recorded Blue-headed Parrot (*Pionus menstruus*), Collared Aracari (*Pteroglossus torquatus*), Keel-billed Toucan (*Ramphastos sulfuratus*), etc. One of the main threats in the reserve is the deforestation and the use of agrochemicals for the crops. This pioneering study provides information for future research and surrounding areas, as it is now known that the RHCT has the appropriate habitat conditions for resident and migratory birds.

KEY WORDS

Cerro Turega, resident birds, migratory birds, threatened birds, biodiversity.



INTRODUCCIÓN

Actualmente factores como la actividad agropecuaria, el desarrollo urbano sin control, explotación maderera y la minería metálica a cielo abierto causan la destrucción de del hábitat, modifican las estructuras naturales de comunidades y ecosistemas, e interrumpen los procesos ecológicos lo que conlleva a la desaparición de las especies de aves y otros grupos faunísticos (Grimm *et al.*, 2008; Benny-Celestino, 2014; Guevara, 2021).

La diversidad y abundancia de especies es un tema central tanto en Ecología de Comunidades, como en Biología de la Conservación debido a su relación con el funcionamiento de los ecosistemas, su productividad y su estabilidad (Rodríguez-Arias *et al.*, 2017). Las aves contribuyen al sustento y el bienestar de los seres humanos, proporcionando alimento y materia prima. Además, son indispensables en los ecosistemas en procesos como polinizadores de muchas especies de plantas silvestres e incluso de plantas cultivadas, otras son carroñeras, dispersoras de semillas y controladoras de plagas, entre otras funciones ecológicas (Feria *et al.*, 2013; Salas-Correa & Mancera-Rodríguez, 2020).

Según datos de AUDUBON (2022) para el Istmo de Panamá se conocen unas 1019 especies de aves, siendo esta cifra más alta que el número de especies de todo Canadá y Estados Unidos. Esta riqueza de especies incluye aves migratorias, con cerca de 150 especies, las cuales pasan por diferentes regiones de nuestro país cada año en sus extraordinarias jornadas de viajes hacia América del Sur y viceversa. No obstante, aún se desconoce con exactitud cuáles son las áreas más visitadas por estas, durante su proceso de migración (Guevara & Samudio, 2021).

En el caso específico de la provincia de Coclé, muchos ambientes de esta región son importantes áreas de concentración de aves durante los períodos de muda de plumaje o la migración anual, también en busca de sitios de reposo, refugio y alimento (González-Parejo & Turizo, 2015; Pérez *et al.*, 2016). Sin embargo, para esta provincia son escasos los estudios que se han efectuado para conocer la riqueza, diversidad y abundancia de aves, sobre todo en áreas protegidas del norte de Coclé.

Una de estas áreas es la Reserva Hídrica de Cerro Turega, nombrada patrimonio forestal del Estado mediante acuerdo Municipal 003 del 31 de marzo del 2005 y la Gaceta Oficial 25,297 del 12 de mayo del 2005, que cuenta con una extensión de 602 hectáreas (Sosa-Bartuano, 2017; Núñez *et al.*, 2018). Esta reserva representa un refugio potencial para las aves por los recursos ecosistémicos que brinda, sin embargo, diversas actividades antropogénicas, como la ganadería, la agricultura de subsistencia y la construcción de acueductos rurales pueden afectar a largo plazo la diversidad de especies. Por ello, en este estudio nos enfocamos en conocer la riqueza, diversidad y abundancia de avifauna en la Reserva Hídrica, para contribuir a expandir la poca información del área de estudio, además de servir como base para futuros estudios biológicos.



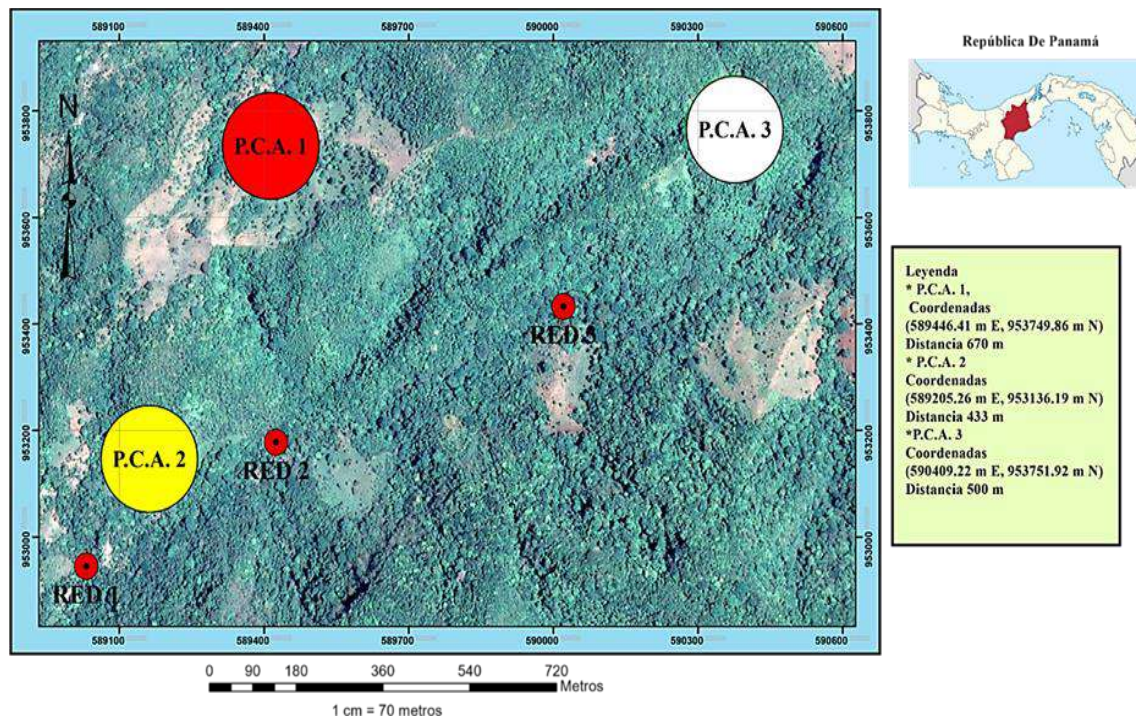
MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de Estudio

El estudio se llevó a cabo en la Reserva Hídrica del Cerro Turega (Figura 1), ubicada en el corregimiento de Pajonal, distrito de Penonomé, provincia de Coclé, República de Panamá (N 08°37'09.4" y W 080°11'26.8"). La reserva tiene una extensión de 602 ha y corresponde a la zona de vida denominada Bosque Húmedo Premontano, cuya altitud varía entre los 410 y 600 msnm, mientras que la temperatura oscila en un promedio de 21°C, con una cobertura de vegetación leñosa y de rastrojo (Sosa-Bartuano, 2017; Núñez *et al.*, 2018) (Figura 1).

Figura 1.

Zonas de muestreo donde se colocaron las redes y puntos de conteos de aves (P.C.A 1, 2 y 3), en la Reserva Hídrica del Cerro Turega, Coclé, Panamá.



La RHCT contiene bosques de galería, secundarios y en varios niveles de regeneración e incluye también cultivos agrícolas como arroz, yuca, café, plátano y maíz. También algunos lugareños realizan actividad ganadera (Reyes-Ledezma *et al.*, 2020). La vegetación dominante en la zona es bosque lluvioso tropical.



METODOLOGÍA DE CAMPO

Se hicieron muestreos de febrero a mayo del año 2021, lo que corresponde principalmente a la estación seca. Se realizaron giras al campo dos veces por mes, que abarcaron cuatro días cada una. Para caracterizar la avifauna se utilizaron tres técnicas de colecta de datos: redes de nieblas, búsqueda generalizada y puntos de conteo. Los senderos establecidos en el área de estudio fueron georreferenciados tomando sus coordenadas mediante la utilización de GPS Etrex 30 Garmin. Los métodos se describen a continuación.

Captura con redes

Para la captura de las aves se realizaron mediante tres redes de nieblas, de 12 m de largo por 2.5 m de alto y 36 mm de malla. Las redes fueron colocadas a lo largo de caminos y la distancia entre ellas fue de unos 200 metros, cubriendo un área aproximada de medio kilómetro. Las redes fueron abiertas desde las 7:00 a.m. hasta las 11:00 a.m. y fueron revisadas a intervalos de 30 minutos siguiendo la metodología utilizada por Araúz & González (2010) (Figura 1).

Los individuos atrapados en las redes fueron colocados en bolsas de tela e inmediatamente fueron identificadas utilizando la Guía de Aves de Panamá de Angehr & Dean (2010). Además del nombre científico, se tomó datos sobre las condiciones del clima, fecha y la hora de captura y el número de red. Esta información se registró en formularios impresos y en cuadernos de apuntes (Figura 1). Una vez identificada el ave se le tomó fotos, cabe señalar que las aves capturadas fueron marcadas cortándole de forma diagonal una pluma de la cola (lado derecho) para conocer las recapturas, posteriormente fueron liberadas cerca al sitio de captura (Polanco *et al.*, 2015).

Búsqueda generalizada

Se hicieron recorridos para la detección de aves desde la 1:00 p.m. hasta la 5:00 p.m. Sin embargo, también hacía anotaciones de las aves observadas cuando iba a revisar las redes (durante la mañana) (Figura 1). Para la identificación de las aves se hizo mediante binoculares Bushnell 10x42 y la Guía de Aves de Panamá de Angehr & Dean (2010), y el listado de aves Avibase (Lepage, 2022). Además, se tomaron fotos con una cámara profesional Canon EOS RebelT100, tanto para aves en libertad como las que fueron atrapadas en las redes, lo que ayudó a la identificación de algunas de ellas.

Análisis de los datos

Para determinar si los datos obtenidos en los muestreos fueron representativos de la riqueza de especies de aves de la RHCT se hicieron curvas de acumulación de especies, para ello se utilizó el programa Estimates 9.1 (Colwell, 2013). La diversidad y dominancia se calcularon mediante el programa Past 4.03



RESULTADOS

Esfuerzo de muestreo

La colecta de datos se efectuó por cuatro meses, durante ocho visitas al campo y tres observadores, lográndose un esfuerzo total de 190.74 horas, de ellas 384 horas/red y 762:96 horas por búsqueda generalizada (Tabla 1).

Diversidad total

Se registró un total de 476 individuos de aves en la Reserva Hídrica Cerro Turega, 154 individuos capturados en redes de nieblas y 322 individuos observados de forma directa. Esos individuos correspondieron a 100 especies, incluidas en 29 familias y 10 órdenes. Mientras las especies registradas por redes fue de 152 y mediante observación 213.

Tabla 1.

Esfuerzo de muestreo realizado en los meses de febrero-mayo 2021.

Muestreos	Redes de niebla				Búsqueda generalizada				
	# de días	Cantidad de redes	# Horas	Total	Km Muestreados	# de días	observadores	# Horas	Total
5-8 de febrero	4	3	4	48	1.50 km	4			93:96
19-22 de febrero	4	3	4	48	1.54 km	4	3	7:83	102.0
5-8 de marzo	4	3	4	48	1.30 km	4	3	8:50	93:00
19-22 de marzo	4	3	4	48	1.67 km	4	3	7:75	78:00
9-12 de abril	4	3	4	48	1.53 km	4	3	6:50	96:00
23-26 de abril	4	3	4	48	1.31 km	4	3	8:00	99:00
5-8 de mayo	4	3	4	48	1.80 km	4	3	8:25	96:00
21-24 de mayo	4	3	4	48	2.00 km	4	3	8:00	105:00
				384	12.65 km	32		190.74	762:96
	Total, Horas/red					días		horas/hombre	Horas

Las curvas de rarefacción para la Reserva Hídrica de Cerro Turega apuntan que con el esfuerzo aplicado se obtuvo una buena estimación en la riqueza de especies de aves. Esta afirmación queda respaldada con las curvas que resultaron de los estimadores no paramétricos Chao1 y Ace Mean, los cuales prevén que para la RHCT podría haber un estimado entre 115 y unas 124 especies de aves (Figura 2). No obstante, el estimador Chao 1 es el más preciso (Villarreal *et al.*, 2004) y calcula que para la RHCT puede haber unas 115 especies, de las cuales en este estudio se detectó cerca de un 81% (100 especies).



Abundancia por órdenes

Los órdenes más abundantes en la RHCT fueron: Passeriformes con 295 individuos (61.97%) y 61 especies (60.40%). Le siguió Apodiformes con 78 individuos (16.42%) y 18 especies (18.81%), y otros órdenes menos representados como Galliformes con 25 individuos (5.26%) y una (1) especie (0.99%) y Accipitriformes con 20 individuos (4.21 %) y 5 especies (5%) (Tabla 2).

Figura 2.

Curva acumulativa y de rarefacción estimadas para la Reserva Hídrica de Cerro Turega.

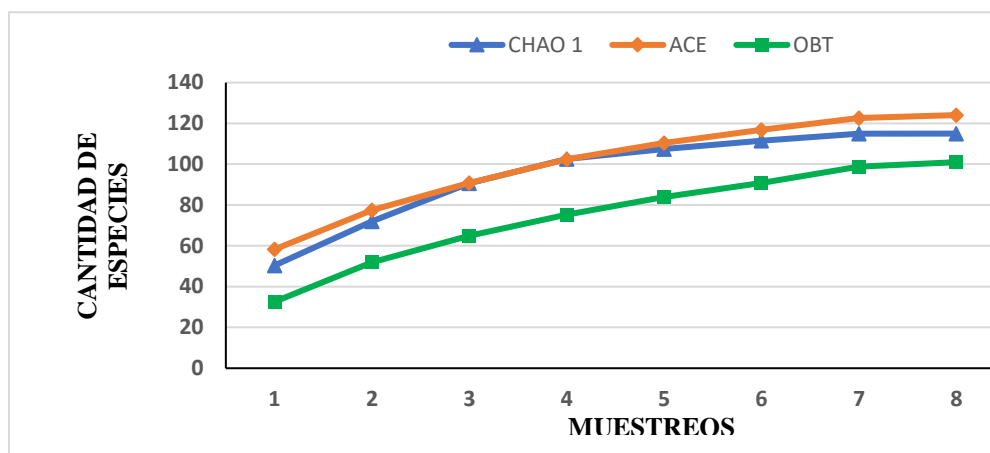


Tabla 2.

Abundancia de órdenes de aves en la Reserva Hídrica de Cerro Turega entre los meses de febrero-mayo de 2021.

Órdenes	Abundancia Absoluta	Abundancia Relativa	Porcentaje en riqueza de especies
Galliformes	25	5.26	1.00
Columbiformes	4	0.84	2.00
Cuculiformes	3	0.63	1.00
Apodiformes	78	16.39	18.00
Accipitriformes	20	4.21	5.00
Trogoniformes	9	1.90	3.00
Coraciiformes	15	3.15	3.00
Piciformes	20	4.20	4.00
Psittaciformes	7	1.47	1.00
Passeriformes	295	61.97	61.00
Total	476	100.00	100.00



Abundancia por familias:

Entre las 29 familias registradas, las más abundantes fueron: Trochilidae con 78 individuos (16.4%) y 18 especies (18 %), Thraupidae con 77 individuos (16.2 %) y 14 especies registradas (14%), y Tyrannidae con 51 individuos (10.7%) y 13 especies observadas (13%) (Tabla 3).

Tabla 3.

Abundancia de familias de aves en la Reserva Hídrica de Cerro Turega entre los meses de febrero-mayo 2021.

Familia	Abundancia absoluta	Abundancia Relativa (%)	Porcentaje de riqueza de especies
Cracidae	25	5.25	1.00
Columbidae	4	0.84	2.00
Cuculidae	3	0.63	1.00
Trochilidae	78	16.39	18.00
Accipitridae	20	4.20	5.00
Trogonidae	9	1.89	3.00
Momotidae	13	2.73	2.00
Alcedinidae	2	0.42	1.00
Ramphastidae	18	3.78	2.00
Picidae	2	0.42	2.00
Psittacidae	7	1.47	1.00
Thamnophilidae	5	1.05	3.00
Furnariidae	16	3.36	4.00
Pipridae	8	1.68	2.00
Tityridae	9	1.89	2.00
Onychorhynchidae	1	0.21	1.00
Tyrannidae	51	10.71	13.00
Vireonidae	1	0.21	1.00
Corvidae	10	2.10	1.00
Hirundinidae	18	3.78	1.00
Troglodytidae	12	2.52	4.00
Turdidae	9	1.89	1.00
Fringillidae	27	5.67	3.00
Icteridae	19	3.99	2.00
Parulidae	26	5.46	6.00
Mitrospingidae	1	0.21	1.00
Cardinalidae	5	1.05	3.00
Thraupidae	77	16.18	14.00
	476	100.00	100.00



Abundancia por especies

La especie más abundante correspondió a la chachalaca cabecigrís o paisana (*Ortalis cinereiceps*), cuya abundancia representó el 5.25% de toda la muestra. Le siguió la eufonía piquigruesa (*Euphonia laniirostris*) con 4.62%, la tangara dorsirroja (*Ramphocelus dimidiatus*) estas dos últimas especies con 4.20%. Cabe destacar que el mielero patirrojo es una especie que habita principalmente en tierras bajas en ecotonos de bosques tropicales; muy adaptable a plantaciones de café, cítricos y cacao, cultivos que se encuentran en los alrededores de la reserva, pertenecientes a los pobladores del sitio (Tabla 4).

Tabla 4.

Especies más abundantes en la Reserva Hídrica de Cerro Turega entre los meses de febrero-mayo 2021.

Orden	Familia	Especie	Individuos	%	
Galliformes	Cracidae	<i>Ortalis cinereiceps</i>	25	5.25	
Apodiformes	Trochilidae	<i>Phaethornis longirostris</i>	10	2.10	
		<i>Klais guimeti</i>	11	2.31	
		<i>Chalybura buffonii</i>	14	2.94	
		<i>Amazilia tzacatl</i>	14	2.94	
Accipitriformes	Accipitridae	<i>Elanoides forficatus</i>	8	1.68	
Coraciiformes	Momotidae	<i>Electron platyrhynchum</i>	9	1.89	
Piciformes	Ramphastidae	<i>Pteroglossus torquatus</i>	8	1.68	
		<i>Ramphastos sulfuratus</i>	10	2.10	
Psittaciformes	Psittacidae	<i>Pionus menstruus</i>	7	1.47	
Passeriformes	Tyrannidae	<i>Myiozetetes similis</i>	11	2.31	
		Corvidae	<i>Cyanocorax affinis</i>	10	2.10
	Hirundinidae	<i>Stelgidopteryx ruficollis</i>	18	3.78	
	Turdidae	<i>Turdus grayi</i>	9	1.89	
	Fringillidae	<i>Euphonia laniirostris</i>	22	4.62	
	Icteridae	<i>Psarocolius decumanus</i>	11	2.31	
	Thraupidae		<i>Ramphocelus dimidiatus</i>	20	4.20
			<i>Cyanerpes cyaneus</i>	20	4.20
	Parulidae		<i>Myiothlypis fulvicauda</i>	6	1.26
			<i>Basileuterus rufifrons</i>	6	1.26
<i>Electron platyrhynchum</i>			9	1.89	
Coraciiformes	Momotidae	<i>Baryphthengus martii</i>	4	0.84	
		Alcedinidae	<i>Chloroceryle amazona</i>	2	0.42
Trogoniformes	Trogonidae	<i>Trogon caligatus</i>	4	0.84	
		<i>Trogon rufus</i>	3	0.63	
		<i>Trogon massena</i>	2	0.42	



Otra especie abundante fue la golondrina alirrasposa sureña (*Stelgidopteryx ruficollis*), representada por el 3.78% de abundancia en el sitio, además de dos especies de colibríes: la amazilia colirrufa (*Amazilia tzacatl*) y el calzonario de Buffon (*Chalybura buffonii*), ambas con un 2.94% de abundancia (Tabla 4).

Diversidad

La diversidad para el área de estudio fue alta ($H' = 4.18$), lo que también queda reflejado en el valor de dominancia que fue muy bajo ($D' = 0.02$). Estos valores indican que hubo una gran uniformidad respecto a la abundancia de especies de aves.

Aves migratorias y residentes

Se registró un total nueve especies de aves migratorias (9%) comprendidas en dos órdenes y cinco familias. La familia Accipitridae fue la más abundante, donde *Elanoides forficatus* registró ocho individuos (Tabla 5). En lo que respecta a especies residentes, se contabilizaron 90 especies pertenecientes a 26 familias y 10 órdenes, siendo la más abundante el orden Passeriformes con 58 especies y 15 familias.

Especies Amenazadas

Se registraron 43 especies consideradas bajo algún grado de amenaza, distribuidas en siete órdenes y 12 familias. De acuerdo con datos de la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES) se registraron 23 especies amenazadas en Apéndice II. Mientras que, para las Autoridades Panameñas, en este caso Mi Ambiente 2016, se reportan 31 especies en estado vulnerable (Tabla 5).

Tabla 5.

Estado de conservación de las especies encontradas en la Reserva Hídrica de Cerro Turega.

TAXÓN	CITES	Mi Ambiente
		2016
<i>Ortalis cinereiceps</i>	II	VU
<i>Florisuga mellivora</i>	II	VU
<i>Eutoxeres aquila</i>		VU
<i>Glaucis hirsutus</i>	II	VU
<i>Threnetes ruckeri</i>	II	VU
<i>Phaethornis guy</i>	II	VU
<i>Phaethornis longirostris</i>	II	VU
<i>Phaethornis striigularis</i>		VU
<i>Colibri delphinae</i>	II	EN
<i>Heliothryx barroti</i>	II	VU
<i>Lophornis delattrei</i>		VU



TAXÓN	CITES	Mi Ambiente
		2016
<i>Helimaster longirostris</i>		VU
<i>Chlorostilbon assimilis</i>		VU
<i>Chalybura urochrysis</i>	II	VU
<i>Chalybura buffonii</i>	II	VU
<i>Thalurania colombica</i>	II	VU
<i>Amazilia edward</i>		VU
<i>Amazilia tzacatl</i>	II	VU
<i>Amazilia amabilis</i>		VU
<i>Juliamyia julie</i>	II	VU
* <i>Elanoides forficatus</i>	II	VU
* <i>Ictinia plúmbea</i>	II	VU
<i>Rupornis magnirostris</i>	II	
<i>Pseudastur albicollis</i>	II	VU
* <i>Buteo platypterus</i>	II	
<i>Trogon massena</i>		VU
<i>Trogon caligatus</i>		VU
<i>Trogon rufus</i>		VU
<i>Pteroglossus torquatus</i>		VU
<i>Ramphastos sulfuratus</i>	II	VU
<i>Pionus menstruus</i>		VU
<i>Onychorhynchus coronatus</i>		
* <i>Legatus leucophaeus</i>		VU
* <i>Vireo flavoviridis</i>		
<i>Stelgidopteryx ruficollis</i>		
* <i>Mniotilta varia</i>		
<i>Myiothlypis fulvicauda</i>		
<i>Basileuterus rufifrons</i>	II	VU
* <i>Setophaga castanea</i>		
* <i>Cardellina canadensis</i>		
* <i>Piranga olivácea</i>	II	VU
<i>Habia rubica</i>	II	VU
<i>Cyanocompsa cyanooides</i>	II	VU

CITES: II= En peligro debido a la comercialización, - =No presenta categoría.

Mi Ambiente: VU=Vulnerable, EN=En peligro, - =No presenta categoría.

*Especies migratorias según Angehr & Dean 2010.



DISCUSIÓN

En la Reserva Hídrica de Cerro Turega se logró contabilizar una gran cantidad de aves sobre todo a través de observación directa, sin embargo, en cualquier sitio el uso de técnicas de redes de nieblas puede representar una limitante para lograr un conteo satisfactorio, ya que obtiene una moderada estimación de abundancia de especies en el sitio (Garcés y Angehr, 2006), también se limita a las aves que habitan el sotobosque y dosel medio del bosque (Polanco *et al.*, 2015; Guevara & Delgado, 2021). No obstante, redes y búsqueda generalizadas son métodos complementarios que deben usarse combinados para obtener una mejor estimación de la riqueza de especies en un inventario de aves (Ralph *et al.*, 1996).

Abundancia por órdenes

El orden de aves más abundante para la reserva hídrica fue el orden Passeriformes con 295 individuos (61.97%) y 61 especies (60.40%). De acuerdo con Araúz & González (2010) este grupo incluye la mayor cantidad de especies de aves de tierra firme del país, además es común encontrarlos en la mayoría de los estudios sobre aves en el país, esto se puede comprobar en otros estudios realizados a lo largo de la región (Garcés & Angehr 2006, Garcés 2007, Solano-Peralta 2007, Araúz & González 2010; Polanco *et al.*, 2015; Gutiérrez-Pineda & Méndez-Carbajal, 2020; Guevara & Delgado, 2021; Murcia-Moreno *et al.*, 2023).

Abundancia por familias

La familia más capturada y avistada fue la familia Trochilidae, entre febrero y marzo, seguida de Thraupidae y Tyrannidae. El predominio de Trochilidae se documenta para áreas hacia el sur del país como Cerro Canajagua (Araúz & González, 2010), y en el Centro Regional Universitario de Azuero (Camarena *et al.*, 2020).

Los representantes de la familia Trochilidae son atraídos por la floración de *Macrocnemum roseum* (Rubiaceae), árbol que florece y fructifica entre diciembre y junio (Mendieta, 2008). En tanto, Thraupidae y Tyrannidae, al ser más generalista, con una dieta de frutos, semillas e insectos, pueden satisfacer sus necesidades alimentarias en los bosques de la RHCT. Estas familias se les considera bioindicadores del estado de conservación del bosque al desempeñar un papel ecológico como dispersores de semillas (Hilty & Brown, 2001; Medina *et al.*, 2007).

Abundancia por especies

La especie más abundante fue *Ortalis cinereiceps* con el 5.25% del total de la muestra, *Cyanerpes cyaneus* con el 4.20% y el *Ramphocelus dimidiatus* con el 4.63%, probablemente su alto número de individuos se deba a que el muestreo coincidió con temporadas de frutos, semillas y algunos cultivos que le sirven de alimento. Eufonia piquigruesa (*Euphonia laniirostris*), también fue abundante en el muestreo (4.63%), esta ave prefiere bosques de galería y bordes, lo que garantiza que la Reserva Hídrica del Cerro Turega brinde el hábitat apropiado (Freile & Poveda, 2019).



El mielero patirrojo (*Cyanerpes cyaneus*) con 4.20% esta especie habita principalmente en tierras bajas en ecotonos de bosques tropicales; muy adaptable a plantaciones de café, cítricos y cacao, plantaciones que se encuentran cultivadas en la reserva por parte de los pobladores del sitio. Otra especie destacada es golondrina alirrasposa sureña (*Stelgidopteryx ruficollis*), representada por el 3.78% de abundancia en el sitio, y por mencionar dos especies de colibrí: amazilia colirrufa (*Amazilia tzacatl*) y calzonario de Buffon (*Chalybura buffonii*), ambas con un 2.95% de abundancia en la reserva, estas especies son comunes de bosques de galería, plantaciones de plátano, café y jardines (BirdLife International, 2012), esta característica permite que ambas especies tengan una distribución bastante amplia en la región (UICN, 2022).

En la RHCT es común encontrar el Tucán pico iris (*Ramphastos sulfuratus*) con 2.10%, habita en el dosel del bosque y se adapta a las áreas de actividad agrícola realizada por los lugareños. Esta especie siempre está en pequeñas bandadas de cinco a seis individuos o más, desplazándose de una rama a otra por lo que tiene preferencias por semillas y frutos. Está ave es de interés ornitológico, por su biología e historia natural y su información es vital para conservarla, encontrándose en estado de vulnerable (Galetti *et al.*, 2000). La Urraca pechinegra (*Cyanocorax affinis*) con 2.10 % de abundancia de especies en la RHCT prefiere los bordes de los bosques de galería de tierras bajas; es un ave ruidosa, tímida, con frecuencia se esconde en los follajes de los árboles y siempre está en pequeños grupos gregarios que suele forrajear moviéndose entre los árboles (Martínez *et al.*, 2008).

Para los ejemplares del mosquero social (*Myiozetetes similis*) fueron observados sobrevolando cerca del nido, protegiéndolo y alimentando a sus crías, la cual se encuentran adaptados a ambientes antropizados (Marateo *et al.*, 2013).

Diversidad

Una diversidad alta (Índice de Shannon–Wiener = 4.184) sugiere que la RHCT proporciona los recursos necesarios para constituirse en un hábitat apropiado para la avifauna de la región. Al comparar con otros sitios en Coclé para comunidades del área norte de Coclé obtuvieron menores valores en índices de Shannon (2.70 y 3.72) lo que pudo deberse a perturbaciones ecológicas de la zona (Garcés & Angher, 2006). No obstante, la RHCT presentó dominancia baja de especies, sin embargo, para Garcés & Angehr (2006) si hubo una dominancia alta de algunas especies.

Existen pocos trabajos publicados sobre las aves de Coclé, sin embargo, al comparar los resultados con información con áreas de Coclé del Norte (provincia de Colón) se observa que se obtuvieron valores bajos en índices de Shannon (2.70 y 3.72) lo que pudo deberse a perturbaciones ecológicas de la zona como por ejemplo cultivos agrícolas, construcción de acueducto entre otras (Garcés & Angehr, 2006).



Este valor de la diversidad sugiere que la RHCT proporciona los recursos necesarios para constituirse en un hábitat apropiado para la avifauna de la región.

Especies Amenazadas

En este estudio se registró 43 especies clasificadas como amenazadas o poblaciones limitadas, de las 43 especies, según la UICN, 31 en estado Vulnerable (VU) y el Ministerio de Ambiente de Panamá (Mi Ambiente) en los apéndices II de la CITES se encuentran 23 especies en peligro debido a la comercialización. Los apodiformes son pequeños ejemplares polinizadores, nectarívoros y especializados en el tipo de hábitat, siendo unas de las especies más frágiles. Algunas de las especies fueron: el colibrí pico de hoz puntiblanco (*Eutoxeres aquila*) se encuentra vulnerable (VU), orejivioláceo pardo (*Colibri delphinae*) está enfrentando un riesgo de extinción (EN). *Ramphastos sulfuratus* y *Pionus menstruus* en estado de peligro debido a la comercialización (CITES II) Mi Ambiente, 2016.

Passeriformes fue el mayormente registrado y representan un papel importante en el ambiente, ya que son controladores de insectos, dispersores de semillas, por lo que son un componente esencial para la dinámica y conservación de los ecosistemas (Kattan & Serrano, 1996), en general, estas aves se ven afectados por la destrucción de los bosques, incremento de comunidades humanas, deforestación, minería y tráfico ilegal (Kattan & Serrano, 1996; Medina et al., 2007). A pesar de la modificación de los bosques, la RHCT funciona como hábitat de especies, reproducción, alimentación, lugar de descanso y refugio que habitan en esta parte del bosque que aún mantiene su fauna propia (Sánchez-Mateo et al., 2007).

Aves migratorias

En cuanto a las aves migratorias observadas en RHCT se contabilizaron nueve especies migratorias, incluidas en cinco familias y dos órdenes. Algunas aves migratorias observadas presentes gavilán alado (*Buteo platypterus*), elanio tijereta (*Elanoides forficatus*), tangara escarlata (*Piranga olivácea*), reinita pechicastaña (*Setophaga castanea*), reinita collareja (*Cardellina canadensis*), reinita trepadora (*Mniotilta varia*), vireo verdiamarillo (*Vireo flavoviridis*) entre otras especies, durante los cuatro meses de muestreo, entre estas se destaca *Ictinia plumbea*, ave migratoria de Sur América que es característica observarlas en época de reproducción en estas áreas, para este caso, la mayoría de las aves migratorias suelen anidar en ambientes más cálidos, además suelen preferir el bosque maduro y poco modificado, pueden también ser comunes en hábitats perturbado (Tejera, 2001; Méndez et al., 2006; Sánchez-Mateo et al., 2007; Rodríguez-Arias et al., 2017). En otros casos, se observan en regiones montañosas pueden avistarse a gran altura entre los 701 a 1200 msnm aproximadamente (Mi Ambiente, 2010).

En el área estudio de la RHCT no se basó en estudio comparativo de las especies en los diferentes bosques de galería, bosque secundario, cultivos agrícolas y de ganadería, ya que en la reserva posee sembradíos cerca de los afluentes.



CONCLUSION

La Reserva Hídrica del Cerro Turega a pesar de ser un área relativamente pequeña (602 ha), sostiene una riqueza de especies considerable que abarca un 10% de la avifauna nacional.

Trochilidae, Thraupidae y Tyrannidae fueron las familias más abundantes, son aves con una dieta variada, ya que participan en procesos vitales para el ecosistema como es el control de otros organismos y en la polinización de una gran variedad de plantas.

La Reserva Hídrica del Cerro Turega contiene cerca de 43 especies clasificadas como amenazadas, y puede considerarse como un área de interés para la conservación de estas especies, no obstante, a pesar de ser una reserva hídrica, son muchas las alteraciones antropogénicas como los acueductos, tala de árboles para cultivos de subsistencias, plantaciones de café, plátano y cacao, estos a su vez, pueden ser controlados llevando a cabo educación comunitaria y capacitación sobre métodos amigables para los cultivos.

Los registros de nueve especies de aves migratorias, la RHCT proporciona diferentes tipos de recursos para la llegada y estadía de estas aves en sus jornadas de viajes entre Norte y Sur América.

Es valioso resaltar la necesidad de contrarrestar la deforestación en Panamá y promover la conectividad entre los remanentes boscosos en la región, pues estos constituyen hábitats importantes para las aves con algún tipo de vulnerabilidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Angehr, G. R., & Dean, R. (2010). The birds of Panama: a field guide. A Zona Tropical Publication. 456 pp.
- Araúz, J., & González, D. (2010). Aves de Cerro Canajagua, Provincia de Los Santos, Panamá. *Tecnociencia*, 12(2), 31-55.
- AUDUBON, BirdLife International. (2021). Lista de las aves de Panamá. Comité de registros, Sociedad Audubon de Panamá. *The Auk: Ornithological Advances*, 1-20
- Benny-Celestino, O. H. (2014). Inventario de la biodiversidad de aves como indicador de la calidad ambiental del “Humedal Laguna el Oconal” del Distrito de Villa Rica. 1-86 pp.
- BirdLife International. (2012). *Amazilia tzacatl*. The IUCN Red List of Threatened Species 2012: e. T22730168A40494944.<http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2012-> Consultado el 3 de enero de 2022.



- BirdLife International. (2018). El Estado de conservación de las aves del mundo: tomando el pulso de nuestro planeta. Cambridge, Reino Unido: BirdLife International.
- Camarena, F., Villalaz, V., Pimentel, G., & Barría, J. (2020). Diversidad de aves en un bosque urbano en regeneración del Centro Regional Universitario de Azuero, Panamá. *Iniciación Científica*, 6.
- Colwell, R.K. (2013). Estimates: Statistical estimation of species richness and shared species from samples. Version 9.1.0 user guide and applications. <http://viceroy.eeb.uconn.edu/estimates>. University of Connecticut, Storrs, C.F.
- Feria Arroyo, T. P., Sánchez-Rojas, G., Ortiz-Pulido, R., Bravo-Cadena, J., Calixto Pérez, E., Dale, J. M., ... & Valencia-Herverth, J. (2013). Estudio del cambio climático y su efecto en las aves en México: enfoques actuales y perspectivas futuras. *Huitzil*, 14(1), 47-55.
- Freile, J. F., & Poveda, C. (2019). Aves del Ecuador. Version 2019.0. Museo de Zoología, Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Galetti, M., Laps, R. & Pizo, M. A.2000. Frugivory by toucans (Ramphastidae) at two altitudes in the atlantic forest of Brazil., *Biotropica*.32: 842-850.
- Garcés, P. A. & G. Angehr. (2006). Estudio de la diversidad, similitud y dominancia de aves en 10 sitios de la región Occidental, provincia de Coclé. *Tecnociencia*, 8(2); 29-147 pp.
- González-Parejo, E. J., & Tamaris-Turizo, D. (2015). Diversidad Y uso de Coberturas de aves asociadas al sector de Puerto Velero, Tubará-Atlántico, Colombia. *Boletín Científico. Centro de Museos. Museo de Historia Natural*, 19(2), 230-242.
- Grimm, N. B., Faeth, S. H., Golubiewski, N. E., Redman, C. L., Wu, J., Bai, X., & Briggs, J. M. (2008). Global change and the ecology of cities. *science*, 319(5864), 756-760.
- Guevara, N. (2021). Riqueza de especies de aves de la Sierra Llorona, provincia de Colón, Panamá. *Tecnociencia*, 23(1):238-261.
- Guevara, N., & Delgado, E. (2021). Riqueza y abundancia de la diversidad de aves en el parque Municipal Summit, República de Panamá. *Tecnociencia*, 23(2), 110-139.
- Guevara, N. & Samudio, N. (2021). El Valle de Antón, provincia de Coclé; como sitio de paso y observación de aves migratorias en Panamá. *Tecnociencia*, 23(1):5-25.



- Gutiérrez-Pineda K.M., Méndez-Carbajal P.G. (2020). Diversidad ecológica de aves en un hábitat fragmentado en la comunidad de Rincón Largo, Chiriquí, Panamá. *Huitzil* 22(1):e-610.
- Lepage, D. (2022). Lista de verificación de las aves de American Ornithological Society. Avibase, la base de datos mundial de aves. 1-60 pp.
- Marateo G, Grilli P, Bouzas N, Jensen R, Ferretti V, Juárez M & Soave G. (2013). Uso de habitat por aves en rellenos sanitarios del noroeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Eco Austral*. 23(3): 202-8.
- Martínez, D., Sánchez, J.E. & Zook, J. R. (2008). Primer registro del nido y huevos de la urraca pechinegra (*Cyanocorax affinis*, Aves: Corvidae) para Costa Rica y notas sobre ampliación de su ámbito de distribución. *BRENESIA* 71-72.
- Medina, O. R., Torres, I. H. G., & Mosquera, J. T. R. (2007). Inventario de aves Passeriformes en áreas de expansión urbana en el municipio de Quibdó, Chocó, Colombia: Orfelina Ríos Medina. *Universidad Tecnológica del Chocó*, 26(1), 79-89.
- Méndez, P., Curti, M., de Montuto, K. H., & Benedetti, A. (2006). Las aves rapaces: guía didáctica de educación ambiental. The Peregrine Fund/Fondo Peregrino–Panamá.
- Mendieta, R. A. P. (2008). Árboles de los bosques del canal de Panamá. Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales, 465 pp.
- Mi Ambiente (Ministerio de Ambiente). (2010). Atlas Ambiental de la República de Panamá. Primera Versión. Gobierno Nacional de la República de Panamá. 190 pp.
- Mi Ambiente (Ministerio de Ambiente). Gaceta Oficial Digital No. 28187-A del 29 de diciembre de 2016. República de Panamá. 50 pp
- Murcia-Moreno, D., Camarena, F., Villarreal, C. A., & Aparicio, K. (2023). Diez Años De Monitoreo De Supervivencia Invernal Mosi En El Parque Nacional Chagres, Colón, Panamá. *Scientia*, 33(1): 62–84.
- Núñez, H., A. Santos Murgas, I. Gómez, J. Rodríguez & E. Ramos. (2018). Diversidad de mariposas diurnas en la Reserva Hídrica del Cerro Turega, Provincia De Coclé, República De Panamá. 1-15 pp.
- Pérez, R. J., Tejera, V. H. & Jiménez, A. M. (2016). Distribución Espacial de las Aves Migratorias en la Zonas Costeras de Costa del Este, Ciudad de Panamá. *Tecnociencia*, 18(2):21-33.



- Polanco, J. M., Duque, A. O., Giraldo, D. A., Granada, J. S., & Gómez, O. H. M. (2015). Efectividad de las redes de niebla para determinar la riqueza de aves en un bosque montano de los andes centrales (Salento, Quindío, Colombia). *Revista de Investigaciones Universidad del Quindío*, 27(1), 75-88.
- Ralph, J., Geupel G., Pyle, P. Martín, T. Desante D. & Milá, B. (1996). *Manual de métodos de campo para el monitoreo de aves terrestres*. Departamento de Agricultura. California, Estados Unidos. 46 pp.
- Reyes-Ledezma, K., A. Santos-Murgas, P. González-Hernández, I. Gómez & A. Barrios-Vargas. (2020). Diversidad Alpha y Beta de Abejas *Euglossini* (Hymenoptera: Apidae) en el dosel y sotobosque del Cerro Turega, provincia de Coclé, Panamá. *Tecnociencia*. 22(2):205-225.
- Rodríguez-Arias, C. & Granados, I. (2017). Diversidad y abundancia de aves de la Reserva Biológica Alberto Manuel Brenes y su área de amortiguamiento, Costa Rica. *Revista Pensamiento Actual*, 17:74-95.
- Salas-Correa, Á. D., & Mancera-Rodríguez, N. J. (2020). Aves como indicadoras ecológicas de etapas sucesionales en un bosque secundario, Antioquia, Colombia. *Biología Tropical*, 68(1), 23-39.
- Sánchez-Mateo, M. A. (2007). Diversidad de aves y mamíferos en zonas donde anida *Rhynchopsitta pachyrhyncha*, en el municipio de Madera, Chihuahua, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 3(1), 52-57.
- Sosa-Bartuano, A. (2017). Herpetofauna de la Reserva Hídrica de Cerro Turega, Cordillera central de Panamá. *Científica Centros*, 6(2): 99-113.
- Tejera, V. H. (2001). Contribución al conocimiento de las aves de la Reserva De Fortuna, Chiriquí, República de Panamá. *Tecnociencia*, 3(1):31-67.
- UICN. (2022). *Lista Roja de Especies Amenazadas de la UICN. Versión 2022-2* (Consultado: 8 de abril de 2023).
- Villarreal, H. M. Álvarez, S. Córdoba, F. Escobar, G. Fagua, F. Gast, H. Mendoza, M. Ospina & A.M. Umaña. (2004). *Manual de métodos para el desarrollo de inventarios de Biodiversidad*. Programa de Inventarios de Biodiversidad. Instituto de investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt. Bogotá, Colombia.





SEABIRDS OFF THE PACIFIC COAST OF PANAMA: OBSERVATION FREQUENCY, DISTRIBUTION AND SEASONALITY

AVES MARINAS EN LA COSTA DEL PACÍFICO DE PANAMÁ: FRECUENCIA DE OBSERVACIÓN, DISTRIBUCIÓN Y ESTACIONALIDAD

Jan A. Cubilla R

Sociedad Audubon de Panamá / Panama Audubon Society, Apartado 0843-03076, Casa 2006-B, Llanos de Curundú, Panama, Republic of Panama.

jcaxel@hotmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-5201-7344>

Fecha de recepción: 27 de diciembre de 2022

Fecha de aceptación: 28 de mayo de 2024

DOI [HTTPS://DOI.ORG/10.48204/J.TECNO.V26N2.A5412](https://doi.org/10.48204/J.TECNO.V26N2.A5412)

ABSTRACT

Little information has been added to our knowledge of Panama's Pacific coast seabirds since the last century. In order to increase and update our knowledge, systematic observations were made of seabirds on a total of 20 trips, conducted in 2010, then every year from 2012-2019 off the Pacific coast of Panama, and the percentage of all 1-hour observation periods during which each species was recorded according to location (continental shelf or continental slope/deep waters) and season (dry or wet) was calculated. Thirty-nine species of seabirds of 11 different families during 120 1-hour observation periods were recorded. The most frequently detected species for all observations was *Fregata magnificens* (present in 65.8% of 1-hour observation periods), followed by *Sula leucogaster* (64.2%) and *Chlidonias niger* (63.3%). These observations increase our knowledge of seabird species occurring off the Pacific coast of Panama, adding three new species to the list of birds of Panama, and documenting another two with photographs for the first time, offering us an idea of the species that are within the reach of the pelagic avitourist.

KEY WORDS

Seabirds, pelagic, continental shelf, continental slope, deep waters.

RESUMEN

Desde el siglo pasado, es poca la información que se ha agregado a nuestro conocimiento sobre las aves marinas de la costa del Pacífico de Panamá. Para mejorar esto, se realizaron observaciones sistemáticas de aves marinas en un total de 20 viajes, realizados en 2010 y cada año desde 2012-2019 frente a la costa del Pacífico de Panamá,



y se calculó el porcentaje de todos los períodos de observación de 1 hora durante los cuales cada especie se registró según su ubicación (plataforma continental o pendiente continental/aguas profundas) y estación (seca o lluviosa). Se registraron 39 especies de aves marinas de 11 familias diferentes durante 120 períodos de observación de 1 hora. La especie detectada con mayor frecuencia en todas las observaciones combinadas fue *Fregata magnificens* (presente en el 65,8 % de los períodos), seguida de *Sula leucogaster* (64,2 %) y *Chlidonias niger* (63,3 %). Estas observaciones aumentan nuestro conocimiento sobre las especies de aves marinas que se encuentran frente a la costa del Pacífico de Panamá, agregando tres nuevas especies a la lista de aves de Panamá y documentando otras dos con fotografías por primera vez, y nos ofrecen una idea de las especies que están dentro del alcance del aviturista pelágico.

PALABRAS CLAVES

Aves marinas, pelágico, plataforma continental, pendiente continental, aguas profundas

INTRODUCTION

Seabirds are a taxonomically varied group that depend on the marine environment for at least part of their life cycle, are more threatened than all other groups of birds with similar numbers of species (Birdlife International, 2012). The priority conservation actions needed for these species consist of monitoring, determination of population size, distribution and trends, assessment of threats, life history and ecology, among others (Croxall *et al.*, 2012).

For those aspects, the seabird species occurring off the Pacific coast of Panama are relatively well documented in terms of composition, especially those of the northern part of the Panama Bight. Birds at sea in the area have been surveyed by Murphy in 1925, 1941, and 1956 (1936; 1944a, b, c; 1956), Robins (1958) in July 1957, Loftin (1991) in 1968-1969, and Spear and Ainley (1999) from 1984 to 1991. The latter two works also provided data on relative abundance, distribution and seasonal occurrence of seabirds in both continental shelf and pelagic waters.

Since then, little has been added to our knowledge of Panama's Pacific coast seabirds. Ridgely and Gwynne (1989) list 58 species of seabirds, while Angehr and Dean (2010) list 69 species occurring off the Pacific coast of Panama. Over a period of 21 years, nine of these 11 additional species were added due to new observations for the country (the rest were added after reviewing old data and due to taxonomic splits).

The Pacific coast of Panama extends 1,700.6 km from the province of Darien in the East to the Burica Peninsula in the West. The Azuero Peninsula divides the Panamanian Pacific shelf into: a) the Gulf of Panama to the east, with a shelf area of 27,175 km², b) the southern zone of the Azuero Peninsula between Punta Mala and Punta Mariato in the center and c) the Gulf of Chiriquí to the west, with a shelf area of 13,119 km². In the northeastern part of the Gulf of Chiriquí is the Gulf of Montijo (Mate, 2006). This coast is an example of the biological and hydrological heterogeneity typical of Central America, with shallow thermoclines, up-



welling events and large patches of nutrients and chlorophyll roughly superimposed onto these events, giving evidence of high biological production, which in turn supports productive local fisheries (Cox & O’Dea 2007). The commercial and sport exploitation of these fisheries, especially the latter, offer a platform for the observation of pelagic seabirds, mainly from the Burica and Azuero Peninsulas, as well as from extreme eastern Darien province. Other activities, such as whale watching, temporarily offer opportunities for seabird watching since specialized pelagic birding trips are not offered on a regular basis in the country. This is due to the highly specialized character of the pelagic avitourist and the relatively small niche of avitourism in Panama, although growth is expected to be strong, and the country is listed among the main birding destinations, at least for United States consumers (Acorn Consulting, 2008).

METHODS

Objective

To describe the observation frequency, distribution and seasonality of the seabirds occurring off the Pacific coast of Panama.

Study site.

All observations were made off the Pacific coast of Panama, from eastern Darién Province (Piñas Bay) to western Chiriquí Province (Burica Peninsula). Observations were made on the continental shelf (0-200 m in depth, primarily in the Gulf of Montijo and the Gulf of Panama), the continental slope (201-800 m in depth), and deep waters (more than 800 m in depth).

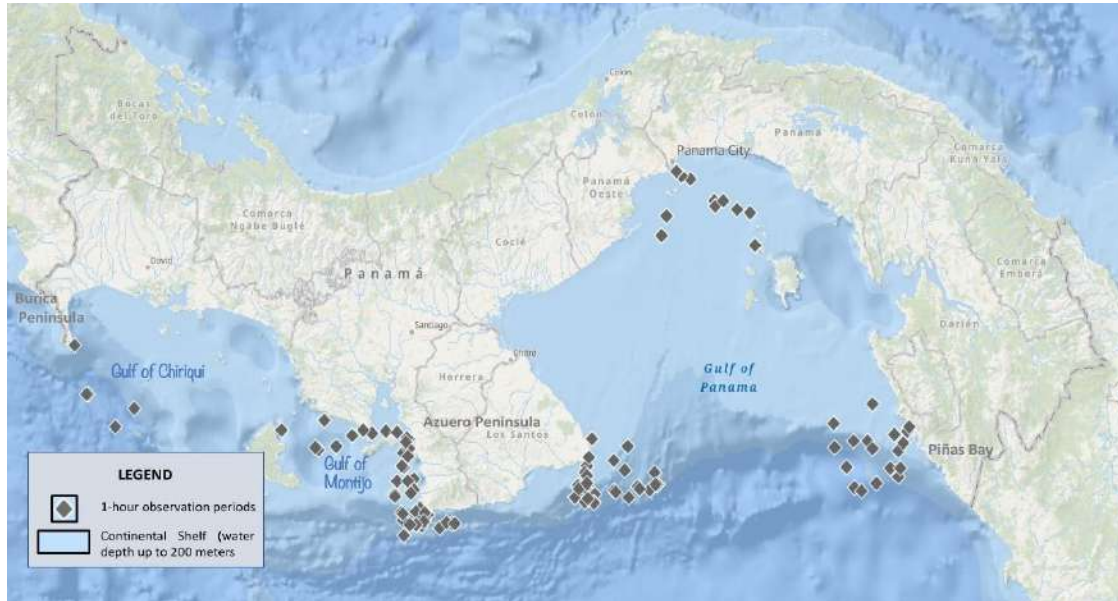
Observations

Systematic observations of seabirds were made on a total of 20 trips, conducted in 2010, and every year from 2012-2019. Observations were made on two types of trips. The first were trips made specifically for the observation of pelagic seabirds, which extended to the continental shelf and deep waters. These were made with rented sport fishing boats up to 10 m long. Routes usually consisted of wide circuits in order to cover as large an area as possible. On these trips, we chummed at favorable sites, such as seamounts. On average, 15.1 km were covered for each one-hour period (range 3.5 - 34.6 km) during these trips. The second type were trips restricted to the continental shelf, to tourist sites on islands and for observation of other marine fauna. Consequently, the routes in these waters were generally straight transects. Observations were made from a wide variety of vessels, including small boats with outboard motors, sport fishing boats, and ferries, ranging from 5 to 35 m in length. Some of these trips allowed close inspection of seabird nesting colonies on rocky islets, especially in the Gulf of Panama. On average, 20.5 km were covered for each one-hour period (range 4.0-42.8 km) during continental shelf trips. All observations were made during daylight hours.



Figure 1.

Plot of 1-hour observation periods off the Pacific coast of Panama. September 2010 - December 2019



For this report, seabirds include all members of the families Stercorariidae, Laridae, Phaethonidae, Oceanitidae, Hydrobatidae, Procellariidae, Fregatidae, Sulidae, Phalacrocoracidae, and Pelecanidae, plus the genus *Phalaropus* of Scolopacidae. Birds species, and the number of individuals of each species, were recorded as soon as they were identifiable (usually to species, but otherwise to the lowest taxonomic rank identifiable), at any distance from the observer. To the extent possible, photos were obtained of individuals to aid in the identification of difficult taxa. For each trip, the general weather, sea conditions, and position by GPS at the start of each 1-hour period during each trip were recorded. Seabirds seen from the mainland while at dock were not included.

From one to seven observers participated in each trip, with JAC present in all of them, thus giving consistency in the identification and recording of field data. All observations were recorded on eBird (www.ebird.org) and most photos were deposited in the Macaulay Library (www.macaulaylibrary.org) of the Cornell Laboratory of Ornithology.

Analysis

To make within-species comparisons, the percentage of all 1-hour observation periods during which each species was recorded according to location (continental shelf or continental slope/deep waters) and season (dry or wet), following Young and Zook (2016). For this work, dry season includes the months of December to April, and the wet season includes the months



of May to November. Because few 1-hour periods were spent on waters >800 m deep, these were combined with those from the continental slope. Spear and Ainley (1999) found little difference between seabird densities on the continental slope and water deeper than 2,000 m. Differences in detectability and distances traveled over 1-hour periods prevent density estimations or interspecific comparisons of abundance.

RESULTS

Thirty-nine species of seabirds of 11 different families were recorded during 120 1-hour observation periods, of which 24 were during dry season and 96 during wet season. The distribution of 1-hour observation periods between continental shelf and continental slope/deep waters was similar, with 58 and 62 periods respectively (Table 1). Six hours of rain were recorded during the study period, with no considerable swells on any trip. Taxonomy and species sequence follow AOU (1998) and subsequent supplements through Chesser *et al.* (2021).

Table 1.

Distributional, seasonal, breeding and conservation status of seabirds off the Pacific coast of Panama. September 2010 - December 2019.

Species ¹	Percent of 1-hr periods recorded (%)						Overall per study period (n = 120)
	Continental Shelf			Continental Slope / Deep Waters			
	Dec -Apr ² (n = 14)	May- Nov (n = 44)	Overall (n = 58)	Dec -Apr ² (n = 10)	May- Nov (n = 52)	Overall (n = 62)	
Scolopacidae							
<i>Phalaropus lobatus</i> (LC)	-	4.5	3.4	-	11.5	9.7	6.7
Stercorariidae							
<i>Stercorarius macconnicki</i> (LC)	-	-	-	-	1.9	1.6	0.8
<i>Stercorarius pomarinus</i> (LC)	7.1	-	1.7	30.0	7.7	11.3	6.7
<i>Stercorarius parasiticus</i> (LC)	-	-	-	10.0	3.8	4.8	2.5
<i>Stercorarius longicaudus</i> (LC)	-	-	-	-	3.8	3.2	1.7
<i>Stercorarius</i> sp.	7.1	-	1.7	40.0	3.8	9.7	5.8
Laridae							
<i>Xema sabini</i> (LC)	7.1	-	1.7	20.0	5.8	8.1	5.0
<i>Leucophaeus atricilla</i> (LC)	78.6	13.6	29.3	80.0	9.6	21.0	25.0
Larinae sp.	7.1	2.3	3.4	-	-	-	1.7
* <i>Anous stolidus</i> (LC)	7.1	20.4	17.2	-	42.3	35.5	26.7
<i>Anous minutus</i> (LC)	7.1	-	1.7	-	-	-	0.8
* <i>Onychoprion fuscatus</i> (LC)	-	2.3	1.7	-	44.2	37.1	20.0
* <i>Onychoprion anaethetus</i> (LC)	7.1	29.5	24.1	50.0	42.3	43.5	34.2
<i>Larosterna inca</i> (NT)	-	2.3	1.7	-	-	-	0.8
<i>Chlidonias niger</i> (LC)	64.3	70.4	69.0	50.0	59.6	58.1	63.3
<i>Sterna hirundo</i> (LC)	21.4	4.5	8.6	10.0	15.4	14.5	11.7
<i>Sterna paradisaea</i> (LC)	-	-	-	-	1.9	1.6	0.8
<i>Thalasseus maximus</i> (LC)	21.4	11.4	13.8	-	-	-	6.7
<i>Thalasseus sandvicensis</i> (LC)	28.6	2.3	8.6	-	-	-	4.2
<i>Thalasseus elegans</i> (NT)	-	-	-	-	1.9	1.6	0.8
Sterninae sp.	7.1	18.2	15.5	-	13.5	11.3	13.3
Phaethontidae							



<i>*Phaethon aethereus</i> (LC)	-	6.8	5.2	-	1.9	1.6	3.3
Oceanitidae							
<i>Oceanites oceanicus</i> (LC)	-	-	-	-	1.9	1.6	0.8
Hydrobatidae							
<i>Hydrobates leucorhous</i> (VU)	-	-	-	10.0	-	1.6	0.8
<i>Hydrobates castro</i> (LC)	-	-	-	-	1.9	1.6	0.8
<i>Hydrobates tethys</i> (LC)	7.1	25.0	20.7	40.0	69.2	64.5	43.3
<i>Hydrobates melania</i> (LC)	7.1	13.6	12.1	40.0	38.5	38.7	25.8
<i>Hydrobates microsoma</i> (LC)	14.3	-	3.4	40.0	10.8	27.4	15.8
<i>Hydrobates</i> sp.	-	4.5	3.4	-	3.8	3.2	3.3
Procellariidae							
<i>Pseudobulweria rostrata</i> (NT)	-	-	-	-	11.5	9.7	5.0
<i>Procellaria parkinsoni</i> (VU)	-	7.1	1.7	-	1.9	1.6	1.7
<i>Ardena pacifica</i> (LC)	14.3	2.3	5.2	50.0	40.4	41.9	24.2
<i>Ardena grisea</i> (NT)	-	-	-	-	3.8	3.2	1.7
<i>Ardena creatopus</i> (VU)	-	-	-	-	7.7	6.4	3.3
<i>Puffinus subalaris</i> (LC)	21.4	25.0	24.1	50.0	86.5	80.6	53.3
Procellariidae sp.	-	-	-	30.0	3.8	8.1	4.2
Fregatidae							
<i>*Fregata magnificens</i> (LC)	85.7	81.8	82.8	90.0	42.3	50.0	65.8
Sulidae							
<i>Sula granti</i> (LC)	-	-	-	-	21.1	17.7	9.1
<i>*Sula nebowxii</i> (LC)	21.4	56.8	48.3	-	1.9	1.6	24.2
<i>Sula variegata</i> (LC)	-	9.1	6.9	-	-	-	3.3
<i>*Sula leucogaster</i> (LC)	57.1	75.0	70.7	30.0	63.5	58.1	64.2
<i>Sula sula</i> (LC)	-	-	-	10.0	-	1.6	0.8
<i>Sula</i> sp.	-	-	-	-	1.9	1.6	0.8
Phalacrocoracidae							
<i>*Nannopterum brasilianus</i> (LC)	28.6	34.1	32.8	-	-	-	15.8
Pelecanidae							
<i>*Pelecanus occidentalis</i> (LC)	50.0	54.5	53.4	-	-	-	25.8

*Breeds in Panama

1. UICN status: (LC) = Least Concern, (CR) = Critically Endangered, (VU) = Vulnerable, (NT) = Near Threatened, (DD) = Data Deficient

2. No observations were made in April

Species diversity was greater in the wet season (36 species) than in the dry season (23 species). Although many species were recorded both over the continental shelf and in continental slope/deep waters (19 species), seven species were restricted to the continental shelf and 13 species to continental slope/deep waters (Table 2).



Table 2.

Distribution of seabirds off the Pacific coast of Panama according to water depth. September 2010 - December 2019.

Continental Shelf	Continental Shelf and Continental Slope / Deep Waters	Continental Slope / Deep Waters
<i>Anous minutus</i> <i>Larosterna inca</i> <i>Thalasseus maximus</i> <i>Thalasseus sandvicensis</i> <i>Sula variegata</i> <i>Nannopterum brasilianus</i> <i>Pelecanus occidentalis</i>	<i>Phalaropus lobatus</i> <i>Stercorarius pomarinus</i> <i>Xema sabini</i> <i>Leucophaeus atricilla</i> <i>Anous stolidus</i> <i>Onychoprion fuscatus</i> <i>Onychoprion anaethetus</i> <i>Chlidonias niger</i> <i>Sierna hirundo</i> <i>Phaethon aethereus</i> <i>Hydrobates tethys</i> <i>Hydrobates melania</i> <i>Hydrobates microsoma</i> <i>Procellaria parkinsoni</i> <i>Ardenna pacifica</i> <i>Puffinus subalaris</i> <i>Fregata magnificens</i> <i>Sula nebouxii</i> <i>Sula leucogaster</i>	<i>Stercorarius maccormicki</i> <i>Stercorarius parasiticus</i> <i>Stercorarius longicaudus</i> <i>Sterna paradisaea</i> <i>Thalasseus elegans</i> <i>Oceanites oceanicus</i> <i>Hydrobates leucorhous</i> <i>Hydrobates castro</i> <i>Pseudobulweria rostrata</i> <i>Ardenna grisea</i> <i>Ardenna creatopus</i> <i>Sula granti</i> <i>Sula sula</i>

The most frequently detected species in all observations combined was *Fregata magnificens* (present in 65.8% of 1-hour observation periods), followed by *Sula leucogaster* (64.2%) and *Chlidonias niger* (63.3%). Relative frequencies were similar if considering only 1-hour observation periods over the continental shelf (*Fregata magnificens* 82.8%, *Sula leucogaster* 70.7%, and *Chlidonias niger* 69.0%). However, considering only 1-hour observations periods in continental slope/deep waters, *Puffinus subalaris* (80.6%) was the most common species, followed by *Hydrobates tethys* (64.5%) and *Chlidonias niger* and *Sula leucogaster* (both 58.1%). Ten species were recorded only once during our study, all of them represented by single individuals, except for *Oceanites oceanicus* (see species account). Of the 39 species recorded, nine are known to breed in Panama, four are considered Near Threatened and three are considered Vulnerable, according to IUCN Red List categories (Table 1; Birdlife International 2020).

DISCUSSION

Species Accounts

Phalaropus lobatus (Red-necked Phalaropus): Single individuals or small groups were present from August to November, and larger flocks (up to 51 birds) in May, when birds were mostly in alternate plumage. This species was more frequently seen over continental slope/deep waters. Loftin (1991) found large flocks to be present in the Gulf of Panama August-November, and just one record in February-March.



Stercorarius maccormicki (South Polar Skua): One individual off the southeastern Azuero Peninsula over deep waters, harassing an *Onychoprion* tern in November, was the only sighting during the study. It is considered a rare visitor to offshore waters on the Pacific coast of Panama, with records in February, March, July, September, and November (Wetmore, 1965; Ridgely & Gwynne 1989). The species has not yet been documented by specimens or definitive photographs for Panama.

Stercorarius pomarinus (Pomarine Jaeger): The most frequently encountered jaeger during the study period, observed from November to March. They were recorded both as single individuals or in groups of up to three, sometimes robbing food items from smaller species, and almost never following the boat. Due to the difficulty of identifying jaegers at sea, Loftin (1991) reported data for them only as a group, recording them in October-November and January-April, with positive identifications of this species in October-November. There are no specimens for Panama; one mentioned by Ridgely and Gwynne (1989) is an error for the following species (Wetmore, 1965). Reported to be an uncommon to at times common transient on both coasts of Panama (Ridgely & Gwynne, 1989); Olson (1993) found them to be common in western Bocas del Toro (Caribbean Sea) in January-April.

Stercorarius parasiticus (Parasitic Jaeger): The few individuals positively identified occurred exclusively over continental slope/deep waters. The number of individuals that could be identified only as *Stercorarius* sp. (Table 1) exceeded those positively identified as *S. parasiticus* or *S. longicaudus*, so the true numbers of these two species may be underestimated. Loftin (1991) collected two specimens in the Gulf of Panama; other specimens have been collected on the Caribbean coast (Wetmore, 1965; Olson, 1993). Reported to be an uncommon transient and winter visitor by Ridgely and Gwynne (1989).

Stercorarius longicaudus (Long-tailed Jaeger): Two intermediate-form juveniles seen on 25 October 2014 off the eastern Azuero Peninsula over deep waters were positively identified only after reviewing photos (Figure 2A). These represented the third record for Panama of this species (at the time it was the second known report; Jones & Komar, 2016). This is the most pelagic of the three jaeger species and is probably a rare transient off the coast of Panama (Ridgely & Gwynne, 1989). Loftin (1991) collected the only specimen for Panama in the Gulf of Panama. There is also a somewhat uncertain sight record from the Caribbean coast (Wetmore, 1985; Ridgely & Gwynne, 1989).

Xema sabini (Sabine's Gull): This elegant species was seen accompanying mixed flocks of gulls and terns. Recorded in this study in November-December and May, consistent with its status as a passage migrant in Panama, predominantly over deep waters but also over the continental shelf in the Gulf of Montijo. Loftin (1991) found it to be common to abundant in the Gulf of Panama in October-November and February-June.



Leucophaeus atricilla (Laughing Gull): Recorded in 25.0% of 1-hour periods of this study, especially over the continental shelf and during the dry season. Loftin (1991) recorded it as being abundant in the Gulf of Panama from December-March, with a few birds present in November and in May-June. The most common gull in Panama, with some individuals, mostly immatures, present through the northern winter (Ridgely & Gwynne, 1989).

Anous stolidus (Brown Noddy): Groups of 30 to 55 birds were seen off the Azuero Peninsula, especially resting on rocky islets off Punta Naranjo on the southwestern corner of the peninsula. Most of the birds seen over continental shelf waters were near this site, which is at the edge of the continental slope. Elsewhere, one to a few individuals were seen over deep waters of western and eastern Panama, usually with flocks of *Chlidonias niger* or resting on floating debris. The species breeds in Panama on the Islas Frailes del Sur off the southern Azuero Peninsula, where 50 pairs were found nesting in 2005 (Angehr & Kushlan, 2007). Although no specimens have been collected there, the expected form at this site is *ridgewayi* (Wetmore, 1965), which also breeds on islands off the west coast of Mexico and at Cocos Island off Costa Rica. The only specimen from the Pacific coast of Panama, collected in the Gulf of Panama, has been identified as *galapagoensis*. (Loftin, 1991), endemic to the Galapagos Islands. However, the subspecific identity of the Colombian breeding populations (which are much closer than the geographically distant Galapagos Islands) is unknown. The subspecies nesting on Malpelo Island has not been determined (López-Victoria & Estela, 2006) and nothing is known about the ecology, population or seasonality of the form nesting on Rocas de Octavia, near the border with Panama (Estela *et al.*, 2010).



Figure 2.

Noteworthy photographic records of seabirds off the Pacific coast of Panama. September 2010 - December 2019. **A.** Long-tailed Jaeger (*Stercorarius longicaudus*). Photo by Rafael Luck. **B.** Black Noddy (*Anous minutus*). Photo by Jan Cubilla/Macaulay Library. **C.** Inca Tern (*Larosterna inca*). Photo by Jan Cubilla/Macaulay Library. **D.** Leach's Storm-Petrel (*Hydrobates leucorhous*). Photo by Jan Cubilla/Macaulay Library



Anous minutus (Black Noddy): One adult on 4 December 2016 over the continental shelf off the western Azuero Peninsula was the second record for Panama and the first to be documented with photographs (Figure 2B). The bird was feeding with a mixed flock of Black and Common Terns over a school of Bonito (*Sarda* sp.). The closest breeding colony is at Malpelo Island south of Panama (López-Victoria & Estela, 2006).

Onychoprion fuscatus (Sooty Tern): This species was recorded only during the wet season, in 20.0% of 1-hour periods overall, mostly over continental shelf/deep waters, where it was seen alone or flocks accompanying mixed flocks of other tern species and shearwaters. The greatest numbers were seen off Azuero Peninsula, including juveniles. The species is known to breed on the Islas Frailes, with approximately 3000 nests in 2005, making it the largest single seabird colony in Panama (Angehr & Kushlan, 2007).

Onychoprion anaethetus (Bridled Tern): This species was more widespread and frequent than the Sooty Tern, detected in 34% of 1-hour periods overall, both over the continental shelf and over continental slope/deep waters, year-round. This species breeds on the Islas Frailes, with approximately 50 nests in 2005 (Angehr & Kushlan, 2007), and also on islets near Coiba Island, with 16 nests in 2012 (Angehr *et al.*, 2014).

Larosterna inca (Inca Tern): One adult of this beautifully patterned species followed the boat from Punta Mala into continental shelf waters on 11 September 2010, perching on the bow where it was photographed (Figure 2C). The bird seemed to be in good physical condition. It was the first documented report for this species in Panama since its invasion into the Gulf of Panama during the very strong El Niño Southern Oscillation (ENSO) event of 1983-1984 (Reed, 1988; Ridgely & Gwynne, 1989; Angehr & Dean, 2010). Its occurrence in Panamanian waters was probably associated with the moderate ENSO event of 2010, although no other vagrant seabird from the Humboldt current was recorded that year (Buitrago-Rosas *et al.*, 2020).

Chlidonias niger (Black Tern): One of the most frequently seen species, present in 63.3% of 1-hour periods overall. Flocks up to 260 individuals were a common sight year round during the study, both over the continental shelf and continental slope/deep waters. With 2,050 individuals counted, this was the most abundant species in absolute numbers. Frequently seen over schools of Bonito (*Sarda* sp.) over the continental shelf or Yellow-finned Tuna (*Thunnus albacares*) and cetaceans over continental slope/deep waters. This species is a boreal migrant to Panama, most birds during the northern summer being immatures (Wetmore, 1965), although it is present year-round. Loftin (1991) found the species to be the most abundant seabird in the Gulf of Panama, with some recorded on every cruise, and flocks of up to 3,000 reported. Spear and Ainley (1999) found it to be the most abundant species over the continental shelf in the Panama Bight, and also among the commonest species over deeper water.

Sterna hirundo (Common Tern): Present from September to December and in May, in low numbers; predominantly over continental slope/deep waters, but also over the continental shelf in the Gulf of Montijo. Birds in alternate plumage were seen in May. Loftin (1991) found some present all year in the Gulf of Panama, but most numerous September-October and December-March.

Sterna paradisaea (Arctic Tern): On 5 May 2018, an adult in alternate plumage was seen and photographed off eastern Darien province in deep waters with a mixed flock of Common and Sooty Terns, feeding over a school of Yellowfin Tuna and Short-beaked Common Dolphins (*Delphinus delphis*). It was just the fifth record for Panama (third documented by photographs) at the time. The paucity of records of this species in Panama is probably due to lack of coverage by experienced observers in pelagic waters, where it is probably a regular passage migrant.



Thalasseus maximus (Royal Tern): This conspicuous species was only seen over the continental shelf close to the coast, where it was detected in 13.8% of 1-hour periods. Loftin (1991) observed a few in the Gulf of Panama in November-December and August.

Thalasseus sandvicensis (Sandwich Tern): As with the previous species, it was only seen over the continental shelf close to the coast, where it was detected in 8.6% of 1-hour periods.

Thalasseus elegans (Elegant Tern): The only record during this study was of one individual feeding offshore from Punta Naranjo over deep waters, on 14 May 2017. It was in a mixed flock of Black and Sooty Terns and Brown Noddies. The rarest of the genus, as with other *Thalasseus* terns, this species is mostly coastal in Panama.

Phaethon aethereus (Red-billed Tropicbird): Only four individuals (all immatures) were recorded, in different 1-hour periods in September and October, over the continental shelf of the Gulf of Montijo and adjacent deep waters. The birds invariably were seen alone, showing some interest on the boat. The species breeds locally in the western Caribbean of Panama but is rare in the Pacific side. Loftin (1991) reported seeing 3 immatures in the Gulf of Panama in September-October. In the eastern Pacific, it breeds on Malpelo Island, in the Galapagos, and possibly on islands off Costa Rica (Pitman *et al.*, 1995; López-Victoria & Estela, 2006; Vallely & Dyer, 2018).

Oceanites oceanicus (Wilson's Storm-Petrel) Four individuals seen on 11 September 2010 off the southeastern Azuero Peninsula were the only ones recorded during the study period. The species was previously known from Panamanian waters from a specimen taken in the Gulf of Panama in August 1969, identified as the subspecies *O. o. chilensis* (Loftin, 1991), breeding on islets off Cape Horn. It is probably a regular offshore passage migrant since it is uncommon but regular farther north (Jehl, 1974).

Hydrobates leucorhous (Leach's Storm-Petrel): An individual photographed on 22 December 2019 off southeastern Azuero Peninsula was the only record during the study (Figure 2D). The bird showed a relatively long bill, long and deeply forked tail and an Ainley' scale value for uppertail-covert class 9-10 (Ainley, 1980; Howell, 2012), consistent with the ssp. *chapmani*, all important features to differentiate from formerly conespecific *H. socorroensis* and *H. cheimomnestes*, not known to occur in Panama. The species was previously known for Panama by specimens of the ssp. *chapmani* collected off Azuero Peninsula in 1925 (Ridgely & Gwynne, 1989).

Hydrobates castro (Band-rumped Storm-Petrel): One sighting off southeastern Azuero on 11 September 2010 of a single individual was the first report for Panama. Crossin (1974) reported two sight records without details from "near Panama" (mapped as being from south of the Azuero Peninsula), obtained by the Smithsonian Institution's Pacific Ocean Biological Survey Program conducted between 1963-1968. Young and Zook (2016) reported sightings



of a total of three individuals on two surveys off Costa Rica in 2007 and 2008, and Stiles and Skutch (1989) reported sightings from Costa Rica in the Gulf of Nicoya and near Cocos Island.

Hydrobates tethys (Wedge-rumped Storm-Petrel): The most frequently encountered storm-petrel both over the continental shelf and in continental slope/deep waters, particularly in the wet season. Present in 43.3% of all 1-hour periods, and 64.5% of 1-hour periods in continental slope/deep waters). There are two subspecies, both of which have been collected in Panama. The nominate, breeding in the Galapagos, has been collected in September, and *H. t. kelsalli*, breeding on islands off the coast of Peru, has been collected in February, March, August, and September (Wetmore, 1965). The subspecies differ only in size (Wetmore, 1965; Harrison, 1983; Carboneras, 1993; Onley & Scofield, 2007) and as far as known are not identifiable at sea. Birds in flight-feather molt were recorded from May to July. Birds with fresh flight feathers were recorded mainly from August to December; however, some birds with fresh flight feathers were recorded from May to July. The two subspecies breed at somewhat different times, nominate in early winter and *kelsalli* earlier, from early autumn to winter (Onley & Schofield, 2007), so that the presence of birds with fresh flight feathers in Panama at different times suggests that our observations include members of both populations. Loftin (1991) recorded the species in the Gulf of Panama between April and November, with a peak in June-August. Robins (1958) found it common in July 1957 between Taboga and Piñas Bay, one or two being visible every hour of the cruise, and up to eight seen off Piñas Bay.

Hydrobates melania (Black Storm-Petrel): Fairly common, present in 25.8% of 1-hour periods. Like the previous species, it was recorded mainly in continental slope/deep waters and in the wet season. Obvious flight-feather molt was seen in May, June and July. Loftin (1991) found the species present on every cruise except January, being most numerous February-June and November. Robins (1958) observed the species only three times in July 1957, all records being near Piñas Bay. Murphy (1956) reported finding the species “very frequently” in November off western Panama and in the Gulf of Panama.

Hydrobates microsoma (Least Storm-Petrel): The least frequently recorded of the three regular *Hydrobates* storm-petrels in Panamanian waters, present in 15.8% of 1-hour periods. In contrast, Loftin (1991) found it to be the most abundant storm-petrel in the Gulf of Panama, recorded most months and with peaks in February-April and August.

Pseudobulweria rostrata (Tahiti Petrel): Exclusively recorded in deep waters and in the wet season from June to October. An individual seen off southeastern Azuero Peninsula on 11 September 2010 was the first record for Panama (Jones & Komar, 2011), while birds recorded on 25 October 2014, also off the southeastern Azuero Peninsula, were the first to be documented photographically (Jones & Komar, 2016; Figure 3A). Up to five birds were



seen together off the Burica Peninsula on 30 June 2019, the highest count for a single 1-hour period during the study.

Procellaria parkinsoni (Parkinson's Petrel): One was seen and photographed (the first photographic confirmation of this species for Panama) on 5 May 2018 off Piñas Bay in eastern Darien province. The bird was in obvious wing molt (Figure 3B; compare similar wing pattern of bird pictured in Jehl, 1974). It was seen in waters 100 m deep, associated with shearwaters and Black Terns. A second sighting was later made in deep waters, probably of the same individual based on similar wing molt. Previous sight records for Panama are from March, April, June and November, over deep and continental shelf waters (Ridgely & Gwynne, 1989). The species is an uncommon to fairly common nonbreeding visitor off Middle America, mainly March-October (Howell, 2012).

Ardenna pacifica (Wedge-tailed Shearwater): The most frequently recorded *Ardenna* shearwater, present in 24.2% of 1-hour periods, mostly over continental slope/deep waters, from September to December and in May. Our lack of records from January to March, when most of the published records off Costa Rica and Panama have occurred (Howell, 2012), is probably due to lack of coverage of deep waters during those months. Flocks up to 300 individuals were seen feeding with other shearwaters (especially *Puffinus subalaris*), boobies, and terns. Birds in heavy wing molt were seen in November and December (probably from Mexican and Hawaiian populations; Howell, 2012). Most individuals recorded were light morph, with only few dark morphs. Two specimens have been taken in Panama, one in either phase, off Darien in March 1941 (Wetmore, 1965). Ridgely and Gwynne (1989) reported three additional sight records between 1930 and 1976, and Loftin (1991) provisionally assigned some sightings to this species but did not make a positive identification. Based on the small number of records, this species has previously been considered a rare vagrant off Panama (Ridgely & Gwynne, 1989; Angehr & Dean, 2010), but this survey and other recent records suggest that it is a common to very common winter visitor off Panama's Pacific coast. The closest breeding site to Panama is the Revillagigedo Islands off western Mexico (Harrison, 1983).



Figure 3.

Noteworthy photographic records of seabirds off the Pacific coast of Panama. September 2010 - December 2019. **A.** Tahiti Petrel (*Pseudobulweria rostrata*). Photo by Rafael Luck. **B.** Parkinson's Petrel (*Procellaria parkinsoni*). Photo by Jan Cubilla/Macaulay Library. **C.** Pink-footed Shearwater (*Ardenna creatopus*). Photo by Rafael Luck. **D.** Peruvian Booby (*Sula variegata*). Photo by Jan Cubilla/Macaulay Library. Peñón de San José, Panama. 9 Aug 2014



Ardenna grisea (Sooty Shearwater): Only two individuals were positively identified during the study, one in deep waters off the southeastern Azuero Peninsula on 25 October 2014, and one off Piñas Bay, in eastern Darien province, on 5 May 2018. No photos were obtained. Of note is that several birds initially identified as Sooty Shearwaters in the field were determined to be dark morph *Ardenna pacifica* after prolonged views or after reviewing photos. Loftin (1991) reported the species occurring in the Gulf of Panama from June to September, most commonly in August. Robins (1958) reported eight sightings in the Gulf of Panama between Taboga Island near Panama City and Piñas Bay, all but one of single birds, between 15-26 July 1957. Specimens have been taken in the Gulf of Panama in February, June, and July (Wetmore, 1965). The species was reported by Ridgely and Gwynne (1989) as a fairly common transient, mostly June-September, with a few at other times. However, Spear and

Ainley (1999) reported observing only seven individuals in the Panama Bight on ten cruises between 1984-1991 (although it is not clear how many of these were actually in Panamanian waters). A similar study to ours off Costa Rica failed to detect any individuals on 11 offshore trips from 2006 to 2010 (Young & Zook, 2016). Our findings also suggest this species may not be as regular or common in the region as previously believed. The species is not expected to occur regularly off Panama nor Central America since these waters are outside the species' main migration track due to several oceanographic features (Howell, 2012; Shaffer *et al.*, 2006). Its presence off Central America may be related to food-poor years in the Humboldt Current (Howell, 2012).

Ardenna creatopus (Pink-footed Shearwater): A group of three individuals photographed on 25 October 2014 off the southeastern Azuero Peninsula was the first record for Panama (Jones & Komar, 2016; Figure 3C). Three other records, all of single birds, were obtained in May, July and November in deep waters. Months of occurrence suggest this is a passage migrant off Panama's Pacific coast.

Puffinus subalaris (Galapagos Shearwater): The most frequently recorded procellariid during the study, present in 53.3% of 1-hour periods overall, in both dry and wet seasons and over the continental shelf and, especially, in continental shelf/deep waters, where it was present in 80.6% of 1-hour periods. Birds copulating, or attempting to copulate, were seen on May off Piñas Bay, in eastern Darien province. All but one of the birds documented by photographs were of the light-winged type. Dark-winged and light-winged types may represent different species (Howell, 2012; Howell & Zufelt, 2019). Loftin (1991) found that the distribution of observations in the Gulf of Panama was bimodal, occurring in April-August and October-December, suggesting seasonal migration. However, Snow (1965) reported the species to nest year-round in the Galapagos Islands, its only breeding site. Robins found the species only near Piñas Bay in July 1957, where 15 were present, and not recorded elsewhere in the Gulf of Panama. Murphy (1956) found the species abundant off western Panama in late November, with hundreds seen on 30 November. He also reported that on an earlier cruise in these waters, B. Shimada observed that large number of shearwaters, believed to be this species, "descended on decks, sung in pairs, and even copulated."

Fregata magnificens (Magnificent Frigatebird): The most frequently encountered species during the study, although usually in low numbers, except on transects over the continental shelf near breeding colonies. The species breeds in Panama in both the Gulf of Panama and the Gulf of Chiriquí (Angehr & Kushlan, 2007; Angehr *et al.*, 2014).

Sula granti (Nazca Booby): One to up to three individuals were seen, exclusively on deep waters during the wet season. Typically seen resting on floating debris. When seen flying, individuals invariably showed little interest in the boat. Only adult birds were seen. Loftin



(1991) found them, usually small numbers, in September-November and April-June, but observed an exceptional 71 individuals in June between the Pearl Islands and Piñas Bay in Darien. The closest breeding sites to Panama are the Galapagos and Malpelo Islands (Pitman & Jehl, 1998), the latter being the closest site to Panama. Masked Booby *Sula dactylactra* potentially occurs in the study area but none were identified during this study by the authors. The closest breeding sites to Panama are Isla del Coco off Costa Rica, where small numbers breed (Montoya, 2008), and in larger numbers on Clipperton Island off Mexico (Pitman & Jehl, 1998). Young and Zook (2016) recorded both species regularly off Costa Rica, but observations of Masked Booby were mainly west of those of Nazca Booby.

Sula nebouxii (Blue-footed Booby): Almost exclusively recorded over the continental shelf, near the coast or breeding colonies on islands in the Gulf of Panama. The species is known to breed in Panama only in the Gulf of Panama (Angehr & Kushlan, 2007). The only record over deep waters was off the coast at the tip of the Burica Peninsula, in extreme western Panama (the westernmost record of this species for the country), a place where the 1000 m isobath passes less than 1 km from shore. Several hundreds were seen in the Gulf of Panama during 1-hour records in 2014 and 2015, probably representing an incursion from the Galapagos Islands (Lee & Komar, 2011), perhaps related to an ENSO event (Buitrago-Rosas *et al.*, 2020). A similar incursion occurred during the ENSO event of 1983-1984 (Smith, 1990). Loftin (1991) reported the species in small numbers on every cruise.

Sula variegata (Peruvian Booby): This South American species was recorded in August 2014 and August 2015 in continental shelf waters in the Gulf of Panama, near the coast of Panama City, and in the northernmost Pearl Islands, where 3 to 38 individuals were seen on or near rocky islets (Figure 3D). Their presence in these waters was certainly associated with an ENSO event (Lee & Komar, 2011; Buitrago-Rosas *et al.*, 2020). The only previous invasion of Panamanian waters occurred during the ENSO event of 1983-1984 (Ridgely & Gwynne, 1989), when thousands appeared in the Gulf of Panama, which might be a refuge from the effects of ENSO in their usual distribution in the Humboldt Current (Smith, 1990). Birds observed in 2014-2015 appeared to be in good condition. During the 1983-1984 event, Smith (1990) found that although Peruvian Boobies were in good condition when they first arrived in Panama, over the course of the next year many lost weight and most probably eventually died of starvation.

Sula leucogaster (Brown Booby): Common year-round, both over the continental shelf and continental slope/deep waters. This is the most widely distributed of the two breeding sulids in Panama, with nesting colonies on the Pacific coast in both the Gulf of Panama and the Gulf of Chiriquí (Angehr & Kushlan, 2007; Angehr *et al.*, 2012). Loftin (1991) found it to be the second most abundant species after Black Tern, recorded on all cruises.

Sula sula (Red-footed Booby): Only one record during the study, an immature seen off the southeastern Azuero Peninsula on 22 December 2019, feeding with a mixed flock of terns,



shearwaters and boobies. The species is a vagrant in Panama, with most records being from the Caribbean coast (Ridgely & Gwynne, 1989; Angehr & Dean, 2010). The closest breeding site to Panama is Cocos Island off Costa Rica, and possibly on rocky islets off the southeastern Pacific coast of Costa Rica (Garrigues & Dean 2007).

Nannopterum brasilianus (Neotropical Cormorant): The few sightings of this species during the study were always near the coast or islands on the continental shelf, especially in the Gulf of Panama, the location of its main breeding colonies in Panama (Angehr & Kushlan, 2007; Kushlan *et al.*, 2017).

Pelecanus occidentalis (Brown Pelican): Present in 53.4% of 1-hour periods over the continental shelf, especially in the Gulf of Panama, where the species is abundant. The species breeds in both the Gulf of Panama and the Gulf of Chiriquí (Angehr & Kushlan, 2007; Angehr *et al.*, 2012). Recorded by Loftin (1991) on every cruise, but most common in January and February, near the start of the breeding season.

CONCLUSIONS

These observations include three species (*Hydrobates castro*, *Pseudobulweria rostrata* and *Ardenna creatopus*) added to the list of birds of Panama (Jones & Komar 2011; Jones & Komar, 2015), and provide the first documented evidence of occurrence in Panama of two additional species (*Anous minutus* and *Procellaria parkinsoni*). Some of these species probably have been overlooked. Also, increase our knowledge on seabirds species occurring off the Pacific coast of Panama and offer an idea of the species that are within the reach of the pelagic avitourist.

The methods implemented preclude the inclusion of mainly coastal species, specially of the family Laridae. Members of this family seen by the authors at coastal sites, but also at offshore waters during the study period by others observers were *Leucophaeus pipixcan*, *Larus delawarensis*, *Larus dominicanus*, *Sternula antillarum*, *Gelochelidon nilotica*, *Sterna forsteri* and *Rynchops niger* (www.ebird.org).

At the other hand, these additional four species were photographed off the Pacific coast of Panama during the study period by other observers (thus, not included in this study): *Creagrus furcatus* (Campos, 2015), *Gygis alba* (Gourad, 2019; Buitrago-Rosas *et al.*, 2020), *Puffinus puffinus* (Hull, 2017) and *Sula dactylatra* (Groenendijk, 2017). A fifth species, *Phalaropus lobatus*, was accepted by the Panama Audubon Society's Records Committee as a new, hypothetical species for Panama due to a sight report (Sociedad Audubon de Panama, 2021; Namitz, 2015). These additional species highlight the diversity of species that exists in the Panamanian Pacific and the need to explore the area in a more systematic way. This may result in the addition of new species and to exactly determine the importance of these waters for their life cycles.



ACKNOWLEDGMENTS

I wish to thank all the pelagic enthusiasts that joined the field trips, specially to R Luck who provided photographic documentation of many species. To J Medina, WJ Adsett and D Klauber for reviewing the manuscript. This paper is dedicated to the memory of the late GR Angehr, who participated in most of the field trips and made important contributions to the "species accounts" section of this work. His myriad and everlasting contributions to Panamanian ornithology inspire us all.

BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

- Acorn Consulting Partnership Ltd. (2008). Developing a niche tourism market database for the Caribbean. <https://www.onecaribbean.org/wp-content/uploads/NicheMarketsDatabase.pdf>
- Ainley, D.G. (1980). Geographic variation in Leach's Storm-Petrel. *Auk*. 97:837-853. <https://doi.org/10.1093/auk/97.4.837>
- Angehr, G.R. & Dean, R. (2010). *The Birds of Panama: a Field Guide*. Cornell University Press, Ithaca, NY, EEUU.
- Angehr, G.R. & Kushlan, J.A. (2007). Seabird and colonial wading bird nesting in the Gulf of Panama. *Waterbirds* 30:335–357. [https://doi.org/10.1675/15244695\(2007\)030\[0335:SACWBN\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1675/15244695(2007)030[0335:SACWBN]2.0.CO;2)
- Angehr, G.R., Kushlan, J.A. & Hines, K.N. (2014). Nesting sites and population estimates of seabirds and other waterbirds of the Gulf of Chiriquí, Panama. *Waterbirds*. 37:426–431. <https://doi.org/10.1675/063.037.0410>
- American Ornithologists' Union [AOU]. (1998). *Check-list of North American Birds* (7th ed.). Washington, DC: American Ornithologists' Union.
- BirdLife International. (2012). Spotlight on seabirds. Presented as part of the BirdLife State of the world's birds website. <http://www.birdlife.org/datazone>.
- BirdLife International. (2020). IUCN Redlist. <http://www.birdlife.org> on 21 April 2021.
- Buitrago-Rosas, D., Medina, J.L. & Castillo-Caballero, P.L. (2020). Records of White Tern *Gygis alba* in Panama and potential connections to El Niño events. *Mar. Ornithol.* 48: 171–174.



- Campos, E. (2015). eBird Checklist: <https://ebird.org/camerica/checklist/S32066689>. eBird: An online database of bird distribution and abundance [web application]. Ithaca, USA: eBird. [Available online at: <http://www.ebird.org>. Accessed 4 April 2021]
- Carboneras, C. (1992). Family Procellariidae (petrels and shearwaters). In J. del Hoyo, A. Elliott, & J. Sargatal (Eds.), *Handbook of the Birds of the World*. Vol. 1 (pp.216-257). Barcelona, Spain: Lynx Editions.
- Chesser, T.R., Billerman, S.M., Burns, K.J., Cicero, C., Dunn, J.L., Hernández-Baños, B.E., Kratter, A.W., Lovette, I.J., Mason, N.A., Rasmussen, P.C., Remsen, J.V.Jr., Stotz, D.F. & Winker, K. (2017). Fifty-eighth supplement to the American Ornithological Society's Check-list of North American Birds. *Auk*. 134:751-773.
- Crossin, R.S. (1974). The Storm-Petrels (Hydrobatidae). Pages 104-205 In: King, W. B. (Ed.). (1974). *Pelagic studies of seabirds in the central and eastern Pacific Ocean*. Smithsonian Contributions to Zoology, 158.
- Croxall, J.P., Butchart, S.H.M., Lascelles, B., Stattersfield, A.J., Sullivan, B., Symes, A. & Taylor, P. (2012). Seabird conservation status, threats and priority actions: a global assessment. *Bird. Conserv. Int.* 22: 1-34. <https://doi.org/10.1017/S0959270912000020>
- D'Croz, L. & O'Dea, A. (2007). Variability in upwelling along the Pacific shelf of Panama and implications for the distribution of nutrients and chlorophyll. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 73: 325-40. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.01.013>
- Estela, F.A., López-Victoria, M., Castillo, L.F. & Naranjo, L.G. (2010). Estado del conocimiento sobre aves marinas en Colombia, después de 110 años de investigación. *Bol. SAO*. 20: 2-21.
- Garrigues, R. & Dean, R. (2007). *The Birds of Costa Rica. A Field Guide*. Cornell University Press, Ithaca, NY, EEUU.
- Gouraud, C. (2019). eBird Checklist: <https://ebird.org/camerica/checklist/S60608743>. eBird: An online database of bird distribution and abundance [web application]. Ithaca, USA: eBird. [Available online at: <http://www.ebird.org>. Accessed 4 April 2021].
- Groenendijk, K. (2017). eBird Checklist: <https://ebird.org/checklist/S34648128>. eBird: An online database of bird distribution and abundance [web application]. Ithaca, USA: eBird. [Available online at: <http://www.ebird.org>. Accessed 4 April 2021]
- Harrison, P. (1983). *Seabirds: An Identification Guide*. Houghton Mifflin Company, Boston, MA.



- Howell, S.N.G. (2012). Petrels, albatrosses, and storm petrels of North America. New Jersey, NJ: Princeton University Press.
- Howell, S.N.G. & Zufelt, K. (2019). Oceanic Birds of the World: A Photo Guide. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Hull, W. (2017). eBird Checklist: <https://ebird.org/checklist/S38596925>. eBird: An online database of bird distribution and abundance [web application]. Ithaca, USA: eBird. [Available online <http://www.ebird.org>. Accessed 4 April 2021].
- Jehl, J.R.Jr. (1974). The near-shore avifauna of the Middle American west coast. *Auk*. 91, 681-699. <https://doi.org/10.2307/4084721>
- Jones, H.L. & Komar, O. (2011). Central America (in The Regional Reports: Fall Migration, August through November 2010). *North Am. Birds*. 65:174-180.
- Jones, H.L. & Komar, O. (2015). Central America (in The Regional Reports: Fall Migration, August through November 2014). *North Am. Bird.*, 69:163-168.
- Loftin, H. (1991). An annual cycle of pelagic birds in the Gulf of Panama. *Neotropic. Ornithol.* 2:85-94.
- López-Victoria, M. & Estela, F. (2006). Additions to the breeding seabirds of Malpelo Island, Colombia. *Mar. Ornithol.* 34:83-84.
- Mate, J. (2006). Análisis de la situación de la pesca en los golfos de Chiriquí y de Montijo. The Natyry Conservancy. Second edition.
- Montoya, M. (2008). Aves marinas de la isla del Coco, Costa Rica, y su conservación. *Rev. Biol. Trop.* 56: 133-149.
- Murphy, R.C. (1936). Oceanic birds of South America, 2 vols. American Museum of Natural History, New York.
- Murphy, R.C.(1944a). To the Chocó in the schooner “Askoy”. *J. Nat. Hist.* 53: 200-208.
- Murphy, R.C. (1944b). Among the Pearl Islands. The second installment in the story of the “Askoy” expedition. *J. Nat. Hist.* 53: 274-281.
- Murphy, R.C. (1944c). Beyond the Continental Shelf. The third installment in the story of the “Askoy” expedition. *J. Nat. Hist.* 53: 303-309.



- Murphy, R.C. (1956). The vertebrates of SCOPE, November 7-December 16. Birds. Pages 121-140 In: R. W. Holmes (Ed.). Physical, Chemical, and Biological Observations in the Eastern Tropical Pacific, November-December 1956 Scripps Institute of Oceanography, La Jolla, CA.
- Namitz, R. (2015). eBird Checklist: <https://ebird.org/checklist/S21801577>. eBird: An online database of bird distribution and abundance [web application]. Ithaca, USA: eBird. [Available online at: <http://www.ebird.org>. Accessed 4 April 2021].
- Olson, S.L. (1997). Avian biogeography in the islands of the Pacific coast of western Panama. pp 69-82 in Dickerman, Robert W. (compiler), The Era of Allan R. Phillips: A Festschrift. Horizon Communications, Albuquerque.
- Onley, D. & Scofield, P. (2007). Albatrosses, Petrels and Shearwaters of the World. Princeton University Press, Princeton, NJ, EEUU.
- Pitman, R.L, Spear, L.B. & Force, M.P. (1995). The Marine Birds of Malpelo Island, Colombia. Col. Waterbirds. 18: 113-119. <https://doi.org/10.2307/1521408>
- Pitman, R.L. & Jehl, J.R.Jr. (1998). Geographic variation and reassessment of species limits in the "Masked" boobies of the eastern Pacific Ocean. Wilson Bull. 110: 155-170.
- Reed, J.R. (1988). Inca Terns in the Bay of Panama during the 1982-1983 El Nino event. Am. Birds. 42: 172-173.
- Ridgely, R.S. & Gwynne, J.A. (1989). A Guide to the Birds of Panama. New Jersey, NJ: Princeton University Press.
- Robins, C.R. (1958). Observations on oceanic birds in the Gulf of Panama. Auk. 60: 300-302. <https://doi.org/10.2307/1365155>
- Shaffer, S.A., Tremblay, Y., Weimerskirch, H., Scott, D., Thompson, D.R., Sagar, P.M., Moller, H., Taylor, G.A., Foley, D.G., Block, B.A. & Costa, D.P. (2006). Migratory shearwaters integrate oceanic resources across the Pacific Ocean in an endless summer. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 103: 12799-12802.
- Smith, N.G. (1990). The Gulf of Panama and El Niño Events: the fate of two refugee boobies from the 1982-83 event. In: Global ecological consequences of the 1982-83 El Nino-Southern Oscillation, edited by P. W. Glynn, pp. 381-394. Amsterdam: Elsevier.



- Sociedad Audubon de Panama. (2021). Lista de las Aves de Panamá. Downloaded from <https://www.audubonpanama.org/publicaciones.html> on 18 September 2021.
- Spear, L.B. & Ainley, D.G. (1999). Seabirds of the Panama Bight. *Waterbirds*. 22: 175-198. <https://doi.org/10.2307/1522207>
- Stiles, F.G. & Skutch, A.F. (1989). *A Guide to the Birds of Costa Rica*. Ithaca, New York, NY: Cornell University Press.
- Vallely, A.C. & Dyer, D. (2018). *Birds of Central America*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Wetmore, A. (1965). The Birds of the Republic of Panama. Part 1. Tinamidae (Tinamous) to Rhynchopidae (Skimmers). *Smithsonian Miscellaneous Collections* 150. Smithsonian Institution Press, Washington, DC.
- Winker. (2021). Sixty-second supplement to the American Ornithologists' Society's checklist of North American birds. *Ornithol.* 138: 1–18.
- Young, B.E. & Zook, J.R. (2016). Observation frequency and seasonality of marine birds off the Pacific coast of Costa Rica. *Rev. Biol. Trop.* 64: 235-248. <https://doi.org/10.15517/rbt.v64i1.23453>

