



Biología-Química-Física  
Matemática-Estadística



# TECNOCIENCIA

Volumen 25 No. 2

ISSN L 2415-0940



Revista de la Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología  
Universidad de Panamá  
julio - diciembre 2023



# **TECNOCIENCIA**

**Volumen 25, No.2**

**julio-diciembre 2023**

**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](mailto: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](mailto:eduardo.camachoa@up.ac.pa)

<https://orcid.org/0000-0001-9339-486X> ;

### Consejo

Mgter. Roberto Cambra

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

[roberto.cambra@up.ac.pa](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto:aurora.mejia@up.ac.pa)

Dr. Janzel Villalaz

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

<https://orcid.org/0000-0001-8914-3216>

Mgter. Jacobo Araúz

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

<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](mailto: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 Ortiz

Institut Cartografic I Geologic, Barcelona Catalunya, España

[josep.batlo@icgc.cat](mailto: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](mailto:bruno.zachrissons@idiap.gob.pa) <https://orcid.org/0000-0002-8219-7438>

Dr. Luis Wong Vega

Universidad de Panamá, Vicerrectoría de Investigación y Postgrado, Panamá [luis.wongv@up.ac.pa](mailto:luis.wongv@up.ac.pa) /[luis.wong.vega@gmail.com](mailto:luis.wong.vega@gmail.com)

<https://orcid.org/0000-0003-0139-6134>

Dr. Fernando Gómez Merino

Colegio de Postgraduados, México

[fernandg@colpos.mx](mailto: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](mailto: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](mailto:yaxelis.mendoza@up.ac.pa) <https://orcid.org/0000-0002-7113-0430>

### Comité de diagramación, estilo y producción

Dr. Eduardo Camacho Astigarrabia

Universidad de Panamá - Editor Jefe

Michelle Ferrín - Universidad de Panamá - Secretaría Técnica

Ing. Samuel Rodríguez - Universidad de Panamá - Técnico

# *Editorial*

La revista **TECNOCENCIA** presenta a la comunidad académica y profesional, nacional e internacional su volumen 25, número 2 correspondiente al periodo de julio a diciembre de 2023. El cual comprende doce (12) artículos que se corresponden con los temas de interés de la publicación. En ese sentido, se presenta cada uno de ellos con una breve descripción de sus contenidos:

En el artículo titulado “Modelamiento del irradiador preclínico X-RAD 320 a partir de simulaciones Monte Carlo utilizando una fuente puntual”, se utilizó un programa que emite imágenes planares de Rayos X de kV para corregir los perfiles de dosis relativa por el efecto talón.

Con relación a la “Caracterización dosimétrica del irradiador preclínico X-RAD 320 a partir de simulaciones Monte Carlo” se demostró que, para las curvas de dosis en profundidad, perfiles de dosis y *output factors* para las diferentes calidades de haz se corresponden con el comportamiento esperado.

Puesto que era necesario resaltar la importancia de los armadillos como especie clave en ecosistemas, debido a que por su actividad atraen múltiples especies, contribuyendo a mantener la biodiversidad, incluso en zonas intervenidas como fincas ganaderas, se presenta el estudio titulado: “Caracterización de la población de *Dasyopus novemcinctus* y fauna asociada a sus madrigueras en Soná, Veraguas, Panamá.

El objetivo del artículo: “Behavioural, notes of *Zenaidura macroura* (Nelson, 1912) and other wild doves at the Chucantí private natural reserve (CPNR), Darien, Panama”, fue reconocer la diversidad de palomas silvestres en la RNPC y describir una línea base de su comportamiento. Finalmente se concluyó que la diversidad encontrada con respecto a las palomas silvestres representa una oportunidad única para estudiar estas especies en la RNPC y otro motivo importante para su conservación.

El estudio: “Evaluación de rendimiento en biomasa de cuatro cultivares de maíz: caso de la cuenca baja del río Purio, Provincia de Los Santos, año 2012, permitió que los autores concluyeran que la elección de los sistemas de cero labranza y labranza de conservación, son los recomendados para las parcelas de producción que se encuentran en las áreas de alta agresividad climática, ya que un índice de erosividad alto constituye una fuente de degradación directa de la fertilidad de los suelos agrícolas con pérdida de la materia orgánica y microbiota.

Puesto que era necesario evaluar el índice de carga puntual,  $I_s$  (50), de un material rocoso, en función de las dimensiones de las probetas, se realizó la investigación titulada: Evaluación del índice de carga puntual con la variación de la geometría de probetas en material rocoso”, en la cual se probó que la propiedad resistencia a la compresión, tiene una relación óptima con el índice de carga puntual, siempre que se efectuó una “geometría de probetas” ideal.

A fin de concluir que la contribución a la radiactividad de la región volcánica objeto de estudio es pequeña, por lo que se recomienda mantener una buena ventilación en las viviendas, se realizó la investigación titulada: “Incidencia del Radón-222 en la radiactividad de fondo en algunas viviendas del Valle de Antón, Panamá”.

A través del artículo: “Mecanismos moleculares involucrados en la diferenciación de células madre de linajes gliales”, se definen los conceptos claves en biología de células madre con respecto al sistema nervioso, presenta una descripción general del desarrollo de las células oligodendrocíticas y su importancia en el desarrollo de la

mielinización, el cual requiere un modelo experimental en el que los axones neuronales y los oligodendrocitos se puedan controlar y manipular durante el proceso.

Dado que el grado de infestación parasitaria en alevines de tilapia nilótica de la estación Dulceacuícola de Divisa sigue siendo alta, aunque al compararlas con las prevalencias obtenidas en estudios previos, nos permite sugerir que las condiciones de manejo han mejorado en el tiempo, es lo que concluyeron los autores del artículo: Ectoparásitos en alevines de *Oreochromis niloticus* en Estación Dulceacuícola de Divisa, Panamá”.

Los autores del artículo “Niveles de concentración de material particulado PM suspendido en el aire durante 17 años de medición, en el campus central de la Universidad de Panamá” señalan que, siempre hay un grado de incertidumbre en las predicciones meteorológicas; esto se debe a que la atmósfera es un sistema complejo y no lineal, y en consecuencia, las pequeñas variaciones en las condiciones iniciales pueden impactar significativamente su comportamiento a largo plazo.

En el siguiente artículo titulado: “Funciones absolutamente continuas y el Teorema Fundamental del Cálculo”, se introducen las funciones de variación acotada y las funciones absolutamente continua y se prueba que estas últimas son exactamente funciones que satisfacen el teorema fundamental de cálculo en la teoría de integración de Lebesgue.

Para cerrar este número se presenta el artículo: “Metales trazas (Cu, Cd, Pb) en agua, sedimento y tejido blando de *Leukoma Asperimma* (Lamellibranchia: veneridae), en la Playa Bique, Pacífico de Panamá”, en el cual se evidenció que el cobre presentó valores más altos en agua en temporada seca, mientras que la concentración de plomo fue mayor en agua y sedimento en la temporada lluviosa y en el tejido blando, durante la temporada seca. Los valores encontrados de los tres metales trazan en tejido de *L. asperrima* no superan los límites permisibles para el consumo humano según las normas internacionales.

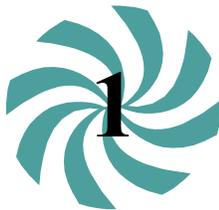
Finalmente es importante acotar que los artículos presentados en este número pasaron por todos los procesos de gestión editorial que ha caracterizado el trabajo que realizan todos los involucrados en la publicación, por lo que se agradece a los autores la confianza depositada en la revista **TECNOCENCIA** .



Mgter. Damaris V. Tejedor De-León  
Normas de Publicación.VIP/OPAC  
Coordinadora del Centro de Acopio Latindex-Panamá

## Índice

Título	Página
MODELAMIENTO DEL IRRADIADOR PRECLÍNICO X-RAD 320 A PARTIR DE SIMULACIONES MONTE CARLO UTILIZANDO UNA FUENTE PUNTUAL .....	5-24
CARACTERIZACIÓN DOSIMÉTRICA DEL IRRADIADOR PRECLÍNICO X-RAD 320 A PARTIR DE SIMULACIONES MONTE CARLO .....	25-35
CARACTERIZACIÓN DE LA POBLACIÓN DE <i>Dasytus novemcinctus</i> Y FAUNA ASOCIADA A SUS MADRIGUERAS EN SONÁ, VERAGUAS, PANAMÁ.....	36-62
BEHAVIOURAL NOTES OF <i>Zentrygon goldmani oreas</i> (NELSON, 1912) AND OTHER WILD DOVES AT THE CHUCANTÍ PRIVATE NATURAL RESERVE (CPNR), DARIEN, PANAMA .....	63-80
EVALUACIÓN DE RENDIMIENTO EN BIOMASA DE CUATRO CULTIVARES DE MAÍZ: CASO DE LA CUENCA BAJA DEL RÍO PURIO, PROVINCIA DE LOS SANTOS, AÑO 2021 .....	81-104
EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE CARGA PUNTUAL CON VARIACION DE LA GEOMETRIA DE PROBETAS EN MATERIAL ROCOSO .....	105-120
INCIDENCIA DEL RADÓN-222 EN LA RADIOACTIVIDAD DE FONDO EN ALGUNAS VIVIENDAS DE EL VALLE DE ANTÓN, PANAMÁ .....	121-136
MECANISMOS MOLECULARES INVOLUCRADOS EN LA DIFERENCIACIÓN DE CÉLULAS MADRE EN LINAJES GLIALES .....	137-167
ECTOPARÁSITOS EN ALEVINES DE <i>Oreochromis niloticus</i> EN LA ESTACIÓN DULCEACUÍCOLA DE DIVISA, PANAMA .....	168-183
NIVELES DE CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO PM SUSPENDIDO EN EL AIRE DURANTE 17 AÑOS DE MEDICIÓN, EN EL CAMPUS CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD DE PANAMÁ .....	184-203
FUNCIONES ABSOLUTAMENTE CONTINUAS Y EL TEOREMA FUNDAMENTAL DEL CÁLCULO .....	204-226
METALES TRAZAS (CU, CD, PB) EN AGUA, SEDIMENTO Y TEJIDO BLANDO DE <i>LEUKOMA ASPERIMMA</i> (LAMELLIBRANCHIA: VENERIDAE), EN LA PLAYA BIQUE, PACIFICO DE PANAMÁ .....	227-253



Tecnociencia, Vol. 25, N°2: 8-27

Julio-Diciembre 2023

ISSN L 2415-0940

## **MODELAMIENTO DEL IRRADIADOR PRECLÍNICO X-RAD 320 A PARTIR DE SIMULACIONES MONTE CARLO UTILIZANDO UNA FUENTE PUNTUAL**

**Luis E. Emiliani**

Universidad de Panamá. Panamá. [luisemiliani02@gmail.com](mailto:luisemiliani02@gmail.com)

<https://orcid.org/0000-0002-4876-1592>

DOI <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v25n2.a4061>

**Fecha de recepción:** 1 de noviembre de 2022

**Fecha de aceptación:** 13 de febrero de 2023

### **RESUMEN**

Se determinó un método para modelar el irradiador preclínico X-RAD 320 a partir de simulaciones Monte Carlo utilizando el código DOSXYZnrc a partir de una fuente puntual de radiación isotrópica que emite un espectro de energía generado con el programa SpekCalc. Las simulaciones MC dan como resultados matrices 3D de dosis por partícula, de las mismas se pueden extraer la dosis relativa en profundidad, perfiles de dosis relativa y *output factors*. Se utilizó un programa que emite imágenes planares de rayos X de kV para corregir los perfiles de dosis relativa por el efecto talón. Debido a la falta de datos experimentales se tuvo que validar las simulaciones MC de este trabajo con las medidas realizadas por Azimi *et. al.* (2014). Las congruencias de las simulaciones MC con las medidas de Azimi permiten validar la metodología empleada en este trabajo, siempre y cuando se tengan presentes las limitaciones que tiene el método empleado.

### **PALABRAS CLAVES**

Física Médica, método de Monte Carlo, radiación, irradiador preclínico.

# **MODELLING OF THE X-RAD 320 PRECLINICAL IRRADIATOR BASED ON MONTE CARLO SIMULATIONS USING A POINT SOURCE**

## **ABSTRACT**

A method was determined to model the X-RAD 320 preclinical irradiator from Monte Carlo simulations using the DOSXYZnrc code from a point source of isotropic radiation that emits an energy spectrum generated with the SpekCalc program. The MC simulations generate a 3D matrix of dose per particle, from which the relative depth doses, relative dose profiles and output factors can be extracted. A program that emits planar kV X-ray images was used to correct the relative dose profiles for the heel effect. Due to the lack of experimental data, the MC simulations of this work had to be validated with the measurements made by Azimi et. al. (2014). The congruences of the MC simulations with the Azimi measures allow us to validate the methodology used in this work, if the limitations of the method used are considered.

## **KEY WORDS**

Medical Physics, Monte Carlo method, radiation, preclinical irradiator.

## **INTRODUCCIÓN**

El modelamiento de los equipos de radiación utilizados en investigaciones preclínicas es crucial para garantizar la entrega de dosis de forma precisa y segura en los experimentos. La utilización de simulaciones Monte Carlo se ha vuelto una herramienta valiosa en este sentido, permitiendo obtener una representación precisa de la distribución de la dosis en profundidad y perfiles de dosis relativa para para diferentes tamaños de campo.

En este trabajo, presentamos el modelamiento del irradiator X-RAD 320, un equipo de radiación de kilovoltaje con energías entre 40-320 kVp. Esto se hizo a partir de simulaciones Monte Carlo (MC) utilizando los códigos de EGSnrc (Kawrakow *et al.*, 2013) y DOSXYZnrc (Walters, Kawrakow and Rogers, 2005) para el transporte de partículas en fantomas de agua o tomografías computarizadas (TC) de rayos X de pacientes.

Usualmente para las simulaciones MC de un tubo de rayos X se requiere conocer la geometría del mismo y simular el transporte de partículas a

través del tubo con el código BEAMnrc (Rogers, Walters and Kawrakow, 2005), sin embargo, en nuestro caso no contábamos con el diagrama esquemático y las dimensiones del tubo de rayos X del X-RAD 320 y por ello desarrollamos un método alternativo que consiste en la utilización de una fuente puntual de radiación isotrópica que emite un espectro de energía generado con el programa de uso comercial SpekCalc que simuló las características del tubo de rayos X del X-RAD 320. Debido a la falta de las medidas experimentales las simulaciones MC se compararon con las medidas tomadas por Azimi *et al.* (2014) para realizar su validación. La reciente obtención del irradiador preclínico X-RAD 320 por parte del grupo de Física Médica de la Pontificia Universidad Católica de Chile brinda la oportunidad para desarrollar esta investigación y por motivos de la pandemia no se pudieron realizar las medidas experimentales.

## **MÉTODOS Y MATERIALES**

### **1. Irradiador X-RAD 320**

El irradiador X-RAD 320 es un sistema de rayos X autónomo que se utiliza específicamente para la irradiación de animales pequeños y muestras biológicas. La unidad tiene un rango de tensiones de tubo de 5–320 kVp, un rango de corriente de tubo de 0,1–45 mA y una tasa de dosis máxima de 3 Gy/min a una distancia de la fuente a la superficie (SSD) de 50 cm. El X-RAD 320 no tiene filtración inherente excepto por una ventana de berilio de 3 mm. Un portafiltros en la ventana de salida permite agregar filtros de acondicionamiento de haz para lograr diferentes calidades de haz. El irradiador adquirido por la Pontificia Universidad Católica de Chile (UC) cuenta con filtros tales como: Thoraeus (0,75 mm Sn, 0,25 mm Cu, 1,5 mm Al), 2 mm de aluminio, 3 mm de aluminio, 3 mm de cobre y 5 mm de cobre.

### **2. Simulación del espectro de energía para un haz del irradiador**

Se hizo uso del software comercial SpekCalc versión 1.1 para la simulación de los espectros de energía del irradiador preclínico X-RAD 320. SpekCalc es un programa comercial que calcula espectros de energía de tubos de rayos X con ánodo de tungsteno. Se pueden simular haces con tensiones de tubo que van de 40-300 kV, en donde se le permite al usuario elegir características del tubo de rayos X como ángulo

del ánodo, el material atenuador, entre otras como se muestra en la figura 1.

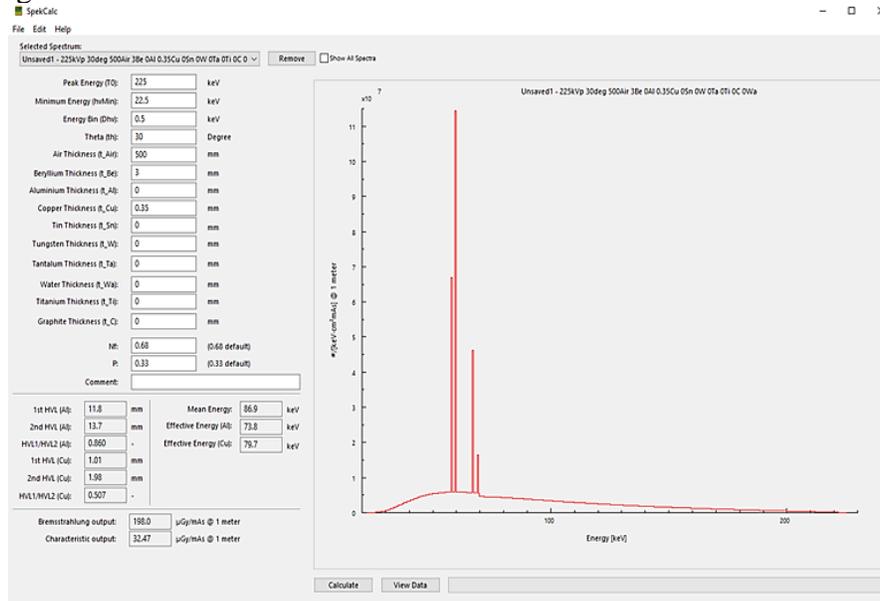


Fig. 1. Interfaz gráfica de SpekCalc.

Se simuló una calidad de haz acorde a las características del irradiador preclínico X-RAD 320 con un ángulo de ánodo de  $30^\circ$  y una filtración inherente de 3 mm de Berilio, a su vez se consideró un espesor de aire de 50 cm como distancia fuente superficie (SSD) de referencia, una filtración de 0,35 mm Cu y una tensión de tubo de rayos X de 225 kVp (Emiliani, 2021).

El  $HVL_1$  medido por Azimi *et al.* (2014) para una energía de 225 kVp y filtración de 0,35 mm Cu fue de 1,15 mm Cu, y el  $HVL_1$  simulado con SpekCalc para las mismas condiciones fue de 1,01 mm de Cu, se aprecia que el HVL no es exactamente el mismo, sin embargo, se asumió que ambas calidades de haz son equivalentes. Mesbahi y Zakariare (2013) y Dehyagani y otros (2011) encontraron que hubo una estrecha concordancia entre los resultados de los espectros de energía generados con simulaciones Monte Carlo a partir del código BEAMnrc y SpekCalc para todo el espectro de energía simulado (Mesbahi and Zakariaee, 2013) (Dehyagani *et al.*, 2011). Chen, Jong y Hharun mostraron que

hubo una buena concordancia para las medidas del espectro de energía con las simuladas a partir de SpekCalc y concluyeron que este programa es fácil de usar para predecir HVL, que se utiliza para caracterizar la calidad del haz de rayos X, y este modelo brinda predicciones casi instantáneamente en comparación con las mediciones experimentales (Chen, Jong and Hharun, 2012).

Se utilizó SpekCalc para simular los espectros de energía por la falta de datos experimentales detallados para hacer la simulación completa del equipo. Estos espectros de energía simulados se utilizaron como entrada en la simulación MC que será descrita a continuación.

### 3. Simulaciones Monte Carlo (MC)

La versión 3 del código DOSXYZnrc fue utilizada para las simulaciones Monte Carlo (Walters, Kawrakow and Rogers, 2005). Las simulaciones fueron calculadas en un computador portátil, con un procesador Intel Core i5 @ 1.60 GHz y 4 GB de memoria RAM utilizando una máquina virtual con Ubuntu 18.04. Los parámetros de las simulaciones MC se encuentran resumidos en la tabla 1. El resultado de las simulaciones MC son matrices 3D de dosis por partícula (Gy/partícula) en cada vóxel en el medio simulado, en donde cada vóxel tiene asociada una incertidumbre relativa, que se determina a través de procesos estadísticos detallados en Walters, Kawrakow y Rogers (2005).

Cuadro 1. Parámetros de simulación y transporte MC.

Parámetros de simulación MC	Global electron cutoff energy - ECUT (MeV) = 0,521 Global photon cutoff energy - PCUT (MeV) = 0,01 'HOWFARLESS' = ON (solo en los casos de la fantoma homogénea de agua) Número de historias = $7 \times 10^7$ a $5 \times 10^8$ Photon splitting number = 50
Parámetros de transporte MC	Boundary crossing algorithm = EXACT Electron transport cutoff (MeV) = 0,7 Photon transport cutoff (MeV) = 0,01 Todos los demás parámetros fueron establecidos por defecto.

Se utilizó la fuente 3 del código DOSXYZnrc que representa una fuente puntual de radiación isotrópica, como se muestra en la figura 2, en donde

la SSD (por sus siglas en inglés, *Source to Surface Distance*) es la distancia fuente superficie,  $x_{inl}$ ,  $x_{inu}$  representan los límites superior e inferior en el eje  $x$  del campo en la superficie del fantoma e  $y_{inl}$ ,  $y_{inu}$  representan los límites superior e inferior en el eje  $y$  del campo en la superficie del fantoma. Por otro lado, entre la fuente y la superficie de la fantoma, se supone que el medio es vacío para esta fuente. Para esta fuente el eje  $z$  es paralelo al eje del haz.

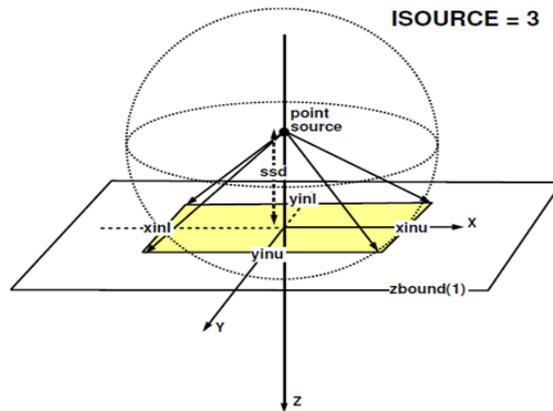


Fig. 2. Representación de la geometría para simulaciones MC utilizando la fuente 3 del código DOSXYZnrc. La fuente puntual de radiación isotrópica está ubicada en el eje  $z$  a una SSD seleccionable y está colimada en un campo rectangular definido por  $x_{inu}$ ,  $x_{inl}$ ,  $y_{inu}$ ,  $y_{inl}$  en la superficie del fantoma (Walters, Kawrakow and Rogers, 2005)

El tamaño de campo se define a una distancia fuente-isocentro (SAD, por sus siglas en inglés) de 50 cm, por lo tanto, como se utilizó una SSD = 50 cm para todas las simulaciones, el tamaño de campo queda definido en superficie.

En este trabajo se utilizó una fuente puntual de radiación isotrópica debido a que es la fuente más adecuada para reproducir las condiciones de irradiación real para tamaños de campo cuadrados. Dicha fuente junto a los espectros de energía simulados con SpekCalc y la SSD = 50 cm se utilizaron como parámetros de la fuente para las simulaciones MC.

La penumbra es la región del perfil lateral de campo que se caracteriza por una rápida variación de dosis, la cual depende fuertemente del

sistema de colimación, el tamaño focal de la fuente de radiación y las propiedades de dispersión lateral de las partículas cargadas. La penumbra total o física se define como la suma de la penumbra por transmisión (esta componente se debe a la transmisión a través de los colimadores), penumbra geométrica (esta componente se debe al tamaño/diámetro de la fuente) y la penumbra por dispersión (esta componente se debe a la contribución proveniente de la dispersión en el material irradiado). Así, el término ancho de penumbra física se define como la distancia lateral entre dos curvas de isodosis a una profundidad específica (Khan, 2003). Dichas isodosis son entre el 80 % y 20 % de la dosis máxima en el eje central. Las consecuencias de haber utilizado una fuente puntual es que la penumbra física calculada con las simulaciones MC no tendrán las componentes de la penumbra geométrica, debido a que una fuente puntual no modela las dimensiones de una fuente real, que habitualmente es del orden de los mm y la penumbra por transmisión, debido a que no se simuló físicamente el colimador.

Debido a que en este trabajo se utilizó una fuente puntual de radiación isotrópica, los perfiles de dosis generados por DOSXYZnrc no presentan el efecto talón característico de los haces de kilovoltaje (ver figura 3).

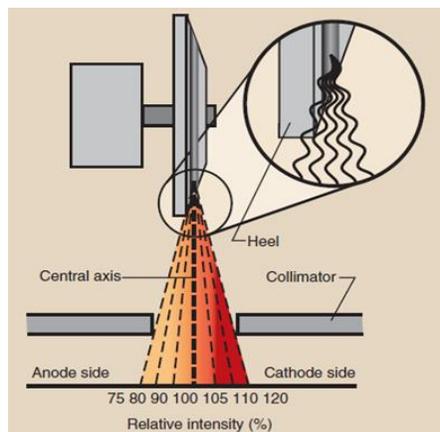


Fig. 3. El efecto talón da como resultado una reducción en la intensidad de los rayos X en el lado del ánodo debido a la absorción en el talón del objetivo y un aumento de la intensidad de los rayos X en el lado del cátodo (Bushong, 2017).

Se utilizó el programa ImaSim en su versión 1.0 (Landry, 2009), para simular el efecto talón para el tubo de rayos X con las características del espectro de energía simulado. ImaSim es un programa que permite la simulación de imágenes en diferentes modalidades como imágenes planares de kV, MV, CT y rayos X de haz cónico, utilizando un espectro de energía simulado con SpekCalc. Para obtener la matriz de corrección por el efecto talón utilizando ImaSim, asumimos que, si se utiliza el mismo espectro de energía utilizado para generar las matrices de dosis 3D, se obtiene una imagen equivalente a la que se obtendría en condiciones reales. Luego se simuló imágenes planares de kV con y sin efecto talón para las calidades de haz simuladas en el presente trabajo, luego se normalizó la imagen con efecto talón sobre la imagen sin efecto talón como se representa en la siguiente ecuación:

$$C(i, j) = \frac{I_{HE}(i, j)}{I_0(i, j)} \quad (1)$$

En donde  $I_{HE}$  es la imagen con efecto talón,  $I_0$  es la imagen sin efecto talón y  $C$  es la matriz de corrección por el efecto talón que va a depender de la calidad del haz y la profundidad, la cual modela aproximadamente el efecto talón para la calidad de haz simulada. Se calcularon las matrices de corrección para la calidad de haz simulada.

### 3.1. Evaluación de la dosis en condiciones homogéneas

Las dosis para condiciones homogéneas fueron calculadas sobre fantomas virtuales voxelizados de agua (con densidad  $1 \text{ g/cm}^3$ ). Las dimensiones fueron  $21 \times 21 \times 21 \text{ cm}^3$  para todas las simulaciones. Se definió un tamaño de vóxel de  $0,2 \times 0,2 \times 0,2 \text{ cm}^3$ . Se obtuvieron matrices de dosis para la calidad de haz de 225 kVp y una filtración de 0,35 mm Cu para tamaños de campo cuadrado entre  $2 \times 2$  y  $20 \times 20 \text{ cm}^2$ .

La figura 4 corresponde a la geometría de simulación de la fantoma de agua utilizado para las simulaciones MC. La geometría en el plano y, z es equivalente al plano x, z.

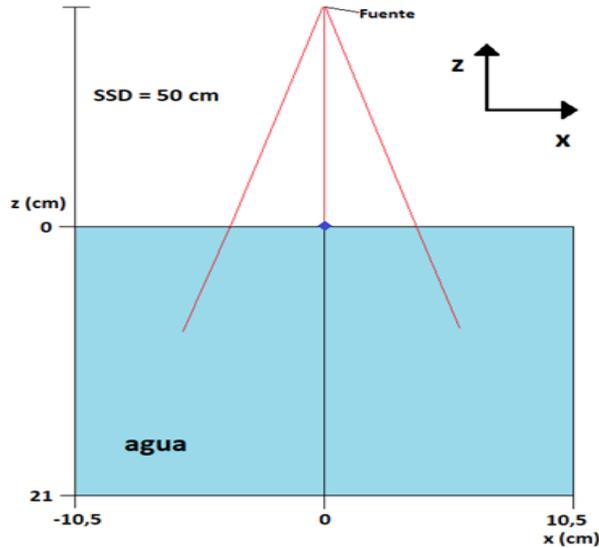


Fig. 4. Geometría de simulación de la fantoma de agua.

De las matrices de dosis se pueden obtener las curvas de dosis en profundidad en el eje central, los perfiles de dosis relativa (en el eje x, que corresponde a la dirección ánodo-cátodo) y los *outputs factors*. Los *outputs factors* se definen con la siguiente expresión:

$$OF(FS, d_0) = \frac{D(FS, d_0)}{D(FS_0, d_0)} \quad (2)$$

En donde  $OF(FS, d_0)$  es el *output factor* para un tamaño de campo  $FS$  y una profundidad de calibración  $d_0 = 2$  cm,  $D(FS, d_0)$  es la dosis para un tamaño de campo  $FS$  y una profundidad de calibración de 2 cm y  $D(FS_0, d_0)$  es la dosis para un tamaño de campo de calibración  $FS_0 = 10 \times 10 \text{ cm}^2$  y una profundidad de calibración de 2 cm.

#### 4. Validación de las simulaciones MC

Debido a que en este trabajo no se realizó una simulación completa del equipo, sino que se utilizó una fuente puntual con un espectro de energía generado para una filtración de 0,35 mm de Cu y una tensión de tubo de 225 kVp, se hace necesaria la validación del cálculo. Para este propósito se compararon las simulaciones de dosis en profundidad (para tamaños de campo de  $4 \times 4$ ,  $10 \times 10$  y  $20 \times 20 \text{ cm}^2$ ), perfiles de dosis relativa

(para tamaños de campo de  $4 \times 4$ ,  $10 \times 10$  y  $20 \times 20 \text{ cm}^2$  y profundidades de 1 y 5 cm) y los *outputs factors*  $OF$  (para tamaños de campo comprendidos entre  $2 \times 2$  hasta  $20 \times 20 \text{ cm}^2$ ), con medidas realizadas por Azimi *et al.* (2014) para el mismo equipo (X-RAD 320) para la calidad de haz correspondiente al filtro de 0,35 mm Cu y 225 kVp.

En el trabajo de Azimi *et al.* (2014), las medidas de dosis en profundidad de 0 a 1 cm se realizaron en una fantoma de agua sólida con una cámara de placas paralelas Attix (Gammex) con incrementos de 0,2 y 0,3 cm, con las lecturas normalizadas a las de una cámara cilíndrica a 1 cm de profundidad (ver figura 5b), mientras que para las profundidades comprendidas entre 1 y 15 cm se realizaron en un fantoma homogéneo de agua (ver figura 5a) y se utilizó una cámara de ionización tipo Pin Point Exradin A1SL con un volumen de  $0,057 \text{ cm}^3$ . Dicha cámara también se utilizó para las medidas de los perfiles de dosis relativa y los *outputs factors* ( $OF$ ). Los perfiles de dosis relativa se midieron en agua, mientras que los factores de dispersión total se midieron en agua sólida con la cámara ubicada a 2 cm de profundidad con una SSD de 50 cm, las medidas se normalizaron a un tamaño de campo de  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ .

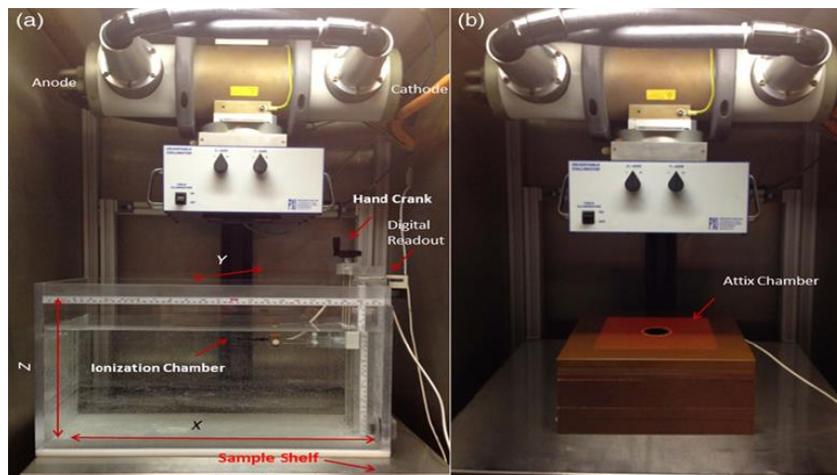


Fig. 5. (a) El fantoma de agua utilizado para mediciones de dosis en profundidad y perfiles, y (b) el fantoma de agua sólida usado para las mediciones de dosis de profundidad para profundidades comprendidas entre 0 y 1 cm, dentro del irradiador X-RAD 320 (Azimi *et al.*, 2014) . El eje x está en la dirección ánodo-cátodo, el eje y es perpendicular a la dirección ánodo-cátodo y el eje z está en el eje del haz.

El criterio utilizado para validar las simulaciones MC en dosis en profundidad es evaluar si las curvas de dosis en profundidad simuladas en este trabajo coinciden con las curvas de dosis en profundidad medidas por Azimi *et al.* (2014) dentro de las incertidumbres relativas asociadas a la medición y a la simulación para profundidades menores a 5 cm. Mientras que para validar los perfiles de dosis relativa y los *outputs factors* se evalúan las diferencias relativas entre las medidas de Azimi *et al.* (2014) y las simulaciones MC realizadas en este trabajo.

## RESULTADOS

En la figura 6 se muestra el espectro de energía generado con SpekCalc.

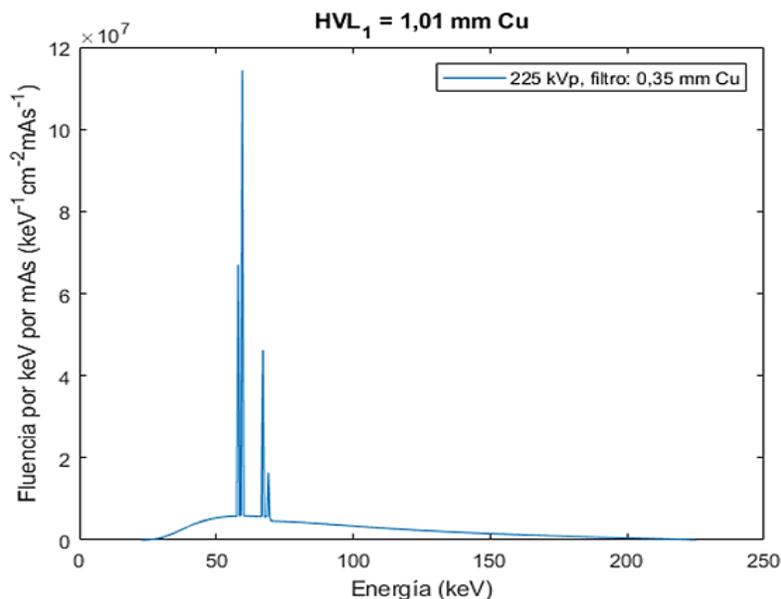


Fig. 6. Espectro de energía simulado con SpekCalc para la calidad de haz de 225 kVp y una filtración de 0,35 mm de Cu.

### 1. Validación de las simulaciones MC

#### 1.1. Dosis relativa en profundidad

En la figura 7 se muestran los gráficos en donde se comparan las dosis relativas en profundidad simuladas en este trabajo para los tamaños de campos de 4 x 4, 10 x 10 y 20 x 20 cm<sup>2</sup> y las medidas realizadas por

Azimi *et al.* (2014). En ambos casos, la dosis relativa está normalizada a 1 cm de profundidad.

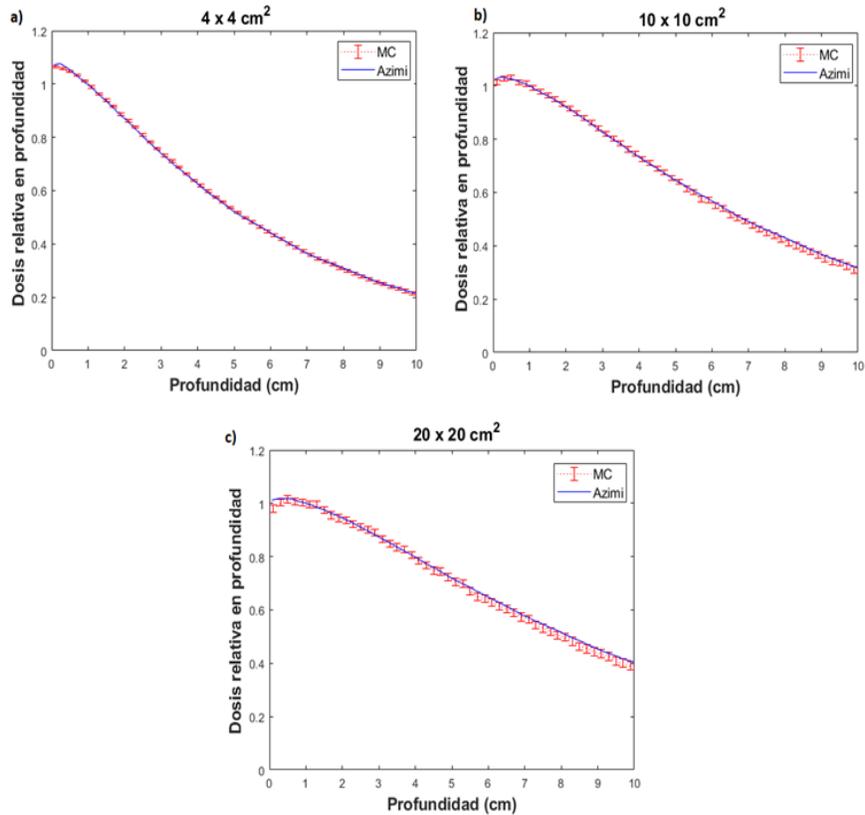


Fig. 7. Dosis relativa en profundidad medida por Azimi (línea azul) y la simulada en este trabajo (línea punteada roja) para una calidad de haz de 225 kVp, y un tamaño de campo de a) 4 x 4 cm<sup>2</sup>, b) 10 x 10 cm<sup>2</sup> y c) 20 x 20 cm<sup>2</sup>.

Se estima que la incertidumbre de medición realizadas por Azimi es de  $\pm 2,0$  % y la incertidumbre relativa asociada a las simulaciones MC realizadas en el presente trabajo es de hasta  $\pm 1,4$  % hasta una profundidad de 5,0 cm. Se evaluaron las diferencias porcentuales desde una profundidad de 0,1 cm hasta 5,0 cm respecto a las medidas de Azimi y las simulaciones MC en el presente trabajo, y las diferencias máximas fueron de 1,2 %, 1,4 % y 3,3 % para tamaños de campo de 4 x 4, 10 x 10 y 20 x 20 cm<sup>2</sup> respectivamente.

## 1.2. Corrección por el efecto talón

En la figura 8 se muestra la corrección por el efecto talón para una posición  $y = 0$ , y para diferentes profundidades.

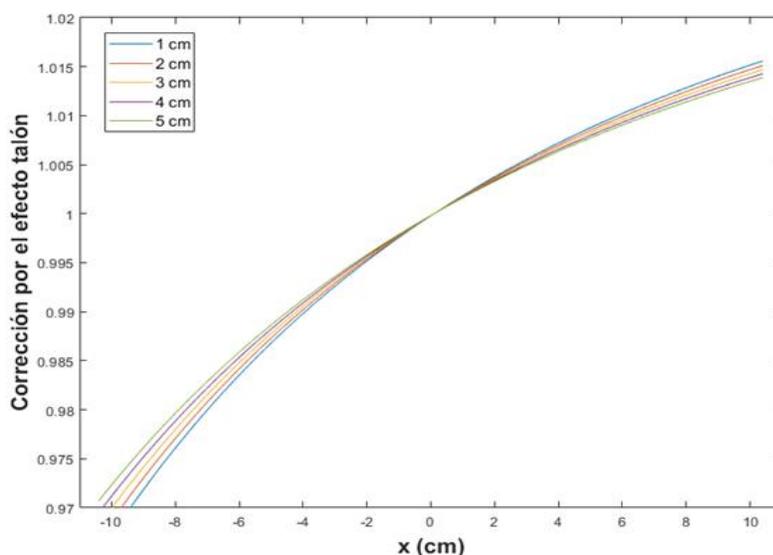


Fig. 8. Corrección por el efecto talón para diferentes profundidades para una calidad de haz de 225 kVp y un HVL de 1,01 mm Cu.

De la figura 8 se muestra el cambio de la matriz de corrección en el eje central de radiación y podemos apreciar que varía poco en profundidad, por lo tanto, la profundidad que se tomará como referencia para aplicar la corrección por el efecto talón será de 1 cm.

En la figura 9 se muestran los perfiles de dosis relativa a profundidades de 1 y 5 cm con y sin el efecto talón para un tamaño de campo de  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ , en donde se aprecia una disminución de la dosis en los perfiles corregidos por el efecto talón en la zona del ánodo en comparación con los perfiles sin corregir, mientras que en la zona del cátodo se aprecia el efecto contrario. El eje x corresponde a la dirección ánodo-cátodo. Los perfiles están normalizados a la dosis a 1 cm de profundidad en el eje central para cada tamaño de campo.

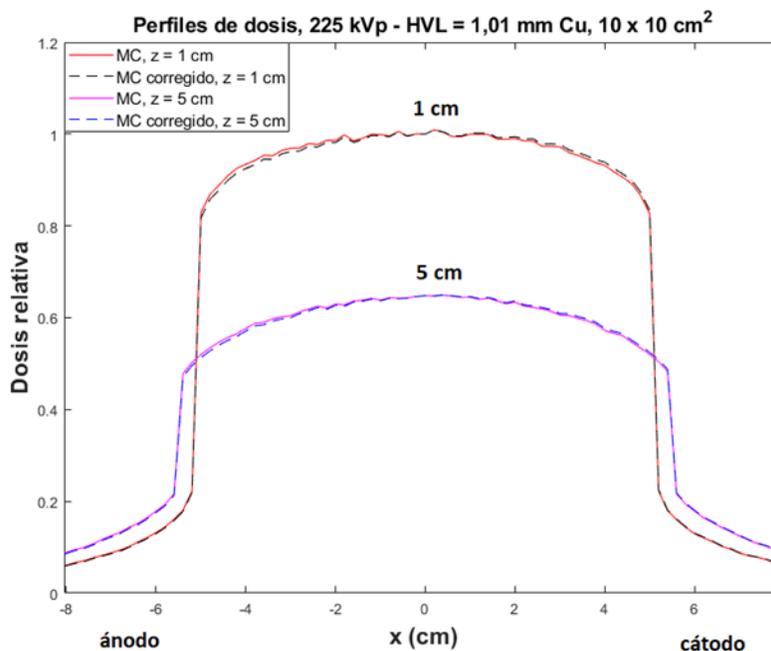


Fig. 9. Perfiles de dosis relativa a 1 y 5 cm de profundidad sin la corrección por el efecto talón (línea sólida roja y magenta respectivamente) y con la corrección por el efecto talón (línea punteada negra y azul respectivamente) para una calidad de haz de 225 kVp, y un tamaño de campo de  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ .

### 1.3. Perfiles de dosis relativa a 1 y 5 cm de profundidad

En las figuras 10-12 se muestran perfiles simulados en este trabajo y medidos por Azimi en el eje x para las profundidades de 1 y 5 cm y tamaños de campos de  $4 \times 4$ ,  $10 \times 10$  y  $20 \times 20 \text{ cm}^2$ . El eje x corresponde a la dirección ánodo-cátodo. Los perfiles están normalizados a la dosis a 1 cm de profundidad en el eje central para cada tamaño de campo.

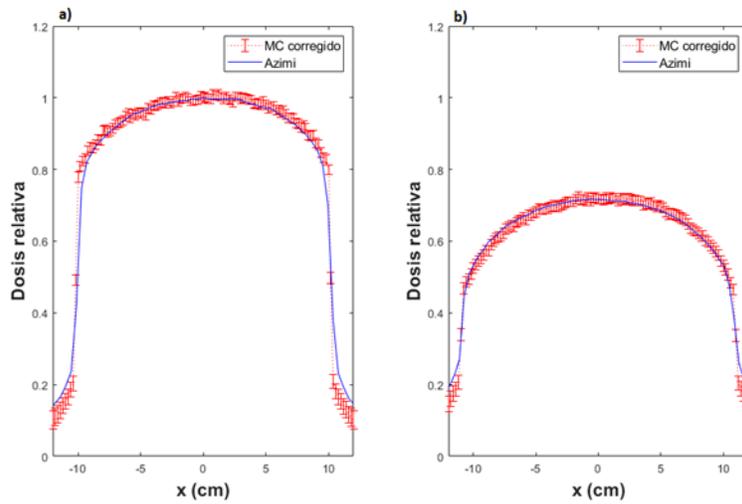


Fig. 10. Perfil de dosis relativa a a) 1 cm y b) 5 cm de profundidad medidos por Azimi (línea azul) y la simulada en este trabajo (línea punteada roja) para una calidad de haz de 225 kVp, y un tamaño de campo de  $4 \times 4 \text{ cm}^2$ .

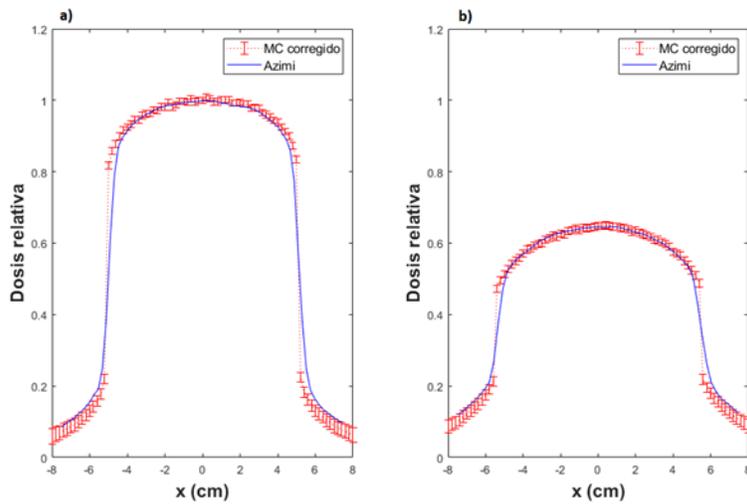


Fig. 11. Perfil de dosis relativa a a) 1 cm y b) 5 cm de profundidad medidos por Azimi (línea azul) y la simulada en este trabajo (línea punteada roja) para una calidad de haz de 225 kVp, y un tamaño de campo de  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ .

Fig. 12. Perfiles de dosis relativa a 1 y 5 cm de profundidad medidos por Azimi (línea azul) y la simulada en este trabajo (línea punteada roja) para una calidad de haz de 225 kVp, y un tamaño de campo de 20 x 20 cm<sup>2</sup>.

Se compararon los perfiles de dosis relativa medidos por Azimi y los calculados en este trabajo y se evaluaron las diferencias para posiciones en donde la dosis es  $\geq 80\%$  de la dosis máxima de Azimi, para un tamaño de campo de 4 x 4 cm<sup>2</sup> y la profundidad de 1 cm se encontraron diferencias de hasta 14,9 %, 5,1 % y 14,6 % para las posiciones en x de -1,8, 1,6 y 1,8 cm respectivamente, los demás puntos dentro de la región central se encontraron diferencias menores al 2,7 %, mientras que para el perfil de profundidad de 5 cm se encontraron diferencias menores al 4,0 %. Para un tamaño de campo de 10 x 10 cm<sup>2</sup> y la profundidad de 1 cm se encontraron diferencias de hasta 7,1 % y 8,5 % para las posiciones en x de -4,6 y 4,8 cm respectivamente, los demás puntos dentro de la región central se encontraron diferencias menores al 3,4 %, mientras que para el perfil de profundidad de 5 cm se encontraron diferencias menores al 1,4 %. Y por último para un tamaño de campo de 10 x 10 cm<sup>2</sup> y la profundidad de 1 cm se encontraron diferencias menores a 3,7 % dentro de la región central del haz (para posiciones entre -9,4 y 9,6 cm), mientras que para el perfil de profundidad de 5 cm se encontraron diferencias menores al 4,0 %.

#### **1.4. Output Factors OF (FS, d<sub>0</sub>)**

La figura 13 muestra la variación del *output factor* con el tamaño de campo, para las mediciones realizadas por Azimi y las simuladas en este trabajo. Los datos están normalizados a la dosis a 2 cm de profundidad con un tamaño de campo de 10 x 10 cm<sup>2</sup> para ambos casos.

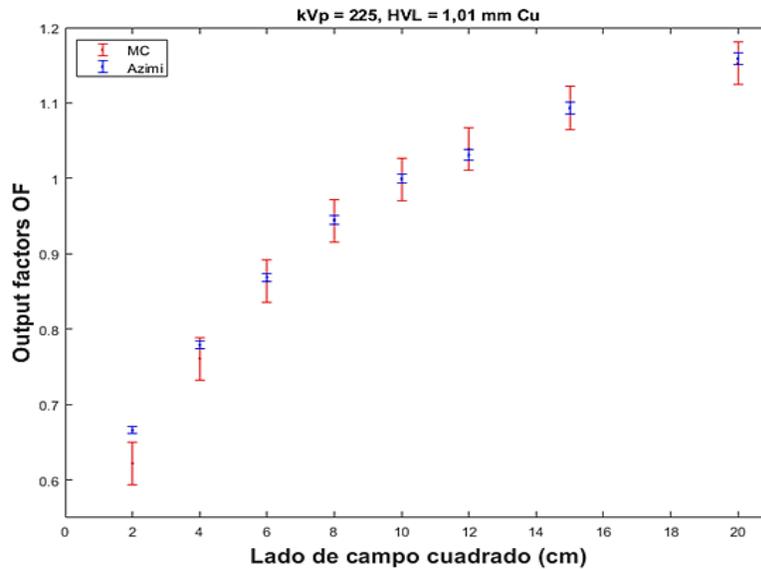


Fig. 13. *Output factors* medidos por Azimi (puntos rojos) y calculados a partir de nuestras simulaciones MC (puntos azules) para una calidad de haz de 225 kVp.

Se evaluaron las diferencias relativas porcentuales de los *Output factors* medidos por Azimi y los simulados en el presente trabajo para el tamaño de campo de 2 x 2 y 4 x 4 cm<sup>2</sup>, fueron de 7,0 % y 2,4 % respectivamente y para los demás tamaños de campo las diferencias relativas porcentuales fueron menores al 0,8 %.

## DISCUSIÓN

Según los resultados obtenidos se tiene que las curvas de dosis en profundidad medidas por Azimi *et al.* (2014) concuerdan con las simuladas en este trabajo, a excepción de algunos puntos cerca de la superficie, dichas discrepancias se pueden deber a que Azimi realizó las

mediciones en una fantoma de agua sólida en profundidades de 0 a 1 cm. Las diferencias máximas de 0 a 1 cm de profundidad entre la dosis de Azimi y las simulaciones MC realizadas para tamaños de campo de 4 x 4, 10 x 10 y 20 x 20 cm<sup>2</sup> fueron de 1,2 %, 1,4 % y 3,3 % respectivamente, mientras que para profundidades entre 1 y 5 cm las

diferencias fueron menores al 1,6 %, por lo tanto, podemos afirmar que las simulaciones de dosis en profundidad realizadas en este trabajo quedan validadas por las medidas de dosis en profundidad medidas por Azimi.

La dosis en la penumbra no se modela correctamente, debido a que se utilizó una fuente puntual y a la ausencia de un colimador físico en la simulación, por lo tanto, las simulaciones MC con respecto a las medidas de Azimi muestran grandes discrepancias y por ello no se validaron los perfiles de dosis en la penumbra y fuera de ella. La presencia del efecto talón para el X-RAD 320 es mínima y aplicar una corrección por el efecto talón no da resultados tan diferentes de los simulados sin la presencia de este.

Los *outputs factors* medidos por Azimi concuerdan con los simulados en este trabajo para tamaños de campo entre 4 x 4 hasta 20 x 20 cm<sup>2</sup>, mientras que para el tamaño de campo de 2 x 2 cm<sup>2</sup> las mediciones realizadas por Azimi y las simulaciones en este trabajo no concuerdan. Dichas discrepancias podrían deberse al hecho de utilizar una fuente puntual de radiación isotrópica para realizar las simulaciones y la simulación completa del equipo en donde se tendría en cuenta el tamaño de la fuente.

## CONCLUSIONES

El método de cálculo de dosis en este trabajo se basó en simulaciones MC mediante el código DOSXYZnrc, en donde se utilizó una fuente puntual de radiación isotrópica acompañada de un espectro de energía simulado con SpekCalc, asumiendo que este espectro generado es equivalente al espectro de energía real del X-RAD 320. Se evaluaron las diferencias entre las medidas realizadas por Azimi y la simulación MC realizadas en este trabajo para dosis relativa en profundidad, perfil de dosis relativa y *output factors* para diferentes tamaños de campo para una calidad de haz de 225 kVp con una filtración adicional de 0,35 mm Cu.

Las congruencias de las simulaciones MC con las medidas de Azimi permiten validar la metodología empleada en este trabajo, siempre y cuando se tengan presentes las limitaciones que se tienen para los

perfiles de dosis en la penumbra y fuera de ella.

Las implicaciones prácticas que tendría la utilización de esta metodología para la determinación de la dosis en animales pequeños serían que se estaría subestimando la dosis en la penumbra y fuera de ella. Las incertidumbres relativas para la dosis en profundidad fueron menores a 3,3 %, para los perfiles de dosis relativa fueron menores al 4 %, por lo tanto, se tendría una buena estimación de la dosis en diferentes condiciones de irradiación preclínica.

Como recomendación para trabajos futuros sería realizar la caracterización dosimétrica del X-RAD 320 aplicando el método empleado en este trabajo.

## **AGRADECIMIENTOS**

Se agradece al CONICYT de la República de Chile a través del Fondecyt Regular N°1181133 y Fondecup EQM108105, y a las profesoras Dra. Paola Caprile y Dra. Beatriz Sánchez de la Pontificia Universidad Católica de Chile, por el apoyo brindado para la realización de este proyecto.

## **REFERENCIAS**

Azimi, R. *et al.* (2014) ‘Characterization of an orthovoltage biological irradiator used for radiobiological research’, *Journal of Radiation Research*, 56(3), pp. 485–492. doi: 10.1093/jrr/rru129.

Bushong, S. C. (2017) *Radiologic Science for Technologists: Physics, Biology, and Protection, Eleventh Edition.*

Chen, S. C., Jong, W. L. & Hharun, A. Z. (2012) ‘Evaluation of X-ray beam quality based on measurements and estimations using SpekCalc and Ipem78 models’, *Malaysian Journal of Medical Sciences*, 19(3), pp. 22–28.

Dehyagani, Z. S. *et al.* (2011) ‘Spectrum Analysis with Monte Carlo Simulation, BEAMnrc, for Low Energy X-RAY’, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 5(10), pp. 723–725. Available at: <http://www.waset.ac.nz/journals/waset/v58/v58-146.pdf>.

Emiliani, L. E. (2021) *Caracterización dosimétrica del irradiador preclínico X-RAD 320 e implementación en una herramienta de cálculo de dosis*. Pontificia Universidad Católica de Chile. Available at: <https://repositorio.uc.cl/handle/11534/62478>.

Kawrakow, I. *et al.* (2013) ‘The EGSnrc code system: Monte Carlo simulation of electron and photon transport NCR Report PIRS-701 (Ottawa: National Research Council of Canada)’, pp. 2001–2006.

Khan, F. M. (2003) ‘Physics of Radiation Therapy Third Edition’, *The Journal of the American Medical Association*, p. 1138.

Landry, G. (2009) ‘ImaSim , a Simulation Software Package for the Teaching of Medical X-Ray Imaging’, (June).

Mesbahi, A. & Zakariaee, S. S. (2013) ‘Effect of anode angle on photon beam spectra and depth dose characteristics for X-RAD320 orthovoltage unit’, *Reports of Practical Oncology and Radiotherapy*, 18(3), pp. 148–152. doi: 10.1016/j.rpor.2012.12.001.

Otero, M. & Pérez, V. (2005) ‘Rumbos y desafíos en psicopedagogía de la creatividad’, *Revista complutense de educación*, 16(1), pp. 169–181.

Rogers, D. W. O., Walters, B. & Kawrakow, I. (2005) ‘BEAMnrc Users Manual’, *Source*.

Walters, B., Kawrakow, I. & Rogers, D. W. O. (2005) ‘DOSXYZnrc Users Manual’, *Source*, pp. 1–132.



Tecnociencia, Vol. 25, N°2: 28-38

Julio-Diciembre 2023

ISSN L 2415-0940

## **CARACTERIZACIÓN DOSIMÉTRICA DEL IRRADIADOR PRECLÍNICO X-RAD 320 A PARTIR DE SIMULACIONES MONTE CARLO**

**Luis E. Emiliani**

Universidad de Panamá, Panamá. [luisemiliani02@gmail.com](mailto:luisemiliani02@gmail.com)

<https://orcid.org/0000-0002-4876-1592>

DOI <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v25n2.a4063>

**Fecha de recepción:** 1 de noviembre de 2022

**Fecha de aceptación:** 19 de febrero de 2023

### **RESUMEN**

Se caracterizó el irradiador preclínico X-RAD 320 a partir de simulaciones Monte Carlo utilizando el código DOSXYZnrc a partir de una fuente puntual de radiación isotrópica que emite espectros de energía generados con el programa SpekCalc. Dichas simulaciones fueron llevadas a cabo en una fantoma de agua para diferentes calidades de haz y tamaños de campo entre 0,5 x 0,5 y 15 x 15 cm<sup>2</sup> para los cuales se obtuvieron matrices 3D de dosis. Se encontraron incertidumbres relativas asociadas a las simulaciones de hasta  $\pm 1,39$  % para profundidades menores a 5 cm. Los resultados obtenidos para las curvas de dosis en profundidad, perfiles de dosis y *output factors* para las diferentes calidades de haz corresponden al comportamiento esperado.

### **PALABRAS CLAVES**

Física Médica, método de Monte Carlo, radiación, irradiador preclínico.

### **DOSIMETRIC CHARACTERIZATION OF THE X-RAD 320 PRECLINICAL IRRADIATOR FROM MONTE CARLO SIMULATIONS**

## **ABSTRACT**

The X-RAD 320 preclinical irradiator was characterized from Monte Carlo simulations using the DOSXYZnrc code from a point source of isotropic radiation that emits energy spectra generated with the SpekCalc program. Those simulations were carried out in a water phantom for different beam qualities and field sizes between 0.5 x 0.5 and 15 x 15 cm<sup>2</sup> for which 3D dose matrices were obtained. Relative uncertainties associated with the simulations of up to  $\pm 1.39\%$  were found for depths less than 5 cm. The results obtained for the depth dose curves, dose profiles and output factors for the different beam qualities correspond to the expected behavior.

## **KEY WORDS**

Medical Physics, Monte Carlo method, radiation, preclinical irradiator.

## **INTRODUCCIÓN**

El objetivo principal de este estudio es realizar la caracterización dosimétrica del irradiador preclínico X-RAD 320 para diferentes calidades de haz en el rango de bajas y medias energías con simulaciones Monte Carlo (MC) utilizando los códigos de EGSnrc (Kawrakow *et al.*, 2013) y DOSXYZnrc (Walters, Kawrakow and Rogers, 2005) como se implementó en Emiliani (2021). La utilización de una fuente puntual de radiación isotrópica resulta una opción para casos en donde no se conozca la geometría del tubo de rayos X del equipo como en este caso.

Las simulaciones MC que se realizarán en este trabajo se obtienen matrices de dosis las cuales se obtienen distribuciones de dosis en profundidad, perfiles de dosis y *output factors* para diferentes calidades de haz y tamaños de campo.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **1. Irradiador X-RAD 320**

El irradiador X-RAD 320 es un sistema de rayos X autónomo que se utiliza específicamente para la irradiación de animales pequeños y muestras biológicas. La unidad tiene un rango de tensiones de tubo de 5–320 kVp, un rango de corriente de tubo de 0,1–45 mA y una tasa de

dosis máxima de 3 Gy/min a una distancia de la fuente a la superficie (SSD) de 50 cm. El X-RAD 320 no tiene filtración inherente excepto por una ventana de berilio de 3 mm. Un portafiltros en la ventana de salida permite agregar filtros de acondicionamiento de haz para lograr diferentes calidades de haz. El irradiador adquirido por la Pontificia Universidad Católica de Chile (UC) cuenta con filtros tales como: Thoraeus (0,75 mm Sn, 0,25 mm Cu, 1,5 mm Al), 2 mm de aluminio, 3 mm de aluminio, 3 mm de cobre y 5 mm de cobre.

## **2. Simulación del espectro de energía para un haz del irradiador preclínico X-RAD 320**

Se hizo uso del software comercial SpekCalc versión 1.1 para la simulación de los espectros de energía del irradiador preclínico X-RAD 320. SpekCalc es un programa comercial que calcula espectros de energía de tubos de rayos X con ánodo de tungsteno. Se pueden simular haces con tensiones de tubo que van de 40-300 kV, en donde se le permite al usuario elegir características del tubo de rayos X como ángulo del ánodo, el material atenuador, entre otras como se muestra en la figura 1.

Se simuló una calidad de haz acorde a las características del irradiador preclínico X-RAD 320 con un ángulo de ánodo de 30° y una filtración inherente de 3 mm de Berilio, a su vez se consideró un espesor de aire de 50 cm como distancia fuente superficie (SSD) de referencia.

En la tabla 1 se muestra un resumen detallado de las calidades de haz simuladas en este trabajo (Emiliani, 2021). Por la falta de información disponible acerca de los espectros de energía reales del X-RAD 320, se asumió que los espectros de energía simulados con SpekCalc son equivalentes a los espectros de energía reales del X-RAD 320 para las calidades de haz simuladas en este trabajo.

Tabla 1. Espectros de energía simulados para diferentes calidades de haz.

kVp	Filtración	Energía promedio (keV)	HVL <sub>1</sub>	HC
300	1,5 mm Al + 0,25 mm Cu + 0,75 mm Sn	152	3,56 mm Cu	0,841
225	2,0 mm Al	71,9	0,373 mm Cu	0,334
105	(2,0 + 3,0) mm Al	54	0,196 mm Cu	0,708
71	2,0 mm Al	38	1,92 mm Al	0,654
50	2,0 mm Al	31,2	1,46 mm Al	0,723

## 2. Simulaciones Monte Carlo (MC)

La versión 3 del código DOSXYZnrc fue utilizada para las simulaciones Monte Carlo (Walters, Kawrakow and Rogers, 2005). Se utilizó una fuente puntual de radiación isotrópica y se utilizaron los mismos parámetros de simulación MC que se muestran en Emiliani (2021).

El tamaño de campo se define a una distancia fuente-isocentro (SAD, por sus siglas en inglés) de 50 cm, por lo tanto, como se utilizó una SSD = 50 cm para todas las simulaciones, el tamaño de campo queda definido en superficie.

### 2.1 Evaluación de la dosis en condiciones homogéneas

Las dosis para condiciones homogéneas fueron calculadas sobre fantomas virtuales voxelizados de agua (con densidad 1 g/cm<sup>3</sup>). Las dimensiones fueron 21 x 21 x 21 cm<sup>3</sup> para todas las simulaciones, excepto para el tamaño de campo más grande, de 20 cm de lado. En ese caso se extendieron las dimensiones en el plano perpendicular al eje del haz a 25 x 25 cm<sup>2</sup>. Se definió un tamaño de vóxel de 0,2 x 0,2 x 0,2 cm<sup>3</sup>, excepto para los tamaños de campo menores de 2 cm de lado. En estos casos se utilizaron tamaños de vóxel variable, aumentando la resolución en el plano transversal al eje del haz en una región de 3 x 3 cm<sup>2</sup>. Dentro de esta región, la resolución aumento a 0,1 x 0,1 x 0,2 cm<sup>3</sup>. Se obtuvieron matrices de dosis para diferentes calidades de haz y tamaños de campo que se resumen en la tabla 2.

Tabla 2. Matrices de dosis por calidades de haz y tamaños de campo.

kVp	HVL <sub>1</sub>	Lado de tamaño de campo cuadrado (cm)										
		0,5	1	1,5	2	4	6	8	10	12	15	20
300	3,56 mm Cu	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
225	0,373 mm Cu	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
105	0,196 mm Cu	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
71	1,92 mm Al	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
50	1,46 mm Al	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	

## RESULTADOS

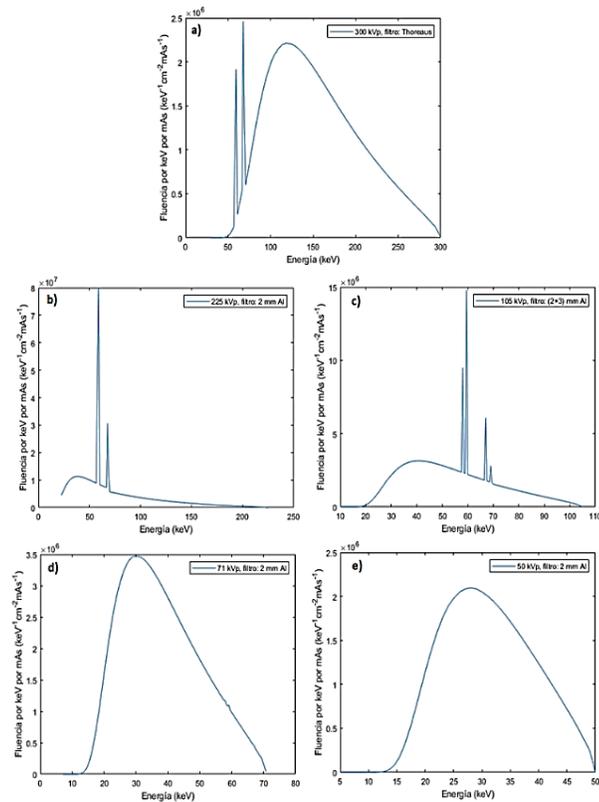


Fig. 1. Espectros de energía simulados con SpekCalc para las calidades de haz: a) 300 kVp, b) 225 kVp, c) 105 kVp, d) 71 kVp, e) 50 kVp.

## 1. Caracterización dosimétrica del X-RAD 320

En esta sección se mostrarán algunas de las curvas de dosis en profundidad, perfiles de dosis relativa y *outputs factors* correspondientes a la caracterización del equipo.

### 1.1 Dosis relativa en profundidad

En las figuras 2 y 3 se muestran el depósito de dosis en profundidad para una calidad de haz de 300 y 71 kVp en función del tamaño de campo. Los datos están normalizados a la dosis a 2 cm de profundidad para un tamaño de campo de 10 x 10 cm<sup>2</sup>, para cada calidad de haz.

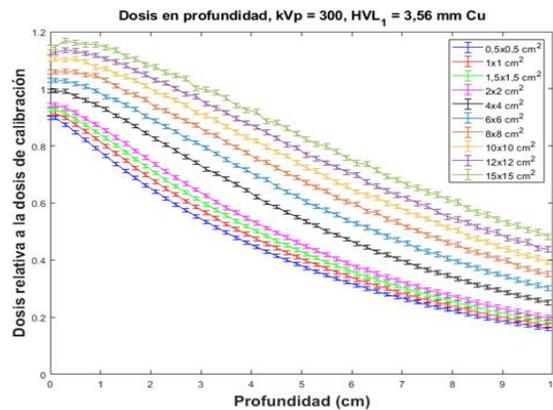


Fig. 1. Dosis relativa en profundidad calculadas en este trabajo para una calidad de haz de 300 kVp, para diferentes tamaños de campo.

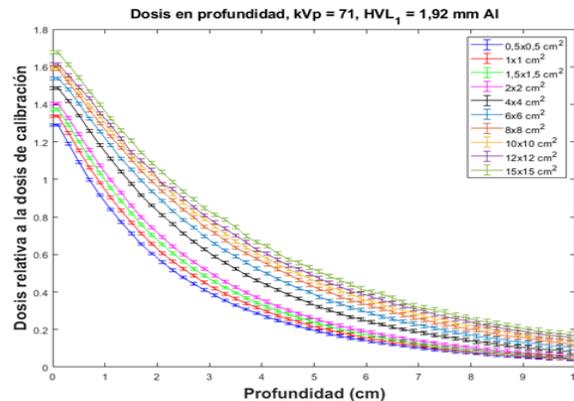


Fig. 2. Corrección por el efecto talón para diferentes profundidades para una calidad de haz de 225 kVp y un HVL de 1,01 mm Cu.

En la figura 4 se muestra el depósito de dosis en profundidad para un tamaño de campo de  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  en función de la energía. Los datos están normalizados a la dosis en superficie para cada calidad de haz.

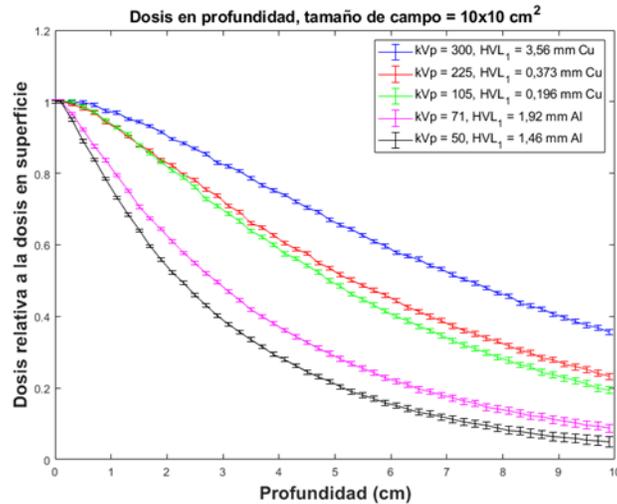


Fig. 3. Dosis relativa en profundidad calculadas en este trabajo para un tamaño de campo  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ , para diferentes calidad de haz.

En nuestro trabajo es conveniente normalizar todas las curvas de dosis en profundidad al punto de calibración debido a que se puede pasar de un tamaño de campo a otro con los *outputs factors*, debido a que estos están calculados a una profundidad de 2 cm.

Se encontraron incertidumbres relativas asociadas a los tamaños de campo simulados de hasta  $\pm 1,39\%$  hasta una profundidad de 5 cm.

### 1.2 Perfiles de dosis relativa

En las figuras 5 y 6 se muestran los perfiles de dosis relativa para una calidad de haz de 300 y 71 kVp y un tamaño de campo de  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ , para profundidades de 1, 2 y 5 cm. Los perfiles están normalizados a la dosis a 2 cm de profundidad en el eje central, para cada calidad de haz.

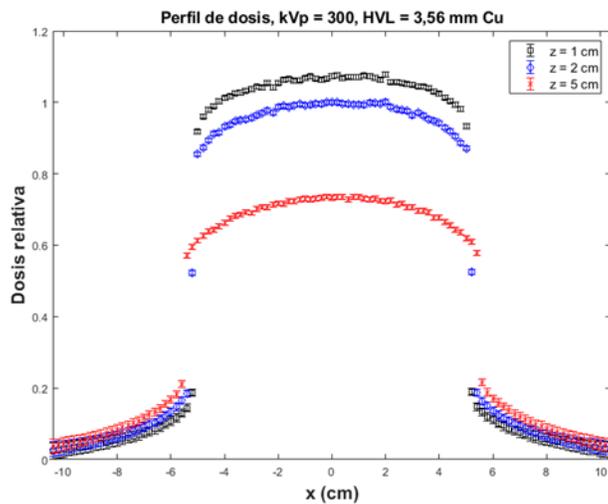


Fig. 4. Perfil de dosis relativa calculadas en este trabajo para una calidad de haz de 300 kVp y un tamaño de campo de 10 x 10 cm<sup>2</sup>, para profundidades de 1 (círculos negros), 2 (diamantes azules) y 5 cm (cruces rojas).

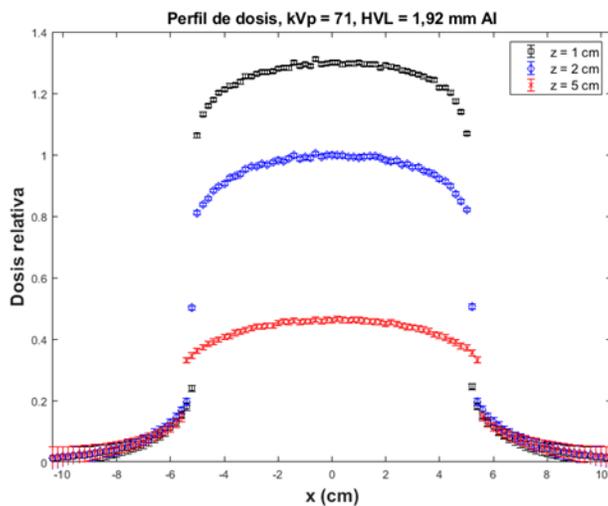


Fig. 5. Perfiles de dosis relativa calculadas en este trabajo para una calidad de haz de 71 kVp y un tamaño de campo de 10 x 10 cm<sup>2</sup>, para profundidades de 1 (círculos negros), 2 (diamantes azules) y 5 cm (cruces rojas).

En las figuras 7 y 8 se muestran la variación del *output factors* con el tamaño de campo, para los cálculos realizados en este trabajo para las calidades de haz de 300 y 71 kVp respectivamente. Los datos están normalizados a la dosis a 2 cm de profundidad para un tamaño de campo de 10 x 10 cm<sup>2</sup>.

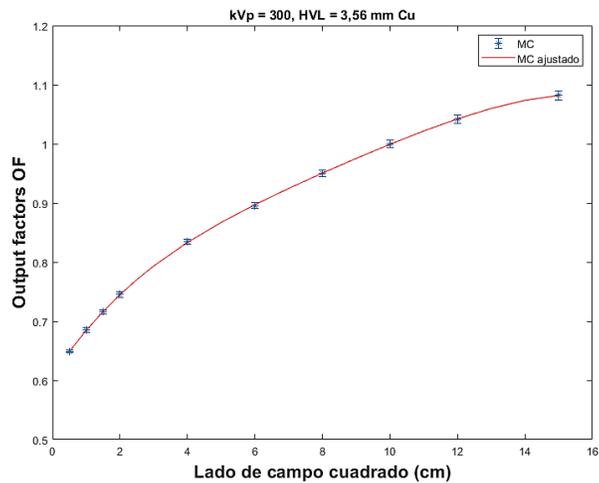


Fig. 6. *Output factors* calculados en este trabajo (asterisco azul) y con el ajuste polinomial (línea roja) para una calidad de haz de 300 kVp.

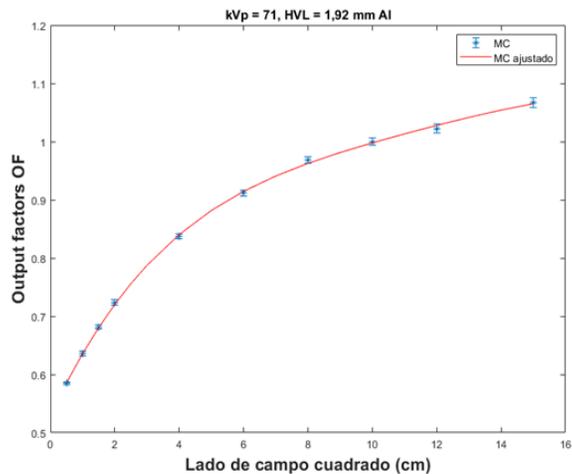


Fig. 7. *Output factors* calculados en este trabajo (asterisco azul) y con el ajuste polinomial (línea roja) para una calidad de haz de 71 kVp.

## DISCUSIÓN

Se evaluó el efecto del tamaño de campo en las curvas de dosis en profundidad en donde se encontró que la dosis aumenta a medida que aumenta el tamaño de campo, para una calidad de haz. A su vez se evaluó el efecto de la calidad de haz en las curvas de dosis en profundidad en donde se apreció un aumento de la dosis a medida que aumenta la calidad de haz para un tamaño de campo específico.

Los perfiles de dosis relativa a diferentes profundidades concuerdan con los valores esperados, a excepción a las dosis en y fuera de la penumbra, como se demostró en Emiliani (2021) y se obtuvieron diferencias de hasta el 15 %. Este efecto depende del tamaño de campo y la profundidad a la cual se midan los perfiles de dosis relativa.

Los *outputs factors* se comportan de manera esperada, aumentando a medida que aumenta el tamaño de campo, sin embargo, se debe tomar en consideración que si se desea calcular la dosis para tamaños de campo  $\leq 2 \times 2 \text{ cm}^2$ , se estaría sobreestimando la dosis como se apreció en Emiliani (2021).

## CONCLUSIONES

Se describió la caracterización completa de los haces de rayos X producidos por el irradiador X-RAD 320 a partir de simulaciones MC. Se simularon diferentes calidades de haz y tamaños de campo variable entre  $0,5 \times 0,5$  hasta  $15 \times 15 \text{ cm}^2$ .

Las mediciones de los *output factors* en este rango de energías se obtienen siguiendo el protocolo de la AAPM TG-61 (Ma *et al.*, 2001), que especifica que se deben realizar las mediciones en aire o a 2 cm de profundidad en un fantoma de agua, en nuestro caso se calcularon a 2 cm de profundidad.

No se encontraron mediciones reales para las calidades de haz simuladas del irradiador preclínico X-RAD 320, por lo tanto, no se pudieron comparar las simulaciones con las medidas, y no es factible comparar las simulaciones con otras curvas de dosis en profundidad para calidades

de haz con un HVL similar, debido a que una calidad de haz puede ser generada a partir de diferentes tensiones de tubo de rayos X (Attix, 2004).

Como recomendación para trabajos futuros sería desarrollar una herramienta de cálculo de dosis a partir de las simulaciones MC realizadas en este trabajo y realizar las mediciones reales del equipo y compararlas con las simulaciones MC en este estudio.

## **AGRADECIMIENTOS**

Se agradece al CONICYT de la República de Chile a través del Fondecyt Regular N°1181133 y Fondecip EQM108105, y a las profesoras Dra. Paola Caprile y Dra. Beatriz Sánchez de la Pontificia Universidad Católica de Chile, por el apoyo brindado para la realización de este proyecto.

## **REFERENCIAS**

Attix, F. H. (2004) ‘Introduction To Radiological Physics and Radiation Dosimetry’, *John Wiley & Sons, Inc*, p. 607.

Emiliani, L. E. (2021) *Caracterización dosimétrica del irradiador preclínico X-RAD 320 e implementación en una herramienta de cálculo de dosis*. Pontificia Universidad Católica de Chile. Available at: <https://repositorio.uc.cl/handle/11534/62478>.

Kawrakow, I. *et al.* (2013) ‘The EGSnrc code system: Monte Carlo simulation of electron and photon transport NCR Report PIRS-701 (Ottawa: National Research Council of Canada)’, pp. 2001–2006.

Ma, C. M. *et al.* (2001) ‘AAPM protocol for 40-300 kV x-ray beam dosimetry in radiotherapy and radiobiology’, *Medical Physics*, 28(6), pp. 868–893. doi: 10.1118/1.1374247.

Walters, B., Kawrakow, I. & Rogers, D. W. O. (2005) ‘DOSXYZnrc Users Manual’, *Source*, pp. 1–132.



## CARACTERIZACIÓN DE LA POBLACIÓN DE *Dasytus novemcinctus* Y FAUNA ASOCIADA A SUS MADRIGUERAS EN SONÁ, VERAGUAS, PANAMÁ

**Roberto C. Lombardo**

Universidad de Panamá. Centro Regional Universitario de Veraguas. Panamá.  
[roberto.lombardo@up.ac.pa](mailto:roberto.lombardo@up.ac.pa) <https://orcid.org/0000-0002-0279-8621>

**Héctor R. Santos Jiménez**

Universidad de Panamá. Centro Regional Universitario de Veraguas. Panamá.  
[hector.santos@up.ac.pa](mailto:hector.santos@up.ac.pa) <https://orcid.org/0000-0001-9585-0101>

**Jaime A. Rivera**

Universidad de Panamá. Centro Regional Universitario de Veraguas. Panamá.  
[jaime.rivera@up.ac.pa](mailto:jaime.rivera@up.ac.pa) <https://orcid.org/0000-0002-8265-7836>

DOI <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v25n2.a4064>

**Fecha de recepción:** 20 de octubre de 2022

**Fecha de aceptación:** 15 de marzo de 2023

### RESUMEN

La evaluación de las poblaciones de armadillos en zonas perturbadas por asentamientos y ganadería, reciben poca importancia, lo que afecta el estado de conservación de la especie. En nuestro país no existen estudios sobre densidad poblacional, patrones de uso de madrigueras y comportamiento general en armadillos. Por ello, el presente estudio tuvo como objetivo caracterizar la población de armadillos *Dasytus novemcinctus* e inventariar las especies de vertebrados asociados a sus madrigueras, en una finca dedicada a la ganadería intensiva, en Soná, Veraguas, Panamá. Para la realización de esta investigación, se utilizó un método mixto de observación directa y cámaras trampa desde enero hasta junio de 2022. Se detectaron 47 armadillos y se determinó una densidad de 1.25 madrigueras/a y 0.38 ind/ha. Se registraron un total de 18 especies asociadas a las madrigueras de *D. novemcinctus*; nueve de aves, siete de mamíferos y dos de reptiles. Se presentan las primeras observaciones de *Tamandúa mexicana*, *Procyon lotor* y *Conepatus semistriatus*, los cuales no habían sido reportados en esta localidad. El presente estudio resalta la importancia de los armadillos como especie clave en ecosistemas, ya que por su actividad atraen múltiples especies, contribuyendo a mantener la biodiversidad; incluso en zonas intervenidas como fincas ganaderas.

## **PALABRAS CLAVES**

Armadillo, madrigueras, cámaras trampa, diversidad, patrones de actividad.

## **POPULATION CHARACTERIZATION AND FAUNA ASSOCIATED WITH *Dasypus novemcinctus* BURROWS IN SONÁ, VERAGUAS, PANAMA**

### **ABSTRACT**

The evaluation of armadillo populations in areas disturbed by human settlements and livestock receives little importance, which affects the conservation status of the species. There are no studies on armadillos' population density, burrow use patterns, or general behavior in our country. Therefore, the objective of this study was to characterize the population of armadillos (*Dasypus novemcinctus*) and to inventory the vertebrate species associated with their burrows on a farm dedicated to intensive livestock farming in Soná, Veraguas, Panama. To carry out this research, a mixed method of direct observation and camera traps was used from January to June of 2022. A total of 47 armadillos were detected and a density of 1.25 burrows/ha and 0.38 ind/ha was determined. A total of 18 species associated with *D. novemcinctus* burrows were recorded: nine birds, seven mammals, and two reptiles. The first observations of *Tamandúa mexicana*, *Procyon lotor* and *Conepatus semistriatus*, which had not been reported in this locality, are presented. This study highlights the importance of armadillos as key species in ecosystems since their activity attracts multiple species, helping to maintain biodiversity even in intervened areas such as cattle farms.

### **KEY WORDS**

Armadillo, burrows, camera traps, diversity, activity pattern.

### **INTRODUCCIÓN**

El armadillo *Dasypus novemcinctus*, se encuentra ampliamente distribuido en el continente americano desde Estados Unidos hasta Uruguay y parte de Argentina central (Balderas *et al.*, 2012). En la región, los armadillos de nueve bandas han sido ampliamente estudiados desde diferentes perspectivas; por ejemplo, su ecología (Platt *et al.*, 2004), patrones de actividad y distribución (Rodríguez-Durán *et al.*, 2018), su conducta (Balderas *et al.*, 2012) y las interacciones con humanos (DeGregorio *et al.*, 2021). Sin embargo, los armadillos no han sido estudiados de forma específica en Panamá, más bien aparecen en la

literatura como un elemento más dentro de inventarios (Meyer *et al.*, 2015; Brown, 2014).

Los animales que cavan madrigueras (“ingenieros de ecosistemas”), dejan recursos y espacio disponible para un grupo considerable de animales, por ejemplo, unas 300 especies entre invertebrados y vertebrados están asociadas a los extensos sistemas de madriguera que excava la tortuga topo, *Gopherus polyphemus* (DeGregorio, 2022). Un armadillo puede excavar y mantener hasta diez madrigueras dentro de su territorio, estas ocurren en densidades de hasta 27 por hectárea (Platt *et al.*, 2004). Las dimensiones de las madrigueras de armadillo permiten que muchos otros vertebrados las puedan usar como refugio contra depredadores o condiciones climáticas adversas (Guzmán-Lenis & Camargo-Sanabria, 2004; DeGregorio, 2022).

Sin embargo, las especies de vida silvestre que utilizan madrigueras de armadillo probablemente varían según la ubicación geográfica y el nivel de conservación del hábitat. Por esta razón, es importante comprender cómo varía el uso de madrigueras geográficamente, lo que proporciona información sobre el valor ecológico del armadillo para la comunidad en general (Rodríguez *et al.*, 2019; Sun *et al.*, 2021; DeGregorio *et al.*, 2022). Generar dicho conocimiento es apremiante, ya que en Panamá no se conocen inventarios de fauna asociada a madrigueras de armadillo, por lo que el papel ecológico de su actividad excavadora está incompleto; especialmente en zonas intervenidas.

Las regiones tropicales están sujetas a reducción sustancial de la cubierta forestal, lo que ha dado como resultado condiciones ambientales modificadas para la fauna nativa (Melo *et al.*, 2010; Arteaga & Venticinque, 2012). El contexto de fincas ganaderas se presta para evaluar la importancia de los armadillos como ingenieros de ecosistemas, ya que al controlar directa o indirectamente la disponibilidad de recursos (p. ej.: refugio, alimento, materiales, etc.) para otros organismos (Jones *et al.*, 1997), los armadillos podrían ser clave en el mantenimiento de la diversidad de ecosistemas fragmentados (Sun *et al.*, 2021; Rodríguez *et al.*, 2019).

El estudio de los mamíferos representa un reto por la dificultad de su observación y baja detectabilidad (Mosquera-Muñoz *et al.*, 2015). La mayoría son de hábito nocturno y silencioso, por lo que se requiere de la combinación de distintos métodos para su estudio (Encalada, 2018). Herramientas como las cámaras-trampa son ideales para superar dichas dificultades, dado que éstas nos permiten detectar actividad o patrones que denoten cambios en la composición de especies en el tiempo y espacio. Adicionalmente, el registro de observaciones en tiempo real y de forma remota, permite cuantificar las poblaciones silvestres, en especial las que están en peligro de extinción o especies crípticas de las cuales no se tienen mucha información (Díaz-Pulido & Payán, 2012).

Por esta razón y lo antes expuesto, el objetivo de este trabajo fue caracterizar la población de armadillos *Dasyus novemcinctus* e inventariar las especies de vertebrados asociados a sus madrigueras, mediante un método mixto de observación directa y cámaras-trampa, en la finca ganadera “Guido Martinelli”, Soná, Veraguas, Panamá.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

El estudio se realizó en una finca ganadera, ubicada en el distrito de Soná, Provincia de Veraguas (fig.1). Por ende, con base en los datos meteorológicos de las estaciones Guarumal (T °C), y Soná (P mm), y de acuerdo con Chorley et al. 1984, en Gutiérrez (2009), el área de estudio pertenece a la región morfoclimática de II orden, denominada tropical húmeda estacional; puesto que, ostenta, 2 meses con precipitaciones <50mm, temperatura promedio de 27. 2° C, y precipitación promedio total anual de 2986.5 mm, donde, el mes de octubre concentra el máximo de precipitaciones con 472.2 mm.

### **Monitoreo de Madrigueras**

Se estableció un polígono con tres parcelas de muestreo (Fig.1). El polígono está delimitado por barreras naturales, al este con el río Cobre, al noroeste la carretera vía Boró y al sur asentamientos humanos. Se ubicaron madrigueras en las tres parcelas de muestreo y se clasificaron como: activas (huellas, tierra removida, hozados) o abandonadas (tierra dura, maleza en el interior de la madriguera, telarañas). Una vez clasificadas, se georeferenciaron con un GPS (Garmin Etrex 10), para darles seguimiento. El conteo y monitoreo de madrigueras se realizó

cada 15 días, en horas de la mañana. Al ubicarse nuevas madrigueras, se tomaron los datos de posición geográfica y se marcaron con estaca numerada para facilitar su localización (Balderas *et al.*, 2012).

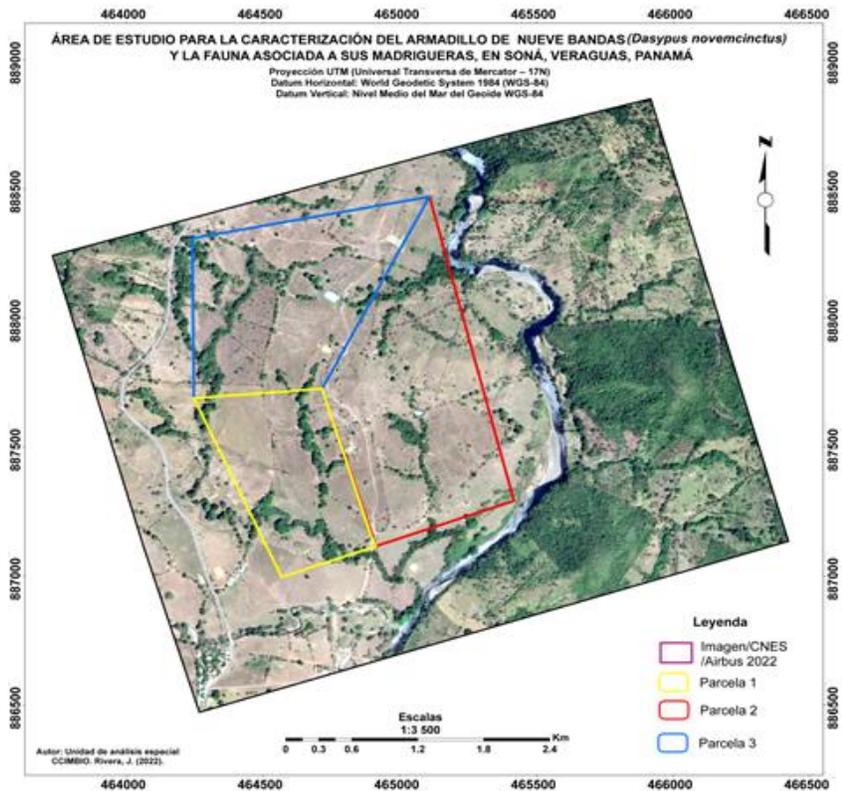


Fig. 1 Polígono con líneas divisorias para tres parcelas de muestreo de *Dasyurus novemcinctus* y fauna asociada a sus madrigueras en la finca ganadera “Guido Martinelli”, Soná, Veraguas, Panamá. Fuente: mapa base estacional. Imagen CNES / Airbus 2021 (Google Earth Pro).

Para determinar el tipo de distribución espacial, las distancias entre cada madriguera se calcularon con la aplicación Google Earth Pro. Luego, mediante la metodología del vecino más cercano se realizó una prueba de significancia para corroborar el desvío de una distribución espacial aleatoria (Krebs, 2013; Pagnutti *et al.*, 2014).

### **Monitoreo Directo**

Se realizaron monitoreos nocturnos (18:00 hs a 23:00 hs), mediante patrullaje de las parcelas previamente reconocidas con madrigueras. En base al reconocimiento previo de signos de actividad, se seleccionaron madrigueras con alta probabilidad de avistamiento de armadillos, para el monitoreo. Dicho monitoreo se llevó a cabo semanalmente, en una parcela diferente, hasta completar todas las parcelas de forma rotativa, esto permitió observar el desplazamiento de los armadillos y cuál fue la interacción con el medio una vez salían de su madriguera (Muñoz *et al.*, 2002).

### **Monitoreo Indirecto**

Se utilizaron nueve cámaras-trampa en la zona de estudio, ocho cámaras de modelo Univision UV557 y una cámara modelo Vikeri E2, las cuales fueron colocadas en puntos estratégicos de las parcelas con señales de actividad, para capturar imágenes de armadillos u otros animales, para la identificación de aves se utilizó el libro *The Birds of Panama: A Field Guide* (Angehr & Dean, 2010). Esto permitió determinar la abundancia/densidad de individuos y los patrones de actividad según el método de Maffei *et al.* (2002).

Para la cuantificación de eventos de detección se contabilizaron imágenes correspondientes a cada cámara y se organizaron en una hoja de Excel en la que se sumó el total de imágenes y se obtuvo la cantidad total de especies en cada cámara. Con esta data se realizaron cálculos para los índices de diversidad con el software Past. Para los índices de abundancia relativa por parcela y cámaras, se utilizó el número de fotografías por esfuerzo de muestreo (Díaz-Pulido & Payán, 2012).

Los datos para patrones de actividad de *D. novemcinctus*, así como especies asociadas, se ordenaron en una hoja de Excel y después se construyó un gráfico con la cantidad de eventos y los registros por hora, para así visualizar la actividad de las especies en el área de estudio. A dichos gráficos se les ajustó data de temperatura registrada por las cámaras en un eje vertical secundario para explorar posibles vínculos entre actividad y temperatura.

Se utilizó el software RStudio, con el paquete “Vegan 2.6-2”, para obtener una curva de acumulación de especies (Oksanen 2017; Bravo 2021), lo que permitió obtener información sobre el nivel de completitud del inventario. Posteriormente se calcularon estimadores para el número total (hipotético) de especies basadas en el error estándar. Se utilizaron los estimadores no paramétricos: Chao 2, Jackknife de primer y segundo orden y Bootstrap, para la abundancia hipotética de especies (Oksanen, 2017).

### **Cobertura Vegetal**

Para determinar si existe relación entre el tipo de cobertura vegetal y la cantidad de eventos de detección de armadillo, se caracterizó la cobertura vegetal, utilizando el método de observación directa para la identificación y clasificación de las unidades de cobertura (Delgado, 2010; ANAM & FAO, 2014). Los porcentajes y área de cobertura vegetal (m<sup>2</sup>), se obtuvieron con la aplicación Google Earth Pro; se asignaron colores en la imagen para cada tipo de cobertura. Las aéreas correspondientes fueron sumadas para obtener los totales de cada categoría por parcela. La asociación entre tipo de cobertura y eventos de detección fue evaluada con la prueba Chi-cuadrado.

## **RESULTADOS**

### **Distribución espacial y densidad de madrigueras**

Se registraron un total de 155 madrigueras a una densidad de 1.25 madrigueras/a, distribuidas en las tres parcelas de estudio, presentando diferencia en el total por cada parcela. Para la Parcela 1, se registraron 48 madrigueras, en la Parcela 2, 55 y para la Parcela 3, 52 madrigueras. Los índices de agregación (R), para las tres parcelas de estudio dieron como resultado una distribución de madrigueras agregada (Tabla 1; Fig.2).

Tabla 1. Parámetros de distribución espacial para *Dasytus novemcinctus* en la finca “Guido Martinelli”, Soná, Veraguas, Panamá. Parámetros:  $r_i$  = distancia al vecino más cercano para el individuo  $i$  (m),  $\Sigma r_i$  = suma de distancias (m),  $n$  = número de individuos,  $r_A$  = distancia media al vecino más cercano (m),  $\rho$  = densidad (ha),  $r_E$  = distancia esperada al vecino más cercano (m) y  $R$  = índice de agregación.

Parámetros	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3
$\Sigma r_i$	952.27	1286.23	903.18
$N$	48	55	52
$r_A$	19.8	23.4	17.4
$P$	0.00061	0.00020	0.00025
$r_E$	20.2	35.4	31.6
$R$	0.98	0.66	0.55

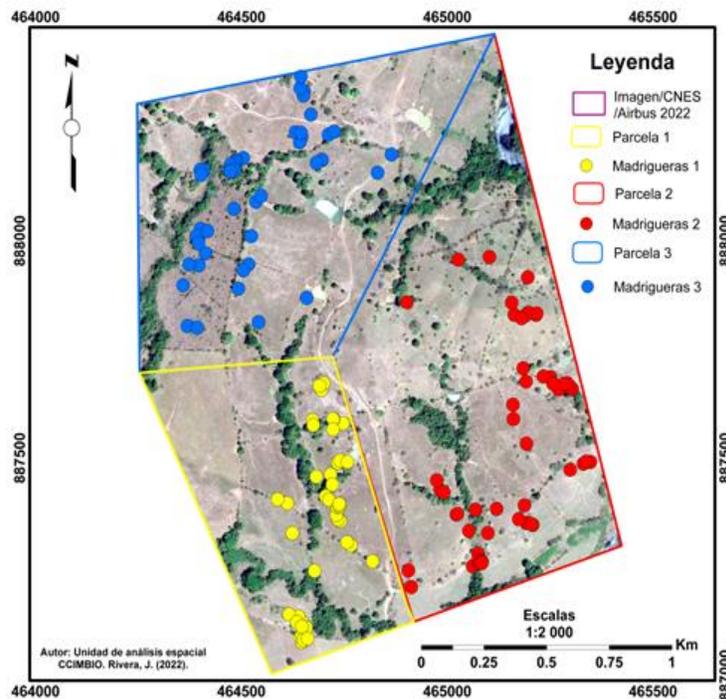


Fig.2 Distribución espacial de madrigueras de *Dasytus novemcinctus* georreferenciada en tres parcelas de estudio en la finca “Guido Martinelli”, Soná, Veraguas, Panamá. Fuente: mapa base estacional. Imagen CNES / Airbus 2021 (Google Earth Pro).

### **Detección y abundancia de especies.**

La especie con más eventos de detección fue *Dasypus novemcinctus* con 157 observaciones para una densidad poblacional de 0.38 ind/ha. A lo largo del estudio se detectaron tres eventos de mortalidad por restos de armadillo (Fig.3).



Fig. 3 Restos de armadillo de nueve bandas, *Dasypus novemcinctus* detectados durante el periodo de estudio en la finca ganadera “Guido Martinelli”, Soná, Veraguas, Panamá. Panel A: 5 de febrero 2022, (Parcela 3), panel B: 24 de febrero 2022, (Parcela 3) y panel C: 5 de marzo 2022, (Parcela 3).

En general, la cámara seis (Parcela 1) fue la que más registros captó, con un total de 71 observaciones (Tabla 2). Las especies en proximidad a madrigueras de armadillo con solo un avistamiento fueron las aves: *Geotrigon chiriquensis*, *Bubulcus ibis*, *Troglodytes aedon*, y mamíferos: *Philander oposum*, *Procyon lotor*, y un reptil, *Ameiva ameiva*.

Tabla 2. Especies de animales en asociación a madrigueras de *Dasypus novemcinctus* registradas por cada cámara trampa, en la finca ganadera “Guido Martinelli”, Soná, Veraguas, Panamá.

Especies	Cámaras trampa								
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
<i>Aramides cajaneus</i>	0	0	1	2	0	0	0	0	0
<i>Nyctidromus albicollis</i>	2	0	0	0	4	0	1	0	0
<i>Leptotila verreauxi</i>	0	1	5	0	0	4	3	0	0
<i>Geotrigon chiriquensis</i>	0	0	0	0	0	0	1	0	0
<i>Arremonops conirostris striaticeps</i>	0	0	0	2	0	3	0	3	0
<i>Milvago chimachima</i>	0	0	0	1	1	0	0	0	2
<i>Bubulcus ibis</i>	0	0	0	1	0	0	0	0	0
<i>Troglodytes aedon</i>	0	0	0	1	0	0	0	0	0
<i>Crypturellus soui</i>	0	0	0	1	0	2	0	0	0
<i>Sylvilagus gabbi</i>	0	1	0	4	1	10	0	0	0
<i>Philander oposum</i>	0	0	1	0	0	0	0	0	0
<i>Tamandua mexicana</i>	2	0	0	1	1	0	0	0	1
<i>Procyon lotor</i>	1	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Didelphis marsupialis</i>	0	1	3	0	0	4	0	1	0
<i>Conepatus semistriatus</i>	2	0	0	1	0	1	0	0	0
<i>Dasypus novemcinctus</i>	12	3	22	25	23	46	7	6	13
<i>Ameiva ameiva</i>	0	0	0	0	0	0	0	1	0
<i>Iguana iguana</i>	0	0	0	0	0	1	0	1	1
<b>Total</b>	19	6	32	39	30	71	12	12	17

Se registraron un total de nueve especies de aves en proximidad con las madrigueras (Fig.4), la especie con mayor cantidad de avistamientos fue *Leptotila verreauxi* (“titibúa”) con un total de once individuos. Las especies con menos eventos de detección (un individuo) fueron: *Geotrigon chiriquensis*, *Bubulcus ibis*, *Troglodytes aedon*.



Fig.4 Especies de aves detectadas por cámaras-trampa en la finca ganadera “Guido Martinelli”, Soná, Veraguas, Panamá. A: *Nyctidromus albicollis* (Capacho), B: *Leptotila verreauxi* (Titibúa), C: *Geotrigon chiriquensis* (Perdis), D: *Bubulcus ibis* (Garza ganadera), E: *Aramides cajaneus* (Cotara), F: *Crypturellus soui* (Gallina de monte), G: *Troglodytes aedon* (Chivirín), H: *Arremonops conirostris striaticeps* (Cerquero), I: *Milvago chimachima* (Caracara).

Se registraron un total de siete especies de mamíferos en proximidad con las madrigueras (Fig.5), siendo *Dasyopus novemcinctus*, los más abundantes con un total de 47, seguido de *Didelphis marsupialis* con catorce individuos; *Philander oposum* (zarigüeya de cuatro ojos) tuvo solamente un registro.

Se registraron solo dos especies de reptiles próximo a las madrigueras, mediante las cámaras-trampa (Fig.6), la iguana verde (*Iguana iguana*) con tres individuos y el “borriguero” (*Ameiva ameiva*) con un individuo.



Fig.5 Especies de mamífero detectados por cámaras-trampa en la finca ganadera “Guido Martinelli”, Soná, Veraguas, Panamá. A: *Tamandua mexicana* (Oso hormiguero), B: *Dasyus novemcinctus* (Armadillo de 9 bandas), C: *Conepatus semistriatus* (Zorrillo de espalda blanca), D: *Sylvilagus gabbi* (Conejo muleto), E: *Philander oposum* (Zarigüeya de cuatro ojos), F: *Didelphis marsupialis* (Zarigüeya común), G: *Procyon lotor* (Mapache).

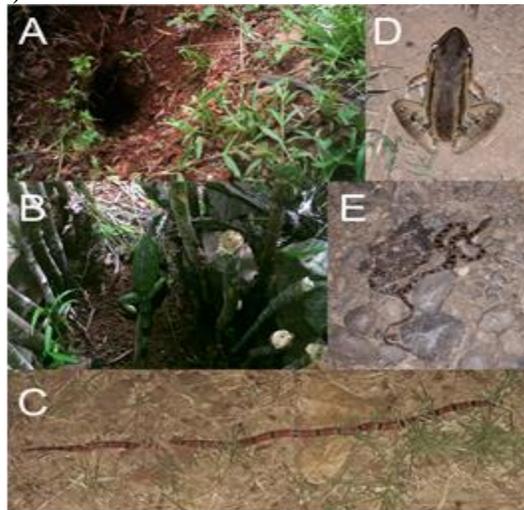


Fig.6 Reptiles y anfibio detectados por cámaras-trampa en la finca ganadera “Guido Martinelli”, Soná, Veraguas, Panamá. A: *Ameiva ameiva* (Borriguero), B: *Iguana iguana* (Iguana), C: *Micrurus nigrocinctus* (Coral verdadera) D: *Leptodactylus bolivianus* (Sapo-rana Boliviano) E: *Leptodeira rhombifera* (Serpiente ojo de gato).

### Índices de diversidad

Según el índice de diversidad de Simpson, la Parcela 2 y la Parcela 3, registraron la mayor diversidad de especies con índices promediados de 0.61 y 0.58, respectivamente. En la Parcela 1 se observó menor diversidad de especies con índice de 0.45. El Índice de Shannon mostró baja diversidad, ya que los índices resultantes fueron inferiores a dos.

En la Parcela 2 se obtuvo el índice más alto (1.27), mientras que en la Parcela 1 se captó el índice más bajo (0.95). De acuerdo con el índice de Margalef, la diversidad por comunidad más alta se detectó la Parcela 2 con un índice de 1.75 y la más baja fue en la Parcela 1 con índice de 1.29 (Tabla 3).

Tabla 3. Índices de diversidad, determinado por cada cámara colocada del polígono de estudio, en la finca ganadera “Guido Martinelli”, Soná, Veraguas, Panamá. Letra C y numeral corresponden a cámaras-trampa desplegadas en tres parcelas de muestreo.

Índices	Parcela 1			Parcela 2			Parcela 3		
	C5	C6	C9	C4	C7	C8	C1	C2	C3
Individuos	30	71	17	40	12	12	19	6	32
Simpson	0.391	0.551	0.395	0.589	0.583	0.667	0.565	0.667	0.492
1-D									
Shannon	0.813	1.236	0.790	1.434	1.075	1.314	1.156	1.242	0.986
H									
Margalef	1.176	1.642	1.059	2.440	1.207	1.610	1.358	1.674	1.154

### Índices de abundancia relativa (IAR)

Para la Parcela 1 se obtuvo un índice de 8.32, con un esfuerzo de muestreo de 1,418 noches-trampa, y en la Parcela 2 se alcanzó un índice de 12.47, con 505 noches-trampa. La Parcela 3 tuvo el índice de abundancia relativa más alto (16.33), con un esfuerzo de muestreo de 349 noches-trampa; a pesar de que las cámaras lograron comparativamente menos noches/trampa.

### Patrones de actividad

Los eventos fotográficos y videos obtenidos de armadillos (276), mediante cámara-trampas permitieron determinar un patrón de actividad nocturno (Fig.6A-C), con mayor actividad durante las 19:00 hs, 22:00 hs y 03:00 hs. Las horas con pocos eventos (1 a 2) fueron las 6:00 hs y las 18: 00 hs; para las horas del día desde las 7:00 hs hasta las 17:00 no

se registró detección. *Dasyus novemcinctus* mantiene un patrón de actividad en un rango de temperaturas que van de 19 °C a 28 °C, presentando una mayor frecuencia de armadillos en temperaturas bajas.

Para los patrones de actividad de todas las especies registradas, se obtuvo 358 eventos (Fig. 7D-F), en la que hubo actividad diurna de 6:00 hs hasta las 17:00 hs, especialmente de especies de aves y una actividad nocturna que va de 18:00 hs hasta las 5:00 hs, especialmente de especies de mamíferos.

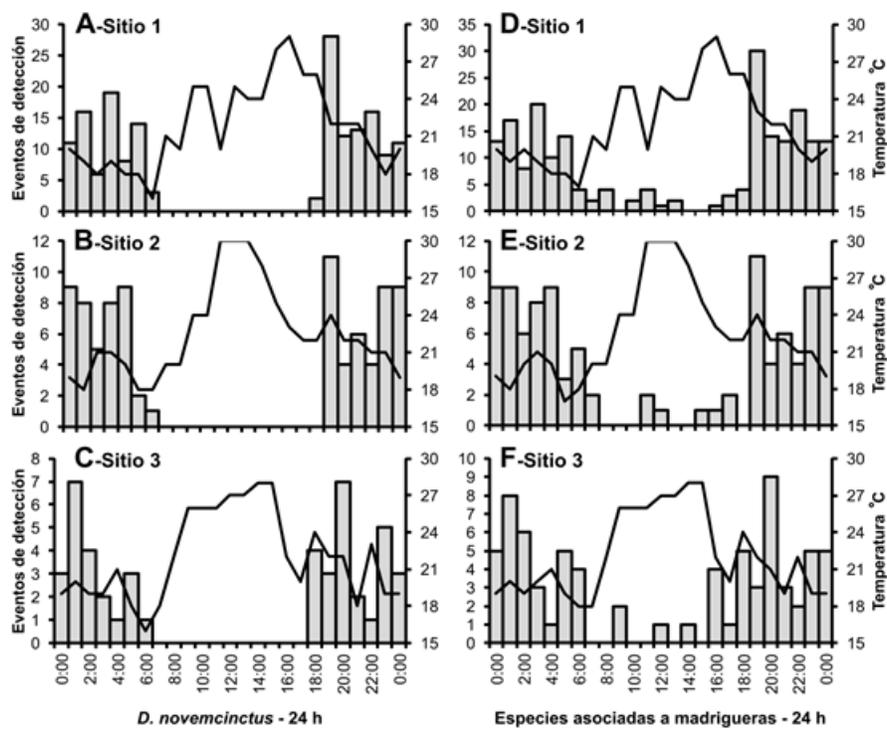


Fig.7 Patrones de actividad de *Dasyus novemcinctus* y especies asociadas a sus madrigueras en la finca ganadera “Guido Martinelli”, Soná, Veraguas. Paneles A-C corresponden a registros de actividad de *D. novemcinctus* en las Parcelas 1 a la 3. Columna derecha (D-F) corresponden al resto de las especies asociadas a madrigueras. Línea sólida representa temperaturas promedio registradas por cámaras-trampa.

### **Cobertura vegetal**

Hubo variación en el área de cobertura vegetal para cada categoría determinada. El pasto (PAST) fue dominante en las 3 parcelas de estudio, con porcentajes de cobertura de 58.7%, 46.4% y 43.4%, respectivamente. En contraste, el área correspondiente a bosque de galería (BDG) fue 16.5%, 8.0% y 6.0%, mientras que el bosque secundario (BS) alcanzó el 13.3% para la Parcela 2 y 9.9% para la Parcela 3; no hubo bosque secundario en la Parcela 1 (Tabla 4; Fig.8).

Tabla 4. Área en m<sup>2</sup> de los tipos de cobertura vegetal en las tres parcelas de estudio en la finca ganadera “Guido Martinelli”, Soná, Veraguas, Panamá. BDG: bosque de galería, VAH: vegetación arbustiva herbácea, ASPV: área abierta sin o con poca vegetación, PAST: pasto, PDT: pendientes, BS: bosque secundario, RTJ: rastrojo, VAT: vegetación arbustiva.

<b>Cobertura vegetal</b>	<b>Parcela 1</b>	<b>Parcela 2</b>	<b>Parcela 3</b>
BDG	46,500	39,000	26,700
VAH	2,100	0	14,200
ASPV	0	7,900	45,500
PAST	165,600	227,500	192,600
PDT	18,200	120,000	0
BS	0	65,100	44,100
RTJ	33,600	0	87,700
VAT	16,100	31,000	32,800



Fig.8 Foto-imagen referenciada con el mapa de la Figura 1 con tipos de cobertura vegetal en la finca ganadera “Guido Martinelli”, Soná, Veraguas, Panamá. Pasto: amarillo, bosque de galería: gris, pendiente: verde, bosque secundario: celeste, vegetación arbustiva herbácea: rosado, vegetación arbustiva: anaranjado, rastrojo: rojo vino, área abierta sin o con poca vegetación: violeta. Fuente: Google Earth Pro - Image 2022 Maxar Technologies.

*Dasytus novemimctus* se detectó en cinco categorías de cobertura vegetal (BDG, PDT, BS, VAT y VAH). Para la Parcela 1, se dieron 121 detecciones en bosque de galería y 45 en pendiente. Para la Parcela 2, 57 detecciones en bosque secundario, 15 en pendiente y 11 detecciones en vegetación arbustiva. En la Parcela 3 se dieron 29 detecciones en vegetación arbustiva herbácea y 21 en bosque secundario (Fig.9). La prueba chi-cuadrado de asociación demostró la asociación significativa entre el número de detecciones de armadillo y el tipo de cobertura vegetal (Tabla 5).

Tabla 5. Prueba de chi-cuadrado con datos obtenidos de la detección de *Dasypus novemcinctus* en los tipos de cobertura vegetal en la finca ganadera “Guido Martinelli”, Soná, Veraguas, Panamá.

Cobertura vs detección	N	g.l.	$\chi^2$	P
Parcela 1	166	7	637.2	<0.001
Parcela 2	83	7	263.5	<0.001
Parcela 3	50	7	155.1	<0.001

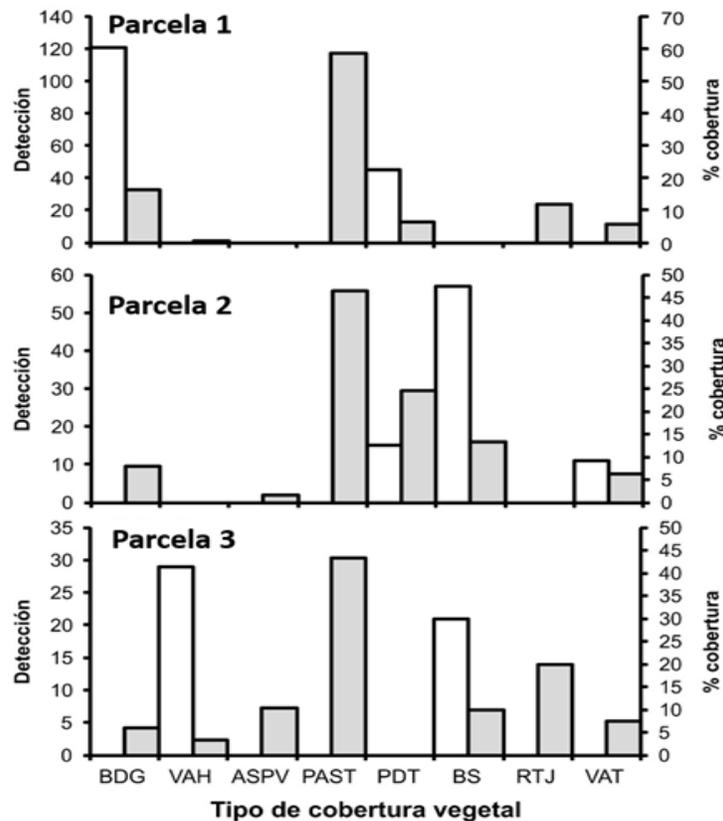


Fig.9 Cobertura vegetal y detección de *Dasypus novemcinctus* en la finca ganadera “Guido Martinelli”, Soná, Veraguas, Panamá. Detección de armadillo en barras blanca y los porcentajes de cobertura vegetal, gris. BDG: bosque de galería, VAH: vegetación arbustiva herbácea, ASPV: área abierta sin o con poca vegetación, PAST: pasto, PDT: pendientes, BS: bosque secundario, RTJ: rastrojo, VAT: vegetación arbustiva.

### Curva de acumulación de especies

Los cálculos realizados para determinar el éxito de muestreo por acumulación de especies en el programa RStudio (Sánchez Porras *et al.*, 2019), mostraron un aumento de la pendiente que se ajustó a los datos, donde la asíntota tendió a la estabilidad en el número de especies registradas con el método de cámaras-trampa (Fig.10).

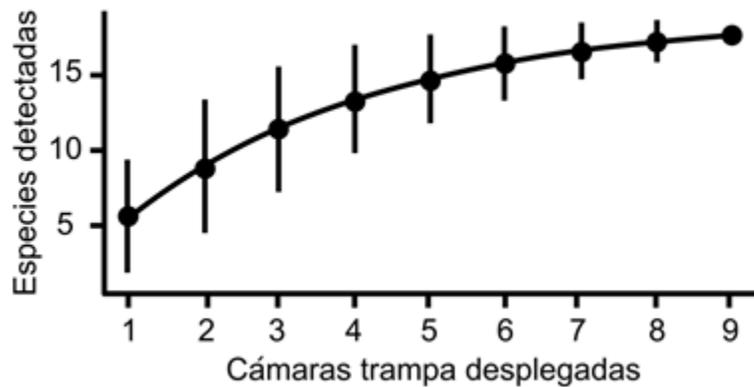


Fig.10 Curva de acumulación de especies en el área de estudio, Soná, Veraguas. Los puntos representan las medias de especies detectadas por cámara y los bigotes son el error estándar calculado por permutación ( $n = 1000$ ).

El estimador Chao 2 arrojó un total hipotético de 26 especies. Los estimadores Jackknife de primer y segundo orden indicaron un total de 23.3 y 26.6 especies, respectivamente. El estimador Bootstrap indicó hipotéticamente 20.4 especies en el área de estudio.

### DISCUSIÓN

Los armadillos mostraron un patrón de actividad relativamente uniforme, ya que iniciaron y terminaron actividades alrededor de la misma hora; esto se observó directamente y se confirmó con la metadata de las imágenes captadas. *Dasyus novemcinctus* tuvo mayor actividad durante las 19:00 hs, 22:00 hs y 03:00 hs. Este patrón es similar al

reportado por Lozano (2010), en el que la actividad de los armadillos se dio desde las 19:00h hasta las 2:00h, con tres picos de actividad (21:00–22:00h, 23:00–24:00h y 1:00–2:00h), a un rango de temperaturas de 19–28°C, demostrando alto grado de actividad nocturna; superior al 95% (Moreno, 2006; Brown, 2014).

En este estudio las madrigueras de armadillo se distribuyeron en un patrón agregado para todas las parcelas. Dicho patrón pudo deberse a que los armadillos excavan múltiples madrigueras en espacios reducidos. La distribución agregada de las madrigueras, en consecuencia, reduce el riesgo de depredación (p. ej.: humanos y perros), permitiéndole a los armadillos refugiarse en la madriguera más cercana, en caso de emergencia. Este es posiblemente el caso, ya que, en respuesta a la persecución de perros domésticos, los armadillos construyen varias madrigueras que también confunden a sus depredadores (McDonough *et al.*, 2000; DeGregorio *et al.*, 2021). Aunque nuestro estudio no se enfocó en el efecto de depredadores sobre la distribución de madrigueras de armadillos, en nuestro sitio de estudio se detectaron tres eventos de mortalidad, lo que indica que el riesgo de depredación durante excursiones fuera de las madrigueras está presente para *D. novemcinctus*.

Este patrón de distribución también pudo deberse a la disposición de la cobertura vegetal. Al ser un área dedicada a la ganadería, la fragmentación del hábitat probablemente hizo que los armadillos se concentrasen en remanentes de hábitats específicos. Este es el caso puesto que en este estudio no se identificaron madrigueras en pastura o áreas abiertas, concordando con reportes previos que indican que *D. novemcinctus* construye sus madrigueras con mayor frecuencia en áreas de bosque que en espacios abiertos (McDonough *et al.*, 2000; Arteaga & Venticinque, 2012).

La distribución se debe también a que los armadillos cavan sus madrigueras en zonas que el ganado no utiliza, como lo son las pendientes, donde el sustrato es más blando, facilitando la excavación. Esta fue la situación en la Parcela 1, donde las madrigueras se encontraron en pendientes y cercanas a arbustos, las cuales brindan protección contra depredadores al no estar totalmente expuestos, cuando emergen o entran a las madrigueras. Sin embargo, el IAR de la Parcela

1 fue comparativamente bajo, debido posiblemente al tránsito constante de personas acompañadas de perros, ganado y cercano a casas. Para evitar interacciones con el ganado, los armadillos también usaron parches de bosque secundario y galería. La Parcela 2 fue donde hubo más ganado, el cual era rotado cada ocho días, lo que posiblemente causó que los patrones de actividad de armadillos entorno a sus madrigueras aumentaran solo al retirarse el ganado; hubo cambios de madriguera frecuentemente. El ligero aumento del IAR para la Parcela 2 está posiblemente asociado a la llegada de la estación lluviosa, dado que la Parcela 2 está cerca del río Cobre, el cual es utilizado por personas en la estación seca como balneario y sitio de pesca, lo que probablemente provoca que la actividad de los armadillos disminuya.

Las madrigueras de la Parcela 3 fueron encontradas en vegetación arbustiva, donde la actividad humana y animales grandes se imposibilita, por lo que los armadillos tienen alimento y protección contra depredadores (Montero-Bagatella *et al.*, 2017). Esto pudo haber contribuido a que en la Parcela 3, el IAR fuese mayor a pesar de que el esfuerzo de muestreo fue menor comparado con las demás parcelas; quizá debido a que la mayoría de los armadillos usó las madrigueras de forma consistente. La Parcela 3 fue el área menos perturbada por personas o animales domésticos, lo que probablemente pudo haber contribuido a que se detectaran más armadillos.

La asociación a madrigueras de armadillo fue variable; por ejemplo, hubo registro del conejo “muleto” (*Sylvilagus gabbi*) utilizando consistentemente madrigueras de armadillo, mientras que especies de otros grupos fueron observados en asociación temporal en el exterior de dichas madrigueras. Las aves fueron el grupo que registró actividad diurna asociada al exterior de madrigueras, quizá debido a que en la entrada de las madrigueras hubo invertebrados activos, que atraen aves (Sun *et al.*, 2021). Otro atractivo es la tierra removida que las aves utilizan para deshacerse de parásitos en el plumaje (Takano Goshima & Castro Izaguirre, 2007; Silva *et al.*, 2012).

Nuestros resultados están en línea con Utreras (2020) & DeGregorio *et al.* (2022), en que las madrigueras de armadillo de nueve bandas son sitios inesperadamente populares, utilizados no solo por sus arquitectos

originales sino también por al menos otras 64 especies comensales (p. ej.: gatos monteses, zorros, zarigüeyas, mapaches, zorrillos, ranas, eslizones, serpientes, tortugas y 40 especies de aves).

Según el estudio de Lozano (2010), en el monumento natural Santuario de fauna y flora Otún Quimbaya en Colombia, los sitios estudiados presentaron IAR de 12.35, 23.15 y 41.67. En comparación con nuestro estudio (IAR 8.32, 12.47 y 16.33), se puede decir que existe valor en el componente faunístico, pese a que nuestro estudio se realizó en una finca ganadera. Por otro lado, el estudio de Lira-Torres & Briones-Salas (2011) en la Selva Zoque, Oaxaca, México, es comparable al presente trabajo, ya que se realizó en una zona agrícola. En contraste, las especies de mamíferos en común, con dicho trabajo alcanzaron IAR más alto en el presente estudio. La causa de esta diferencia se debe quizá a que en la Selva Zoque se dan incendios recurrentes, existe ocupación de tierras, a diferencia de nuestro sitio que no presenta estos factores.

Los resultados obtenidos y el contraste con otros estudios permiten establecer que la riqueza de especies en este estudio es mayor en comparación con el reporte realizado por Reyes (2010), en una propuesta para el desarrollo urbano de Soná, en la que dicho autor reportó una pobre fauna silvestre (ocho especies). Mediante este estudio se logra un inventario más completo, resaltando la importancia de los armadillos *D. novemcinctus* y la fauna asociada a sus madrigueras, en el Distrito de Soná. Esta nueva información puede contribuir a la mejora de planes de conservación para la región. En este estudio se han dado los primeros reportes de especies de mamíferos como *Tamandúa mexicana*, *Procyon lotor* y *Conepatus semistriatus*, los cuales no habían sido reportados en esta localidad dentro del distrito.

Este aspecto se sostiene más aun, por la asíntota en la curva de acumulación de especies, indicando que el esfuerzo de muestreo fue adecuado. Este fue el caso, ya que los estimadores y el número de especies observado son afines, lo que contrasta con el estudio de Guido (2016), que apenas alcanzó el 60% de las especies estimadas. La ligera discrepancia entre los estimadores y el número total de especies en nuestro estudio puede deberse a limitantes inherentes del método de muestreo. Este es el caso de especies que fueron observadas directamente (p. ej.: serpientes: *Micrurus nigrocinctus*, *Leptodeira*

*annulata* y anuro: *Leptodactylus bolivianus*), pero que las cámaras no captaron. Los sensores infrarrojos de las cámaras son menos sensibles a la presencia de anfibios y reptiles por sus bajas temperaturas corporales (Sun *et al.*, 2021).

Este estudio resalta la importancia de los armadillos como especie clave en ambientes intervenidos por la ganadería. Este es el caso porque los armadillos contribuyen a la complejidad estructural de los hábitats (Rodríguez *et al.*, 2019). Precisamente en fincas ganaderas, como en el presente estudio, la complejidad de los hábitats se reduce por la expansión de pastura y desmonte. Es por ello que los armadillos son de importancia crítica, ya que sus actividades mantienen dicha complejidad estructural y promueven el aumento local de la riqueza de especies (Jones *et al.*, 1997; Rodríguez *et al.*, 2019).

## **CONCLUSIONES**

La distribución de madrigueras depende de la conducta de los armadillos en respuesta a la presencia de enemigos naturales, disruptores y tipos de cobertura vegetal. Las madrigueras de armadillo son “hot spots” de actividad animal, debido a que los recursos disponibles entorno a la madriguera atraen comensales. La diversidad de especies aumentó cuando la cobertura vegetal aportó complejidad estructural y cuando el impacto de disruptores fue bajo. A pesar de tratarse de una zona intervenida por ganadería, los armadillos desempeñan un papel de importancia crítica, ya que sus actividades contribuyen al mantenimiento de la abundancia relativa y diversidad de especies. El método mixto de muestreo fue suficiente para el levantamiento de un inventario comprensivo de las especies asociadas a madrigueras de *D. novemcinctus*, con los primeros reportes de *Tamandúa mexicana*, *Procyon lotor* y *Conepatus semistriatus* para el área. Esta nueva información puede contribuir a la mejora de planes de conservación para la región.

## **AGRADECIMIENTOS**

Nuestro agradecimiento es para Juan Santos y María Jiménez por el apoyo durante los monitoreos en campo. Este estudio fue apoyado

parcialmente por fondos de Idea Wild 501c (3), a través de la fundación Biodiversity Conservation Organization.

## REFERENCIAS

Angehr, G. R. & Dean, R. (2010). *The Birds of Panama: A Field Guide*. Zona Tropical Publications.

Arteaga, M. C. & Venticinque, E. (2012). Effects of change in primary forest cover on armadillo (Cingulata, Mammalia) burrow use in the Central Amazon, *Rev. Mex. Biodivers.*, 83, pp. 177–183.

Autoridad Nacional del Ambiente, (ANAM) y Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, (FAO) (2014).

Sistema de clasificación de la cobertura y uso de la tierra para el sistema nacional de monitoreo de los bosques.

Balderas, S, Barrón, D. N. & Magaña Guzmán, V. (2012). Plan de manejo tipo para armadillo de nueve bandas (*Dasypus novemcinctus*) modalidad intensiva, Semarnat.

Bravo, H. (2021). Evaluación de la relación entre la diversidad de aves y la estructura vegetal en fincas agroforestales de cultivo de cacao en la provincia de Los Ríos, Cantón Quevedo, Ecuador. Tesis de pregrado. Universidad de Especialidades Espíritu Santo, Ecuador.

Brown, E. (2014). Aspectos ecológicos de los felinos silvestres y sus presas en área silvestre Narganá, Guna Yala. Tesis de pregrado. Universidad de Panamá, Panamá.

DeGregorio, B. A., Gale, C., Lassiter, E. V., Massey, A., Roberts, C. P., & Veon, J. T. (2021). Nine-banded armadillo (*Dasypus novemcinctus*) activity patterns are influenced by human activity, *Ecol. Evol.* 11(22), pp. 15874–15881. DOI: 10.1002/ece3.8257.

DeGregorio, B. A., Veon, J. T. & Massey, A. (2022). Wildlife associates of nine-banded armadillo (*Dasypus novemcinctus*) burrows in Arkansas, *Ecol. Evol.* 12(5), pp. 1–10. DOI: 10.1002/ece3.8858.

Díaz-Pulido, A. & Payán, E. (2012). Manual de fototrampeo: una herramienta de investigación para la conservación de la biodiversidad en Colombia, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt y Panthera Colombia., p. 32.

Encalada, L. M. (2018). Patrones de actividad diaria de mamíferos medianos y grandes de la Reserva Biológica Uyuca mediante fototrampeo. Tesis de grado. Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras.

Empresa de Transmisión Eléctrica de Panamá (2021). Estadísticas meteorológicas acumuladas (compendio histórico), de temperatura y precipitación. Estaciones Soná y Guarumal. <https://n9.cl/kst2g>

Escobar-Gutiérrez, A. & Amezcua-de Bernés, M. E. (1981). El armadillo: un nuevo animal de experimentación para el estudio de las zoonosis, *Cienc. Vet.*, 3, pp. 200–224.

Guido, L. D. (2016). Riqueza, abundancia y patrones de actividad de los mamíferos medianos y grandes, en diferentes condiciones de manejo en la región del Bajo Balsas, Michoacán. Tesis de grado. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.

Gutiérrez, M. (2009). Geomorfología. Madrid, España: Pearson Educación.

Guzmán-Lenis, A. & Camargo-Sanabria, Á. (2004). Importancia de los rastros para la caracterización del uso de hábitat de mamíferos medianos y grandes en el Bosque los Mangos (Puerto López, Meta, Colombia), *Acta Biolo. Colomb.*, 9(1), pp. 11–22.

Jones, C. G., Lawron, J. H. & Shachak, M. (1997). Positive and negative effects of organisms as physical ecosystem engineers, *Ecology*. 78(7), pp. 1946–1957. doi: 10.1890/0012-9658(1997)078[1946: PANEEO]2.0.CO;2.

Krebs, C. J. (2013). Spatial pattern in animal and plant populations Organisms, in *Ecological Methodology*, pp. 233–274.

Lira-Torres, I. & Briones-Salas, M. (2011). Impacto de la ganadería extensiva y cacería de subsistencia sobre la abundancia relativa de mamíferos en la Selva Zoque, Oaxaca, México, *Therya*. 2(3), pp. 217–244. doi: 10.12933/therya-11-49.

Lozano, L. A. (2010). Abundancia relativa y distribución de mamíferos medianos y grandes en dos coberturas vegetales en el Santuario de fauna y flora Otún Quimbaya mediante el uso de cámaras trampa. Tesis de grado. Pontificia Universidad Javeriana, Colombia.

Maffei, L., Cuellar, E. & Noss, A. J. (2002). Uso de trampas-cámara para la evaluación de mamíferos en el ecotono Chaco-Chiquitanía, *Rev. Boliv. Ecol. y Conserv. Ambient.*, 11, pp. 55–65.

McDonough, C. M., DeLaney, M. J., Quoc L. P., Blackmore, M. S., & Loughry, W. J. (2000). Burrow characteristics and habitat associations of armadillos in Brazil and the United States of America. *Rev. Biol. Trop.*, 48(1), 109-120.

Melo, Felipe P. L.; Martínez-Salas, E., Benítez-Malvido, J. & Ceballos, G. (2010). Forest fragmentation reduces recruitment of large-seeded tree species in a semi-deciduous tropical forest of southern Mexico. *J. Trop. Ecol.*, 26(1), 35–43. doi:10.1017/s0266467409990435

Meyer, N., Esser, H. J., Moreno, R., van Langevelde, F., Liefing, Y., Oller, D. R., Vogels, C. B. F., Carver, A. D., Nielsen, C. K. & Jansen, P. A. (2015). An assessment of the terrestrial mammal communities in forests of Central Panama, using camera-trap surveys, *J. Nat. Conserv.*, 26, pp. 28–35. doi: 10.1016/j.jnc.2015.04.003.

Montero-Bagatella, S. H., González-Romero, A., Gallina, S. & Sánchez-Rojas, G. (2017). Relación entre las características de la vegetación y las densidades de la ardilla de Perote. *Rev. Mex. Biodivers.*, 88(3), 691–700. doi: 10.1016/j.rmb.2017.06.010

Mosquera-Muñoz, D.M., Corredor, G., Cardona, P. & Armbrecht, I. (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.

Moreno, R. 2006. Parámetros poblacionales y aspectos ecológicos de los felinos y sus presas en Cana, Parque Nacional Darién, Panamá. Tesis de grado. Instituto Internacional en Conservación y manejo de Vida Silvestre, Heredia, Costa Rica.

Muñoz, J, Octavio, B. & Duque, M. (2002). Patrones de Hábitat y de Actividad Nocturna de *Agouti paca* En el Parque Nacional Natural Utría (Chocó, Colombia), Actual Biol., 24, pp. 75–85.

Oksanen, J. (2017). Vegan: ecological diversity, R Package Version 2.4-4. <https://cran.r-project.org/package=vegan>.

Pagnutti, N., Gallo, J., Superina, M., Vizcaíno, S. F., & Abba, A. M. (2014). Patrones estacionales de distribución espacial y área de acción del Piche Llorón, *Chaetophractus vellerosus* (Cingulata: Dasypodidae), en magdalena, Buenos Aires, Argentina. Mastozool. Neotrop., 21(1), 59-65.

Platt, S. G., Rainwater, T. R. & Brewer, S. W. (2004). Aspects of the burrowing ecology of nine-banded armadillos in northern Belize, Mamm. Biol., 69(4), pp. 217–224. doi: 10.1078/1616-5047-00138.

Reyes, Y. C. (2010). Propuesta para el desarrollo urbano de Soná. Tesis de grado. Universidad de Panamá, Panamá.

Rodrigues, T. F., Mantellatto, A. M. B. Superina, M., & Chiarello, A. G. (2019). Ecosystem services provided by armadillos. Biol. Rev., 95: 1-21. <https://doi.org/10.1111/brv.12551>

Rodríguez-Durán, A., Valencia, K., Superina, M., & Peña (2018). Distribución y usos de los armadillos en sabanas inundables de Arauca, Colombia, Biota Colomb. 19, pp. 117–127. doi: 10.21068/c2018.v19n02a10.

Silva, J., Pollack, L. & Bazán, G. (2012). Avifauna en el Campus de la Universidad Nacional de Trujillo - Perú, Mayo–agosto 2009, Ucv - Sci., 4(2), pp. 197–204.

Sun, S., Dou, H., Wei, S., Fang, Y., Long, Z., Wang, J., An, F., Xu, J., Xue, T., Qiu, H., Hua, Y., & Jiang, G. (2021). A Review of the

Engineering Role of Burrowing Animals: Implication of Chinese Pangolin as an Ecosystem Engineer, *J. Zool. Res.*, 3(3), pp. 1–20. doi: 10.30564/jzr.v3i3.3102.

Takano, F. & Castro, N. (2007). Avifauna En El Campus De La Universidad Nacional Agraria La Molina (Unalm), Lima – Perú, *Ecol. Apl.*, 6(1–2), p. 149. doi: 10.21704/rea.v6i1-2.351.

Utreras, J. P. (2020). Caracterización de la estructura y la abundancia de la comunidad de macromamíferos terrestres del Bosque Protector Oglán Alto, cantón Arajuno, Pastaza – Ecuador, Uce. Tesis de pregrado. Universidad Central del Ecuador, Ecuador.



**BEHAVIOURAL NOTES OF *Zentrygon goldmani oreas* (NELSON, 1912) AND OTHER WILD DOVES AT THE CHUCANTÍ PRIVATE NATURAL RESERVE (CPNR), DARIEN, PANAMA**

**Pedro G. Méndez-Carvajal**

Universidad de Panamá, Panamá. [mendez55.pm@gmail.com](mailto:mendez55.pm@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0003-1306-5869>

**Karol M. Gutiérrez-Pineda**

Universidad de Panamá, Panamá. [gutierrezpinedakm@gmail.com](mailto:gutierrezpinedakm@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0001-9129-7716>

**Guido Berguido**

Adopta Bosque Panamá S.A. Panamá. [gcberguido@hotmail.com](mailto:gcberguido@hotmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-5952-3901>

DOI <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v25n2.a4065>

**Fecha de recepción:** 30 de octubre de 2022

**Fecha de aceptación:** 16 de marzo de 2023

**ABSTRACT**

The province of Darien in eastern Panama is well known for its endemic doves. Most of them are poorly studied and threatened. The aim of this study was to recognize the wild dove's diversity from CPNR and describe an ethological baseline. We compiled 38,592-day hours, with information on circadian activity and behavioral data from camera traps from December 2012 to May 2014 in a cloud forest. We detected four species of wild doves and obtained information on circadian activity for the most frequent species detected. An ethogram was built for *Zentrygon goldmani* and *Leptotila cassinii* in five categories: transversal walking, foraging, courtship, copulation and walking together. Courtship occurred during December, February, July and September, in both the dry and rainy seasons. We also detected *Geotrygon montana* and *Zentrygon lawrencii* for the Pacific slope of Panama and for the Chucanti Private Natural Reserve. The diversity found regarding wild doves represents a unique opportunity to study these endemic species at CPNR, and another important reason for its conservation.

## KEY WORDS

Birds, Cloud Forest, Columbiformes, Pigeons

## NOTAS DE COMPORTAMIENTO DE *Zentrygon goldmani* oreas (NELSON, 1912) Y OTRAS PALOMAS SILVESTRES EN LA RESERVA NATURAL PRIVADA CHUCANTÍ (CPNR), DARIÉN, PANAMÁ

## RESUMEN

El lado este de Panamá es bien conocido por sus palomas endémicas, la mayoría de ellas poco estudiadas y amenazadas en la provincia de Darién, Panamá. El objetivo de este estudio fue reconocer la diversidad de palomas silvestres en la RNPC y describir una línea base de su comportamiento. Compilamos 38,592 horas día, con información sobre la actividad circadiana y datos de comportamiento de las cámaras trampa desde diciembre de 2012 hasta mayo de 2014 en un bosque nuboso. Detectamos cuatro especies de palomas silvestres y obtuvimos información de actividad circadiana para las especies más frecuentes detectadas. Se construyó un etograma para *Zentrygon goldmani* y *Leptotila cassinii* en cinco categorías: caminata transversal, búsqueda de alimento, cortejo, cópula y caminata en pareja. El cortejo se produjo durante diciembre, febrero, julio y septiembre, incluidas las estaciones secas y lluviosas. También detectamos *Geotrygon montana* y *Zentrygon lawrencii* para la vertiente del Pacífico de Panamá y para la Reserva Natural Privada Chucantí. La diversidad encontrada con respecto a las palomas silvestres representa una oportunidad única para estudiar estas especies en la RNPC y otro motivo importante para su conservación.

## PALABRAS CLAVES

Aves, Bosque nuboso, Columbiformes, Palomas

## INTRODUCTION

Columbidae is one of the most diverse families of birds, with high endemism in Darien and other highlands in Mesoamerica (Angehr & Dean, 2010). Ground-dwelling birds are poorly studied but may be important for understanding biogeography due to their high dispersal capabilities and colonization between regions and continents (Johnson & Weckstein, 2011, Lapiedra *et al.*, 2013). Darien is a unique habitat for species like *Z. goldmani* (Nelson, 1912), which has been reported only in a few peaks within the region, and an endemic species like *Odontophorus dialeucos* (Tacarcuna wood quail), which has adapted to

high-altitude habitats in the Darien Mountain chains (Ridgely & Gwynne, 1989; Angehr *et al.*, 2004). These adaptations are clearly illustrated by unique behaviour and habitat use observed in Chucanti Private Natural Reserve (CPNR). While *L. cassinii* has adapted to live in mixed open habitat, the other reported pigeon-doves have adapted to cloud forests and have developed strict arboreal habits compared with *Zentrygon* and *Geotrygon* species (Lawrence, 1867; Sanfilippo & Werther, 2001). It is known that the range of food resources used by these species provides more ecological opportunities to survive and disperse. Some species exploit a wide variety of food resources within habitats, some are selective of fruits, and others are seed and grain specialists (Lapiedra *et al.*, 2013). Snails and insects are another protein source for wild doves like *Geotrygon* and *Zentrygon* species (Baptista *et al.*, 2009). The foraging, reproductive and vocalization patterns of these species have only changed in adaptations for crypsis and brooding (Tubaro & Mahler, 1998; Brooks, 2012). There is a direct correlation between body mass and advertising calls, based on innate and stereotyped patterns described by Lade & Thorpe (1964).

From studies related to vocalizations in *Z. lawrencii* 858 kilohertz (kHz) and *Z. goldmani* (586 kHz), *Z. goldmani* may have greater nutritional requirements, given a body mass average of 258 gram (g) (Salvini, 1974; Tubaro & Mahler, 1998). The energy requirements of the eye coordination and bobbing head movements needed for clear and effective foraging activity, plus the vigilance these birds invest, being at the ground for courtship, imply specialization for particular habitats, food, and temperatures for successful colonization (Mac-Arthur, 1978; Diamond, 1975). One of the most poorly studied and elusive wild doves in the country is the Russet-Crowned Quail-Dove, *Zentrygon goldmani* (Columbiformes: Columbidae), discovered by Edward A. Goldman on March 5, 1912. The type specimen (No. 232545) is located at the United States National Museum (Nelson, 1912). It was found at Limón river, Pirre mountain, Darien at 1,524 meters average sea level (masl). The physical description of this species includes a rufous chestnut between the eyes, reddish chestnut by the crown and nape, olivaceous and dark gray on the upper side of the neck, vinaceous color on the back and tail, brownish wings, and pinkish buff on the ear bordered with black lines from the bill to the lower side of both cheeks. Body measurements are 144 millimeter (mm) extended wings, 87 mm tail, sixteen mm culmen,

and 44 mm tarsus (Nelson, 1912). Other measurements reported body size 280 mm (Angehr & Dean, 2010). This species is predominantly found in forested mountain habitat (Nelson, 1912). Common names include Goldman's Wood Dove (Nelson, 1912), "perdiz de frente dorada", "perdiz cabezicanela" in Colombia, and "perdiz cabecicastaña" in Panama (Méndez, 1979; Angehr *et al.*, 2004; Angehr & Dean, 2010). Historically, *Z. goldmani* has been classified by the following names: *Geotrygon goldmani goldmani*, *Oreopeleia goldmani goldmani*, and *Zentrygon goldmani goldmani*, the latter proposed by Banks *et al.* (2013) and listed for the Birds of the World and Birdlife (Birdlife International, 2016). *Zentrygon goldmani oreas* was designated as a rare subspecies from Panama (Hilty & Brown, 1986; Ridgely & Gwynne, 1989; Baptista *et al.*, 1997; 2020). *Zentrygon goldmani oreas* has been poorly studied and is distributed from lowlands (~700 m) up to 1,600 m in Panama.

There are 28 columbids reported for Panamá (Angehr & Dean, 2010; MiAmbiente, 2016). Columbids are regular targets for rural hunting in different parts of Panama, and others are pressured by natural predators (Méndez, 1979). Determining the distributions, population densities, basic behaviours, and their predators, helps to determine their conservation statuses and threats. Most of the pigeon species present in Panama lack this information, making it difficult to evaluate their conservation category. In Panama, some species have restricted habitats and small distribution ranges due to endemism, habitat requirements, and activity patterns (Miller *et al.*, 2011). For these species, behavioral data is in need. A few studies have focused on *Z. goldmani*, including inventories at Tacarcuna, Pirre, Altos de Quia, Nique, Jurado, and other highlands in Darien and at the Colombian border, which contain nearly untouched mountain forest ecosystems (Renjifo *et al.*, 2017). Studies with the genus *Zentrygon* and *Geotrygon* have examined behaviour (vocalization, courtship) (Tubaro & Mahaler, 1998; Johnson & Weckstein 2011; Donegan & Salaman, 2012; Renjifo *et al.*, 2017; Baptista *et al.*, 2020), genetic and evolutionary adaptations (Brooks, 2012; Lapiedra *et al.*, 2013). The aims for this study were to build preliminary list of wild-dove species and obtain behavioural information that can help as baseline for monitoring and conserve the wild-doves from Darien.

## MATERIALS AND METHODS

### Study area

Chucanti Private Natural Reserve (CPNR) is located in Darien Province, Republic of Panama, (08°47' N 078°27' W). Chucanti mountain is the highest elevation of the Maje Mountain Chain, at 1,400 masl (Laurance, 2008). Annual temperatures are between 24-27.2 Celsius (°C), and the annual mean precipitation is 1,940.5 mm (Navas *et al.*, 2001). Habitats include montane and submontane forest with characteristics of cloud forest with many epiphytes and bryophytes (Aizprúa unpubl. data). It has 1,200 species of vascular plants, the most abundant families being Rosaceae, Magnoliaceae, Gentianaceae, and Fabaceae (Ortíz *et al.*, 2016; Flores *et al.*, 2017; Mijango-Ramos *et al.*, 2020). The CPNR has been recognized by several studies for its endemism of plants, amphibians, mammals, and birds (Batista *et al.*, 2020; Bezark *et al.*, 2013; Bermúdez *et al.*, 2012; Méndez-Carvajal, 2014; 2015; Gutiérrez-Pineda *et al.*, 2021).

### Data collection

The baseline camera trap monitoring system at the reserve was comprised of three camera traps along the main trail, a six-kilometer loop that connects the mountain valley to Chucanti peak. One camera Cuddeback model 1347, and two Bushnell Trophy Cam model 11-9736 Bushnell model were placed only along the first three km. The cameras were located at different elevations as follows: station 1 “tronco” (800 masl; 08°47' North, 78°27' West), station 2 “filo 1” (1,350 masl; 08°47' North, 78°27' West), and station 3 “filo 2” (1,375 masl; 08°48' North, 78°27' West). Cameras were separated starting from 800 masl at station 1 “tronco” (1 km from biological station), station 2 “filo 1” (2.5 km from camera 1), and station 3 “filo 2” (3.5 km from camera 2) (Fig. 1). This project follows the Panamanian ethical approval and was conducted under scientific permit No. SE/A-70-14 from the Panamanian Environmental Ministry (Mi Ambiente).

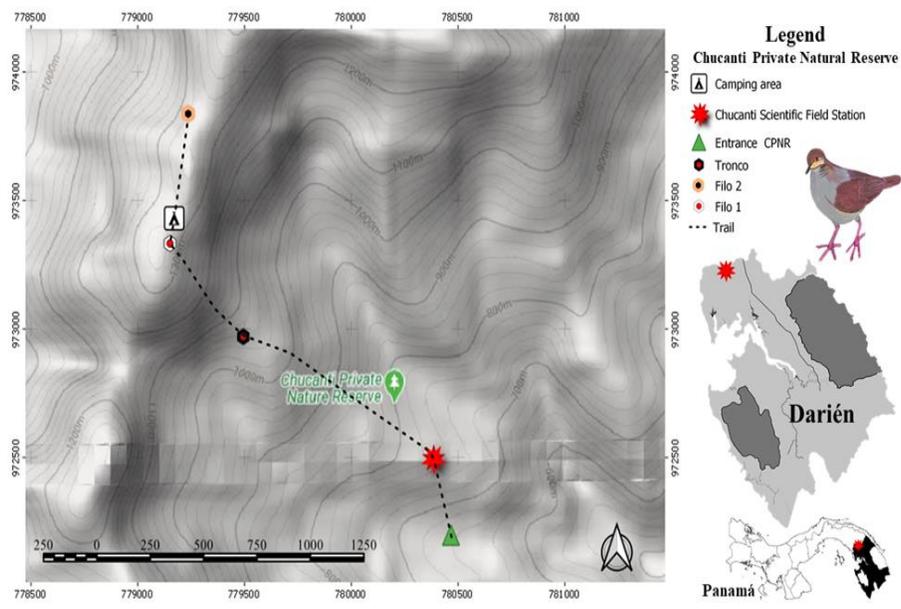


Fig 1. Study area, Chucanti Private Natural Reserve, Darien, Panama

### Data analysis

PAleontological STatistics Software (PAST 4.02) was used to calculate the detection graph of the number of doves's species per month and their frequency of detection. Graphs of circadian activity were also created for species with more than eleven photographic events at intervals of more than 30 minutes per photograph, if it was of the same species following Mosquera-Muñoz (2014). An ethogram was built based on Steadman (2001) and Brooks (2012), adding any other relevant behaviour observed in the photographs during the two years of data. As behaviours were repetitive, we calculated percentage of occurrence from the total of all appearances of the animals in the camera.

## RESULTS

### Behaviour

Data for behaviour analysis obtained from pictures is presented as an ethogram in Table 1 for *Z. goldmani* and *L.cassinii*, comparing courtship display and other behaviours, the patterns of movements for approach, touch of beaks, "front dance," copulation, separation and a distant

walking circle resembling a typical Panamanian dance called “El punto” (Fig. 2). Doves expended between 1-2 minutes, walking around, and crossing in front of the cameras, and 1% of the time recorded they stopped for a short rest. Foraging for grain was the second most common activity. There is a variation of transversal walking (77%) with “circular walking” (2%), where doves walked in circles from right to left, pecking while walking. We detected the characteristic bobbing behaviour as “head bobbing and tail is raised”, which was included as part of the courtship we describe here (Table 1). In general, the same pattern was reported only twice during our study. It is notable that these events occurred on April 12 and 28, 2013 and match with the same season reported for the *Zentrygon* genus (Steadman, 2001; Brooks, 2012). For *Z. goldmani*, we found: 1) bobbing movement to be about one second, and 2) tail and head lowered and raised quickly. *Zentrygon goldmani* did not fan the tail. *Zentrygon goldmani* appears to call the partner from a distance, alone from the ground, with the head up/down, and moving in circles twice. The partner lands, both less than half a meter from each other, approaches with eye contact, then they put their chest in contact while joining their beaks. Moving slowly, each turns its body, switching sides and slowly moving forward in different directions (Fig. 2). *Leptotila cassinii* exhibited more socialization behaviour, described in five categories: transversal walking (47.5%), foraging (15%), courtship (15%), copulation (2.5%) and walking together (2.55%). Courtship occurred in different months during the two years of the study (December, February, July, and September), including dry and rainy seasons.

Table 1. Ethogram of *Zentrygon goldmani* and *Leptotila cassinii* at CPNR, Darien province, Panama.

Ethogram	<i>Zentrygon goldmani</i>	<i>Leptotila cassinii</i>
Courtship Display		
Stationary head down and tail up	x	x
Pumping head down with tail up	x	x
Approaching breasts and peaks	x	x
Frontal dancing together with touching beaks	x	x
Walking side by side	x	x
Male fluttering and jump over female/female receptive	-	x
Separation	x	x
Spoil	x	x
Walking together	x	x
Other behaviour		
Foraging	x	x
Walking transversal	x	x
Walking on circles	x	x
Grooming	x	x
Ground sitting	x	-

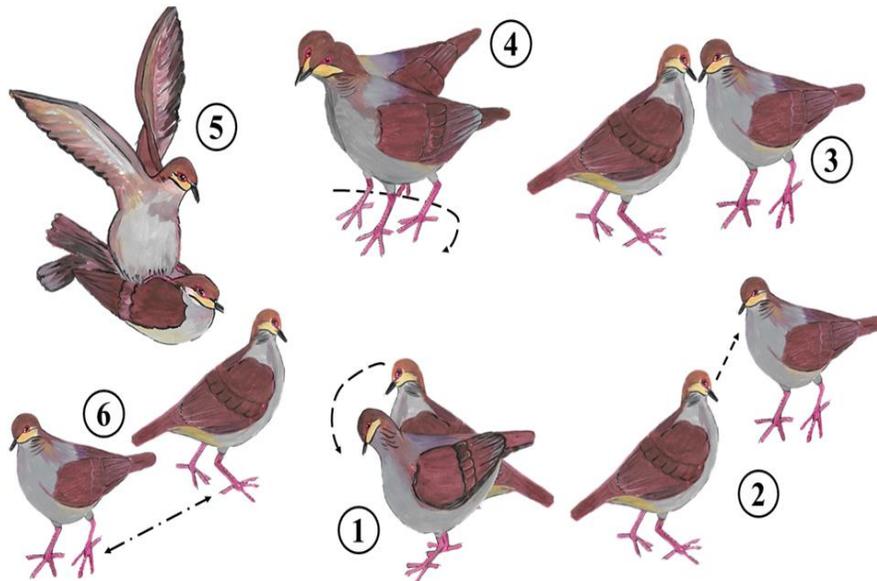


Fig. 2. Courtship behaviour of *Zentrygon goldmani oreas*

#### **Diversity and Circadian activity**

We detected four species of wild doves: *Geotrygon montana*, *Zentrygon goldmani*, *Z. lawrencii*, and *Leptotila cassinii*. The months from January to April obtained more detectability (Fig. 3). The species with the highest occurrence frequency during sampling was *Z. goldmani* (Fig. 3, Fig. 4). *Zentrygon goldmani* was frequently detected from July 2013 to May 2014 (Fig.3). Circadian activity shows the wild doves were mainly diurnal starting activities at 06:00 and finishing activities between 17:00 to 18:00 (Fig.4). The graphics were only examined for species with more than eleven photographic events; thus, we list only *Z. goldmani*, and *L. cassinii* (Fig. 3). *Zentrygon goldmani* showed a greater range of activity between 08:00 to 09:00 hours (hrs), with a decrease at 13:00 hrs, and peak activity in the afternoon between 15:00 to 16:00 hrs (Fig. 4). *Leptotila cassinii* had three well-marked activity peaks, at 10:00, 12:00, and 15:00 hrs (Fig.4).

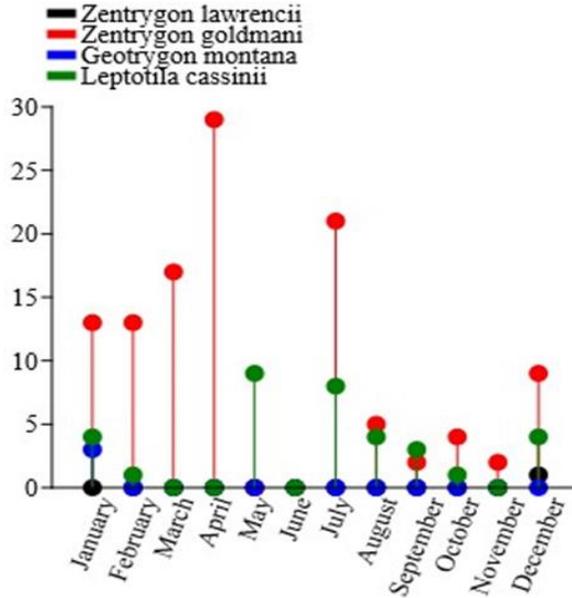


Fig. 3. Frequency of occurrence for wild doves at Chucantí Private Natural Reserve, Darien, Panama. Note: This graph included only data for 2013.

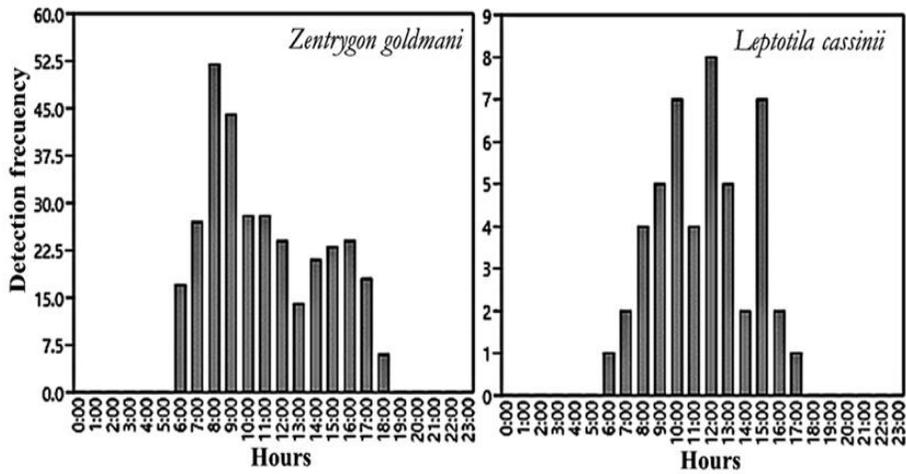


Fig. 4. Circadian activity of wild doves at Chucantí Private Natural Reserve, Darien, Panama.

## DISCUSSION

Behavioral patterns were detected for *L. cassinii* and *Z. goldmani*. The preferred habitats of both species were well-defined and non-overlapping, with *Z. goldmani* exhibiting exploration (end of December 2012) and colonization at the edge “filo 1” and *L. cassinii* at “tronco”. Reproductive behaviour for Geotrygon/Zentrygon has been controversial. Steadman (2001) described the courtship display as occurring either on the ground or perching on a branch, while Brooks (2012) reports only *Z. chiriquensis* displaying courtship at ground level. The latter study compared *Z. chiriquensis* with seven species of quail-doves in Panama, including species other than those found in this study, and noted the lack of information related to this behaviour. The current study at CPNR may support the results of Steadman (2001), as we recorded *Z. goldmani* and *L. cassinii* displaying courtship behaviour strictly at ground level. Ethograms showed the most common activity on trails for these birds was “transversal walking” that took place away from clear areas of the trail, potentially to avoid predators (Martin, 1988). *Zentrygon goldmani* and *L. cassinii* are similar in conducting courtship on the ground, differing from *Z. chiriquensis* which performs courtship on a perch (Brooks, 2012). *Zentrygon goldmani* did not fan the tail as this seems unique to the courtship display of *Z. chiriquensis* (Brooks, 2012). Those patterns were always observed several days before courtship events (1%) and were in some ways like the movements reported for *Z. chiriquensis* in phylogeny studies (Brooks, 2012). More observations are needed to describe a clear pattern for this courtship behaviour and if captivity results in changes to behavioral patterns.

Copulation was photographed in June 2014, and the nesting season has been reported to occur around May in the lowland Panama Canal Watershed (Pérez & Tejera, 2018). *Leptotila cassinii* was found sharing habitat in the lower parts of CPNR “tronco” with *G. montana*, both with characteristic alar modifications for fast flight to avoid predators over short periods (Ocampo *et al.*, 2019). *Leptotila cassinii* and *G. montana* showed preferred conditions and dominance in semi-open areas at 800 masl, as did *Z. goldmani* and a new species for Chucanti detected in this study, for CPNR, *Z. lawrencii*, at 1,350-1,400 masl. *Zentrygon lawrencii* is reported as rare for the Pacific and Central Panama and is distributed mostly along the Caribbean coast (Angehr & Dean 2010). However,

*Z. goldmani* was one of the more photographed between nine species of understory birds presents at CPNR according to Gutiérrez-Pineda *et al.* (2021). Patterns of circadian activity were very well represented for *Z. goldmani*, with eleven active daytime hours, and *L. cassinii*, with ten active daytime hours. Most *Z. goldmani* activity detected on cameras occurred between April-May (around the breeding period), with main activity occurring around 08:00-09:00 hrs and a small peak between 15:00-16:00 hrs, probably related to temperature and food availability. However, main activities for *L. cassinii* occurred between 10:00 and 15:00 hrs. In this study, we report preliminary data for four species of wild doves, including the first report of *Z. lawrencii* within CPNR and records of circadian activity and baseline behaviour for *Z. goldmani*, *L. cassinii*, and *Geotrygon montana*. We remark upon their capability to adapt and diversify in response to ecological opportunities, a feature that is common at CPNR as stated by Wege (1996), who first described it in Darien province in Panama. The presence of these wild doves represents a unique opportunity to study this endemic species at CPNR, and another important reason for its conservation (Fig. 5).



Bushnell

01-06-2013 13:58:45

Fig. 5. *Zentrygon goldmani oreas* at Chucantí Private Natural Reserve, Darien, Panama.

## CONCLUSIONS

There is a well-represented individuals of wild doves at CPNR, with a marked preference of *Z. goldmani* for the cloud level of the forest (between 700 to 1,400 masl). The *Z. goldmani* showed a greater range of activity between 08:00 to 09:00 hours (hrs), with a decrease at 13:00 hrs, and peak activity in the afternoon between 15:00 to 16:00 hrs, which could be predictable. This study described for the first time an ethogram for this endemic and rare species, which is relevant to understand habitat use, preference, ethogram, and interactions with other species at same habitat. More studies related to population should be conducted at the CPNR to monitor its conservation.

### Author's contributions

PGMC. Principal researcher, participated in the field working with the camera traps, prepared, and reviewed different versions of the article's main text and figures.

KMGP. Assisted in the field, writing process, prepared the study map, illustrations, and statistics.

GB. Helped with the ID of the species, facilitated the field station and participated in the writing process.

## ACKNOWLEDGEMENTS

We are grateful to Fundación Pro-Conservación de los Primates Panameños (FCPP), Panamá, Panamá for their support. Milvia Sánchez, Yayson Péres, Arcadio Castillo, Elena Méndez, who helped in the field at the Chucanti Private Natural Reserve research station. We deeply appreciate the support of Idea Wild, Mohamed bin-Zayed Species Conservation Fund (projects # 1025476 and 12055182), and II Rufford Small Grant (project #16021-2). Our special appreciation to Ricardo Moreno from Yaguará Panamá, and the Virginia Commonwealth University (VCU), for their generous camera trap donation, to Cathy Viverette, Edward Crawford, and especially to Gabrielle LaTora and Ramón Da Pena for kindly reviewed the English of the manuscript. We

appreciate the editorial comments from *Tecnociencia* to improve earlier versions of this manuscript.

## **BIBLIOGRAPHY**

Angehr, G.R., D.G. Christian & K.M. Aparicio. (2004). A survey of the Serranía de Jungurudó, an isolated mountain range in eastern Panama. *Bull. Br. Orn. Club.* 124(1):51-62.

Angehr, G.R. & R. Dean. (2010). The birds of Panama: a field guide. San José, CR: Zona Tropical Publications. p. 464.

Banks, R.C., J.D. Weckstein, J.V. Remsen & K.P. Johnson. (2013). Classification of a clade of New World Doves (Columbidae: Zenaidini). *Zootaxa.* 3669(2): 184-188.

Baptista, L.F., P.W. Trail & H.M. Horblit. (1997). Family Columbidae (pigeons and doves). En: del Hoyo J, Elliot A, Sargatal J, editors. Handbook of the Birds of the World, Vol. 4: Sandgrouse to Cuckoos. Barcelona, Spain: Lynx Edicions, p. 60–243.

Baptista, L.F, E.M. Gómez-J. & H.M. Horblit. (2009). Darwin's pigeons and the evolution of the Columbiforms: Recapitulation of Ancient Genes. *Acta Zool. Mex.* 25(3): 719-741.

Baptista, L.F., P.W. Trail, H.M. Horblit & P.F.D. Boesman. (2020). Russet-crowned Quail-Dove (*Zentrygon goldmani*), version 1.0. In: del Hoyo, J., Elliot, A., Sargatal, J., Christie, D.A., de Juana E (eds) Birds of the World Cornell Lab of Ornithology. Ithaca, NY, USA. <https://doi.org/10.2173/bow.rcqdov1.01>

Batista, A., K. Mebert, M. Miranda, O., Garcés, R. Fuentes & M. Ponce. (2020). Endemism on a threatened sky island: new and rare species of herpetofauna from Cerro Chucantí, Eastern Panama. *Amphib. Reptile Conserv.* 14(2): 27-46.

Bermúdez, S., R. Miranda, Y. Zaldívar, P. González, G. Berguido, D. Trejos, J.M. Pascale & M. Labruna. (2012). Detection of Rickettsia in ectoparasites of wild and domestic mammals from the Cerro Chucanti

private reserve and from neighboring towns, Panamá, 2007-2010. *Biomédica*. 32(2): 189-195.

Bezark, L.G., W.H. Tyson & N.M. Schiff. (2013). New species of Cerambycidae from Panama, with new distribution records (Coleoptera: Cerambycidae). *Zootaxa*. 3608(4): 273-277.

BirdLife International. (2016). *Zentrygon goldmani*. The IUCN Red List of Threatened Species 2016: e.T22690942A93295585. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2016-3.RLTS.T22690942A93295585.en>. Downloaded on 29 May 2020.

Brooks, D.M. (2012). Courtship displays of Rufous-breasted (Chiriquí) Quail-Dove *Zentrygon chiriquensis*. *Bull. Br. Orn. Club*. 134(3): 232-234.

Diamond, J.M. (1975). Assembly of species communities. In: Cody ML, Diamond, editors: *Ecology and Evolution of Communities*. London, England: The Belknap Press of Harvard University Press. p. 342-444.

Donegan, T. & P. Salaman. (2012). Vocal differentiation and conservation of Indigo-crowned Quail-Dove *Geotrygon purpurata*. *Conservación Colombiana*. 17: 15-19.

Flores, R., C. Black & A. Ibáñez. (2017). A new species of Heliconia (Heliconiaceae) with pendent inflorescence, from Chucantí Private Nature Reserve, Eastern Panama. *PhytoKeys*. 77: 21-32.

Gutiérrez-Pineda, K. M., G. Berguido, G. & P.G. Méndez-Carvajal. (2021). Diversidad ecológica de aves caminadoras en la Reserva Natural Privada Cerro Chucantí, Darién, Panamá. *Mesoamericana*. 25(1): 1-14.

Hilty, S.L. & W.L. Brown. (1986). *Birds of Colombia*. Princeton, New Jersey, United States: Princeton University Press. p. 836.

Johnson, K.P. & J.D. Weckstein. (2011). The Central American land bridge as an engine of diversification in New World Doves. *J. Biogeogr.* 38(6): 1069-1076.

- Lade, B.I. & W.H. Thorpe. (1964). Dove songs as innately coded patterns of specific behaviour. *Nature*. 202(4930) : 366-368.
- Lapiedra, O., D. Sol, S. Carranza & J.M. Beaulieu. (2013). Behavioural changes and the adaptive diversification of pigeons and doves. *Proc R Soc B*. 280: 20122893
- Laurance, W.F. (2008). Adopt a Forest. *Biotropica*. 40(1): 3–6.
- MacArthur, R. H. (1978). Geographical Ecology: Patterns in the distribution of species Harper & Row Publishers Inc. New York, New York.
- Martin, T.E. (1988). On the advantage of being different: nest predation and the coexistence of bird species. *Proc Natl Acad Sci USA*. 85(7): 2196-2199.
- Méndez, E. (1979). Las aves de caza de Panamá. [Game birds of Panama]. Panamá, Panamá: Editora Renovación. p. 177.
- 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.
- 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.
- Miller, M.J., J.T. Weir, G.R. Angehr, M.P. Guitton & E. Bermingham. (2011). An ornithological survey of Piñas Bay, a site on the Pacific coast of Darién Province, Panama. *Boletín SAO*. 20(2):1-10.
- MiAmbiente (Ministerio de Ambiente de Panamá). (2016). Informe sobre el Estado del Conocimiento y Conservación de la biodiversidad y de las Especies de Vertebrados de Panamá.

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.

Navas, N., V. Eyda & B.H. Cedeño. (2001). Estadística de Panamá, Dirección de Estadística y Meteorológica, 1998-1999. Panamá, Panamá: Estadística de Panamá, Censo. p. 57.

Nelson, E.W. (1912). Descriptions of new genera, species, and subspecies of birds from Panama, Colombia, and Ecuador. *Smithson. Misc. Collect.* 6(3): 1-25.

Ocampo, D., A. Alvarado, M.J. Álvarez, J.A. Ríos-A, G. Barrantes, L. Sandoval. (2019). Asociación entre la morfología alar y el uso del hábitat en seis especies de palomas (Columbidae) neotropicales. *Rev. Biol. Trop.* 67(2): 315-325.

Ortíz, 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.

Pérez, R.J. & V.H. Tejera. (2018). Inventario de Nidos de Aves en Juan Grande, Gamboa, Panamá. *Rev. Nicar. Biodivers.* 28:3-21.

Renjifo, L.M., Repizo, A., Ruiz-Ovalle, J.M., Ocampo, S., Avendaño, J.E. (2017). New bird distributional data from Cerro Tacarcuna, with implications for conservation in the Darién highlands of Colombia. *Bull. Br. Orn. Club.* 137(1): 46-66.

Ridgely, D. & J.A. Gwynne, Jr. (1989). A Guide to the Birds of Panama. NJ, United States: Princeton University Press, Princeton. p. 534.

Sanfilippo, L.F. & K. Werther. (2001). Order Columbiformes (Pigeons, Doves). In: Fowler ME, editors: Biology, Medicine, and Surgery of South American Wild Animals. Iowa, Ames, SouthState Avenue. p. 139-145.

Steadman, D.W. (2001). Pigeons and Doves: A Guide to the Pigeons and Doves of the World. *The Auk*. 118(4): 1117-1118.

Tubaro, P.L., Mahler, B. (1998). Acoustic frequencies and body mass in New World doves. *The Condor*. 100(1): 54-61.

Wege, D.C. (1996). Threatened birds of the Darien highlands, Panama: A reassessment. *Bird Conserv. Int.* 6(2): 175-179.



Tecnociencia, Vol. 25, N°2: 84-107

Julio-Diciembre 2023

ISSN L 2415-0940

## **EVALUACIÓN DE RENDIMIENTO EN BIOMASA DE CUATRO CULTIVARES DE MAÍZ: CASO DE LA CUENCA BAJA DEL RÍO PURIO, PROVINCIA DE LOS SANTOS, AÑO 2021**

**Franklin E. Wilcox C**

Universidad de Panamá. Centro Regional Universitario de Los Santos. Panamá.  
[franklin.wilcox@up.ac.pa](mailto:franklin.wilcox@up.ac.pa) <https://orcid.org/0000-0001-8617-3137>

**Jaime A. Rivera S.**

Universidad de Panamá, Centro Regional Universitario de Veraguas, Panamá.  
[jaime.rivera@up.ac.pa](mailto:jaime.rivera@up.ac.pa) <https://orcid.org/0000-0002-8265-7836>

DOI <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v25n2.a4066>

**Fecha de recepción:** 13 de marzo de 2023

**Fecha de aceptación:** 24 de marzo de 2023

### **RESUMEN**

El objetivo principal de esta investigación fue evaluar el rendimiento en biomasa de cuatro cultivares de maíz. Realizada en la Finca Aranda, Corregimiento de Pocrí, Distrito de Pocrí, Provincia de los Santos, en época de lluvia. Para este fin, inicialmente, se realiza la caracterización morfoclimática y se estiman las curvas de agresividad climática de la lluvia a través del índice modificado de Fournier (IMF), ajustadas a la subcuenca del río Purio. Posteriormente, se evaluaron los cultivares de maíz P30-F35, SV 1020, IDIAP 1102 y ADV 9293. Implementado un diseño de boques completos al azar (DBCA), con cuatro tratamientos y cinco bloques o repeticiones. Como resultado se obtuvo que, el espacio que comprende la cuenca media y alta del río Purio expone valores estimados muy altos de agresividad climática >160; mientras que, la cuenca baja registra valores considerados altos >120 y <160. No obstante, para la variable rendimiento en biomasa el cultivar P30-F35 obtuvo la mayor media con 28 Kg, seguido del SV 1020 con 26 Kg, el ADV 9293 24 Kg y el IDIAP 1102 con 22 Kg. Concluyendo al no existir diferencia significativa, la elección del cultivar a utilizar está sujeta al costo de semilla en el mercado y el nivel tecnológico de cultivo.

## **PALABRAS CLAVES**

Cultivares, biomasa, índice modificado de Fournier (IMF), Panamá cuenca 126, río Purio.

## **EVALUATION OF BIOMASS YIELD OF FOUR CORN CULTIVARS: CASE OF THE LOWER BASIN OF THE PURIO RIVER, PROVINCE OF LOS SANTOS, YEAR 2021**

### **ABSTRACT**

The main objective of this research was to evaluate the biomass yield of four maize cultivars. Carried out at Finca Aranda, Corregimiento de Pocrí, District of Pocrí, Province of Los Santos, during the rainy season. For this purpose, initially, the morphoclimatic characterization is carried out and the climatic aggressiveness curves of the rain are estimated through the modified Fournier index (INF), adjusted to the Purio river sub-basin. Subsequently, the maize cultivars P30-F35, SV 1020, IDIAP 1102 and ADV 9293 were evaluated. A randomized complete forest design (DBCA) was implemented, with four treatments and five blocks or repetitions. As a result, it was obtained that the space that includes the middle and upper basin of the Purio river exposes very high estimated values of climatic aggressiveness  $>160$ ; while the lower basin registers values considered high  $>120$  and  $<160$ . However, for the biomass yield variable, the cultivar P30-F35 obtained the highest average with 28 Kg, followed by SV 1020 with 26 Kg, ADV 9293 24 Kg and IDIAP 1102 with 22 Kg. Concluding that there was no significant difference, the choice of cultivar to use is subject to the cost of seed in the market and the technological level of cultivation.

### **KEY WORDS**

Cultivars, biomass, modified Fournier index (IMF), Panama basin 126, Purio river.

### **INTRODUCCIÓN**

El estudio geo ecológico permite a través del análisis morfo genético clasificar e inventariar las unidades del paisaje que integran la cuenca hidrográfica; generando indicadores ambientales que facilitarán la toma de decisiones para mitigar los posibles conflictos ambientales que ocasiona el uso inadecuado de los suelos (Mateo et al., 2010; Teixeira y Dos Santos, 2015).

En consecuencia, desde la perspectiva de los estudios agronómicos, el periodo de lluvias se torna un factor determinante relacionado directamente en erosión del suelo, producto de la erosividad (Lince y Castro, 2015). Por tanto, entre los índices más destacados para calcular la capacidad erosiva de la lluvia y su distribución, se encuentran el denominado factor R presentado por Wischmeier y Smith (en 1958), y el índice modificado de Fournier (IMF), desarrollado por Arnoldus (en 1980); el cual se destaca por su utilidad y confiabilidad en las cuencas con deficientes registros pluviométricos (Lince y Castro, 2015; Blanco, 2019; Méndez et al., 2020).

Atendiendo a lo anteriormente expresado, la erosión tiene una incidencia directa en la degradación del suelo, lo cual significa el cambio de una o más de sus propiedades a condiciones inferiores a las originales, por medio de procesos físicos, químicos y/o biológicos. En términos generales la degradación del suelo provoca alteraciones en el nivel de fertilidad del suelo y consecuentemente en su capacidad de sostener una agricultura productiva (FAO, 1993).

Durante los últimos años condiciones climáticas adversas en la península de Azuero, han afectado fuertemente la producción tanto agrícola como pecuaria. Repercutiendo en altos costos de producción y la baja productividad dentro de las explotaciones pecuarias, lo cual están directamente relacionados con la disponibilidad de alimento en los dos periodos climáticos que registra la provincia de Los Santos, en el año. Por ende, impera la búsqueda de alternativas viables de bajo costo, con la finalidad de suplementar las condiciones de alimentación actual.

En consecuencia, para llenar este vacío, la investigación centra su objetivo en evaluar cuatro cultivares de maíz (Pioneer 30-F35, Semillas Valle 1020, Advanta 9293 e IDIAP 1102) y su rendimiento en biomasa, procurando generar una base de datos sobre el comportamiento agronómico de los mismos; ajustado, por ende, a las características morfo climáticas del sitio de pesquisa, datos los cuales, analizados en conjunto, permitirán que los resultados puedan ser aplicado en aquellas áreas del país, donde existan condiciones ambientales similares.

Basados en los conceptos del profesor John Symonds sobre la alimentación del ganado, el ensilaje es un método para conservar verde el forraje, principalmente los desechos agroindustriales o alimentos como el plátano, la yuca, los cítricos y el pescado, en almacenes conocidos como silos. Mediante un proceso de fermentación anaerobia controlada, se mantiene estable la composición del material ensilado durante largo tiempo a través de la acidificación del medio (Valencia, et al. 2011).

Esto se logra comprimiendo bien el forraje y expulsando el aire. La segunda consideración es que se deben favorecer las fermentaciones lácticas, impidiendo por el contrario las fermentaciones perjudiciales como son las butíricas, que producen putrefacción, hongos y mohos, y, por tanto, mico toxinas (Muñoz, 2020).

Relacionando los conceptos anteriores se considera que el principal uso del ensilado es producir alimento para los animales (rumiantes primordialmente), cuando hay escasez en los periodos secos o épocas de estiaje. El producto final debe obtenerse sin que se produzcan sustancias tóxicas para la salud animal durante el proceso, con un mínimo de pérdidas de materia seca y de nutrientes y manteniendo un buen sabor para el ganado (Valencia, et al. 2011).

El maíz es la forrajera que produce más energía por unidad de superficie. Su principal desventaja es la baja proteína y calcio. Del total de la planta, la mazorca aporta un 50% de la materia seca y alrededor de un 70% de los nutrientes. El proceso de acumulación de materia seca se acelera luego del desarrollo inicial de las hojas. A partir del grano lechoso, la acumulación es mayor. Alcanzando el máximo cuando la planta alcanza su madurez fisiológica (Cofré, et al. 1998).

Demagnet (2017), nos dice que el almidón proporciona a la dieta animal una gran cantidad de energía de fácil digestión. Principalmente proviene de los granos de cereales y, en segundo lugar, de ensilajes de granos tradicionales, principalmente del maíz.

El ensilaje de maíz es un componente importante en la dieta del ganado, debido a que constituye una opción de bajo costo por unidad energética y es el perfecto complemento en las raciones de los sistemas intensivos

de estabulación, estabulación temporal y pastoril. Los productores que establecen este cultivo suplementario no solo buscan alcanzar un buen rendimiento de materia seca: 20 a 26 Tonelada métrica/ha (cosechando la plata completa), sino que también un alimento de alto valor nutricional (Demagnet, 2017).

En las dietas del ganado en general, el ensilaje de maíz es el perfecto complemento al consumo de pasturas permanentes. El sistema de alimentación óptimo es aquel que puede combinar la proteína y la fibra de la pastura con la energía y el almidón del ensilaje de maíz, asegurando así, una alta eficiencia de utilización de ambos recursos forrajeros (Demagnet, et al., 2020).

Por otro lado, el mayor crecimiento de la población a nivel mundial hace necesario que nuestros países cada día realicen esfuerzos tendientes a lograr una mayor producción y productividad de carne vacuna y de leche para satisfacer la demanda creciente por estos productos. Para lograr este objetivo, los países deben elaborar y desarrollar políticas y estrategias para reducir la brecha entre la oferta y la demanda de estos productos (Gálvez, et al. 2009, p. 9).

Dando una visual a la situación en Panamá, anualmente se consumen unos 480 millones de litros (L) de leche entre fluida y diversos productos lácteos nacional e importada, siendo la producción panameña de unos 180 millones de litros y el consumo per cápita está por 120 L (Ministerio de Desarrollo Agropecuario, 2021).

En consecuencia, justamente debido a las características climáticas de la provincia de Los Santos, los productores utilizan la técnica del ensilado para asegurar el suministro de alimento y garantizar el aporte nutricional diario que sus semovientes demandan durante el periodo seco. Es por este motivo, que la pesquisa tiene por objeto evaluar el potencial de rendimiento del cultivo de maíz en biomasa vegetal; como una alternativa alimentaria que coadyuve a mitigar los estragos que genera el estrés hídrico ambiental en esta región del país.

En mismo contexto de consumo, Gerardo González presidente de la Asociación Nacional de Ganaderos (ANAGAN), citado por Villar (2019) explicó que a la fecha el consumo per cápita por año del

panameño, se sitúa en 13.3 kilos (Kg) de carne deshuesada, con una matanza promedio de 325,000 reses al año.

En el caso de la ganadería, además, se debe lidiar con la estacionalidad de las praderas, donde el recurso forrajero es mayor en algunas épocas del año que en otras. Es decir, la producción de materia seca no es continua, como el consumo de las vacas. Por lo tanto, la conservación del forraje es esencial para poder alimentar todo el año a las vacas. Uno de los recursos más utilizados es el ensilaje de maíz (Muñoz, 2020).

Sin lugar a duda, los datos citados, confirman la importancia que tiene el sector pecuario en el desarrollo socioeconómico del país. Por tal razón, y en aras de colaborar con procedimientos y técnicas agrícolas que faciliten la manutención alimentaria del ganado (durante el periodo seco); la investigación procura ofrecer resultados que le permitan a los productores asegurar su alimento y disminuir los costos de producción. Al respecto, según Muñoz (2020), uno de los aspectos más relevantes y de mayor impacto en el costo de la producción animal, es la alimentación. Más del 65 por ciento (%), aproximadamente de los costos se asocian a este factor, por ende, un manejo eficiente de estos recursos es fundamental a la hora de lograr una óptima rentabilidad en el negocio, ya sea en producción lechera o cárnica.

## **MATERIALES Y PROCEDIMIENTOS METODOLÓGICOS**

**Localización:** La investigación se realizó en la finca ARANDA, corregimiento de Pocrí, provincia de Los Santos. Ajustada a las recomendaciones de Gordón (2012, p 4), el cual indica que, “para el área de estudio, el mejor periodo de cultivo se extiende de septiembre a enero, especificando que la siembra se realizada del 1 al 15 de septiembre”. La finca experimental donde se ubica el sitio de pesquisa cuenta con  $\pm 38,6$ ha, que se localizan sobre la franja marino-costera de la cuenca hidrográfica 126, específicamente, en la subcuenca del río Purio (figura 1).

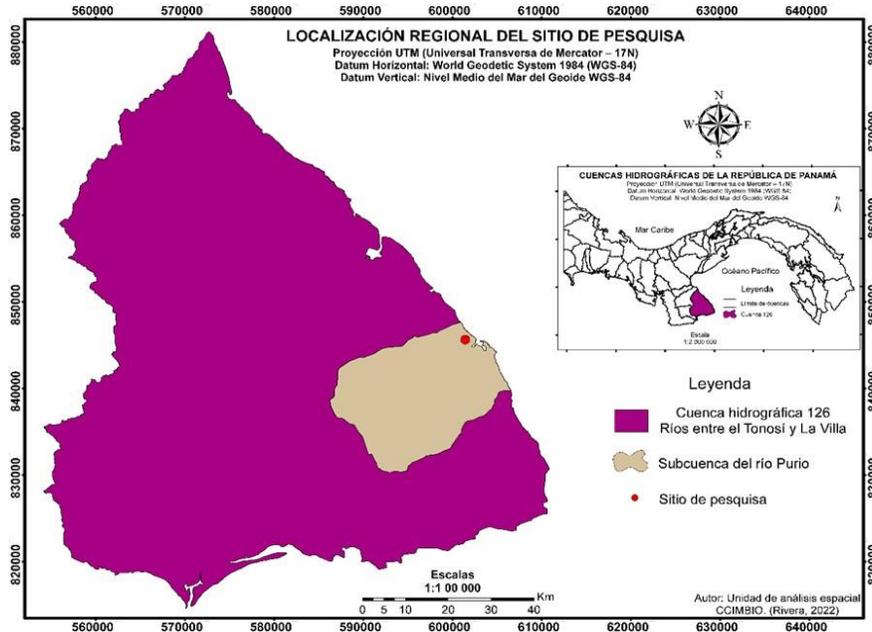


Figura 1: Sitio de pesquisa. Fuente: Rivera (2023)

### Procedimientos metodológicos:

Para demostrar hipotéticamente el efecto del clima, se elaboró un cuadro sinóptico donde se relacionan las variables climáticas de temperatura, precipitación y la estacionalidad; con los procesos geomorfológicos determinados. Para alcanzar este objetivo, se adecua la metodología de Peltier 1950 y Chorley et al. 1984 (Gutiérrez, 2009); y posteriormente, se compilan los datos climáticos de la estación meteorológica Pedasí, toda vez que, es la estación más próxima ( $\pm 14$  km), al sitio de pesquisa.

Para estimar los valores de precipitación y temperatura durante el periodo lluvioso, inicialmente, se delimita la cuenca hidrográfica (archivo shapefile. Cuenca 126), y se localizan sus estaciones al importar en ambiente ArcGIS el archivo excel con los datos X, Y, Z (Berezuk, 2014).

Para despejar el índice modificado de Forner (IMF), y descubrir el valor de las curvas de agresividad climática dentro de la subcuenca del río Purio; se recolectan los datos de precipitación promedio del total (14), de las estaciones meteorológicas localizadas dentro de la gran cuenca

hidrográfica 126. Acto seguido, en ambiente ArcGIS 10.7.1:

- Se abre un nuevo proyecto y se efectúa un *Join*, para importar las tablas de excel con los valores de Z, Y, Z.
- Se importan los archivos *shapefile* que contienen la cuenca y subcuenca hidrográfica.
- Se crean los *raster* mensuales (12), de precipitación siguiendo la rutina *Spatial Analyst Tools – Interpolation – IDW*.
- Se procede a calcular los valores del IMF, despejando la fórmula de acuerdo con Blanco (2019):

$$IMF = \sum_{i=1}^{12} \frac{p^2}{Pt}$$

Donde:

IMF/ Índice Modificado de Fournier.  
 p<sup>2</sup>/ precipitación media mensual (mm).  
 Pt/ precipitación promedio anual (mm).

- Para despejar la ecuación se emplea la rutina (*Spatial analyst tools – Map algebra – Raster calculator*).
- Para interpretar la intensidad los valores obtenidos del IMF, se recomienda utilizar los rangos expuestos en la tabla 1.

Tabla 1. Rangos para la clasificación del IMF.

Índice modificado de Fournier		
Clases	Rangos	Clasificación
1	<60	Muy bajo
2	60 – 90	Bajo
3	90 – 120	Moderado
4	120 – 160	Alta
5	>160	Muy alta

Fuente: Commission of the European Communities (CEC/1992).

Finalmente, para contextualizar el entorno natural que circunscribe la finca experimental, se discriminan las geofacies por unidades

morfogenéticas. Para tal fin, aunado al trabajo de campo (colecta de puntos UTM), en ambiente ArcGIS 10.7.1., se aplican técnicas de georreferenciación, geoprocesamiento y vectorización sobre las imágenes SRTM y CNES / Airbus 2022 para cuantificar las unidades morfogenéticas y obtener las características morfométricas de la finca experimental.

Culminado los procedimientos metodológicos que facilitarán el reconocimiento de diversos valores y/o indicadores ambientales del espacio natural asociados a la subcuenca del río Purio; inicia la etapa correspondiente con los procedimientos agronómicos.

Preparación de suelo: Para esta investigación se utiliza el sistema de siembra labranza cero, aplicando un control inicial de malezas con el herbicida Bipiridilo Paraquat a dosis 2 L/ Hectárea (ha), posteriormente se realizará la marcación y división de los bloques y tratamientos con cinta y estacas.

Siembra: Se realizó a chuzo, cuatro hileras por tratamiento a razón de 0.20 metros (m) entre plantas y 0.80 m entre hileras, a dos granos por golpe para su posterior raleo a una planta por sitio y asegurar la población de 62,500 plantas/ha, un control de maleza pre emergente con glifosato a 3 L/ha, más un control pos emergente con Dinitroanilina Pendimentalina (Prowl 45,5 CS) + Atrazina (gesaprim 90 WDG) a los 12 días después de germinación (DDG).

Fertilización: Se utilizó la fertilización recomendada por Gordón (2012), 130 a 200 kg de N/ha, 60 kg de P O /ha, 20 a 2 5 30 kg de K y 20 a 30 kg de S/ha. Estas cantidades de nutrimentos se logran aplicando 5 qq de fórmulas como 13-26-6-7 al momento de la siembra. Para completar la cantidad de nitrógeno indicada, es necesario aplicar 5.5 a 8.0 quintales (qq) de urea/ha en una o dos aplicaciones (depende de la precipitación). De realizar una sola aplicación la misma se debe realizar de 30 a 35 dds; mientras que, si se realizan en dos fraccionamientos la aplicación de urea, la primera aplicación se realiza de 17 a 21 dds a razón de 2.5 a 3.5 qq/ha y la segunda aplicación de 35 a 40 dds en dosis de 3.0 a 4.5 qq/ha (p. 7).

Cosecha: Fue realizada de forma manual por tratamiento, en la etapa de madurez fisiológica, cosechando las dos hileras del medio, cortando la plata desde la base a ras de suelo, para su posterior picado (mediante desmenuzadora a gasolina) y posterior pesaje del material.

Diseño Experimental: El ensayo se realizó en una superficie total de investigación de 324 metros cuadrados (m<sup>2</sup>), que comprende 5 bloques de tratamientos con 60 m<sup>2</sup> cada uno, y separados entre sí a 0.5 metros (m). Como unidad experimental se consideró cuatro hileras de cultivo separadas a 0.8 m con un total de 12 m<sup>2</sup> por tratamiento, y se tomaron como muestra de análisis las dos hileras centrales con un total de 4m<sup>2</sup> cada una, excluyendo las hileras externas como efecto de borde.

Se utilizó un diseño de boques completos al azar (DBCA), que responde al siguiente Modelo Lineal Aditivo para este experimento (Kuehl, 2001):

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + e_{ij}$$

Dónde: Y<sub>ij</sub> = Observación de la respuesta en el nivel o bloque I<sup>th</sup>, con el material de maíz j<sup>th</sup>.

$\mu$  = Media poblacional estimada por la media general del ensayo.

$\tau_i$  = Efecto del material de maíz j<sup>th</sup>  $\beta_j$  = Efecto del I<sup>th</sup> nivel o bloque.

e = Error experimental

Dónde: i = 1,5

J = 1...4

Bajo el supuesto: E<sub>ij</sub> NNID (0,  $\sigma^2$ ) mejor conocido como supuesto de normalidad, tabla 2.

Tabla 2. Supuesto de normalidad.

Fuente de Variación	Grados de Libertad
Bloque	r - 1 = 4
Tratamiento	t - 1 = 3
Error	(r - 1) (t - 1) = 12
Total	rt - 1 = 19

Fuente: Elaborado por el autor

Considerando al factor inter-sujeto, tabla 3, se presentan los materiales en estudio los cuales corresponden a su número de tratamiento de la siguiente manera:

Tabla 3. Factor inter-sujeto.

Tratamiento	Material
T1	P30-F35
T2	SV 1020
T3	IDIAP 1102
T4	ADV-9293

Fuente: Elaborado por el autor

El parámetro evaluado o variable de respuesta a cuantificado fue:

- Producción de biomasa (kg/m<sup>2</sup>)

Se efectuaron análisis cuantitativos y cualitativos, observaciones de tipo fitopatológicas (sólo reportada), observación de daños fisiológicos y en el aspecto económico.

EL análisis de varianza fue realizado mediante el sistema de análisis estadístico (SPSS). Se efectuarán pruebas de comparación de medias para los factores en estudio (Pérez, 2001).

## **RESULTADOS**

Con base en las recomendaciones teóricas antedichas, se logra elaborar el cuadro sinóptico que expone la relación existente entre las variables climáticas citadas y los procesos geomorfológicos actuantes, ajustados para la subcuenca del río Purio (tabla 4).

Tabla 4. Caracterización de la región morfoclimática y procesos geomorfológicos actuantes.

Estación	Prom. Anual T °C	Total Anual Pmm	Estacionalidad Meses >50 mm	Región Morfoclimática:		
				Prom. Anual T °C >25	Total anual Pmm >1000	
Pedasí	27,1	1564,4	8	<b>De II orden: Tropical húmeda estacional</b>		
Procesos Geomorfológicos:						
			Meteorización Física - química Intensa	Erosión Pluvial Moderada	Movimientos de Masas Moderada	Erosión Eólica Mínima

Fuente: Rivera, (2023).

Fuente: Elaborado por el autor.

Respecto a los nuevos valores de precipitación y temperatura estimados por interpolación en ambiente ArcGIS 10.7.1., para el periodo lluvioso (total de meses con >50mm de precipitación); la figura 2 expone el conjunto de isoyetas distribuidas dentro de la cuenca 126 por estacionalidad climática.

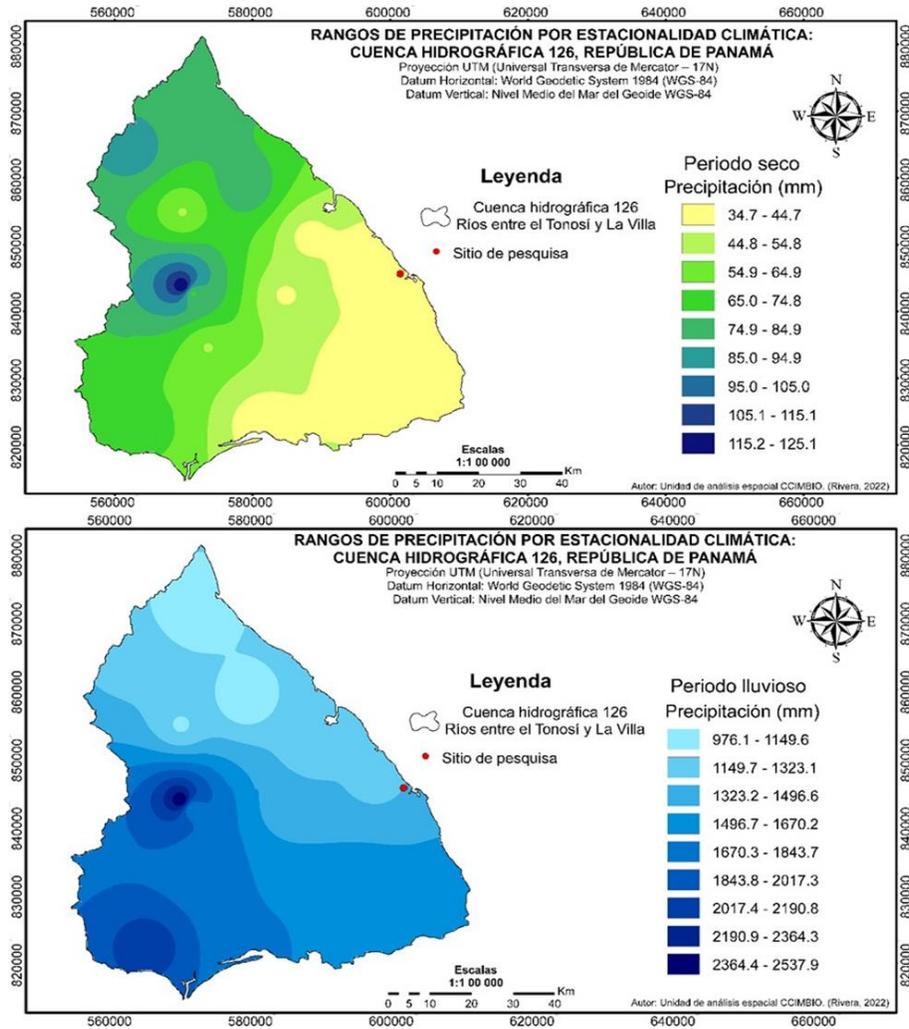


Figura 2. Distribución espacial de la precipitación por estacionalidad climática. Fuente: Rivera, (2023).

En atención con los valores estimados para demostrar los valores de erosividad según el IMF, la figura 3, expone el mapa coroplético que ilustra la distribución espacial de los rangos de agresividad climática.

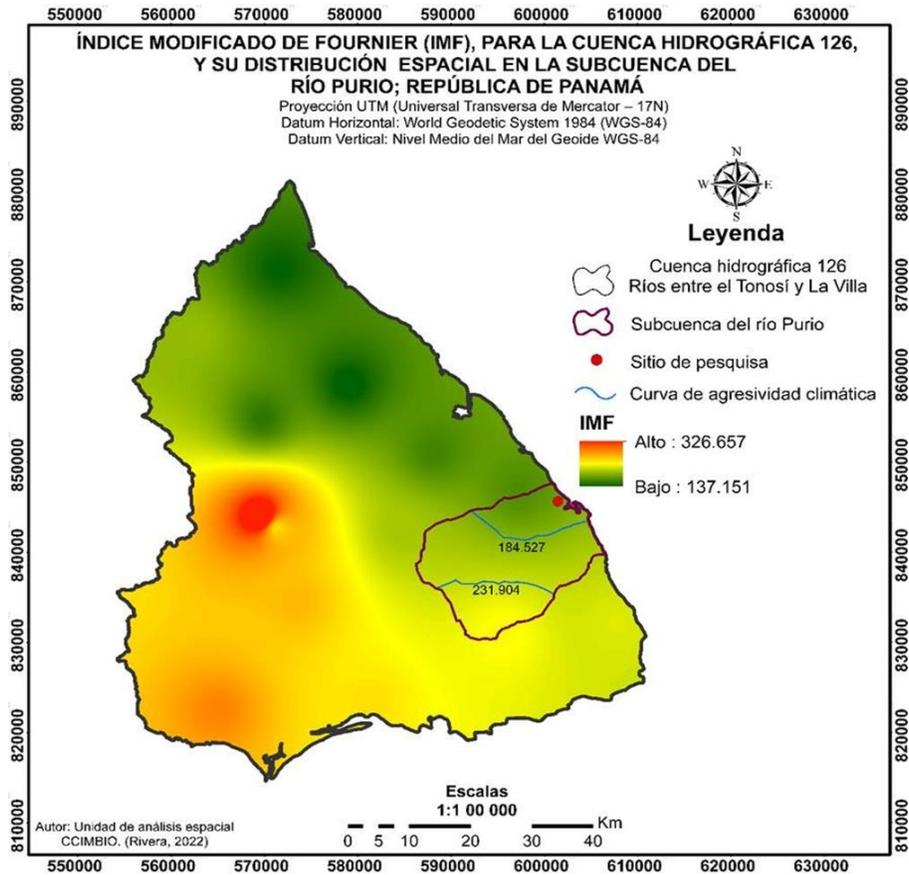


Figura 3. Cálculo del IMF para la cuenca hidrográfica 126. Fuente: Rivera, (2023).

Finalmente, producto del tratamiento en GIS de imágenes satelitales seleccionadas, la figura 4, contiene las diferentes unidades morfogénicas por geofacies que integran la finca experimental; además, de los datos morfométricos por polígono.

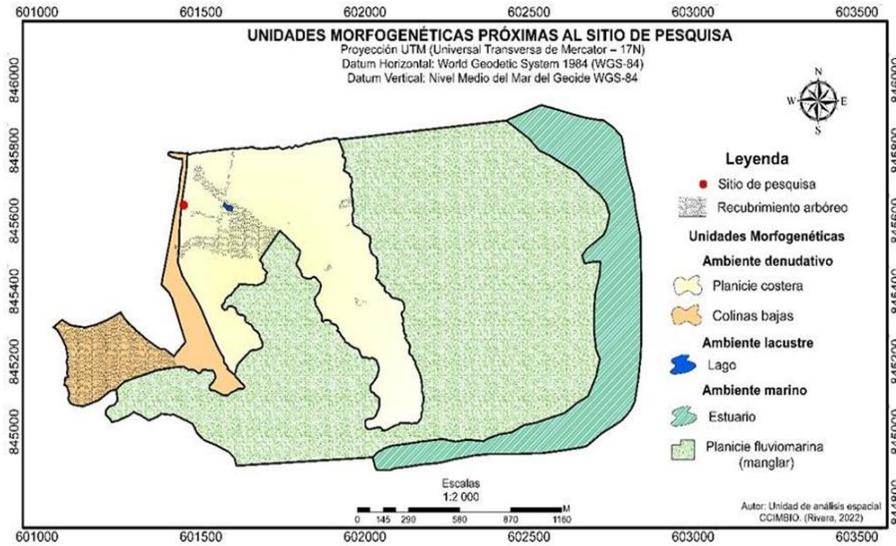


Figura 4. Geofacies que integran las unidades morfogénicas de la finca experimental. Fuente: Unidad de análisis espacial. CCIMBIO - CRUV

Para el análisis de prueba de efecto inter-sujeto, tabla 5 se observa que no existe diferencia significativa entre los tratamientos, sin embargo, si existe diferencia significativa entre los bloques, atribuible a la topografía inclinada de la parcela en estudio. De la misma forma se observa que el R al cuadrado ajustado (0,458) está dentro de los parámetros aceptables (5%), lo cual indica que el diseño planteado y la metodología en la toma de datos para esta investigación es aceptable.

Tabla 5. Pruebas de efectos inter-sujetos

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Cuadrático promedio	F	Sig.
Modelo corregido	119,337a	7	17,048	3,290	0,034
Interceptación	13109,760	1	13109,760	2529,814	0,000
Bloques	50,387	4	12,597	2,431	0,105
Tratamientos	68,950	3	22,983	4,435	0,026
Error	62,185	12	5,182		
Total	13291,283	20			
Total corregido	181,522	19			

a. R al cuadrado = 0,657 (R al cuadrado ajustada = 0,458)  
Fuente: Elaborado por el autor

Por otro lado, en la prueba comparativa de medias, tabla 6 y la figura 5 de medias marginales estimadas en kilogramos muestran que el tratamiento 1 obtuvo la mayor media con 28 kilogramos (Kg), seguido del tratamiento 2 con 26 Kg, el tratamiento 4 con 24 Kg y el tratamiento 3 con 22 Kg en orden descendente de producción. En cuanto a los intervalos de confianza vemos que los valores máximos o mínimos respecto a la media general poblacional por tratamiento son aceptables, lo cual corrobora la metodología planteada en esta investigación.

Tabla 6. Prueba comparativa de Medias.

Tratamientos	Media	Error estándar	Intervalo de confianza al 95%	
			Límite inferior	Límite superior
T1	28,040	1,018	25,822	30,258
T2	26,400	1,018	24,182	28,618
T3	22,990	1,018	20,772	25,208
T4	24,980	1,018	22,762	27,198

Fuente: Elaborado por el autor

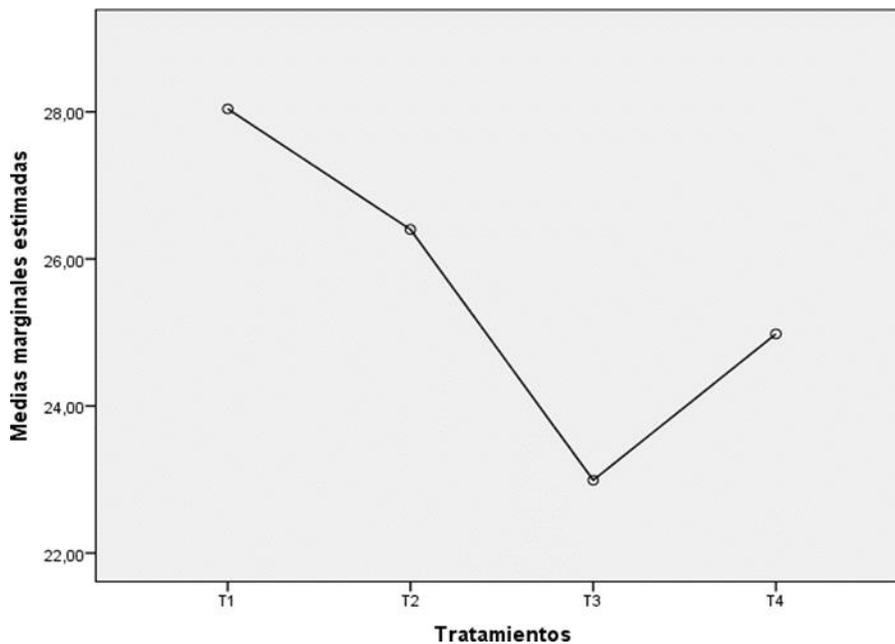


Figura 6. Medias Marginales estimadas en kilogramos.

Fuente: Elaborado por el autor

En el análisis de diferencia mínima significativa (DMS) o prueba de comparación múltiple de medias, tabla 7 indica que existe diferencia significativa del tratamiento 3 con la menor media respecto al tratamiento 1 y 2; no así con el tratamiento 4. De manera general no existe diferencia significativa entre los tratamientos 1, 2 y 4 mostrando una diferencia mínima entre sus medias (Tabla 7).

Tabla 7. Comparaciones múltiples.

(I) Tratamientos	(J) Tratamientos	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
T1	T2	1,6400	1,43974	,277	-1,4969	4,7769
	T3	5,0500*	1,43974	,004	1,9131	8,1869
	T4	3,0600	1,43974	,055	-,0769	6,1969
T2	T1	-1,6400	1,43974	,277	-4,7769	1,4969
	T3	3,4100*	1,43974	,035	,2731	6,5469
	T4	1,4200	1,43974	,343	-1,7169	4,5569
T3	T1	-5,0500*	1,43974	,004	-8,1869	-1,9131
	T2	-3,4100*	1,43974	,035	-6,5469	-,2731
	T4	-1,9900	1,43974	,192	-5,1269	1,1469
T4	T1	-3,0600	1,43974	,055	-6,1969	,0769
	T2	-1,4200	1,43974	,343	-4,5569	1,7169
	T3	1,9900	1,43974	,192	-1,1469	5,1269

Fuente: Elaborado por el autor

## DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

El estudio geocológico centrado en el análisis espacial por cuencas hidrográficas, comprobó que es posible estimar los rangos de precipitación estacional en sitios específicos. También, la posibilidad de generar indicadores ambientales que coadyuvan con el desarrollo de las ciencias agronómicas, con es el caso del IMF.

Así, con apoyo de los datos pluviométrico que en conjunto promedian 42.5 años de registros (14 pluviómetros / cuenca 126); los valores

estimados de precipitación para la finca experimental son de 39,7mm para el periodo seco, y de 1409,9 durante el lluvioso. Por tanto, en atención a la metodología recomendada para la caracterización de la región morfoclimática (Gutiérrez, 2009); y de acuerdo con los parámetros expuestos en la tabla 4, al mantener precipitaciones anuales >1000mm, en el sitio de pesquisa, los procesos geomorfológicos actúan con la intensidad característica de las regiones morfoclimáticas de II orden (tropical húmeda estacional).

En consecuencia, para expresar cuantitativamente el grado de erosividad de esta lluvia estacional, se utilizó el índice modificado de Fournier (IMF), porque se calcula con base en registros pluviométricos y no pluviográficos (Blanco, 2019). Para el computo de los resultados, en ambiente ArcGIS, se empleó el método de interpolación de distancia ponderada inversa (IDW), por su eficacia al ponderar los nuevos datos a partir de los puntos de valores más próximos (Belasri y Lakhouili, 2016). En efecto, como el IMF expresa la relación de la precipitación promedio anual, y su potencial erosivo vinculado con la carga en suspensión que transportan los cursos fluviales ( $Tm/km^2/año$ ), (Gutiérrez, 2009); de acuerdo con la figura 3, la cuenca 126 expone valores extremos entre 326,657 y 137,151, mientras que, la tabla 8 presenta los valores de las curvas de agresividad climática por área y clasificación para la subcuenca.

Tabla 8. IMF para la subcuenca del río Purio.

Subcuenca del río Purio	Análisis espacial	Clasificación (CEC/1992), y análisis porcentual
Max. 231,904	Cuenca alta sector S – W área de 52,4 km <sup>2</sup>	>160 Muy alta (79,2 %)
Inter. 184,527	Cuenca media centro – W y centro – E área 115,0 km <sup>2</sup>	
Min. 137,151	Cuenca baja sector N área 43,7km <sup>2</sup>	120 – 160 Alta (20,8 %)

Fuente: Unidad de análisis espacial. CCIMBIO – CRUV.

Finalmente, como es necesario inventariar las unidades del paisaje, para generar indicadores ambientales que nos permitan monitorear su estado (resiliencia, degradación y recuperación), en el tiempo. así, con relación a las unidades morfogenética y sus valores morfométricos, la figura 4 resalta la existencia de tres (3), unidades; donde el ambiente denudativo detalla colinas bajas (9,32ha), recortadas por cotas de 20msnm, y una planicie costera (29,32ha), que colinda con la planicie fluvio-marina; de esta correlación se obtiene una pendiente de 3,07%. También, coadyuba a mitigar los procesos erosivos la coexistencia del ambiente marino conformado por dos geofacies, el estuario (18,54ha), y la presencia de manglar sobre la planicie fluvio-marina (78,59ha), que bordean el perímetro de la finca experimental; aunado a una cobertura de bosque tropical estacional que sobre la finca abarca 8,6ha.

En cuanto al parámetro rendimiento en la prueba comparativa de medias, tabla 7 nos indica que no existió diferencia estadística a nivel de significancia 0.05 entre los tratamientos 1 con 28,04 kg, 2 con 26,40 kg y 4 con 24,98 kg, más sin embargo si existió diferencia entre los tratamientos 1 y 2 respecto al tratamientos 3 con 22,99 kg; aunado a esto en la interrelación entre el tratamiento 3 con, y 4 no se presenta diferencia significativa.

A manera de discusión, la tabla 9 muestra la transformación de los resultados obtenidos en la parcela efectiva en Kg/4m<sup>2</sup>, a rendimiento en tonelada t/ha por cada cultivar en estudio. Siendo el P30-F35 el que presenta la media de producción más alta.

Tabla 9. Rendimiento en toneladas/hectárea por cultivar.

Tratamiento	Cultivar	Kg/4m <sup>2</sup>	t/ha
T1	P30-F35	28,04	70,1
T2	SV 1020	26,40	66,0
T3	IDIAP 1102	22,99	62,5
T4	ADV 9293	24,98	57,5

Fuente: Elaborado por el autor

Considerando las medias de rendimiento obtenidas en el análisis estadístico, los cuales se muestran en la tabla 6, los valores obtenidos por cultivar se muestran altos con respecto a lo reportado por Cuevas et al. 2002, con una media de 20 t/ha, considerando el bajo manejo

agronómicos aplicados a la producción de silos.

Lo anteriormente expresado marca una gran diferencia en rendimiento sin importar el cultivar, al utilizar las practicas ergonómicas (densidad, siembra, fertilización, protección vegetal) correctamente recomendadas para el establecimiento de cultivo de maíz.

Correlacionando los resultados de los indicadores del análisis morfoclimático estudiados, los cuales muestran una pendiente 3%, un índice de agresividad alta (>160), provocado por la cantidad y distribución pluviometría en época de lluvia que se recomienda el establecimiento del cultivo de maíz en el sitio de pesquisa, consideramos que utilizar el sistema de labranza cero es la practica agrícola correcta, con la finalidad de provocar perdida de suelo y por ende, disminución de la fertilizas de los mismos.

Como consideración final, destacando los altos rendimientos obtenidos en esta investigación, es necesario realizar periódicamente análisis de distintos materiales híbridos o variedades, en diferentes épocas del año

y bajo los sistemas de producción adecuados al momento. En la misma línea, es imperante ensayar arreglos topológicos considerando las distintas arquitecturas de los cultivares, la incorporación de bio estimulantes para maximizar el aprovechamiento de los fertilizantes aplicados y el monitoreo de las condiciones edafoclimáticas las cuales se han presentado inestables durante los últimos años en la Península de Azuero, por la evidente variabilidad climática provocada por el Cambio Climático Global.

## **CONCLUSIONES**

Al comprobar el IMF (índice de agresividad climática o de la lluvia), empleando las técnicas geomáticas es posible identificar y calcular con precisión las áreas susceptibles a erosión, producto de la cantidad de precipitación versus la escorrentía superficial.

Al cotejar los cálculos del IMF, la distribución espacial de las curvas de agresividad climática obedece a la configuración geomorfológica de la subcuenca, en la cual, los valores máximos registrados (231,904), se encuentran hacia la cuenca alta (de recepción), y disminuyen paulatinamente hacia la cuenca media (184,527), hasta alcanzar sobre las planicies costera los valores más bajos identificados (137,151); siendo este comportamiento iterativo para casi toda la cuenca 126. En consecuencia, se recomienda realizar las prácticas agrícolas supervisadas por un especialista.

Por consiguiente, consideramos que la elección de los sistemas de cero labranza y labranza de conservación, son los recomendados para las parcelas de producción que se encuentran en las áreas de alta agresividad climática, ya que un índice de erosividad alto constituye una fuente de degradación directa de la fertilidad de los suelos agrícolas con pérdida de la materia orgánica y microbiota.

Considerando los rendimientos por cultivar obtenidos (250% más que lo reportado por Cuevas et al. 2002) en esta investigación, los cuales se muestran en la tabla 9, y conociendo que estadísticamente no existe diferencia altamente significativa entre los tratamientos, podemos concluir que la elección de un material para la producción de biomasa dependerá de la disponibilidad de semilla, el costo de la semilla en el mercado y el nivel tecnológico del productor. Las recomendaciones quedan sujetas a la disponibilidad del recurso monetario, para la implementación de prácticas agrícolas requeridas.

## **AGRADECIMIENTO**

Nuestro agradecimiento es para Juan Santos y María Jiménez por el apoyo durante los monitoreos en campo. Este estudio fue apoyado parcialmente por fondos de Idea Wild 501c (3), a través de la fundación Biodiversity Conservation Organization.

## REFERENCIAS

Belasri, A. & Lakhouili, A. (2016) Estimation of Soil Erosion Risk Using the Universal Soil Loss Equation (USLE) & Geo-Information Technology in Oued El Makhazine Watershed, Morocco. *Journal of Geographic Information System*, 8, 98-107. <http://dx.doi.org/10.4236/jgi>

Berezuk, G. (2014). Análisis das tendencias do ritmo pluviométrico na bacia hidrográfica do Amambai-MS/Brasil. *Experimentos em Climatologia Geográfica*. (pp. 325 – 340). Brasil. Editora da UFGD.

Blanco, M. (2019). Factor erosividad de la lluvia en la subcuenca sur del lago Xolotlán, Managua. *Revista científica Nexo*. Vol. 32 (1), pp. 41-51. <https://doi.org/10.5377/nexo.v32i01.7986>

Cofré, P. & John E. (1998). Ensilaje de Maíz. INIA [Archivo PDF]. [bit.ly/3sMIWB6](http://bit.ly/3sMIWB6).

Commission of the European Communities (CEC). (1992). CORINE soil erosion risk and important land resources in the southern regions of the European Community. EUR –Luxembourg. <https://www.eea.europa.eu/publications/COR0-soil>

Cuevas, M; Medina, L; González, G; & Yoshida, M. (2002). UP – PROMEGA. Técnicas de Producción de Ensilaje. [Archivo PDF]. [bit.ly/3DkYH8A](http://bit.ly/3DkYH8A)

Demagnet, R. (2017). Ensilaje de Maíz. “Tiempo entre Sellado y Apertura” [Archivo PDF]. Plan Lechero WATT’S N° 3. Universidad de La Frontera. [bit.ly/3GTC9uu](http://bit.ly/3GTC9uu)

Demagnet, R. & Canales, C. (2020). Manual. Cultivo del maíz para ensilaje [Archivo PDF]. [bit.ly/3BtZMZh](http://bit.ly/3BtZMZh)

Gálvez, R. & Rodríguez, I. (2009). MIDA - FAO. Programa Nacional de Zonificación Agroecológica. Resultados de la Zonificación Agro-Ecológica de 20 Especies de Pastos y Forrajes en la República de Panamá [Archivo PDF]. [bit.ly/3BowETg](http://bit.ly/3BowETg)

Gordón, R. (2012). Manejo Integrado del Cultivo de Maíz. Guía Técnica. Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá. Impresora Central S. A. Panamá.

Gutiérrez, M. (2009). Geomorfología. Madrid, España: Pearson Educación.

Hernández R. Fernández C. & Batista P. (2014). Metodología de la Investigación 6a Edición. <https://www.uca.ac.cr>.

Kuehl, R. (2001). Segunda Edición. Diseño de Experimentos Principios Estadísticos para el Diseño y Análisis de Investigación. THOMSON EDITORES, S. A. México.

Lince, L. & Castro, A. (2015). Erosividad de la lluvia en la región cafetera de Quindío, Colombia. *Cenicafé*, 66 (1), pp. 25-31. <https://n9.cl/sdjg1>

Mateo, J.; Da Silva, E. & Brito, A. (2010). Geocologia das paisagens: Uma visão geossistêmica da análise ambiental. (3ª ed.). Fortaleza, Brasil: Edições UFC.

Méndez, W; Pacheco, H; Landaeta, L; Menéndez, E; Pérez, M; Parra, G; y Fuentes, J. (2020). Indicadores de erosividad de la lluvia en una cuenca de la Serranía del Litoral Central de Venezuela. *Revista de Geografía Norte Grande*, 76, pp. 279-301. <https://n9.cl/a67ut>

Muñoz Hinrichsen, A. (marzo 2020). Hablemos de ensilaje de maíz. Su importancia como recurso forrajero & la relevancia del monitoreo periódico. *Revista Infortambo Lechería Chile*. Edición 202, 34-38. [bit.ly/3gPosBZ](https://bit.ly/3gPosBZ)

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura & la Alimentación (FAO). (1993). Erosion de suelos en America Latina. Tema 2 Erosión y pérdida de fertilidad del Suelo. <https://www.fao.org/3/t2351s/T2351S06.htm>

Panamá. Ministerio de Desarrollo Agropecuario (MIDA). (2021). Producción de leche en Panamá a buen ritmo de crecimiento. [bit.ly/3I7GrQ0](https://bit.ly/3I7GrQ0)

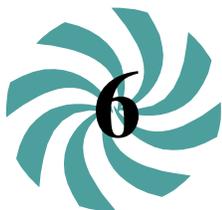
Pérez López, C. (2001). Técnicas Estadísticas con SPSS. PERSON EDUCACION, S. A. Madrid.

Rivera, J. (2023). Estimación de la Capacidad Erosiva de Lluvia según Índice Modificado de Fournier: Caso de la Cuenca Hidrográfica 126, República de Panamá. *Gobernanza, Comunidades Sostenibles & Espacios Portuarios*. (pp. 1291 – 1307). España. Editorial/ Asociación de Geógrafos Españoles (AGE). DOI: <https://doi.org/10.21138/dl/2023.lc>.

Teixeira, A. & Dos Santos, M. (2015). Geomorfología Ambiental. (7ª ed). Rio de Janeiro, Brasil: Bertrand Brasil.

Valencia Castillo, A. Hernández Beltrán, A. & López de Buen, L. (Mayo-Agosto 2011). El ensilaje: ¿qué es y para qué sirve? *Revista de Divulgación Científica & Tecnológica de la Universidad Veracruzana*. Volumen XXIV, Número2, 9. [bit.ly /3gN0ojn](http://bit.ly/3gN0ojn)

Villar, V. (13 noviembre de 2019). Consumo de carne de res disminuye 18% en los últimos cinco años. *Capital Financiero*. [bit.ly /34JztT3](http://bit.ly/34JztT3).



Tecnociencia, Vol. 25, N°2: 108-123

Julio-Diciembre 2023

ISSN L 2415-0940

## **EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE CARGA PUNTUAL CON VARIACION DE LA GEOMETRIA DE PROBETAS EN MATERIAL ROCOSO**

**Patricio Feijoo Calle**

Universidad del Azuay, Cuenca. Ecuador.

[pfeijoo@uazuay.edu.ec](mailto:pfeijoo@uazuay.edu.ec) 

**Bernardo Feijoo Guevara**

Universidad del Azuay, Cuenca. Ecuador.

[bernardofejoo@uazuay.edu.ec](mailto:bernardofejoo@uazuay.edu.ec) 

DOI <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v25n2.a4068>

**Fecha de recepción:** 26 de noviembre de 2022

**Fecha de aceptación:** 5 de abril de 2023

### **RESUMEN**

Este trabajo tuvo por objetivo evaluar el índice de carga puntual,  $I_s$  (50), de un material rocoso, en función de las dimensiones de las probetas. Se inició con la toma de muestras de un mismo material, el cual provino de un solo afloramiento compuesto de una andesita anfibólica. El afloramiento está ubicado en el sector denominado Cojitambo, en la provincia de Cañar (Ecuador). En una segunda instancia se elaboraron una serie de probetas, hasta obtener noventa, que estuvieron en condiciones idóneas para el ensayo, las mismas subdivididas en tres grupos de treinta, el grupo uno denominado P5, el grupo dos P7 y el grupo tres P9 y las dimensiones de las probetas fueron aproximadamente, 10x6x5 cm, 10x8x7 cm y 10x10x9 cm, respectivamente. Como tercera etapa se determinó las dimensiones precisas de las probetas y se las sometió al ensayo de carga puntual. Los resultados son interesantes ya que mostraron un comportamiento diferente para cada grupo de probetas, y se pudo valorar el índice de carga puntual de la roca objetivamente. Se probó que la propiedad resistencia a la compresión, tiene una relación óptima con el índice de carga puntual, siempre que se efectúe una “geometría de probetas” ideal.

### **PALABRAS CLAVES**

Andesita, Compresión, Resistencia, Roca.

# **EVALUATION OF THE POINT LOAD TEST INDEX AND RESISTANCE OF THE ROCK MATERIAL**

## **ABSTRACT**

The objective of this work was to evaluate the point load test index, is (50), of a rock material, depending on the dimensions of the specimens. It began with the taking of samples of the same material, which came from a single outcrop composed of an amphibolic andesite. The outcrop is in the sector called Cojitambo, in the province of Cañar (Ecuador). In a second instance, a series of test tubes were made up to ninety, which were in ideal conditions for the test, subdivided into three groups of thirty, group one called P5, group two P7 and group three P9 and the dimensions of the specimens were approximately 10x6x5 cm, 10x8x7 cm and 10x10x9 cm, respectively. As a third stage, the precise dimensions of the specimens were determined, and they were subjected to the point load test. The results are interesting since they showed a different behavior for each group of specimens, and it was possible to assess the point load test index of the rock objectively. It was proved that the compressive strength property has an optimal relationship with the point load test index, provided that an ideal "specimen geometry" is made.

## **KEY WORDS**

Andesite, Compression, Resistance, Rock.

## **INTRODUCCIÓN**

El comportamiento mecánico de una masa de roca in situ es diferente de una masa de suelo. Los dos motivos fundamentales que actúan juntos son los siguientes: a) El material rocoso es mucho más fuerte y resistente que el material de suelo. b) Una masa rocosa presenta casi siempre sistemas de debilidades estructurales como fracturas, diaclasas, fisuras, discontinuidades, fallas; y en rocas cristalinas al aumentar la fisuración, es decir el tamaño y la densidad de las fisuras, disminuye la durabilidad de estas.

Por este motivo se tiene que distinguir entre macizo y material rocosos. Se habla de material rocoso entendiendo el material intacto, es decir un testigo o muestra de pequeño tamaño generalmente constituido por material sin fracturas. Se habla de macizo rocoso a todo el conjunto del material rocoso y de las discontinuidades presentes en él. Un macizo rocoso es por esto constituido por muchos bloques de material rocoso

separados por discontinuidades, fisuras, etc. El material o matriz rocosos es la roca simple y suelta de un conjunto de más pedazos del material. Este conjunto de pedazos de material rocoso toma el nombre de macizo rocoso y es el que debe ser evaluado en su totalidad (Feijoo e Iñiguez, 2020).

Actualmente, las clasificaciones geomecánicas son una herramienta de uso generalizado en el proyecto y construcción de túneles y, gracias a ellas, es posible obtener un mejor conocimiento, interpretación y aplicación de los datos geológicos y geotécnicos. Así mismo, dichas clasificaciones son criterios muy útiles que coadyuvan a la representación del comportamiento geomecánico de los macizos rocosos, ya que permiten realizar una primera aproximación de los parámetros mecánicos de diseño, así como de los posibles sistemas de soporte, estabilización y reforzamiento adecuados para el túnel.

Las clasificaciones geomecánicas modernas más difundidas en la ingeniería de túneles son las conocidas como Rock Mass Rating o sistema RMR, la clasificación del Instituto Geotécnico Noruego, sistema o índice Q y el Geological Strength Index (GSI).

Las primeras dos clasificaciones se basan en los datos de recuperación de núcleos, número de familias de discontinuidades, rugosidad y estado general de las juntas, presencia de agua y adicionalmente pueden considerar la resistencia de la roca matriz, la orientación de las discontinuidades respecto a la excavación y el tipo de obra de que se trate (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2016).

Para el desarrollo de estas clasificaciones es indispensable obtener un parámetro o característica del material rocoso denominada resistencia a la compresión simple (RCS).

El ensayo para determinar esta resistencia se lo puede desarrollar sobre una probeta cilíndrica de roca de altura entre el doble y el triple del diámetro. Normalmente estas probetas se obtienen a partir de testigos de perforación. También se pueden obtener muestras a partir de bloques de roca; la extracción de estos bloques en la mina o en la obra se debe llevar a cabo sin voladuras, ya que éstas pueden generar en la roca nuevas micro fisuras o aumentar las existentes, lo cual se

traduciría en una pérdida de resistencia de las probetas que se obtengan de ellos. Averiguar la resistencia a compresión simple de una roca es importante porque permite clasificar la roca según su resistencia, es un parámetro importante en los criterios de rotura más utilizados (Mohr-Coulomb y Hoek-Brown) (Marín, 2017).

Es importante a este punto indicar que las rocas o las probetas obtenidas para la ejecución de ensayos no mantienen las propiedades en las diferentes direcciones, en consecuencia, se debe introducir y argumentar estos conceptos.

La isotropía se puede aplicar de forma simplificada como siendo la propiedad de un medio de responder de forma igual independiente de la dirección que se aplique la fuerza. Las rocas no suelen poseer esta característica, ya que la presencia de defectos o su composición condicionan/alteran el comportamiento de la roca matriz y del macizo rocoso (Santos, 2014).

Los materiales anisótropos son aquellos cuyas propiedades varían en función de la dirección utilizada para su medida. Aunque el carácter anisótropo de las rocas que poseen esta característica se manifiesta en todas sus propiedades, las de mayor importancia en mecánica de rocas son la resistencia y deformación (Oyanguren y Alejano, 2004).

De hecho, las propiedades de las rocas varían en las diferentes direcciones que se aplique el efecto, por eso a este punto proponemos utilizar el corte en la roca, el cual por razones descritas no será igual en función de la arista establecida para generar el mismo.

Este corte debe ser ejecutado sobre muestras o probetas preparadas, para tratar de mitigar los efectos de la anisotropía, lo cual es muy difícil conseguir. Así pues, en el proceso de corte de rocas intervienen conjuntamente el equipo o sierra de corte, el útil diamantado y el material a cortar. Además, no se deben olvidar los parámetros o condiciones del corte ni quizás el factor más importante: el humano (Suarez et al., 1998).

Una de las propiedades importantes que se debe conocer sobre el material rocoso es la resistencia a la compresión simple o uniaxial

(RCS), y para obtener este parámetro se deben obtener muestras de roca que aflore en el yacimiento, preparar probetas adecuadas y enviarlas a laboratorios para la determinación de la presión de ruptura. Este trabajo debe ser permanente ya que la geología de los proyectos mineros varía en el avance de la explotación y por naturaleza las rocas son anisótropas y heterogéneas. Se suele entender por “resistencia” a la carga específica (por unidad de sección), que es necesario aplicar a un material para producir su rotura. Según el esfuerzo que se aplique la resistencia puede ser: a compresión, a tracción, a flexión, a corte, a torsión, etc. La resistencia a compresión simple (o compresión uniaxial) de la matriz rocosa, es el valor que se obtiene cuando se aplica una carga de compresión en una dirección dada, sin aplicar ningún otro esfuerzo en ninguna otra dirección (Galván, 2015).

En la mayor parte de proyectos mineros, especialmente los de denominados de pequeña minería, la posibilidad de determinar la RCS se vuelve casi nula, primero por la dificultad de contar con laboratorios y equipos para el efecto y segundo, al costo que demandan los laboratorios privados, por lo que la ISRM (Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas), ha propuesto un ensayo alternativo, el cual se denomina índice de carga puntual.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

La base de cualquier trabajo es la planificación de las actividades a realizar. Para cumplir con el objetivo disponemos de una serie de herramientas, unas para aplicar en campo y otras en laboratorio.

Para el desarrollo de la propuesta se inició con la obtención de muestras de un afloramiento ubicado en la provincia del Cañar (Ecuador), constituido por una andesita. La ubicación del mencionado afloramiento se la puede observar en la figura 1.

Las andesitas son rocas volcánicas de grano fino, son comunes, como coladas de lava en regiones orogénicas y ocasionalmente forman pequeñas intrusiones. Son compactas, algunas veces vesiculares y comúnmente de color castaño y en extensión total ocupan el segundo lugar después del basalto (Blyth y Freitas, 2003).

Estas muestras se tomaron del afloramiento, pero trabajando sobre el mismo para que la matriz rocosa extraída sea sana y no contenga ningún tipo de alteración o descomposición. Es muy importante que las muestras tengan superficies frescas y limpias, que nos permita realizar una valoración correcta del estado de la roca a la cual se procede a realizar los ensayos.

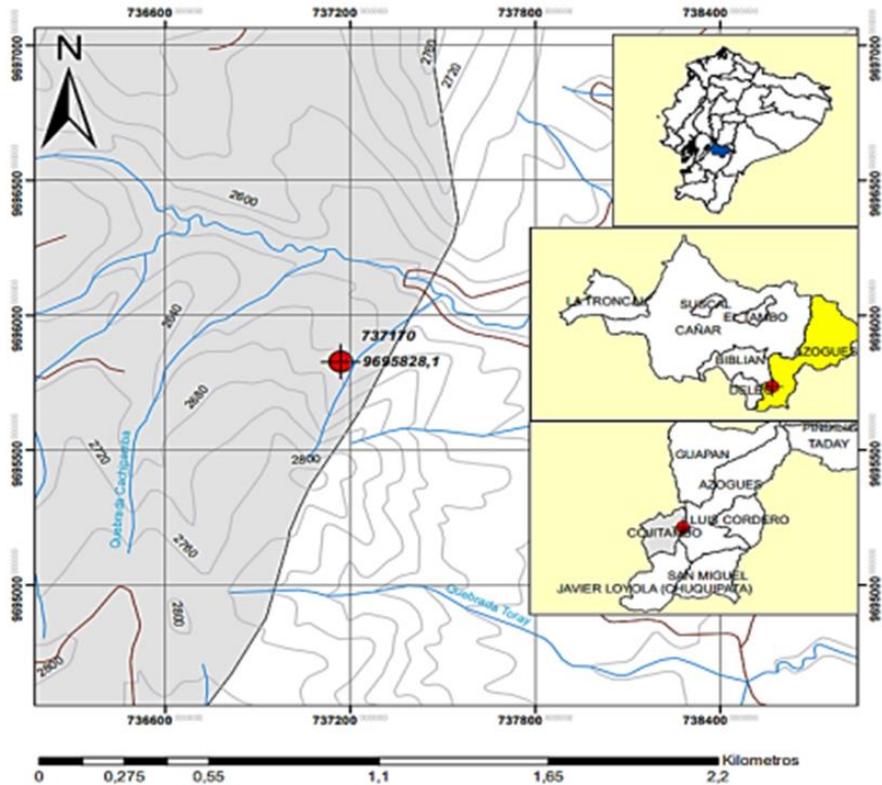


Figura 1. Ubicación del afloramiento de andesita (Cojitambo, Cañar, Ecuador).

Realizada la toma de muestras se las preparó para la elaboración de probetas, de dimensiones predeterminadas, para esto se utilizó una cortadora Covington de piso, la cual podemos observar en la figura 2.



Figura 2. Cortadora de rocas.

La relación  $D/W$  de las probetas debe ser menor a 1 y mayor a 0.3, por lo que se elaboraron las 90 probetas, distribuidas en tres grupos de 30 cada uno, con las siguientes dimensiones: grupo P5, 5x6x10 cm, grupo P7, 7x8x10 cm y grupo P9, 9x10x10 cm (Figura 3).

Si analizamos los datos de la relación  $D/W$  se observa que en todos los grupos la misma es cercana a 0.9, esto debido a lo propuesto por Feijoo en el 2022 (Feijoo et. al, 2022).



Figura 3. Probetas para el ensayo de carga puntual.

Finalmente se ejecutaron los ensayos de carga puntual. Para ello se utilizó el equipo apropiado, el cual consiste en una prensa de construcción en campo, con las condiciones y especificaciones que se establecen en las normas. La misma se la puede observar en la figura 4.



Figura 4. Prensa para ensayos de carga puntual.

El ensayo de carga puntual consiste en romper un pedazo de roca entre dos puntas cónicas de acero endurecido. Las muestras que posteriormente van a ser colocadas entre dichas puntas pueden ser de cualquier forma, pero lo recomendable es que su diámetro no sea inferior a 50 mm, ya que, el volumen de dicha probeta influye en su resistencia (Feijoo y Ureña, 2021).

El índice de carga puntual se calcula mediante la relación, sin corrección:

$$I_s = \frac{P}{(De)^2} \quad (1)$$

Dónde:

P = Carga aplicada en kN.

De = Diámetro del núcleo equivalente en mm.

Se toman las distancias de los fragmentos los cuales deben cumplir con las disposiciones que se indican en la norma. La razón  $0.3 < D/W < 1$  que de preferencia quede cerca de 1. La distancia  $L > 0.5W$  (L distancia del extremo de la roca a las puntas cónicas y W distancia perpendicular a L medida sobre la roca).

En la ecuación 2 se determina el diámetro equivalente  $De$ , en función de las dimensiones de los fragmentos irregulares:

$$(De)^2 = \frac{4A}{\pi} \quad (2)$$

Donde A está definido por la ecuación 3:

$$A = WD \quad (3)$$

Siendo A el área transversal mínima paralela a la dirección de la carga en  $\text{mm}^2$ .

El índice de resistencia a la carga puntual corregido  $Is(50)$ , de una muestra de roca se define como el valor de  $Is$  que se ha medido por una prueba diametral con  $D = 50$  mm. Cuando una clasificación de roca es fundamental, el método más fiable para conseguir  $Is(50)$  es llevar a cabo las pruebas con diámetros de  $D = 50$  mm o muy cercanos a dicho valor.

La mayoría de las pruebas de carga puntual son llevadas a cabo utilizando tamaños de muestras diferentes al diámetro mencionado (Navarrete et al., 2013). Con la ecuación 4 se obtiene la corrección de tamaño:

$$Is(50) = \left(\frac{De}{50}\right)^{0.45} \cdot Is \quad (4)$$

Se ha propuesto que la relación que existe para la resistencia a la compresión del material rocoso está en el orden de 20 veces el valor del  $Is(50)$ .

$$RCS \cong 20 \cdot Is(50) \quad (5)$$

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Realizados todos los ensayos, en los tres grupos de probetas, se determinaron los valores de  $I_s$  (50) para las probetas que cumplieron con la relación  $D/W$ , y los mismos podemos observar en las tablas 1, 2 y 3, con todas las dimensiones y valores de fuerza.

Tabla 1. Resultados del  $I_s$  (50) del grupo de probetas P5.

Probeta	W	L	D	D/W	Fuerza (P)	WD	De <sup>2</sup>	I <sub>s</sub>	F	I <sub>s</sub> (50)
	(cm)	(cm)	(cm)		(kN)	(mm <sup>2</sup> )	(mm <sup>2</sup> )	(MPa)		(MPa)
501	6.2	9.8	5.4	0.87	11.46	3348	4262.81	2.69	1.13	3.03
502	5.9	10.0	5.1	0.86	15.07	3009	3831.18	3.93	1.10	4.33
503	5.9	9.8	5.5	0.93	15.07	3245	4131.66	3.65	1.12	4.08
504	5.7	10.0	5.0	0.88	13.47	2850	3628.73	3.71	1.09	4.04
505	6.0	9.9	5.3	0.88	10.67	3180	4048.90	2.63	1.11	2.94
506	5.6	10.0	4.8	0.86	14.27	2688	3422.47	4.17	1.07	4.47
507	5.9	9.8	5.6	0.95	10.53	3304	4206.78	2.50	1.12	2.81
508	6.2	9.8	5.4	0.87	10.67	3348	4262.81	2.50	1.13	2.82
509	6.0	10.0	5.2	0.87	10.67	3120	3972.51	2.69	1.11	2.98
510	6.1	10.0	5.3	0.87	9.47	3233	4116.38	2.30	1.12	2.57
511	6.2	10.0	5.5	0.89	9.80	3410	4341.75	2.26	1.13	2.56
512	6.2	10.0	5.6	0.90	12.00	3472	4420.69	2.71	1.14	3.09
513	6.0	9.9	5.3	0.88	16.40	3180	4048.90	4.05	1.11	4.51
514	5.9	9.9	5.5	0.93	14.00	3245	4131.66	3.39	1.12	3.79
515	6.2	9.9	5.6	0.90	14.00	3472	4420.69	3.17	1.14	3.60
516	6.0	9.7	5.2	0.87	10.80	3120	3972.51	2.72	1.11	3.02
517	6.0	9.9	5.3	0.88	13.47	3180	4048.90	3.33	1.11	3.71
518	6.0	10.0	5.6	0.93	21.20	3360	4278.08	4.96	1.13	5.59
519	5.8	10.0	5.4	0.93	15.20	3132	3987.79	3.81	1.11	4.23
520	6.1	9.9	5.4	0.89	14.20	3294	4194.05	3.39	1.12	3.80
521	6.0	9.7	5.2	0.87	8.53	3120	3972.51	2.15	1.11	2.38
522	6.2	9.9	5.3	0.85	14.20	3286	4183.87	3.39	1.12	3.81
523	6.0	10.0	5.6	0.93	10.53	3360	4278.08	2.46	1.13	2.78
524	6.0	9.7	5.4	0.90	10.00	3240	4125.30	2.42	1.12	2.71
525	5.7	10.0	5.1	0.89	10.53	2907	3701.31	2.85	1.09	3.11
526	6.2	10.0	5.4	0.87	11.47	3348	4262.81	2.69	1.13	3.03
527	6.0	9.8	5.3	0.88	11.87	3180	4048.90	2.93	1.11	3.27
528	6.0	9.9	5.3	0.88	10.00	3180	4048.90	2.47	1.11	2.75
529	5.8	10.0	5.4	0.93	18.27	3132	3987.79	4.58	1.11	5.09
530	6.0	9.9	5.5	0.92	16.40	3300	4201.69	3.90	1.12	4.39

Tabla 2. Resultados del Is (50) del grupo de probetas P7.

Probeta	W	L	D	D/W	Fuerza (P)	WD	De <sup>2</sup>	Is	F	Is (50)
	(cm)	(cm)	(cm)		(kN)	(mm <sup>2</sup> )	(mm <sup>2</sup> )	(MPa)		(MPa)
701	8.0	10.0	7.0	0.88	23.06	5600	7130.14	3.23	1.27	4.09
702	8.4	10.0	8.0	0.95	15.11	6720	8556.17	1.77	1.32	2.33
703	8.2	9.9	7.1	0.87	12.91	5822	7412.80	1.74	1.28	2.22
704	8.1	10.1	7.2	0.89	15.00	5832	7425.53	2.02	1.28	2.58
705	8.4	9.9	7.9	0.94	25.02	6636	8449.22	2.96	1.32	3.89
706	8.5	10.0	8.1	0.95	27.75	6885	8766.25	3.17	1.33	4.20
707	8.0	9.8	7.1	0.89	22.09	5680	7232.00	3.05	1.27	3.88
708	8.2	10.0	7.8	0.95	15.34	6396	8143.64	1.88	1.30	2.46
709	8.2	9.7	7.5	0.91	20.34	6150	7830.42	2.60	1.29	3.36
710	8.1	10.0	7.3	0.90	18.59	5913	7528.67	2.47	1.28	3.17
711	7.9	9.9	7.0	0.89	21.53	5530	7041.01	3.06	1.26	3.86
712	8.0	10.0	7.0	0.88	20.73	5600	7130.14	2.91	1.27	3.68
713	8.3	9.9	7.8	0.94	16.71	6474	8242.95	2.03	1.31	2.65
714	7.9	10.1	7.0	0.89	19.77	5530	7041.01	2.81	1.26	3.54
715	7.9	10.0	7.0	0.89	20.13	5530	7041.01	2.86	1.26	3.61
716	7.9	10.0	7.0	0.89	12.49	5530	7041.01	1.77	1.26	2.24
717	8.0	10.0	7.0	0.88	22.70	5600	7130.14	3.18	1.27	4.03
718	8.2	9.9	7.4	0.90	21.97	6068	7726.02	2.84	1.29	3.66
719	8.2	9.9	7.5	0.91	14.12	6150	7830.42	1.80	1.29	2.33
720	8.2	9.9	7.3	0.89	23.71	5986	7621.61	3.11	1.29	4.00
721	7.9	9.9	7.0	0.89	15.20	5530	7041.01	2.16	1.26	2.73
722	8.2	9.9	7.6	0.93	14.33	6232	7934.83	1.81	1.30	2.34
723	8.2	9.9	7.5	0.91	18.89	6150	7830.42	2.41	1.29	3.12
724	8.3	9.9	7.8	0.94	23.76	6474	8242.95	2.88	1.31	3.77
725	8.2	9.9	7.2	0.88	23.01	5904	7517.21	3.06	1.28	3.92
726	8.1	9.7	7.7	0.95	19.24	6237	7941.20	2.42	1.30	3.14
727	8.0	10.0	7.4	0.93	24.11	5920	7537.58	3.20	1.28	4.10
728	7.8	9.8	6.9	0.88	15.31	5382	6852.58	2.23	1.25	2.80
729	8.2	10.0	7.1	0.87	18.22	5822	7412.80	2.46	1.28	3.14
730	8.0	10.0	7.0	0.88	15.73	5600	7130.14	2.21	1.27	2.79

Tabla 3. Resultados del Is (50) del grupo de probetas P9.

Probeta	W	L	D	D/W	Fuerza (P)	WD	De <sup>2</sup>	Is	F	Is (50)
	(cm)	(cm)	(cm)		(kN)	(mm <sup>2</sup> )	(mm <sup>2</sup> )	(MPa)		(MPa)
901	10.0	10.1	8.8	0.89	28.55	8795	11197.73	2.55	1.40	3.57
902	10.1	9.9	8.8	0.87	28.16	8917	11353.50	2.48	1.41	3.49
903	10.0	10.0	8.9	0.89	24.66	8833	11247.06	2.19	1.40	3.07
904	9.9	9.9	8.8	0.89	31.19	8710	11089.61	2.81	1.40	3.93
905	9.7	10.1	8.9	0.92	33.30	8708	11086.81	3.00	1.40	4.20
906	9.9	9.9	8.9	0.90	31.36	8756	11148.08	2.81	1.40	3.94
907	9.9	9.9	8.9	0.90	38.75	8833	11246.17	3.45	1.40	4.83
908	9.9	9.9	8.9	0.90	30.88	8790	11191.99	2.76	1.40	3.87
909	9.9	10.0	9.0	0.91	21.01	8919	11356.02	1.85	1.41	2.60
910	9.9	9.9	9.0	0.91	42.22	8889	11318.17	3.73	1.40	5.24
911	9.9	10.1	8.8	0.89	23.23	8715	11096.55	2.09	1.40	2.93
912	10.1	9.6	9.2	0.91	28.52	9309	11851.98	2.41	1.42	3.42
913	9.9	10.0	8.9	0.90	20.66	8744	11132.95	1.86	1.40	2.60
914	9.9	9.9	8.7	0.88	34.46	8623	10979.02	3.14	1.40	4.38
915	10.1	10.1	9.0	0.90	32.63	9103	11590.66	2.82	1.41	3.98
916	10.1	9.8	8.9	0.88	30.15	8971	11422.49	2.64	1.41	3.71
917	9.9	9.9	9.2	0.92	21.85	9105	11592.90	1.88	1.41	2.66
918	10.1	9.9	9.0	0.89	35.14	9082	11563.66	3.04	1.41	4.29
919	10.0	9.9	8.8	0.88	36.16	8792	11194.81	3.23	1.40	4.53
920	10.1	9.1	8.9	0.88	32.32	8981	11435.32	2.83	1.41	3.98
921	10.1	9.9	8.9	0.88	34.96	8961	11409.65	3.06	1.41	4.31
922	10.0	10.2	9.0	0.89	32.53	9006	11466.64	2.84	1.41	4.00
923	10.0	9.9	8.9	0.89	32.48	8889	11317.67	2.87	1.40	4.03
924	10.2	9.9	8.8	0.86	25.96	9004	11464.02	2.26	1.41	3.19
925	9.9	10.0	8.8	0.90	37.74	8706	11085.31	3.40	1.40	4.76
926	10.0	9.8	8.7	0.87	24.14	8731	11116.99	2.17	1.40	3.04
927	10.3	10.0	8.8	0.86	28.28	9061	11536.82	2.45	1.41	3.46
928	9.8	9.9	8.9	0.90	39.44	8748	11137.99	3.54	1.40	4.96
929	10.0	10.2	8.9	0.89	32.98	8853	11272.45	2.93	1.40	4.11
930	9.9	9.9	8.8	0.89	31.18	8758	11151.36	2.80	1.40	3.91

Los resultados permiten hacer un análisis de la desviación estándar y para el grupo P5 podemos ver este cálculo en la figura 5, para el grupo P7 en la figura 6 y para el grupo P9 en la figura 7.

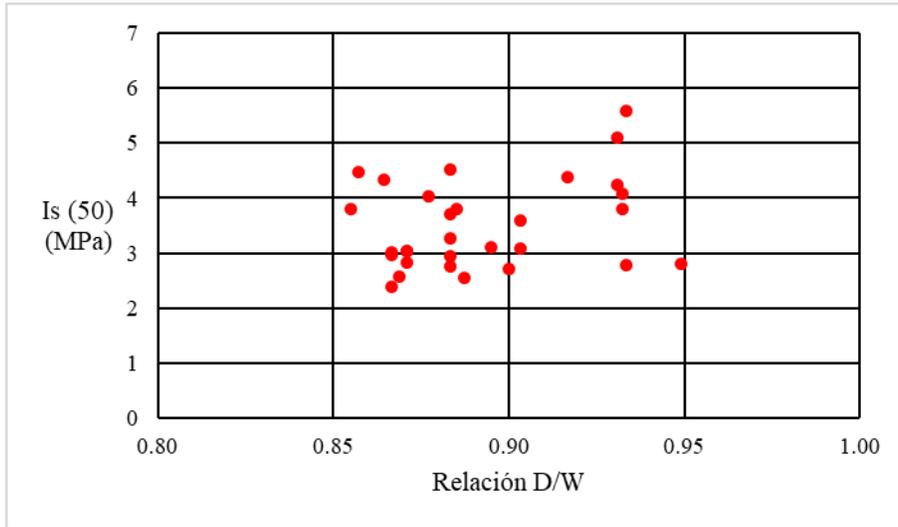


Figura 5. Valores de Is (50) y D/W del grupo P5.

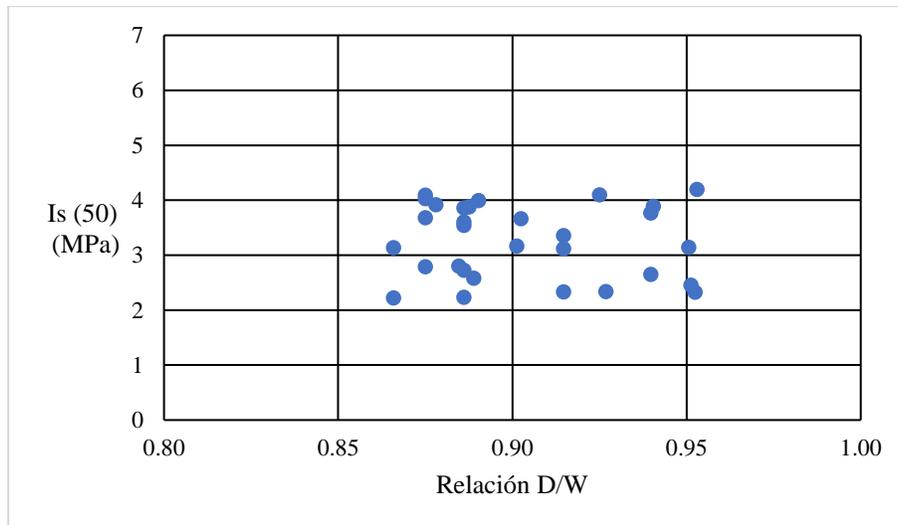


Figura 6. Valores de Is (50) y D/W del grupo P7.

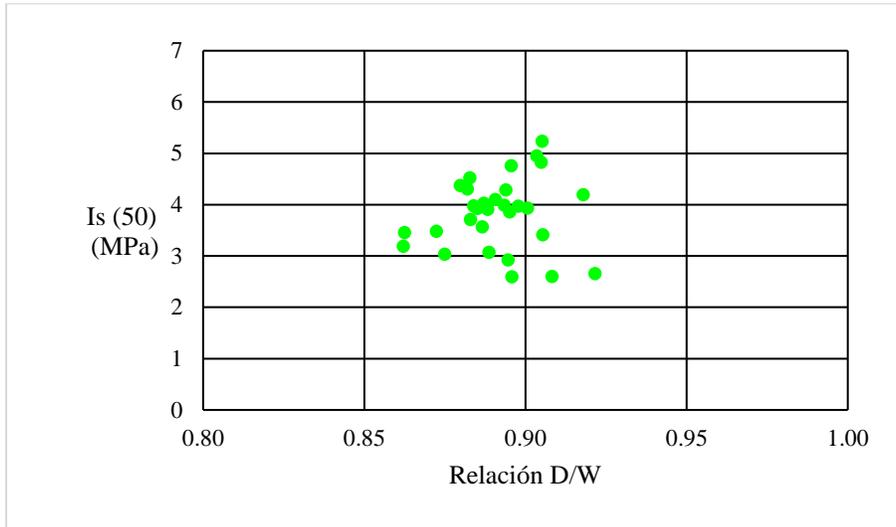


Figura 7. Valores de Is (50) y D/W del grupo P9.

En la Tabla 4 se pueden observar estos resultados, a más de la media, mediana y desviación estándar de cada grupo.

Tabla 4. Resultados de finales de los 3 grupos de probetas.

	Pendiente	Media (MPa)	Mediana (MPa)	Desviación Estándar
Grupo P5	0.0886	3.51	3.19	0.812
Grupo P7	0.0745	3.25	3.26	0.663
Grupo P9	0.0775	3.83	3.94	0.696

Si bien los valores de las pendientes no difieren considerablemente, a más de los resultados de las medias y medianas, se establece que el grupo P7 presenta resultados interesantes.

## CONCLUSIONES

Los resultados para el grupo P7 del Is (50) indican que existe un grupo de probetas que tienen un mejor comportamiento al determinar esta propiedad. Se puede observar que la pendiente es más cercana a 0, lo que indica la consistencia de los valores, además que la media y mediana están prácticamente en un mismo valor y la desviación estándar es baja.

Se propone, para el caso de estudio presentado, que las dimensiones de probetas sean de 7x8x10 cm, y en consecuencia la resistencia a la compresión simple del material rocoso, según la relación 5, está en el orden de 65 MPa.

Esta propuesta debe ser implementada en cada proyecto minero, y complementada con la ejecución de probetas que presenten relaciones de D sobre W cercanas a 0.9, pero con otras dimensiones de probetas, así como también ejecutar ensayos con otros tipos de roca.

## REFERENCIAS

Blyth, F., Freitas, M. (2003). Geología para Ingenieros, México.

Feijoo, P., Iñiguez, C. (2020). Corte en rocas y su relación con la resistencia a compresión simple. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*, E30, 59-67. <http://www.risti.xyz/issues/ristie30.pdf>

Feijoo, P., Ureña, C. (2021). Characterization of the compressive strength in rocks by granulometric classification: a field test. *Ingeniería y Competitividad*, In press 2021; e20310832. 1-11. <https://doi.org/10.25100/iyc.v24i1.10832>

Feijoo, P., Choco, E., Peláez, G., Feijoo, B. (2022). Índice de carga puntual y su relación con dimensiones en bloque regular de roca. *Revista Tecnológica - ESPOL*. 34, 2, 29–40. DOI: <https://doi.org/10.37815/rte.v34n2.886>.

Galván, M. (2015). *Mecánica de Rocas*, Programa Editorial Universidad del Valle, Colombia.

Marín, W. (2017). Evaluación de parámetros materiales de fractura en roca intacta, Tesis, Universidad Nacional de Colombia.

Navarrete, M., Martínez, W., Alonso, E., Lara, C., Bedolla, A., Chávez, H., Delgado, D., Arteaga, J. (2013). Caracterización de propiedades físico-mecánicas de rocas ígneas utilizadas en obras de infraestructura. *ALCONPANT*, vol. 3, n. ° 2, 133-143.  
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=427639592005>

Oyanguren, P., Alejano, L. (2004). *Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes*, Universidad Politécnica de Madrid, España.

Santos, A. (2014). Resistencia Anisótropa de las Rocas, Universidad Politécnica de Madrid, Tesis de Maestría.

Secretaría de Comunicaciones y Transporte. (2016). *Manual de Diseño y Construcción de Túneles de Carreteras*, México.

Suarez, L., Rodríguez, A., Calleja, L., Ruiz, G. (1998). El corte de rocas ornamentales con discos diamantados: influencia de los factores propios del sistema de corte. *Revista Materiales de Construcción*, Vol. 48, 49-55.  
DOI: 10.3989/mc.1998.v48.i251.471



Tecnociencia, Vol. 25, N°2: 124-140

Julio-Diciembre 2023

ISSN L 2415-0940

## **INCIDENCIA DEL RADÓN-222 EN LA RADIATIVIDAD DE FONDO EN ALGUNAS VIVIENDAS DE EL VALLE DE ANTÓN, PANAMÁ**

**Lisbeth A. Santana M.,**

Universidad de Panamá. Panamá. [lissethsantana@up.ac.pa](mailto:lissethsantana@up.ac.pa)

<https://orcid.org/0009-0008-7410-2970>

**Luis A. Marín**

Universidad de Panamá. Panamá. [luis.marin-d@up.ac.pa](mailto:luis.marin-d@up.ac.pa)

<https://orcid.org/0000-0001-8580-4128>

**Juan Rodríguez**

Universidad de Panamá. Panamá. [juan-m.rodriguez-c@up.ac.pa](mailto:juan-m.rodriguez-c@up.ac.pa)

<https://orcid.org/0000-0002-2013-6752>

**Alejandro Arroyo**

Universidad de Panamá. Panamá. [alejandro@reserma.com](mailto:alejandro@reserma.com)

<https://orcid.org/0009-0008-0593-444X>

**Carlos Dreyfus**

Universidad de Panamá. Panamá. [carlosdreyfus@gmail.com](mailto:carlosdreyfus@gmail.com)

<https://orcid.org/0009-0006-0647-1913>

**Bernardo Fernández**

Universidad de Panamá. Panamá. [bernardo.fernandezg@up.ac.pa](mailto:bernardo.fernandezg@up.ac.pa)

<https://orcid.org/0000-0002-7947-3147>

**Omayra J. Pérez Castro**

Universidad de Panamá. Panamá. [omayra.perezc@up.ac.pa](mailto:omayra.perezc@up.ac.pa)

<https://orcid.org/0000-0002-7080-5598>

DOI <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v25n2.a4069>

**Fecha de recepción:** 1 de marzo de 2023

**Fecha de aceptación:** 4 de mayo de 2023

## **RESUMEN**

Este trabajo se enmarcó en el programa que desarrolla la Estación RN50 para caracterizar el origen de la radiactividad de fondo, a nivel de la República de Panamá. El Radón-222 es un gas que proviene de la cadena natural de desintegración del  $^{238}\text{U}$  que se encuentra, mayormente, en rocas volcánicas profundas. De acuerdo con las características del suelo volcánico, el radón puede emanar en mayor o menor cantidad del suelo, en esas zonas. Las mediciones se realizaron durante 2021 y 2022, en El Valle de Antón, que es la zona volcánica más accesible de las cuatro identificadas en Panamá. Para medir las concentraciones de Rn-222, se utilizó el equipo RAD7. Por la incidencia del agua en la propagación del Rn-222 en suelos, se midió en los periodos lluvioso, intermedio o de transición y seco. En la estación seca, la mejor captación en los suelos exteriores de las viviendas se obtuvo durante el mes de marzo ( $550 - 18\ 110$ )  $\text{Bq}/\text{m}^3$ . Durante los meses de octubre y mayo, se registraron las dosis más altas de radiactividad equivalente en el interior de las viviendas ( $0,199 - 0,249$ )  $\text{mSv}/\text{año}$ . En conclusión, la contribución a la radiactividad de esta región volcánica es pequeña, por lo que se recomienda mantener una buena ventilación en las viviendas.

## **PALABRAS CLAVES**

Radón, dosis de radiación, Panamá.

## **RADON MEASUREMENT IN THE THREE SEASONAL PERIODS OF THE YEAR, IN ANTON VALLEY, PANAMA.**

### **ABSTRACT**

This work is part of the program developed by Station RN50 to characterize the origin of background radioactivity in the Republic of Panama. Radon-222 is a gas that comes from the natural disintegration chain of  $^{238}\text{U}$ , mostly found in deep volcanic rocks. According to the characteristics of the volcanic soil, radon can emanate in greater or lesser quantities from the soil in those areas. The measurements were conducted during 2021 and 2022 in El Valle de Antón, which is the most accessible volcanic zone of the four identified in Panama. To measure Rn-222 concentrations, RAD7 equipment was used. Due to the incidence of water on the propagation of Rn-222 in soils, measurements were taken during the rainy, intermediate or transition and dry periods. In the dry season, the best uptake in the exterior soils of the dwellings was obtained during the month of March ( $550 - 18\ 110$ )  $\text{Bq}/\text{m}^3$ . During the months of October and May, the highest doses of equivalent radioactivity inside the dwellings were recorded ( $0,199 - 0,249$ )  $\text{mSv}/\text{year}$ . In conclusion, the contribution to radioactivity from this volcanic region is small, so it is recommended to maintain good ventilation in the dwellings.

## KEY WORDS

Radon, radioactive dose, Panama

## INTRODUCCIÓN

Por ser un gas noble, el radón que proviene del  $^{238}\text{U}$  de las rocas, emana fácilmente del suelo, pasa a la atmósfera y generalmente se adhiere a las partículas suspendidas en el aire (PM<sub>2,5</sub>). Al ser inhalado por el ser humano, se deposita en las vías respiratorias donde emite radiación alfa, la cual podría dañar el ADN de las células y provocar cáncer del pulmón (WHO, 2021). La Organización Mundial de la Salud y la Unión Europea, en sus recomendaciones, fijan los niveles máximos aceptables de concentración de radón en interiores en  $100 \text{ Bq/m}^3$  y  $200 \text{ Bq/m}^3$ , respectivamente. Lo que implica un valor de referencia para la dosis efectiva máxima aceptable, de alrededor de  $10 \text{ mSv/año}$ .

El estudio del Radón tiene la finalidad de que, en caso de ser necesario, se tomen las medidas de protección radiológica apropiadas para preservar la salud humana y de allí se deduce la importancia de la medición.

La facilidad con la que el radón circula en los suelos depende del tipo de roca, de factores ambientales como: estación, circulación del agua, temperatura, profundidad, permeabilidad, humedad, presencia de fallas activas y de los hábitos en interiores, en función de cuán ventilado y cerrado esté un lugar. La medición del radón que proviene de los poros del suelo puede alcanzar valores de concentración de hasta  $10^4 \text{ Bq/m}^3$  (Quindos, Fernández y Soto, 1994). Las regiones volcánicas, con potencial geotérmico, son candidatas para tener altas emisiones de radón. En Panamá, El Valle de Antón (figura 1) es una región volcánica con cierto potencial geotérmico (IRHE et al., 1987) y en sus suelos podemos encontrar concentraciones de radón superiores a la norma.



Fig. 1. Localización de la zona de estudio, volcán “El Valle de Antón” (File: Panama SRTM lrg.Jpg, 2023).

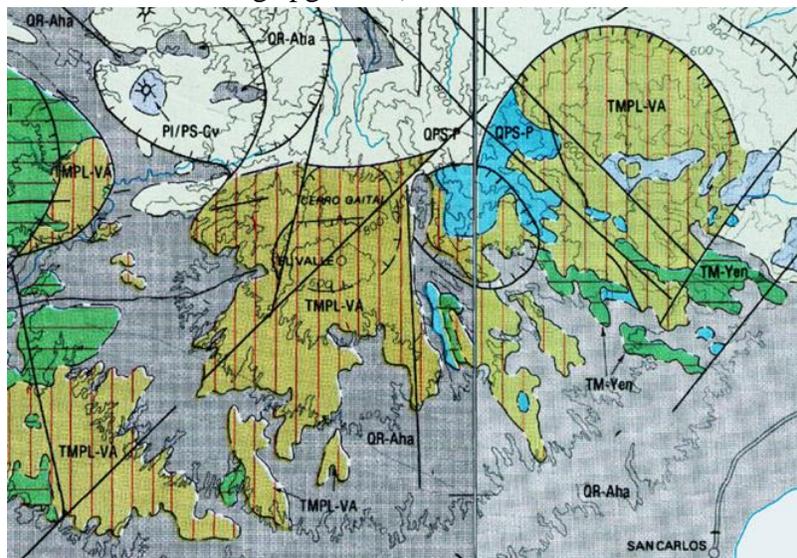


Fig. 2. Mapa geológico de la región de “El Valle de Antón”. Esta región está predominantemente formada por rocas del periodo terciario: formación El Valle, señalada con el símbolo TMPL-VA. Principalmente caracterizado por rocas de tipo: dacitas, brechas, plugs,

flujos ignimbríticos, pumitas, tobas finas. Andesitas/basaltos, tobas y subintrusivos de grano fino (STRI GIS Portal, 2023).

Cuando las rocas de  $^{238}\text{U}$  son atravesadas por agua, puede disolver el radón y transportarlo en solución. La cantidad de radón transportada por el agua depende de la cantidad de uranio presente en las rocas, la permeabilidad de las rocas y la rapidez del flujo de agua. Por ello, las concentraciones de radón en el agua pueden variar de acuerdo con la geología, la geografía y la meteorología local. La mayoría de la exposición al radón se produce por la inhalación del gas en el aire en el interior de las viviendas, especialmente en aquellas construidas sobre suelos y rocas que contienen uranio y otros elementos radiactivos. Sin embargo, en ciertas áreas donde el agua contiene concentraciones significativas de radón, la inhalación del gas disuelto en el agua también puede ser una fuente importante de exposición. De allí la importancia de estudiar el radón en suelos volcánicos (Skeppstrom et al., 2007).

Este estudio inicial es parte del proyecto “Rastreo de Rn-222 en áreas volcánicas de Panamá”, con código de registro VIP-01-04-03-2022-08, el cual consiste en: 1) describir las características geográficas, climáticas y meteorológicas en las áreas escogidas del Valle de Antón, que sean pertinentes para construir el mapa local de radón; 2) medir radón-222 en el exterior (suelo) e interior (aire), habitables, alrededor de dos viviendas representativas del área urbana del Valle de Antón, y, 3) calcular la dosis efectiva de radón en el interior de esas dos residencias seleccionadas. Lo anterior se realizó durante los tres periodos estacionales representativos del año: mayo 2021 (inicio de estación lluviosa), octubre 2021 (pico máximo de estación lluviosa) y marzo de 2022 (pico estación seca).

En el Sistema Internacional de Unidades, la unidad de actividad ( $dN/dt$ ) es 1 desintegración por segundo, llamada Becquerel ( $Bq$ ), la de concentración por unidad de volumen es el  $Bq/m^3$  y la de dosis efectiva es  $mSv/año$ .

## MATERIALES Y MÉTODOS

El RAD7, de DurrIDGE<sup>®</sup>, es ampliamente utilizado para realizar estudios científicos y como instrumento de medición de radón en aire, agua o suelo, el equipo cuenta con varios accesorios opcionales. Los isótopos radiactivos al ingresar en el dispositivo se depositan en la superficie del material semiconductor, generando una señal eléctrica y electrónicamente se determina la energía de cada partícula alfa lo que permite medir continuamente concentraciones de radón y torón (torio). El RAD7, en la calibración, está certificado con una exactitud total superior al 5%, en condiciones secas (DURRIDGE, 2022). Si el ambiente es húmedo, con el programa Capture, se puede realizar una corrección automática de los datos de humedad.

La toma de datos se hace con la finalidad de calcular las dosis de radiación a la que están expuestas las personas que habitan en las viviendas. Para la medición en suelos se empleó el protocolo GRAB. En este caso, por bombeo, el RAD7 extrae aire seco del suelo a través de una sonda de acero inoxidable (figura 3). Para escoger los puntos de medición en suelo, se diseñó una malla aleatoria con 13 puntos de muestreo a lo largo del área de trabajo (ver figura 4). En el caso de la medición en aire se estableció como protocolo de monitoreo, la medición continua durante un día, pero sin sonda. La dosis efectiva recibida se calculó a partir de la expresión establecida por la UNSCEAR (2000).

$$E = C_{Rn} * D * F * T \quad (1)$$

$C_{Rn}$  es la concentración de radón medida, D es el factor de conversión de dosis ( $9 \text{ nSv}$ ), F es el factor de equilibrio y T es el tiempo de estadía de la persona en el lugar (“*occupancy*” u ocupación). Para interiores, el factor de equilibrio utilizado fue de 0,4.

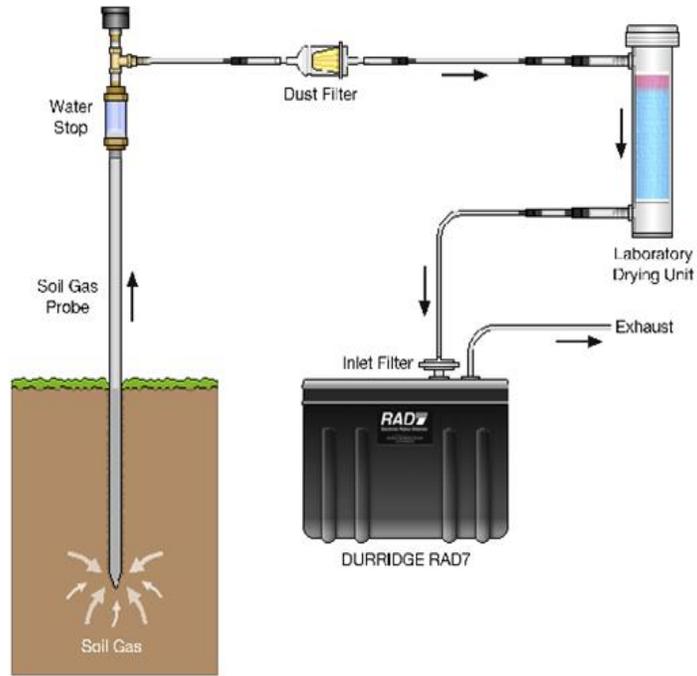


Fig. 3. Configuración estándar del RAD7 con la sonda de gas para suelos (Durrige, 2022).

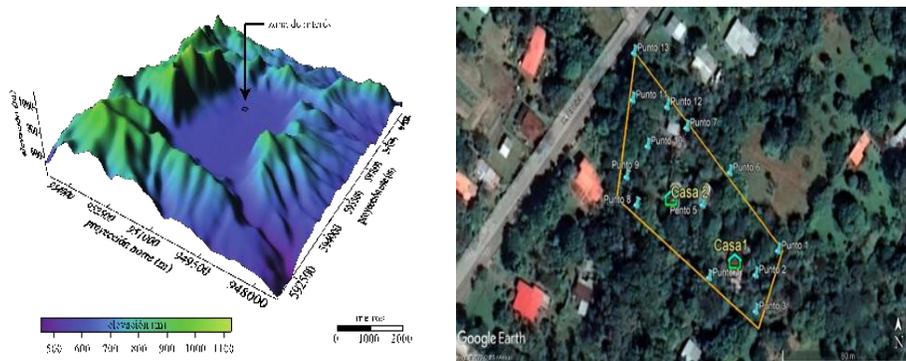


Fig. 4. Mapa con los puntos de muestreo, en el Sector de El Hato, El Valle de Antón. Nota. A la izquierda se tiene un mapa en relieve del

Valle de Antón realizado con Golden Surfer 22, indicando la ubicación del lugar de trabajo y a la derecha, la malla de los 13 puntos para el muestreo de Rn en suelo, junto con las dos viviendas escogidas para monitorear el Radón-222 en aire (Landsat/Copernicus 2022).

Una vez se toman los datos, in situ, se guarda el registro en la memoria del RAD7 para su posterior exportación y análisis. La información obtenida permite elaborar los mapas del radón mediante el programa Surfer ya que proporciona múltiples tipos de interpoladores. La literatura indica que se debe usar un comportamiento lognormal de la data. Debido a que la cantidad de datos (13) es menor a la recomendada (20), se verificó que su distribución es lognormal, por lo que se consideraron los métodos como representativos y válidos. Por el lado determinista, la interpolación usada fue la de la Distancia Inversa Ponderada (DIP) y por el lado geoestadístico, la Kriging.

Ambos métodos de interpolación siguen el siguiente modelo iterativo:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (2)$$

donde los  $\lambda_i$  representan los pesos o ponderaciones de los valores originales. Estos se calculan en función de la distancia entre los puntos muestreados y el punto donde se va a hacer la correspondiente predicción (Giraldo Henao, 2002).

## RESULTADOS Y ANÁLISIS

### Radón en suelo

El Rn en suelo se detectó en dos de los tres periodos estacionales. Los picos mayores y de distribución más regular de concentración de radón en suelo, se registraron en el mes de marzo (estación seca), con valores que se aproximan a los  $20 \text{ kBq/m}^3$  (figura 5). Le sigue el mes de mayo (inicio de la estación lluviosa), mientras que octubre (estación lluviosa) se mostró, en su mayoría, casi sin detección.

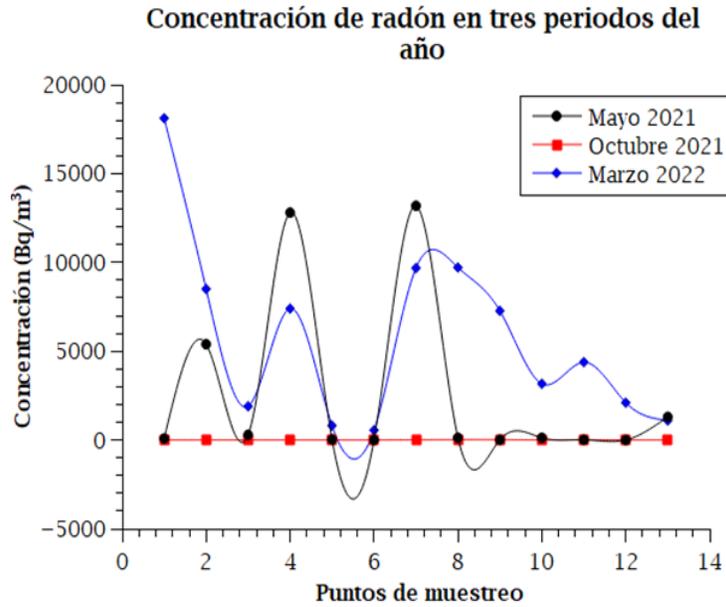


Fig. 5. Gráficos de la concentración de radón en suelo, para los tres periodos estacionales.

En la figura 6 se muestran las tendencias de los datos de la concentración de radón, para el mes de marzo, en función de dos de las más significativas magnitudes físicas ambientales: temperatura (T) y humedad (HR).

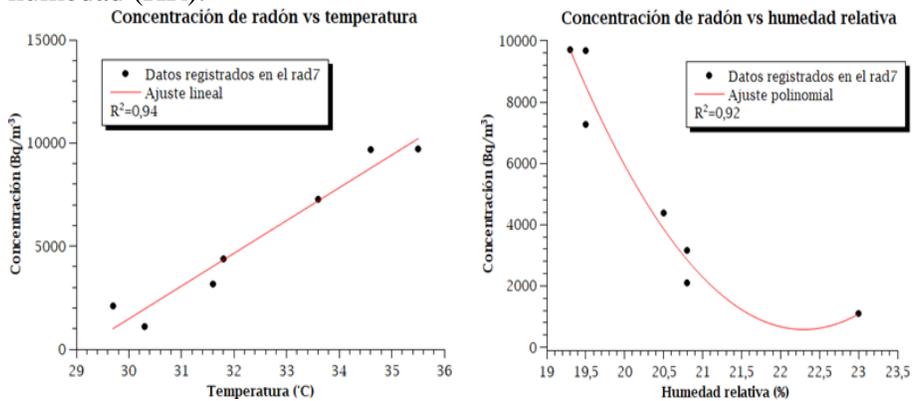


Fig. 6. Ajuste de las tendencias de la data de concentración de Rn vs las magnitudes ambientales (T, HR), para el mes de marzo.

Las concentraciones del radón aumentan con la temperatura, por ende, durante la estación más calurosa (seca) encontramos los niveles más elevados. Las mismas disminuyen con el aumento de la humedad relativa ya que los suelos húmedos, propios de la estación lluviosa, diluyen el gas radón e impide que sea detectado por el equipo de medición.

### **Radón en aire**

En la vivienda 1, el muestreo del mes de mayo se hizo en una sala, con poca ventilación y se obtuvo una mayor detección de Rn ( $7,90 \pm 1,70 \text{ Bq/m}^3$ ) que, en el mes de octubre, que se hizo en un dormitorio, con mayor ventilación. En la vivienda 2 se registró el mayor valor de concentración de radón en octubre y, por ende, la mayor dosis de radiación ( $6,30 \pm 1,30 \text{ Bq/m}^3$ ). Esto se debió a la escasa ventilación y cierre de ventanas debido a las lluvias. Los menores valores se midieron en verano (marzo 2022) y lo asociamos a la presencia de corrientes de aire que mantienen una mejor ventilación de las viviendas.

Por otro lado, los valores de las dosis efectivas se mantuvieron en el rango de  $(0,0568 - 0,2490) \text{ mSv/año}$ , con valores inferiores a  $1,0 \text{ mSv/año}$  que es el máximo aceptable según la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) 2007. En este sentido, los valores encontrados no representan riesgos considerables a la salud.

## Elaboración de mapas

Para realizar un análisis exploratorio de la distribución de los datos se graficó su histograma de frecuencia como se muestra a continuación.

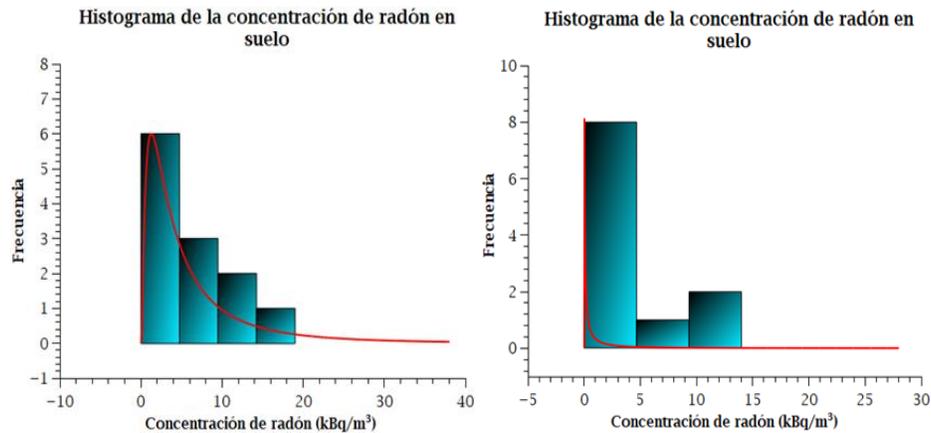


Fig. 7. Histogramas de frecuencias para los meses de marzo (izquierda) y mayo (derecha).

Observamos que los resultados siguen una distribución lognormal (curva roja en la figura 7). Los datos se acumulan en bajas concentraciones y disminuye en las altas. Se omite el mes de octubre porque no marcó en la medición, luego hay falta de lecturas.

La distribución lognormal se modeliza a través de la expresión:

$$f(x|\mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{(-\log x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

Donde  $\mu$  es la media de los valores logarítmicos de la data y  $\sigma$  es la varianza del conjunto de mediciones realizadas.

Entonces se procedió a graficar los 13 puntos en un mapa con sus respectivas concentraciones (figura 8). No se observan tendencias direccionales en ninguno de los tres periodos y el muestreo se muestra heterogéneo.

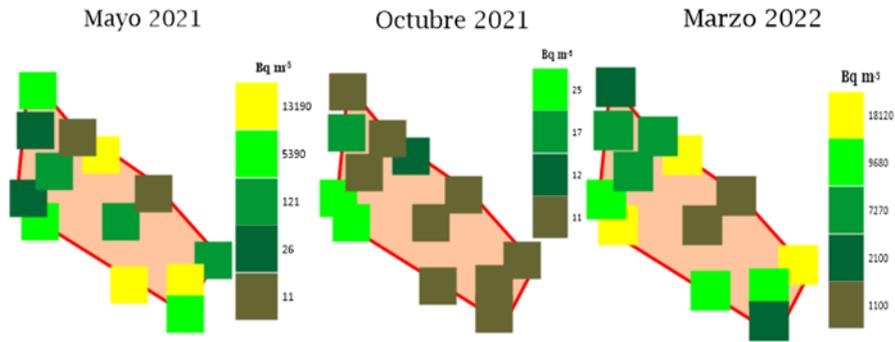


Fig. 8. Mapa de niveles de radón medidos.

Nota. Se identifican los niveles de concentración de radón medidos en el suelo a través de una escala de colores.

Para observar el corrimiento de la concentración según factores, se recurre al método de interpolación. La interpolación se realizó por dos métodos, el de Distancia Inversa Ponderada (DIP) y el Kriging. Los valores más altos se colorean en amarillo, mientras que los más bajos en verde. Al ponerlos en una misma escala de colores fríos (figura 9) el mes de octubre se pinta morado en su totalidad, ya que los valores registrados en este periodo son muy inferiores a las concentraciones de  $20,0 \frac{kBq}{m^3}$ , detectadas en el mes de marzo.

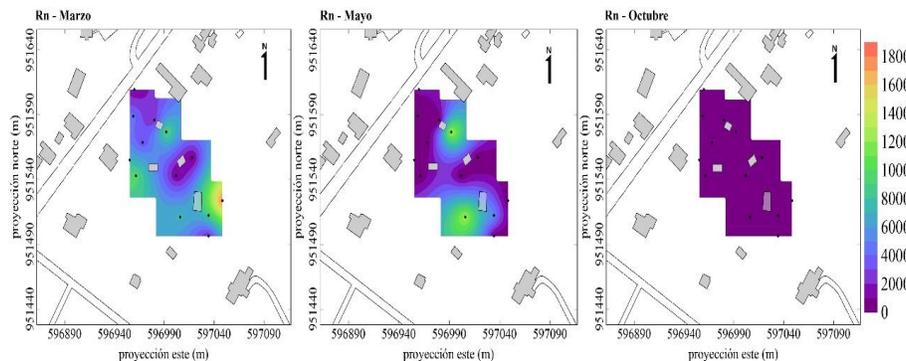


Fig.9. Mapas de las concentraciones de radón con una misma escala de colores.

En los tres mapas o periodos estacionales se observa una subregión que presenta el mismo patrón de alta concentración de radón (ver punto de medición 7, de la figura 4. Esta área se caracteriza por presentar un suelo firme ya que está expuesto directamente a la radiación solar, por lo que almacena poca agua.

Se observa un corrimiento del amarillo (ver figura 10). Durante el mes de marzo, el pico más alto se presenta en el punto de medición 1, lugar colindante con una quebrada que pasa cerca de los puntos 2, 3, 4, 8 y 9 (perímetro inferior) de la figura 4. Luego, en mayo, esta región se desplaza bordeando la quebrada hacia los puntos de medición 2, 3 y 4. Finalmente, en el mes de octubre, siguiendo la dirección del flujo del agua, vemos el área amarilla ubicada en los puntos de medición 9, 10 y 11. Esto puede ocurrir por el movimiento del flujo de radón favorecido por la infiltración de aguas en el suelo que traslada las altas concentraciones del radón.

Comparando la distribución de las concentraciones de radón en el suelo con las dosis efectivas de las viviendas vemos aparecer una correspondencia. En mayo 2021 y marzo 2022, tenemos focos de alta concentración próximos a la vivienda 1 lo cual se relaciona con la detección de mayor radón en el interior de esta y, por consiguiente, una dosis efectiva ligeramente superior a la de la vivienda 2. Mientras que, en octubre 2021, los pocos puntos donde se encontró radón se localizan en regiones contiguas a la vivienda 2, obteniendo una dosis efectiva superior a la de la vivienda 1.

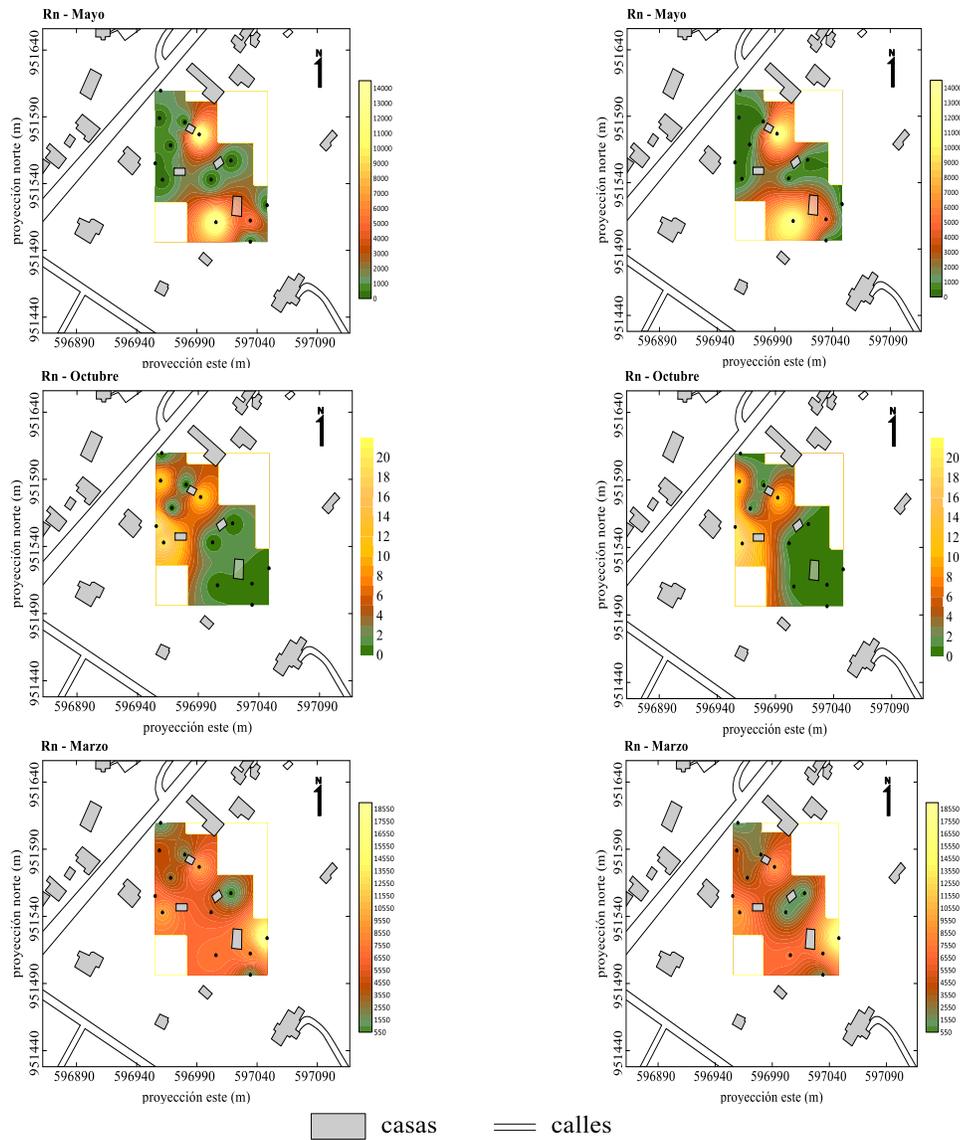


Fig. 10. Mapas de radón generados tras interpolación. Nota. Los puntos muestreados son marcados en negro, para conocer su número según la malla (véase figura 4). A la izquierda se muestran los tres periodos interpolados por el método Distancia Inversa Ponderada (IDW, por sus siglas en inglés y DIP en español) y a la derecha los mapas interpolados con Kriging.

## CONCLUSIONES

En conclusión, el RAD7 es un instrumento sólido y versátil, ideal para llevar a cabo investigaciones en campo relacionadas con la medición de concentraciones de radón en aire y suelo. Los resultados obtenidos muestran un rango de concentraciones de 0 a 18 110 Bq/m<sup>3</sup>, de radón en el suelo, con una clara dependencia estacional. Las concentraciones de radón en el suelo son más elevadas en la estación seca y disminuyen en la lluviosa, lo que refleja la influencia de factores ambientales como la temperatura y la humedad relativa.

Por otro lado, en interiores, los niveles de radón en aire tienden a ser más altos durante la estación lluviosa debido al cierre de las viviendas y la consiguiente reducción de la ventilación. A pesar de las variaciones observadas, la dosis de radiación más alta registrada fue de 0,249 mSv/año, lo cual se encuentra por debajo de los límites máximos admisibles y no representa un riesgo inminente para la salud.

Lo anterior resalta la importancia de considerar factores ambientales en la evaluación de las concentraciones de radón en suelos y en el interior de las viviendas.

Además, se presenta un mapa de radón elaborado a partir de dos métodos de interpolación distintos: el Inverso Cuadrado de la Distancia Ponderada y el Kriging. Al analizar los resultados obtenidos con ambos enfoques, se evidencia un desplazamiento de los puntos de alta concentración de radón en la dirección del flujo de agua de la quebrada como lo indica Skeppstrom et al. En su artículo “Uranium and radon in groundwater”. Este patrón sugiere que el movimiento del radón está influenciado por la infiltración de agua en el suelo, lo que respalda la teoría que postula una fuerte correlación entre el radón y la circulación del agua.

La información proporcionada por estos mapas de radón no solo confirma las relaciones teóricas existentes, sino que también resalta la importancia de considerar el flujo de agua en el suelo al estudiar la distribución y concentración de radón.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradecemos a los propietarios de las dos viviendas en el Valle de Antón, por permitirnos realizar las mediciones en sus propiedades, al Dr. Alexis Mojica por el apoyo para realizar algunos mapas y al Sr. L. Marín padre, por su ayuda durante los viajes a El Valle de Antón.

## **REFERENCIAS**

DURRIDGE. (2022). Electronic Radon Detector User Manual. <https://durridge.com/documentation/RAD7%20Manual.pdf>.

DURRIDGE. (2017). Soil gas measurement. <https://durridge.com/support/technical-resources/application-notes/soil-gas-measurement/>

File: Panama SRTM lrg.Jpg. (s/f). Wikimedia.org. [https://commons.m.wikimedia.org/wiki/File:Panama\\_SRTM\\_lrg.jpg](https://commons.m.wikimedia.org/wiki/File:Panama_SRTM_lrg.jpg)

Giraldo Henao, R. (2002). Introducción a la Geoestadística, Teoría y Aplicación. Universidad Nacional de Colombia.

Golden Surfer, LLC. (2022). Choosing method based on the number of XYZ data points.

International Commission Radiologic Protection. (2008). Publicación 103 ICRP: Las Recomendaciones 2007 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (Trad. Sociedad Española de Protección Radiológica). Senda Editorial S.A. [https://www.icrp.org/docs/P103\\_Spanish.pdf](https://www.icrp.org/docs/P103_Spanish.pdf)

IRHE, BID y OLADE (1987). Informe Final del Estudio de Reconocimiento de los Recursos Geotérmicos de la República de Panamá. Convenio de cooperación técnica IRHE-OLADE.

King, C.Y., Zhang, W., & King, B.S. (1993). Radon anomalies on three kinds of faults in California. *Pageoph* 141(1), 111-124. <https://doi.org/10.1007/BF00876238>.

Krane, Kenneth. (1988). *Introductory Nuclear Physics*. John Wiley & Sons, Inc. <https://faculty.kfupm.edu.sa/PHYS/aanaqvi/Introductory-Nuclear-Physics-new-Krane.pdf>.

Marín, L. (2020). Identificación de los criterios básicos para la utilización del RAD-7 en la medición de radón en centros educativos de la República de Panamá.

Quindos, L. S., Fernández, P. L., & Soto, J. (1994). A method for the measurement of the emanation factor for Rn 222 in small samples of porous materials. *Radiation Protection Dosimetry*, 56 (1), 171-173. <http://elradon.com/wp-content/uploads/2018/10/9.pdf>.

Skeppström, K. A. O. B., & Olofsson, B. (2007). Uranium and radon in groundwater. *European water*, 17(18), 51-62.

STRI GIS Portal. (2023). Stridata.Si. Mapa de la Geología de la República de Panamá <https://stridata.si/maps/SI::mapa-de-la-geolog%C3%ADa-de-la-rep%C3%BAblica-de-panam%C3%A1/explore?location=8.462576%2C-79.884350%2C8.69>

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2000). Sources and effects of ionizing radiation [https://www.unscear.org/docs/publications/2000/UNSCEAR\\_2000\\_Annex-B.pdf](https://www.unscear.org/docs/publications/2000/UNSCEAR_2000_Annex-B.pdf).

Us Epa, O. (2014). Building a New Home, have you considered Radon? <https://www.epa.gov/radon/building-new-home-have-you-considered-radon>

World Health Organization. (2009). *WHO Handbook on indoor radon*. WHO Press.

World Health Organization. (2021). Radon and health. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-healthz>.



Tecnociencia, Vol. 25, N°2: 141-171

Julio-Diciembre 2023

ISSN L 2415-0940

## ARTICULO DE REVISION

# MECANISMOS MOLECULARES INVOLUCRADOS EN LA DIFERENCIACIÓN DE CÉLULAS MADRE EN LINAJES GLIALES

**José Antonio Thomas Argüelles**

Universidad de Panamá. Panamá. [joseantoniomthomasa@gmail.com](mailto:joseantoniomthomasa@gmail.com)

<https://orcid.org/0000-0002-3404-0647>

**Diego Reginensi**

Universidad de Panamá. Panamá. [diego.reginensi@gmail.com](mailto:diego.reginensi@gmail.com)

<https://orcid.org/0000-0002-7709-1663>

**L. Sebastián A Valerio**

INDICASAT-AIP, Centro de Neurociencia, Panamá. [newmanboy45@hotmail.com](mailto:newmanboy45@hotmail.com)

<https://orcid.org/0000-0001-8972-1223>

DOI <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v25n2.a4070>

**Fecha de recepción:** 7 de junio de 2022

**Fecha de aceptación:** 8 de mayo de 2023

## RESUMEN

A pesar del hecho que diferentes tipos de células tienen diferentes funciones y morfologías, todas descienden de una célula ancestral común, conocidas también como células madre, por lo que esencialmente comparten el mismo ADN. Lo que las diferencia es la dinámica molecular, lo cual implica regular modificaciones químicas en el microambiente interno de las células con el fin de modular el nicho de un tejido o un órgano. Uno de los principales objetivos de este artículo de revisión, es recapitular el desarrollo normal del organismo y como se puede aprovechar la capacidad regenerativa endógena de las células madre. Este artículo define los conceptos claves en biología de células madre con respecto al sistema nervioso, presenta una descripción general del desarrollo de las células oligodendrocíticas y su importancia en el desarrollo de la mielinización, el cual requiere un modelo experimental en el que los axones neuronales y los oligodendrocitos se puedan controlar y manipular durante el proceso.

## **PALABRAS CLAVES**

Células Madre, Oligodendrocitos, Factores de Transcripción, Red Reguladora de genes.

## **MOLECULAR MECHANISMS INVOLVED IN THE DIFFERENTIATION OF STEM CELLS INTO GLIAL LINEAGES**

### **ABSTRACT**

Even though different cell types have different functions and morphologies, they are all descended from a common ancestral cell, also known as stem cells, so they essentially share the same DNA. What differentiates them is molecular dynamics, which involves regulating chemical modifications in the internal microenvironment of cells to modulate the niche of a tissue or organ. One of the main objectives of this review article is to recapitulate the normal development of the organism and how the endogenous regenerative capacity of stem cells can be harnessed. This article defines the key concepts in stem cell biology with respect to the nervous system, presents an overview of oligodendrocyte cell development and its importance in the development of myelination, which requires an experimental model in which neuronal axons and oligodendrocytes can be controlled and manipulated during the process.

### **KEY WORDS**

Stem cells, Oligodendrocytes, Transcription Factors, Gene Regulatory Network.

### **INTRODUCCIÓN**

El término “células madre” (SC), fue mencionado por primera vez en 1868 por Ernst Haeckel (Ramalho-Santos & Willenbring, 2007) . Destacando la importancia de la fertilización del óvulo como punto de partida, para la generación de las células que darán forma al cuerpo y sus respectivos órganos. Definiéndolas como unidades de organización biológica, cuyas características serán las responsables del desarrollo y la regeneración de los sistemas de órganos y tejidos.

Las células madre son células no especializadas que se pueden clasificar dependiendo de su capacidad de autorrenovarse infinitamente (producir más células madre en nichos establecidos), la clonalidad / proliferación

acelerada (la capacidad de multiplicarse rápidamente), y la potencia (la capacidad de diferenciarse en uno o varios tipos de células). Según el origen o procedencia de las Células madres o Stem Cells (*SC por sus siglas en inglés*), se pueden dividir en células madre embrionarias, células madre fetales, células madre adultas, células madre cancerosas y células madre reprogramadas (Ballabeni *et al.*, 2011; Boroviak, *et al.*, 2014; Pimentel-Parra & Murcia-Ordoñez, 2017).

Las terapias regenerativas basadas en el uso de células madre pueden centrarse en la aplicación directa en zonas dañadas terapia celular o en la ingeniería de tejidos usando andamios apropiados como portadores de estas células. Este artículo destaca la importancia de comprender la procedencia y los mecanismos que promueven el mantenimiento y diferenciación de las células madre; ofreciendo nuevas oportunidades para contrarrestar las enfermedades degenerativas y utilizar estas células con fines terapéuticos.

## **DESARROLLO EMBRIONARIO EN METAZOOS**

El cigoto es la SC totipotente por excelencia, capaz de dividirse y producir todas las células diferenciadas que requiere un organismo (Casser *et al.*, 2018). La primera división cigótica en algunos metazoos (por ejemplo, nematodos) es visiblemente asimétrica, generando un blastómero cada vez más grande, (Christians, 2016), cuyas células experimentarán mitosis sucesivas, asincrónicas y desiguales, aumentando su número pero con escaso crecimiento celular (Casser *et al.*, 2017). De esta manera se va corrigiendo la relación citoplasma/núcleo, tan aumentada en el cigoto (Harrison *et al.*, 2017), y eventualmente permitiendo la formación del blastocisto.

Los blastocistos se componen de dos tipos de células distintas. Por un lado, la masa celular interna (ICM), que se convierte en epiblastos e induce el desarrollo del embrión, el cual se convertirá en feto. Por otro lado, las células superficiales del blastocisto se convierten en el trofotodermo (TE), el cual es el precursor de las células del trofoblasto y origina tejidos como la placenta (es el primer epitelio que aparece durante el desarrollo de los mamíferos). Los blastocistos son

responsables de la regulación del microambiente del ICM (Zakrzewski *et al.*, 2019). El TE continúa desarrollándose y forma las estructuras de soporte extraembrionarias necesarias para el origen exitoso del embrión, como la placenta. A medida que el TE comienza a formar una estructura de soporte especializada, las ICM permanecen indiferenciadas, pluripotentes y proliferativas ( Liu, *et al.*, 2019; Casser *et al.*, 2017; J. Wang *et al.*, 2006).

En la embriogénesis, el desarrollo del sistema neural comienza con la formación del tubo neural. El ectodermo dorsal primitivo se diferencia en ectodermo neural, que luego se transforma en el tubo neural durante el proceso de "neurulación" (Miyamoto & Wada, 2013). El tubo neural está compuesta por una zona ventricular que dará origen al neuroepitelio; donde las células neurales se especifican desde el ectodermo a través de una vía predeterminada, regulado por señales inhibitorias de moléculas como la "proteína morfogenética de hueso" (BMP, por sus siglas en ingles ) y el factor transformante de crecimiento (TGF $\beta$ , por sus siglas en inglés ) (Méndez-Maldonado *et al.*, 2020; Mossahebi-Mohammadi *et al.*, 2020; Rivron *et al.*, 2018). Este proceso dará origen a la formación del sistema nervioso central (médula espinal y el encéfalo), y la formación de la cresta neural (NC)(York & McCauley, 2020).

## **CELULAS MADRE EMBRIONARIAS (ESC)**

Luego de la fertilización, se activa una serie de divisiones consecutivas, un proceso de diferenciación y movimiento de células para formar una capa externa trofoblasto y una masa de células internas en los blastocistos ( ICM *por sus siglas en ingles*), con cualidades pluripotentes (Casser *et al.*, 2018). Esta masa de células pluripotentes dará origen a todos los linajes celulares del organismo en desarrollo: endodermo, ectodermo y mesodermo. El aislamiento y la diferenciación de las células madre embrionarias (ESC por sus siglas en ingles), *in vitro* se ilustran esquemáticamente comenzando con la fertilización de un óvulo por un espermatozoide para formar un cigoto (ver figura 1). En la etapa de blastocisto, la ICM se vuelve visible y se puede extraer y cultivar *in vitro* para formar células madre embrionarias (ESC).

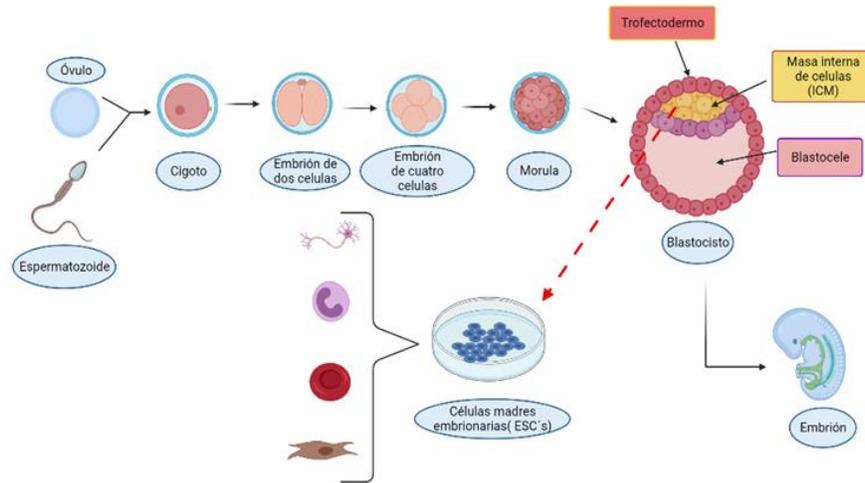


Figura 1. Esquema que representa cómo se derivan las (ESC). Las ESC se derivan de la masa celular interna de un embrión en división en la etapa de blastocisto y se cultivan en el laboratorio en medios nutritivos (imagen modificada de van Holde & Zlatanova, 2018). Realizada usando la plataforma Biorender.

### **RED REGULADORA DE GENES (GRN): FACTORES DE TRANSCRIPCIÓN, EPIGENÉTICA Y DIFERENCIACIÓN DE CÉLULAS EMBRIONARIAS.**

El entender cómo se puede controlar la diferenciación y la autorrenovación de las células madre, es prioritario en medicina regenerativa. El mantenimiento de las poblaciones de células madre emplea diversos mecanismos intrincados, comprometidos con el equilibrio de la división y diferenciación celular, mediante la utilización de factores reguladores intrínsecos y extrínsecos. Algunos autores sugieren que la diferenciación de ESC implica mecanismos “estocásticos”, (Moris *et al.*, 2016). Sin embargo la evidencia del modelo “determinista” de diferenciación celular, también está respaldada por hallazgos experimentales, e incluso se cree que puede trazarse cuantitativamente para proporcionar un modelo predictivo de diferenciación (Yunusova *et al.*, 2017); pero esto no será discutido en esta revisión.

Lo que sí es importante dejar en claro, es que a nivel molecular las ESC expresan un conjunto de genes característicos del estado pluripotente, incluidos factores de transcripción como Oct-3/4, Sox2 y Nanog que, al ser expresados, permiten la indiferenciación, la autorrenovación y la potencia celular (Kashyap *et al.*, 2009; Mistri *et al.*, 2020; Sedaghat *et al.*, 2019; Tremble *et al.*, 2020). La regulación de estos Factores de Transcripción (TF), sumado a los factores de regulación, determinan la diferenciación de linajes celulares, al inhibir o potenciar la expresión en las células pluripotentes embrionarias (Zhang *et al.*, 2019; Ferreira *et al.*, 2018; Taupin, 2010; Wang *et al.*, 2006).

## **PLURIPOTENCIA DE LAS CÉLULAS MADRE**

El mantenimiento de la pluripotencia está dirigido por un conjunto de interacciones entre los factores de transcripción (TF), que se encuentran dentro de una misma red específica (ver fig.2). Depende principalmente de tres TF, a saber, Oct4 (también conocido como Pou5f1), Sox2 (SRY-Box2) y Nanog, que inducen los genes necesarios para preservar el estado indiferenciado y reprimir otros TF involucrados en la diferenciación (Kashyap *et al.*, 2009; Niwa *et al.*, 2016; Li & Izpisua Belmonte, 2018; Tremble *et al.*, 2020). La eliminación de cualquiera de estos TF conduce a la letalidad del embrión y la pérdida de pluripotencia (Ferreira *et al.*, 2018; Fogarty *et al.*, 2017; Sedaghat *et al.*, 2019).

Mientras tanto, el factor KLF (Kruppel-like factor, también llamado Gklf o Gut-enriched Kruppel-like factor), tiende a regular la autorrenovación en las ESC. Debido a que KLF2 / KLF4 / KLF5 controlan la autorrenovación al regular la expresión de genes implicados en la autorrenovación (Oct4, Sox2, Myc y Tcl-1) y pluripotencia (Nanog, Esrrb y Oct4), facilitando la formación de bucles autorreguladores entre Oct4, Sox2, Nanog y Sall4 en ESC (Rivron *et al.*, 2018). KLF4 regula la expresión génica a través de la activación o represión transcripcional por medio de la unión de ADN o interacciones proteína- proteína (Ferreira *et al.*, 2018).

## FACTORES EXTRÍNSECOS DE REGULACIÓN CELULAR

La GRN está compuesta por factores intrínsecos que definen o controlan las etapas del desarrollo, esto incluye los reguladores transcripcionales. No obstante, el estado de diferenciación de las células madre se logra mediante la interacción de señales externas, y factores extracelulares, cuya interacción da lugar a la estimulación de la maquinaria genética (Pandima Devi *et al.*, 2017; Rathnam *et al.*, 2017; Smith *et al.*, 2018). Algunos de los factores extrínsecos que regulan las decisiones sobre el destino celular en embriones, incluyen proteínas morfogénicas del hueso (BMP), Hedgehog (HH), factores de crecimiento de fibroblastos (FGF) y Wnt, además de moléculas pequeñas como el ácido retinoico.

El dímero de Oct4 y Sox2 activan el gen FGF4 ( ver figura 2), Mediante mecanismos de regulación que conectan factores intrínsecos y extrínsecos (Boroviak *et al.*, 2014; Dey & Evans, 2011) . En apoyo de la regulación extrínseca, el gen de FGF4, se expresa en la masa celular interna del blastocisto y más tarde en distintos tejidos embrionarios (Nandi, Lim *et al.*, 2018); pero es transcripcionalmente silencioso en el células adultos (Lodish *et al.*, 2018; Pan *et al.*, 2002).

Los FGF comprenden una familia de 22 polipéptidos, estructural y funcionalmente relevantes en los procesos del desarrollo embrionario, diferenciación celular y proliferación de diferentes tipos de células madre específicas de tejido, incluidas células madre hematopoyéticas, mesenquimales, neurales, espermatogoniales, entre otras (Gudi *et al.*, 2011). FGF2, FGF4, FGF6 y FGF9, influyen en las PSC al inducir un alto nivel de expresión de NANOG. Se cree que FGF2 y FGF4 son esenciales para mantener las células madre de ratón y humanas en el estado indiferenciado (Mossahebi-Mohammadi *et al.*, 2020).

La señalización autocrina de FGF4 induce la activación secuencial de las quinasas reguladas por mitógenos MEK1 / 2 y ERK 1 / 2. Varios mecanismos antagonizan esta vía de señalización, lo que permite la autorrenovación de ESC en ausencia de inhibición de MEK por PD0325901, lo que sugiere que la suspensión de las cascadas de señalización intracelular también es suficiente para preservar la pluripotencia (Son *et al.*, 2020).

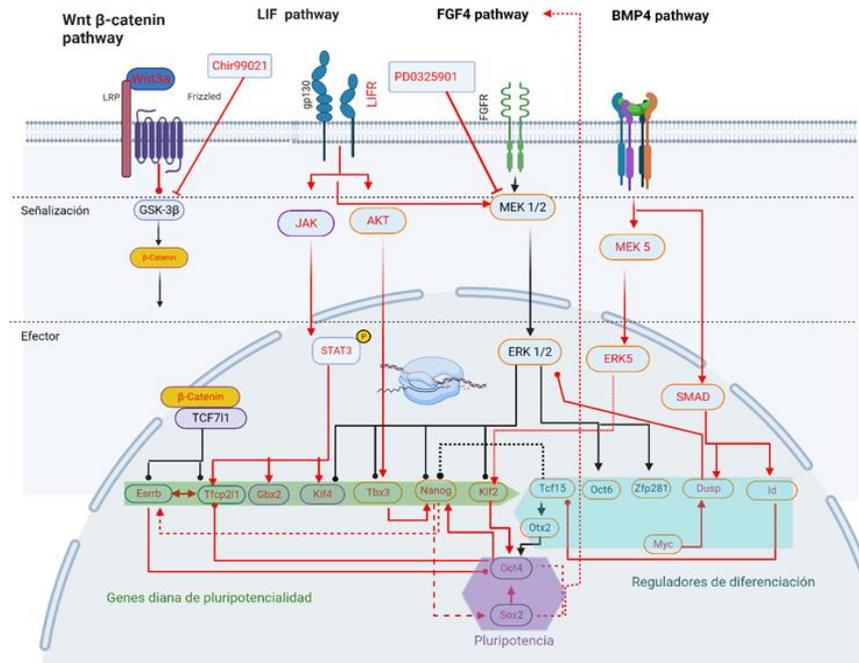


Figura 2. Vías de señalización que regulan la biología de las células madre. Esquemas simplificados de las vías de señalización de BMP, LIF, FGF y Wnt que funcionan individualmente o en combinación para controlar la autorrenovación de células madre frente a la diferenciación. Diagrama de red de mecanismos en autorrenovación (rojo) y diferenciación (negro). Las flechas indican activación y las líneas con cabeza de círculo significan inhibición. El cableado de TF de pluripotencia general, reguladores de diferenciación y la autorrenovación. Se adoptó de las Refs. (Harrison et al., 2017; Liang & Liu, 2018; Rivron et al., 2018; Son et al., 2020; Veneri et al., 2020). Diagrama realizado en la plataforma Biorender.

La vía de señalización Wnt está relacionada a varios procesos celulares del desarrollo embrionario, incluyendo la transición de las ESC a través de períodos de inactividad, proliferación y diferenciación. El resultado de la señalización también es dependiente de las interacciones de la vía Wnt con otras cascadas de señalización como las desencadenadas por el leukemia inhibitory factor (LIF) (Veneri *et al.*, 2020), FGF (J. Lee *et al.*, 2020; Mossahebi-Mohammadi *et al.*, 2020) y BMP (Senft *et al.*,

2019). La inhibición química de la glucógeno sintetasa quinasa 3 (GSK3), por el derivado de amino- pirimidina Chir99021 (que es un ligando análogo a Wnt), en las ESC conduce a la estabilización de la  $\beta$ -catenina y la consiguiente inhibición del represor transcripcional Tcf711, lo que genera la respuesta de autorrenovación. En las ESC, Tcf711 modula negativamente la expresión de genes pluripotentes y prepara el epiblasto para la transición a la especificación del linaje. Se ha informado que Tcf711 puede funcionar independientemente de la  $\beta$ -catenina durante la gastrulación y la formación del eje hipotálamo pituitario. (Liang & Liu, 2018; Murphy *et al.*, 2016).

El factor LIF, es esencial para la derivación y el mantenimiento de las ESC en presencia de suero (Baker & Pera, 2018), se une al receptor LIF (LIFR), localizado en la membrana celular, activando STAT3 (transductor de señal y activador de transcripción 3) por medio de fosforilación, lo que lleva a su translocación nuclear y activación de los genes diana Tfc2L1, KLF4 y Gbx2 (Almalki & Agrawal, 2017; Li *et al.*, 2018; Senft, Bikoff *et al.*, 2019).

Las proteínas morfogenéticas óseas (BMP), trabajan en conjunto con LIF para promover la autorrenovación de las ESC. Smad1, en interacción con BMP, se fosforilará y los miembros de la familia de genes Id (inhibidor de la diferenciación), que son efectores de la ruta de las BMP, son activados (Harrison *et al.*, 2017).

## **DIFERENCIACIÓN CELULAR MEDIADA POR SEÑALIZACIÓN EXTRÍNSECA**

La señalización mediada por proteínas Wnt es fundamental para el mantenimiento de la pluripotencia (Biechele *et al.*, 2013), pero a su vez la diferenciación de las SC en las diferentes capas germinales requiere también modulación de la cascada Wnt/ $\beta$ -catenina, para dirigir las células hacia el linaje del endodermo o la inactivación para el neuroectodermo. El knockout del gen Wnt1 resulta en la pérdida del mesencéfalo por lo que se sugiere que los Wnts son candidatos para la autorrenovación de las células madre neurales.

La mutación de Wnt3a permite observar un hipocampo subdesarrollado debido a la poca proliferación. Mientras que la expresión exógena de Wnt3a induce un incremento de la neurogénesis en el hipocampo, al igual que BMP2 y BMP4. esto indica que la señalización BMP dependiente de la señalización WNT son esenciales en la especificación del destino neuronal.

Se ha demostrado que FGF es el impulsor extrínseco celular predominante de la progresión del desarrollo en el embrión temprano y las ESC. La ablación de FGF4 antagoniza la inducción neural y mesodérmica en las células madre embrionarias, interrumpiendo la expresión de los marcadores de pluripotencia Oct-3/4, Nanog y Rex1, lo que indican que la señalización de FGF4-ERK1 / 2 influye en la diferenciación neural y mesodérmico en el desarrollo del embrión (Cho *et al.*, 2019; Smith *et al.*, 2018). El FGF1 se expresa en gran medida en el cerebro, la retina, la matriz ósea y los osteosarcomas, así como en el tejido cardíaco. En contraste, el FGF2 se encuentra abundantemente en muchos tejidos, incluida la glándula pituitaria, el tejido neural, la corteza suprarrenal, el cuerpo lúteo y la placenta.

## **REGULADORES DE LA DIFERENCIACIÓN CELULAR**

Durante la diferenciación celular, se silencian los genes encargados de mantener la pluripotencia, mientras se van induciendo los genes que codifican para las proteínas específicas del tejido correspondiente que dictan el tipo celular maduro (Ferreira *et al.*, 2018).

A nivel molecular, estudios recientes (Harrison *et al.*, 2017; Steinhart & Angers, 2018), han demostrado que la  $\beta$ -catenina de la ruta Wnt juega un importante papel regulador en el proceso de diferenciación de las células neuroprogenitoras que migran desde las SVZ hasta los bulbos olfatorios. Como ya se describió previamente, la liberación de  $\beta$ -catenina disminuye conforme las células neuroprogenitoras entran en un proceso de diferenciación durante la neurogénesis embrionaria. Estudios ratones transgénicos deficientes en Wnt (Buechler & Salinas, 2018; Jin *et al.*, 2020), con han demostrado este mismo comportamiento tanto en la zona subventricular (SVZ), como en la migración de estas células a los bulbos olfatorios. Esto parece corroborar la idea de que las células madre adultas del Sistema Nervioso Central (CNS), son capaces de

regular el mantenimiento de su propia capacidad auto regenerativa a través de la secreción de diversos tipos de factores que estarían actuando como señales autocrinas (Z. Xu *et al.*, 2016) y paracrinas (Sharma & Bhonde, 2020), entre el SVZ y los bulbos olfatorios. Del mismo modo a lo observado en la SZV, se ha descrito la acción esencial de Wnt y  $\beta$ -catenina en el mantenimiento de la neurogénesis adulta en la SGZ del hipocampo.

En el caso de las proteínas Id, son polipéptidos pequeños con motivos tipo hélice-bucle-hélice (HLH), que participan en la dimerización con otras proteínas HLH. Sirven como inhibidores dominantes negativos de las proteínas E, al formar heterodímeros no funcionales, las cuales regulan el ciclo celular. En otras palabras, las proteínas Id son capaces de bloquear la actividad de los factores de transcripción de la proteína E, necesarios para el desarrollo, lo que sugiere que las proteínas Id tengan una función en el mantenimiento de las células madre inhibiendo la diferenciación.

Se han reportado subconjuntos de astrocitos GFAP +Id1, que poseen características de células madre, los cuales se pueden dividir asimétricamente para producir una célula madre con altos niveles de Id1 y una célula diferenciada con niveles más bajos de Id1. Las proteínas Id2 e Id4, bloquean el compromiso de los oligodendrocitos, inhibiendo a las proteínas OLIG1 y OLIG2. Este mecanismo podría retener la capacidad de autorrenovación de forma similar al que usan las células madre neurales (NSC), regulando el compromiso del linaje y evitando que se diferencien prematuramente.

Las diferentes células que constituyen el nicho neurogénico DG regulan la actividad de las células madre secretando moléculas de señalización difusibles, que representan la mayoría de las señales extracelulares que regulan la neurogénesis. Entre ellos, el papel de las BMP y la señalización de WNT está bien establecido (York & McCauley, 2020; Breton *et al.*, 2021; Long *et al.*, 2021). Por lo tanto, la señalización de WNT producida por NSC y astrocitos en la SGZ puede regular diferentes etapas de la neurogénesis adulta. Es bien sabido que la señalización de WNT promueve la proliferación y la autorrenovación de NSC, mientras que los inhibidores de señalización de WNT endógenos,

como sFRP3 y Dkk1, promueven la inactividad de las células madre y controlan el tiempo de maduración de las neuronas granulares del recién nacido.

## **LA EPIGENÉTICA DURANTE LA DIFERENCIACIÓN Y EL DESARROLLO DE LAS CÉLULAS MADRE**

El epigenoma, consta de varios mecanismos reguladores, que determinan el perfil de expresión génica de las células, entre ellas los factores epigenéticos, como acetilación y metilación de las histonas, mediante las enzimas: HAT (Histona Acetyl Transferasa), HDAC (Histonas Des-Acetiladas) y metiltransferasas de ADN (DNMT).

Las ESC experimentan acetilación al inicio del proceso de diferenciación en la histona 3 lisina 9 (H3K9) la cual es una modificación activa relacionada con la eucromatina. Su nivel es casi indetectable en la ESC y aumenta cuando las células abandonan el estado indiferenciado (L. Xu & Jiang, 2020). Esto conlleva a un aumento de la expresión génica; pero al encontrarse en un estado de diferenciación temprana, las células aún no se encuentran comprometidas a un linaje celular (Sharma & Bhonde, 2020).

Las ESC están marcadas por dominios de cromatina bivalentes (Baker & Pera, 2018), que contienen marcas de modificación de histonas tanto activantes (H3K4me3), como represivas (H3K9me3; H3K27me3). Estos dominios de cromatina bivalentes se resuelven posteriormente durante el proceso de diferenciación en regiones que contienen solo un tipo de estas marcas de histonas, lisina 4 (K4), trimetilada en regiones transcripcionalmente activas y lisina 27 (K27), trimetilada en regiones transcripcionalmente reprimidas. Además, durante la diferenciación, se activan reguladores de genes específicos de linaje (Baker & Pera, 2018; van Holde & Zlatanova, 2018; Moreno & Mobbs, 2017).

La metilación del ADN (ADN-me) desempeña un papel importante en la diferenciación de las ESC, regulando la expresión de genes y facilitando la especificación del linaje (Aiba *et al.*, 2017; Kraushaar & Zhao, 2013). En el caso de las células madre embrionarias, el genoma está hipo metilado (pérdida del grupo metilo en el nucleótido 5-

metilcitosina), mientras que los niveles globales de metilación generalmente aumentan a medida que las células se comprometen con un cierto linaje y se diferencian; regulando negativamente los genes encargados de la pluripotencia, mediante la metilación de las regiones promotoras (Sedaghat *et al.*, 2019; Shi *et al.*, 2013)

## **EL CICLO CELULAR EN LA PROLIFERACIÓN DE CÉLULAS MADRE, PLURIPOTENCIA Y DIFERENCIACIÓN**

Las células madre pluripotentes (PSC), incluidas las ESC y las células madre pluripotentes inducidas (iPSC), se caracterizan por su capacidad para retener un amplio potencial de diferenciación, luego de períodos prolongados de cultivo. Esta propiedad de autorrenovación se mantiene mediante controles del ciclo celular que mantienen la capacidad proliferativa a largo plazo (Mistri *et al.*, 2020; Sharma & Bhonde, 2020). Estas poblaciones autorrenovables se clasifican como 'pluripotentes' mientras conservan la capacidad de generar las tres capas germinales embrionarias.

El ciclo celular se puede dividir en cuatro fases, cada una siendo un paso esencial en la división celular y por ende la proliferación de ESC: GAP 1 (G1), síntesis de ADN (S), GAP 2 (G2) y mitosis (M). Dependiendo del entorno mitogénico, las células que atraviesan la fase G1 activan un programa que dará como resultado la división celular o entran en un estado de reposo G0 (Alam *et al.*, 2018).

La maquinaria del ciclo celular, que opera en el núcleo celular, organiza la división celular y los componentes clave de esta maquinaria que son proteínas llamadas ciclinas. Estas se unen, activan y proporcionan especificidad de sustrato a sus socios catalíticos conocidos como quinasas dependientes de ciclina (CDK) (Boyer & Cheng, 2008). A nivel molecular, la estimulación de las células con factores que promueven el crecimiento (Cell Growth Factors, en inglés), tales como el insuline-like growth factor (IGF), da como resultado la regulación positiva de las ciclinas de tipo D, activando las quinasas dependientes de ciclina CDK4 y CDK6 (Savatier & Malashicheva, 2004).

En un ciclo celular convencional, los complejos de ciclina D-CDK4 / 6 y sus quinasas asociadas (CDK2, CDK1 y CDK3) fosforilan e inactivan la proteína RB1 del retinoblastoma, relacionadas con pRB1 (Lee & Kaeberlein, 2018; Liu *et al.*, 2019; Rieckher *et al.*, 2018). Esto conduce a la activación o represión de los factores de transcripción E2F, que luego transactiva los genes necesarios para la entrada y progresión de las células en la fase “S” (Lodish *et al.*, 2018; Rivron *et al.*, 2018).

Las células pluripotentes, poseen altas tasas de proliferación provocada por un ciclo celular modificado que permite a las células pasar rápidamente de la fase S, a la división celular reduciendo el tiempo entre las fases intermedias (Liu *et al.*, 2019). La mayoría de los reguladores o moléculas que regulan el ciclo celular somático están inhibidos o muestran alteraciones (ver cuadro 1), lo que permite que la célula pluripotente evite los puntos de control del ciclo celular hasta ahora conocidos en las células somáticas (Boyer & Cheng, 2008; Park *et al.*, 2019).

Cuadro 1. Diferencias entre biomoléculas del ciclo celular entre células somáticas y SC

Molécula del ciclo celular	Células Somáticas	Células madre embrionarias	Referencias
Cdk2	Permite la transición de G1 a S	Crítico para el mantenimiento de las células madre embrionarias y considerado el Cdk principal	(Boyer & Cheng, 2008; Cheng & Scadden, 2014)
Cdk4	Crítico para el desarrollo de células $\beta$	No expresado en células madre embrionarias	(Ding <i>et al.</i> , 2020)
Cdk6	No expresado	Expresado a altos niveles	(Zaveri & Dhawan, 2018)
Ciclina D1	Expresado a altos niveles	Expresado en niveles bajos	(El-Badawy & El-Badri, 2016)
Ciclina D2	Crítico para el desarrollo y altamente expresado	No expresado en células madre embrionarias	(Ding <i>et al.</i> , 2020)
Ciclina E	Expresado, pero sin importancia	Crítico para mantener el estado pluripotente de las células madre embrionarias	(Savatier & Malashicheva, 2004; Zaveri & Dhawan, 2018)

OCT4, SOX2 y NANOG son componentes clave de la red reguladora central que gobierna la pluripotencia de las células madre (George *et al.*, 2019). La expresión de NANOG está directamente regulada por OCT4 y SOX2, y al mismo tiempo Nanog regula Oct4 y Sox2 (Fogarty *et al.*, 2017). Se han descrito interacciones entre la red de pluripotencia y el ciclo celular en las ESC. OCT4 y NANOG, tienen funciones en el control de la transición a través del ciclo celular. Incluso, se demostró que NANOG regula directamente los genes necesarios para la transición de la fase G1 a la S, como CDK6 y CDC25A, y acelera la G1, regulando la ciclina E y ciclina D. Se ha propuesto una función similar para OCT4, que se requiere para la transición de mESC a través de la fase G1 y que regula p21.

### **COMPONENTES DEL NICHU NEUROGÉNICO DEL HIPOCAMPO**

Los factores metodológicos parecen contribuir a las discrepancias entre los estudios que describen la presencia o ausencia de neurogénesis en la circunvolución dentada (DG) del adulto humano (Boldrini *et al.*, 2018; Sorrells *et al.*, 2018). Se necesitarán investigaciones futuras que utilicen diferentes enfoques para comprender cómo se generan las células granulares (CG) nacidas en adultos. Estudios recientes describen que la neurogénesis del hipocampo humano persiste durante la novena década de la vida y se asocia con el estado cognitivo en pacientes con Alzheimer, lo que proporciona evidencia de la potencial relevancia de este proceso para muchos trastornos humanos (Moreno-Jimenez *et al.*, 2019; Tobin *et al.*, 2019).

La característica de las células madre neurales (NSC) es su capacidad para multiplicarse mediante divisiones simétricas y asimétricas; lo que permite el mantenimiento de la reserva de células madre y da lugar a diferenciación de tipos de células del sistema nervioso central (SNC). Es necesario un estricto control del espacio temporal de la diferenciación del NSC, ya que sus alteraciones se asocian a disfunciones neurológicas y, en algunos casos, a la muerte. En este trabajo se revisa el estado actual de los mecanismos moleculares que regulan la transcripción en las NSC, organizados según si el origen del estímulo que desencadena la cascada molecular en el SNC es interno

(factores intrínsecos) o si es el resultado del microambiente que rodea el SNC (factores extrínsecos).

La creciente evidencia muestra un papel importante para las NSC como reguladores de su propio nicho, influyendo en el desarrollo de su progenie en diferentes etapas neurogénicas. VEGF, neurotrofina-3 (NT3), pleiotrofina (PTN) y BDNF son algunos de los factores liberados por las NSC (Viciomini *et al.*, 2020). Dando a entender que el nicho neuroprogenitor del hipocampo adulto es un microambiente especializado y dinámico, que involucra componentes celulares y no celulares del DG. Esto indica que, las células y las señales producidas por ellas pueden regular el proceso oligodendrogenico actuando a diferentes niveles desde la proliferación hasta la integración funcional (Toni & Schinder, 2015; Toda *et al.*, 2019).

## **DIFERENCIACIÓN DE CÉLULAS MADRE A OLIGODENDROCITOS**

Las células neurales surgen de la capa germinal ectodérmica (Baker & Pera, 2018). Este proceso requiere que el ectodermo embrionario naciente, reciba una señal positiva de un grupo especializado de células mesodérmicas dorsales, denominadas “*organizador*”, la cual guían a las células ectodérmicas adyacentes a adoptar un destino neural. Es conocido que las moléculas de señalización secretadas por el tejido organizador, tales como noggin (Harrison *et al.*, 2017; Izrael *et al.*, 2007), ejercen potentes efectos neutralizantes. Sin embargo, más tarde se descubrió que los efectos de neurogénesis de estos factores dependían de interacciones inhibitoras con proteínas morfogénicas óseas (BMP), de modo que la neurogénesis se reprime de forma proactiva (Barros *et al.*, 2014; Mercurio *et al.*, 2019).

Las células progenitoras de oligodendrocitos (OPC) son subtipos de células gliales responsables de la regeneración de la mielina. Los oligodendrocitos (OL) se originan a partir de OPC y son las células mielinizantes del sistema nervioso central (SNC). Estas células están presentes en la materia blanca y la materia gris del SNC adulto (Barros *et al.*, 2014; Grochowski *et al.*, 2018) ; la caracterización de la trayectoria de desarrollo de las OPC es de gran interés dada la importancia de estas células en el proceso de mielinización. Sin

embargo, los estudios del desarrollo de OPC humano siguen estando limitados por la disponibilidad de muestras de células completas y material que abarca un amplio rango de edad, incluido el momento pico en el proceso de mielinización; donde una vez que las OPC se diferencian en OLG maduras, extienden múltiples procesos que envuelven individualmente los axones y luego proceden a generar las capas concéntricas de la membrana celular modificada que componen la mielina (Chien, 2011; Kanton *et al.*, 2019).

Los estudios sobre el desarrollo de oligodendrocitos indican que la diferenciación de OPC, sigue una secuencia compleja, estrictamente regulada, de varios pasos con patrones de expresión génica identificables (Baldassarro *et al.*, 2021) y una red reguladora de genes descrita en linajes oligodendrogliales, los cuales incluyen los factores de transcripción Olig2 (Hogg *et al.*, 2010; Lara Vellosillo, 2015; Kanton *et al.*, 2019), Sox10 (Mercurio *et al.*, 2019), Nkx2.2 (Mercurio *et al.*, 2019) y Myrf (Perlman *et al.*, 2020; Weider *et al.*, 2018) como determinantes principales de la diferenciación y mielinización. Olig2 se expresa en el momento de la especificación e induce a Sox10. Una vez inducido, Sox10 contribuye al mantenimiento de la expresión de Olig2 en un bucle de retroalimentación positiva. Sox10 también estimula la expresión de Nkx2.2 e induce Myrf antes del inicio de la diferenciación (Rasband & Peles, 2015).

## **FACTORES SOLUBLES DIFUSIBLES EN OLIGODENDROCITOS.**

La gliogénesis, es una vía de investigación menos explorada pero igual de importante, especialmente la oligodendrogénesis, la creación de nuevos OL, ha surgido como un mecanismo que infiere la plasticidad dependiente de la experiencia en el cerebro adulto y en el desarrollo. Los OL son células gliales del sistema nervioso central que producen mielina, una membrana rica en lípidos que envuelve y aísla los axones (Gupta *et al.*, 2012; Hester & Hood, 2017). La mielina es canónicamente conocida por su papel en la mejora de la velocidad de transmisión neuronal (Song & Dityatev, 2018). Sin embargo, también se ha encontrado que los OL y su mielina asociada regulan la plasticidad. Específicamente, las proteínas de mielina inhiben el brote axonal y se cree que cierran los períodos críticos y cristalizan los circuitos. En el

cerebro adulto, la mielina puede sufrir una reorganización considerable en respuesta a la actividad neuronal; esta mielinización dependiente de la experiencia contribuye en última instancia a la función motora, el aprendizaje espacial y motor, el comportamiento social y el afecto emocional. La plasticidad de la mielina en el sistema nervioso central se produce a través de alteraciones de la mielina existente. la adición de nuevos segmentos de mielina de OL existentes, y la incorporación de nuevos OL y mielina a través de oligodendrogénesis.

La evidencia reciente sugiere que los cambios en la mielinización, incluida la hipermielinización y la hipomielinización, también pueden desempeñar un papel en numerosas enfermedades neurológicas y psiquiátricas (Breton *et al.*, 2021; Long *et al.*, 2021; McPhie *et al.*, 2018). Por lo tanto, proteger la mielina y promover la remielinización es crucial para crear un tratamiento contra una amplia gama de trastornos. Comprender la regulación de la oligodendrogénesis y la plasticidad de la mielina en contextos de enfermedades es, por lo tanto, fundamental para el desarrollo de nuevas dianas terapéuticas. En especial el estudio de hormonas involucradas en la regulación de la oligodendrogénesis en condiciones fisiológicas.

## **LAS ENFERMEDADES DESMIELINIZANTES, UN PROBLEMA SIN RESOLVER EN BIOMEDICINA**

La biología de la mielina, como también las enfermedades desmielinizantes siguen siendo una interrogante sin resolver a fecha de hoy en el ámbito de la biomedicina. Las enfermedades desmielinizantes corresponden a cualquier afección que provoque un daño en la vaina de mielina que rodea las fibras nerviosas del cerebro, los nervios ópticos y la médula espinal. Cuando la vaina de mielina se daña, los impulsos nerviosos se ralentizan o incluso se detienen, causando problemas neurológicos. La esclerosis múltiple es la enfermedad desmielinizante más común del sistema nervioso central. La esclerosis múltiple y otras enfermedades desmielinizantes suelen provocar pérdida de visión, debilidad muscular, rigidez y espasmos musculares, pérdida de coordinación, cambios en la sensibilidad, dolor y cambios en la función de la vejiga y el intestino (Popescu *et al.*, 2012). Actualmente, no existe una cura para las enfermedades desmielinizantes y su avance, y los síntomas son diferentes para cada persona. El tratamiento de estas

patologías se centra en: minimizar los efectos de los ataques, modificar el curso de la enfermedad y manejar de los síntomas; sin la existencia de diagnóstico anticipado, ni tampoco de tratamiento terapéutico. Por ello, es de gran importancia la búsqueda de nuevos abordajes que permitan la comprensión de los procesos de mielinización en el sistema nervioso central.

Durante mucho tiempo se ha pensado que el sistema nervioso de los mamíferos adultos es incapaz de regenerarse después de una lesión. Sin embargo, los avances recientes en nuestra comprensión de la biología de las células madre y la neurociencia han abierto nuevas vías de investigación para desarrollar tratamientos potenciales para enfermedades neurodegenerativas incurables y lesiones neuronales. Debido a que las células madre tienen la capacidad de autorrenovarse y generar células diferenciadas, la terapia de reemplazo de células madre para los trastornos y lesiones del sistema nervioso central y periférico, se esfuerza por repoblar el tejido neural afectado con neuronas y otras células neurales.

La disfunción de los oligodendrocitos se ha considerado fundamental en muchos trastornos neurológicos y psiquiátricos, como la esclerosis múltiple y la esquizofrenia ((Noh *et al.*, 2017). Por lo tanto, la evidencia sugiere que los oligodendrocitos son primordiales para el mantenimiento de la función cerebral y pueden convertirse en objetivos potenciales para enfoques terapéuticos en condiciones patológicas.

El incremento en los estudios de las células madre neurales y el mecanismo de las moléculas implicadas en el proceso de diferenciación glial ha promovido la búsqueda de estrategias terapéuticas para enfermedades neurodegenerativas, tomando como diana varias vías metabólicas como las vías de traducción de señales de Sonic Hedgehog (Shh), Notch, Wnt y Bone Morphogenetic Proteins (BMP), y la participación de algunos factores de transcripción como Oct4, Sox. y Nanog, que son responsables de regular la pluripotencialidad en las NSC.

## CONCLUSIONES

El cómo los embriones son formados y se desarrollan para formar un organismo funcional ha sido uno de los tantos cuestionamientos milenarios que se hacen tanto los científicos como el público en general. El avance en la biología molecular y celular en las últimas décadas han ayudado a desentrañar cómo se produce el desarrollo embrionario y postembrionario, a partir de la fertilización del óvulo; para dar lugar a las complejidades de un organismo multicelular en el que existen y se comunican entre sí todos los tipos de células diferentes, cada una con funciones especializadas. En este artículo se menciona de manera resumida, algunos de los mecanismos moleculares y estrategias celulares que son necesarios para la formación del embrión y por consiguiente la generación de ESC, que puedan ser utilizadas en prometedoras terapias regenerativas en enfermedades relacionadas al sistema nervioso.

## REFERENCIAS

Aiba, T., Saito, T., Hayashi, A., Sato, S., Yunokawa, H., Maruyama, T., Fujibuchi, W., Kurita, H., Tohyama, C., & Ohsako, S. (2017). Methylated site display (MSD)-AFLP, a sensitive & affordable method for analysis of CpG methylation profiles. *BMC Molecular Biology*, *18*(1), 1–11. <https://doi.org/10.1186/s12867-017-0083-2>

Alam, P., Al-yousef, H. M., Siddiqui, N. A., Alhowiriny, T. A., Alqasoumi, S. I., Amina, M., Hassan, W., Hassan, B., Abdelaziz, S., & Abdalla, R. H. (2018). Anticancer activity and concurrent analysis of ursolic acid,  $\beta$ -sitosterol and lupeol in three different Hibiscus species (aerial parts) by validated HPTLC method. *Saudi Pharmaceutical Journal*, *26*(7), 1060–1067.

<https://doi.org/10.1016/j.jsps.2018.05.015>

Almalki, S. G., & Agrawal, D. K. (2017). Key Transcription Factors in the Differentiation of Mesenchymal Stem Cells. *Physiology & Behavior*, *176*(10), 139–148.

<https://doi.org/10.1016/j.diff.2016.02.005.Key>

Baker, C. L., & Pera, M. F. (2018). Capturing Totipotent Stem Cells. *Cell Stem Cell*, 22(1), 25–34. <https://doi.org/10.1016/j.stem.2017.12.011>

Baldassarro, V. A., Giardino, L., & Calzà, L. (2021). *Oligodendrocytes in a dish for the drug discovery pipeline : the risk of oversimplification*. 16(2), 291–293.

Ballabeni, A., Park, I. H., Zhao, R., Wang, W., Lerou, P. H., Daley, G. Q., and Kirschner, M. W. (2011). Cell cycle adaptations of embryonic stem cells. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(48), 19252–19257. <https://doi.org/10.1073/pnas.1116794108>

Barros, C. S., Franco, S. J., Müller, U., Lu, P., Takai, K., Weaver, V. M., Hynes, R. O., Naba, A., Huttenlocher, A., Horwitz, A. R., Geiger, B., Yamada, K. M., Adams, J. C., Lawler, J., Munger, J. S., & Sheppard, D. (2014). Extracellular Matrix : Functions in the Nervous System. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 1(25). <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a005108>

Boroviak, T., Loos, R., Bertone, P., Smith, A., & Nichols, J. (2014). The ability of inner-cell-mass cells to self-renew as embryonic stem cells is acquired following epiblast specification. *Nature Cell Biology*, 16(6), 513–525. <https://doi.org/10.1038/ncb2965>

Boyer, M. J., & Cheng, T. (2008). The CDK inhibitors: Potential targets for therapeutic stem cell manipulations? *Gene Therapy*, 15(2), 117–125. <https://doi.org/10.1038/sj.gt.3303064>

Breton, J. M., Long, K. L. P., Barraza, M. K., Perloff, O. S., & Kaufer, D. (2021). Hormonal regulation of oligodendrogenesis II: Implications for myelin repair. *Biomolecules*, 11(2), 1–26. <https://doi.org/10.3390/biom11020290>

Buechler, J., & Salinas, P. C. (2018). Deficient Wnt Signaling and Synaptic Vulnerability in Alzheimer’s Disease: Emerging Roles for the LRP6 Receptor. *Frontiers in Synaptic Neuroscience*, 10(October), 1–10. <https://doi.org/10.3389/fnsyn.2018.00038>

Casser, E., Israel, S., Schlatt, S., Nordhoff, V., & Boiani, M. (2018). Retrospective analysis: Reproducibility of interblastomere differences of mRNA expression in 2-cell stage mouse embryos is remarkably poor due to combinatorial mechanisms of blastomere diversification. *Molecular Human Reproduction*, 24(7), 388–400. <https://doi.org/10.1093/molehr/gay021>

Casser, E., Israel, S., Witten, A., Schulte, K., Schlatt, S., Nordhoff, V., and Boiani, M. (2017). Totipotency segregates between the sister blastomeres of two-cell stage mouse embryos. *Scientific Reports*, 7(1), 1–15. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08266-6>

Cheng, T., & Scadden, D. T. (2014). Cell Cycle Regulators in Stem Cells. In *Essentials of Stem Cell Biology: Third Edition* (Third Edit). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409503-8.00008-1>

Chien, C. (2011). Neural Stem Cell Markers : Cytoskeletons. *Medicine*.

Cho, I. K., Hunter, C. E., Ye, S., Pongos, A. L., & Chan, A. W. S. (2019). Combination of stem cell and gene therapy ameliorates symptoms in Huntington's disease mice. *Npj Regenerative Medicine*, 4(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41536-019-0066-7>

Christians, E. S. (2016). *Totipotency continuity from zygote to early blastomeres: a model under revision Michele*.

Dey, D., & Evans, G. R. D. (2011). Generation of induced pluripotent stem (iPS) cells by nuclear reprogramming. *Stem Cells International*, 2011(c). <https://doi.org/10.4061/2011/619583>

Ding, L., Cao, J., Lin, W., Chen, H., Xiong, X., Ao, H., Yu, M., Lin, J., and Cui, Q. (2020). The roles of cyclin-dependent kinases in cell-cycle progression and therapeutic strategies in human breast cancer. In *International Journal of Molecular Sciences* (Vol. 21, Issue 6, pp. 1–28). <https://doi.org/10.3390/ijms21061960>

El-Badawy, A., & El-Badri, N. (2016). The cell cycle as a brake for  $\beta$ -cell regeneration from embryonic stem cells. In *Stem Cell Research and Therapy* (Vol. 7, Issue 1, pp. 1–9). Stem Cell Research & Therapy.

<https://doi.org/10.1186/s13287-015-0274-z>

Ferreira, A. F., Calin, G. A., Picanço-Castro, V., Kashima, S., Covas, D. T., & de Castro, F. A. (2018). Hematopoietic stem cells from induced pluripotent stem cells - Considering the role of microRNA as a cell differentiation regulator. *Journal of Cell Science*, *131*(4). <https://doi.org/10.1242/jcs.203018>

Fogarty, N. M. E., McCarthy, A., Snijders, K. E., Powell, B. E., Kubikova, N., Blakeley, P., Lea, R., Elder, K., Wamaitha, S. E., Kim, D., Maciulyte, V., Kleinjung, J., Kim, J. S., Wells, D., Vallier, L., Bertero, A., Turner, J. M. A., & Niakan, K. K. (2017). Genome editing reveals a role for OCT4 in human embryogenesis. *Nature*, *550*(7674), 67–73. <https://doi.org/10.1038/nature24033>

George, S. K., Abolbashari, M., Kim, T.-H., Zhang, C., Allickson, J., Jackson, J. D., Lee, S. J., Ko, I. K., Atala, A., & Yoo, J. J. (2019). Effect of Human Amniotic Fluid Stem Cells on Kidney Function in a Model of Chronic Kidney Disease. *Tissue Engineering Part A*, 1–28. <https://doi.org/10.1089/ten.tea.2018.0371>

Grochowski, C., Radzikowska, E., & Maciejewski, R. (2018). Neural stem cell therapy—Brief review. *Clinical Neurology and Neurosurgery*, *173*, 8–14. <https://doi.org/10.1016/j.clineuro.2018.07.013>

Gudi, V., Škuljec, J., Yildiz, Ö., Frichert, K., Skripuletz, T., Moharrehg-Khiabani, D., Voß, E., Wissel, K., Wolter, S., & Stangel, M. (2011). Spatial and temporal profiles of growth factor expression during CNS demyelination reveal the dynamics of repair priming. *PLoS ONE*, *6*(7). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0022623>

Guerra, P., Valbuena, A., Querol-Audí, J., Silva, C., Castellanos, M., Rodríguez-Huete, A., Garriga, D., Mateu, M. G., & Verdager, N. (2017). Structural basis for biologically relevant mechanical stiffening of a virus capsid by cavity-creating or spacefilling mutations. *Scientific Reports*, *7*(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04345-w>  
Gupta, N., Henry, R. G., Strober, J., Kang, S. M., Lim, D. A., Bucci, M., Caverzasi, E., Gaetano, L., Mandelli, M. L., Ryan, T., Perry, R., Farrell, J., Jeremy, R. J., Ulman, M., Huhn, S. L., Barkovich, A. J., & Rowitch,

D. H. (2012). Neural stem cell engraftment and myelination in the human brain. *Science Translational Medicine*, 4(155). <https://doi.org/10.1126/scitranslmed.3004373>

Harrison, S. E., Sozen, B., Christodoulou, N., Kyprianou, C., & Zernicka-Goetz, M. (2017). Assembly of embryonic and extraembryonic stem cells to mimic embryogenesis in vitro. *Science*, 356(6334). <https://doi.org/10.1126/science.aal1810>

Hester, E. M., & Hood, B. A. (2017). Stem Cell Technologies in Neuroscience. In *Cryopreservation, Standardized* (Vol. 126, pp. 193–203). <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-7024-7>

Hogg, K., Etherington, S. L., Young, J. M., Mcneilly, A. S., & Colin, W. (2010). *Hogg 2010 Inhibitor of Differentiation (Id) genes are expressed in the.pdf.* 151(3), 1247–1256. <https://doi.org/10.1210/en.2009-0914.Inhibitor>

Izrael, M., Zhang, P., Kaufman, R., Shinder, V., Ella, R., Amit, M., Itskovitz-eldor, J., Chebath, J., & Revel, M. (2007). *Human oligodendrocytes derived from embryonic stem cells : Effect of noggin on phenotypic differentiation in vitro and on myelination in vivo.* 34, 310–323. <https://doi.org/10.1016/j.mcn.2006.11.008>

Jin, Y. R., Han, X. H., Nishimori, K., Ben-Avraham, D., Oh, Y. J., Shim, J. W., & Yoon, J. K. (2020). Canonical WNT/ $\beta$ -Catenin Signaling Activated by WNT9b and RSPO2 Cooperation Regulates Facial Morphogenesis in Mice. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 8(May), 1–16. <https://doi.org/10.3389/fcell.2020.00264>

Kanton, S., Boyle, M. J., He, Z., Santel, M., Weigert, A., Sanchís-Calleja, F., Guijarro, P., Sidow, L., Fleck, J. S., Han, D., Qian, Z., Heide, M., Huttner, W. B., Khaitovich, P., Pääbo, S., Treutlein, B., & Camp, J. G. (2019). Organoid single-cell genomic atlas uncovers human-specific features of brain development. In *Nature* (Vol. 574, Issue 7778). <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1654-9>

Kashyap, V., Rezende, N. C., Scotland, K. B., Shaffer, S. M., Persson, J. L., Gudas, L. J., and Mongan, N. P. (2009). Regulation of Stem cell

pluripotency and differentiation involves a mutual regulatory circuit of the Nanog, OCT4, and SOX2 pluripotency transcription factors with polycomb Repressive Complexes and Stem Cell microRNAs. *Stem Cells and Development*, 18(7), 1093–1108. <https://doi.org/10.1089/scd.2009.0113>

Kraushaar, D. C., & Zhao, K. (2013). The epigenomics of embryonic stem cell differentiation. *International Journal of Biological Sciences*, 9(10), 1134–1144. <https://doi.org/10.7150/ijbs.7998>

Lara Velloso. (2015). Diferenciación de las células estromales de tejido adiposo de rata para la obtención de células con fenotipo *Oligodendroglial*.

Lee, J., Rabbani, C. C., Gao, H., Steinhart, M. R., Woodruff, B. M., Pflum, Z. E., Kim, A., Heller, S., Liu, Y., Shipchandler, T. Z., & Koehler, K. R. (2020). Hair-bearing human skin generated entirely from pluripotent stem cells. *Nature*, 582(7812), 399–404. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2352-3>

Lee, M. B., & Kaerberlein, M. (2018). Translational Geroscience: From invertebrate models to companion animal and human interventions. *Translational Medicine of Aging*, 2, 15–29. <https://doi.org/10.1016/j.tma.2018.08.002>

Li, M., & Izpisua Belmonte, J. C. (2018). Deconstructing the pluripotency gene regulatory network. *Nature Cell Biology*, 20(4), 382–392. <https://doi.org/10.1038/s41556-018-0067-6>

Liang, R., & Liu, Y. (2018). Tcf7l1 directly regulates cardiomyocyte differentiation in embryonic stem cells. *Stem Cell Research & Therapy*, 9(1), 1–7. <https://doi.org/10.1186/s13287-018-1015-x>

Liu, L., Michowski, W., Kolodziejczyk, A., & Sicinski, P. (2019). The cell cycle in stem cell proliferation, pluripotency and differentiation. *Nature Cell Biology*, 21(9), 1060–1067. <https://doi.org/10.1038/s41556-019-0384-4>

Lodish, Berk, Kaiser, Krieger, Bretscher, & Ploegh. (2018). *Molecular Cell Biology*. <https://doi.org/http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ja309527h>.

Long, K. L. P., Breton, J. M., Barraza, M. K., Perloff, O. S., & Kaufer, D. (2021). Hormonal regulation of oligodendrogenesis i: Effects across the lifespan. *Biomolecules*, *11*(2), 1–36. <https://doi.org/10.3390/biom11020283>

McPhie, D. L., Nehme, R., Ravichandran, C., Babb, S. M., Ghosh, S. D., Staskus, A., Kalinowski, A., Kaur, R., Douvaras, P., Du, F., Ongur, D., Fossati, V., Eggan, K., & Cohen, B. M. (2018). Oligodendrocyte differentiation of induced pluripotent stem cells derived from subjects with schizoprenias implicate abnormalities in development. *Translational Psychiatry*, *8*(1). <https://doi.org/10.1038/s41398-018-0284-6>

Méndez-Maldonado, K., Vega-López, G. A., Aybar, M. J., and Velasco, I. (2020). Neurogenesis From Neural Crest Cells: Molecular Mechanisms in the Formation of Cranial Nerves and Ganglia. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, *8* (August). <https://doi.org/10.3389/fcell.2020.00635>

Mercurio, S., Serra, L., & Nicolis, S. K. (2019). More than just stem cells: Functional roles of the transcription factor Sox2 in differentiated glia and neurons. *International Journal of Molecular Sciences*, *20*(18). <https://doi.org/10.3390/ijms20184540>

Mistri, T. K., Kelly, D., Mak, J., Colby, D., Mullin, N., and Chambers, I. (2020). *Characterisation of interactions between the pluripotency transcription factors Nanog, Oct4 and Sox2*. <https://doi.org/10.1101/2020.06.24.169185>

Miyamoto, N., & Wada, H. (2013). Hemichordate neurulation and the origin of the neural tube. *Nature Communications*, *4*. <https://doi.org/10.1038/ncomms3713>

Moreno, C. L., & Mobbs, C. V. (2017). Epigenetic mechanisms underlying lifespan and age-related effects of dietary restriction and the

ketogenic diet. *Molecular and Cellular Endocrinology*, 455, 33–40. <https://doi.org/10.1016/j.mce.2016.11.013>

Moris, N., Pina, C., & Arias, A. M. (2016). Transition states and cell fate decisions in epigenetic landscapes. *Nature Reviews Genetics*, 17(11), 693–703. <https://doi.org/10.1038/nrg.2016.98>

Mossahebi-Mohammadi, M., Quan, M., Zhang, J. S., & Li, X. (2020). FGF Signaling Pathway: A Key Regulator of Stem Cell Pluripotency. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 8(February), 1–10. <https://doi.org/10.3389/fcell.2020.00079>

Murphy, M., Chatterjee, S. S., Jain, S., Katari, M., & Dasgupta, R. (2016). TCF7L1 Modulates Colorectal Cancer Growth by Inhibiting Expression of the Tumor-Suppressor Gene EPHB3. *Scientific Reports*, 6(June), 1–12. <https://doi.org/10.1038/srep28299>

Nandi, P., Lim, H., Torres-Garcia, E. J., & Lala, P. K. (2018). Human trophoblast stem cell self-renewal and differentiation: Role of decorin. *Scientific Reports*, 8(1), 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-27119-4>

Niwa, H., Nakamura, A., Urata, M., Shirai-Kurabayashi, M., Kuraku, S., Russell, S., & Ohtsuka, S. (2016). The evolutionally-conserved function of group B1 Sox family members confers the unique role of Sox2 in mouse ES cells. *BMC Evolutionary Biology*, 16(1), 1–12. <https://doi.org/10.1186/s12862-016-0755-4>

Noh, H., Shao, Z., Coyle, J. T., & Chung, S. (2017). BBA - Molecular Basis of Disease Modeling schizophrenia pathogenesis using patient-derived induced pluripotent stem cells ( iPSCs ). *BBA - Molecular Basis of Disease*, 1863(9), 2382–2387. <https://doi.org/10.1016/j.bbadis.2017.06.019>

Pan, G. J., Chang, Z. Y. I., Schöler, H. R., & Pei, D. (2002). Stem cell pluripotency and transcription factor Oct4. *Cell Research*, 12(5–6), 321–329. <https://doi.org/10.1038/sj.cr.7290134>

Pandima Devi, K., Rajavel, T., Daglia, M., Nabavi, S. F., Bishayee, A., and Nabavi, S. M. (2017). Targeting miRNAs by polyphenols: Novel therapeutic strategy for cancer. *Seminars in Cancer Biology*, *46*, 146–157. <https://doi.org/10.1016/j.semcancer.2017.02.001>

Perlman, K., Couturier, C. P., Yaqubi, M., Tanti, A., Cui, Q. L., Pernin, F., Stratton, J. A., Ragoussis, J., Healy, L., Petrecca, K., Dudley, R., Srour, M., Hall, J. A., Kennedy, T. E., Mechawar, N., & Antel, J. P. (2020). Developmental trajectory of oligodendrocyte progenitor cells in the human brain revealed by single cell RNA sequencing. *GLIA*, *68*(6), 1291–1303. <https://doi.org/10.1002/glia.23777>

Pimentel-Parra, G. A., & Murcia-Ordoñez, B. (2017). Células madre, una nueva alternativa médica. *Perinatología y Reproducción Humana*, *31*(1), 28–33. <https://doi.org/10.1016/j.rprh.2017.10.013>

Ramalho-Santos, M., & Willenbring, H. (2007). On the Origin of the Term “Stem Cell.” *Cell Stem Cell*, *1*(1), 35–38. <https://doi.org/10.1016/j.stem.2007.05.013>

Rasband, M. N., & Peles, E. (2015). *The Nodes of Ranvier : Molecular Assembly and Maintenance*. 1–16.

Rathnam, C., Chueng, S. T. D., Yang, L., & Lee, K. B. (2017). Advanced gene manipulation methods for stem cell theranostics. *Theranostics*, *7*(11), 2775–2793. <https://doi.org/10.7150/thno.19443>

Rieckher, M., Markaki, M., Princz, A., Schumacher, B., & Tavernarakis, N. (2018). Maintenance of Proteostasis by P Body-Mediated Regulation of eIF4E Availability during Aging in *Caenorhabditis elegans*. *Cell Reports*, *25*(1), 199–211.e6. <https://doi.org/10.1016/j.celrep.2018.09.009>

Rivron, N. C., Frias-Aldeguer, J., Vrij, E. J., Boisset, J. C., Korving, J., Vivié, J., Truckenmüller, R. K., Van Oudenaarden, A., Van Blitterswijk, C. A., & Geijsen, N. (2018). Blastocyst-like structures generated solely from stem cells. *Nature*, *557*(7703), 106–111. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0051-0>

Savatier, P., & Malashicheva, A. (2004). Cell-Cycle Control in Embryonic Stem Cells. In *Handbook of Stem Cells* (Vol. 1). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-012436643-5/50014-6>

Sedaghat, F., Cheraghpour, M., Hosseini, S. A., Pourvali, K., Teimoori-Toolabi, L., Mehrtash, A., Talaei, R., & Zand, H. (2019). Hypomethylation of NANOG promoter in colonic mucosal cells of obese patients: A possible role of NF- $\kappa$ B. *British Journal of Nutrition*, *122*(5), 499–508. <https://doi.org/10.1017/S000711451800212X>

Senft, A. D., Bikoff, E. K., Robertson, E. J., & Costello, I. (2019). Genetic dissection of Nodal and Bmp signalling requirements during primordial germ cell development in mouse. *Nature Communications*, *10*(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09052-w>

Sharma, S., & Bhonde, R. (2020). Genetic and epigenetic stability of stem cells: Epigenetic modifiers modulate the fate of mesenchymal stem cells. *Genomics*, *112*(5), 3615–3623. <https://doi.org/10.1016/j.ygeno.2020.04.022>

Shi, J., Shi, W., Ni, L., Xu, X., Su, X., Xia, L., Xu, F., Chen, J., & Zhu, J. (2013). OCT4 is epigenetically regulated by DNA hypomethylation of promoter and exon in primary gliomas. *Oncology Reports*, *30*(1), 201–206. <https://doi.org/10.3892/or.2013.2456>

Smith, L. R., Cho, S., & Discher, D. E. (2018). Stem cell differentiation is regulated by extracellular matrix mechanics. *Physiology*, *33*(1), 16–25. <https://doi.org/10.1152/physiol.00026.2017>

Son, J., Tae, J.-Y., Min, S., Ko, Y., & Park, J.-B. (2020). Fibroblast growth factor-4 maintains cellular viability while enhancing osteogenic differentiation of stem cell spheroids in part by regulating RUNX2 and BGLAP expression. *Experimental and Therapeutic Medicine*, 2013–2020. <https://doi.org/10.3892/etm.2020.8951>

Song, I., & Dityatev, A. (2018). Crosstalk between glia, extracellular matrix and neurons. *Brain Research Bulletin*, *136*, 101–108. <https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2017.03.003>

Steinhart, Z., & Angers, S. (2018). Wnt signaling in development and tissue homeostasis. *Development (Cambridge, England)*, *145*(11), 1–8. <https://doi.org/10.1242/dev.146589>

Taupin, P. (2010). Very small embryonic-like stem cells for regenerative medicine: WO2010039241. *Expert Opinion on Therapeutic Patents*, *20*(8), 1103–1106. <https://doi.org/10.1517/13543776.2010.495122>

Tremble, K., Stirparo, G. G., Bates, L. E., Maskalenka, K., Stuart, H. T., Jones, K., Andersson-Rolf, A., Radzsheuskaya, A., Koo, B. K., Bertone, P., and Silva, J. C. R. (2020). Sox2 modulation increases naïve pluripotency plasticity. In *bioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2020.01.14.906933>

van Holde, K. E., & Zlatanova, J. (2018). Development and Differentiation. *The Evolution of Molecular Biology*, 135–147. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-812917-3.00013-9>

Veneri, P., Vazquez Echegaray, C., Oses, C., Stortz, M., Guberman, A., and Levi, V. (2020). Dynamical reorganization of the pluripotency transcription factors Oct4 and Sox2 during early differentiation of embryonic stem cells. *Scientific Reports*, *10*(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62235-0>

Wang, J., Rao, S., Chu, J., Shen, X., Levasseur, D. N., Theunissen, T. W., & Orkin, S. H. (2006). A protein interaction network for pluripotency of embryonic stem cells. *Nature*, *444*(7117), 364–368. <https://doi.org/10.1038/nature05284>

Weider, M., Starost, L. J., Groll, K., Küspert, M., Sock, E., Wedel, M., Fröb, F., Schmitt, C., Baroti, T., Hartwig, A. C., Hillgärtner, S., Piefke, S., Fadler, T., Ehrlich, M., Ehlert, C., Stehling, M., Albrecht, S., Jabali, A., Schöler, H. R., ... Wegner, M. (2018). Nfat/calcieneurin signaling promotes oligodendrocyte differentiation and myelination by transcription factor network tuning. *Nature Communications*, *2018*(MARCH), 1–16. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03336-3>

Xu, L., & Jiang, H. (2020). Writing and Reading Histone H3 Lysine 9 Methylation in Arabidopsis. In *Frontiers in Plant Science* (Vol. 11). <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00452>

Xu, Z., Robitaille, A. M., Berndt, J. D., Davidson, K. C., Fischer, K. A., Mathieu, J., Potter, J. C., Ruohola-Baker, H., & Moon, R. T. (2016).

Wnt/ $\beta$ -catenin signaling promotes self-renewal and inhibits the primed state transition in naïve human embryonic stem cells. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *113*(42), E6382–E6390. <https://doi.org/10.1073/pnas.1613849113>

York, J. R., & McCauley, D. W. (2020). The origin and evolution of vertebrate neural crest cells. *Open Biology*, *10*(1). <https://doi.org/10.1098/rsob.190285>

Yunusova, A. M., Fishman, V. S., Vasiliev, G. V., & Battulin, N. R. (2017). Deterministic versus stochastic model of reprogramming: New evidence from cellular barcoding technique. *Open Biology*, *7*(4). <https://doi.org/10.1098/rsob.160311>

Zakrzewski, W., Dobrzyński, M., Szymonowicz, M., & Rybak, Z. (2019). Stem cells: Past, present, and future. *Stem Cell Research and Therapy*, *10*(1), 1–22. <https://doi.org/10.1186/s13287-019-1165-5>

Zaveri, L., & Dhawan, J. (2018). Cycling to meet fate: Connecting pluripotency to the cell cycle. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, *6*(JUN), 1–19. <https://doi.org/10.3389/fcell.2018.00057>

Zhang, H., Shao, X., Peng, Y., Teng, Y., Saravanan, K. M., Zhang, H., Li, H., and Wei, Y. (2019). A novel machine learning based approach for iPS progenitor cell identification. *BioRxiv*, 744920. <https://doi.org/10.1101/744920>



## **ECTOPARÁSITOS EN ALEVINES DE *Oreochromis niloticus* EN LA ESTACIÓN DULCEACUÍCOLA DE DIVISA, PANAMA**

### **Kedric González**

Universidad de Panamá, Panamá. [kedricg75@gmail.com](mailto:kedricg75@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-3010-2070>

### **Claudia Rengifo**

Universidad de Panamá, Panamá. [crengifoh@gmail.com](mailto:crengifoh@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0003-0254-1815>

### **Cilini Arosemena**

Autoridad de Recursos Acuáticos de Panamá, Panamá. [arosemenacilini@gmail.com](mailto:arosemenacilini@gmail.com)  
<https://orcid.org/0009-0009-1240-6466>

DOI <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v25n2.a4071>

**Fecha de recepción:** 11 de noviembre de 2022

**Fecha de aceptación:** 8 de mayo de 2023

### **RESUMEN**

Se evaluó la presencia de ectoparásitos en alevines de tilapia del nilo *Oreochromis niloticus* cultivados en la estación Dulceacuícola de Divisa, República de Panamá. Se analizó un total de 75 alevines de 60 días de edad, se midieron peso y largo. Las branquias, el mucus y secciones de cada aleta fueron preparados en fresco para su observación. Se registró la presencia de parásitos en 59 individuos (79 %) mediante microscopía óptica. Se identificaron dos monogéneos *Gyrodactylus* sp. y *Cichlidogyrus* sp., lo que representó 1.69 % del total muestreado, respectivamente; además de protozoarios ciliados: *Trichodina* sp. (100 %), *Ambiphrya* sp. (27.10 %) y *Ichthyophthirius multifiliis* (6.77 %). Este estudio constituye el primer reporte de *Cichlidogyrus* sp. y *Ichthyophthirius multifiliis* en esta estación de cultivo.

### **PALABRAS CLAVES**

Panamá, monogéneos, protozoarios, tilapia del Nilo.

## **ECTOPARASITES IN *Oreochromis niloticus* ALEVINES AT THE DIVISA SWEETFISHING STATION, PANAMA**

## ABSTRACT

The presence of ectoparasites was evaluated in fishlings of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* raised in the Estación Dulceacuícola of Divisa, Republic of Panamá. A total of 75 sixty days old fishlings were analyzed, weight and length were measured. The gills, mucus and sections of each fin were prepared fresh for observation. The presence of parasites was registered in 59 individuals (79%) using an optic microscope. Two monogenes were identified, *Gyrodactylus* sp. and *Cichlidogyrus* sp. Representing 1.69% of the total sampled, respectively; also, ciliated protozoa were found: *Trichodina* sp. (100 %), *Ambiphrya* sp. (27.10 %) y *Ichthyophthirius multifiliis* (6.77 %). This study represents the first report of *Cichlidogyrus* sp. and *Ichthyophthirius multifiliis* in this aquaculture station.

## KEY WORDS

Panamá, monogenes, protozoa, Nile tilapia.

## INTRODUCCIÓN

Los parásitos son organismos pequeños que viven dentro o sobre otros organismos más grandes, sobreviviendo a sus expensas. Este organismo más grande es el hospedador y el parásito obtiene de él lo necesario para sobrevivir, sin brindarle algún tipo de beneficio; sino más bien perjudicándolos (Salgado-Maldonado y Rubio-Godoy, 2014).

La estación Dulceacuícola de Divisa fue la primera estación dedicada a la producción de peces para su comercialización, que se creó a nivel nacional en el 1975, como respuesta ante la necesidad de impulsar este rubro en el país. Actualmente entre sus servicios tiene la venta de alevines de tilapia (*Oreochromis* sp.) y producción de otros peces de agua dulce como: Colossoma (*Collosoma macropomum*), Carpa herbívora (*Ctenopharyngodon idellus*) y Guapote Tigre (*Parachromis managuense*). Igualmente, tiene como una de sus funciones el brindar apoyo a las comunidades rurales de la región, capacitando en el manejo del cultivo de tilapias como una alternativa sustentable y supliendo con una fuente saludable de proteína a la población (ARAP, 2018).

Para que el desarrollo de estos organismos sea el adecuado, se han identificado varios factores influyentes, los cuales deben ser

monitorizados durante todo el proceso de producción, entre ellos los aspectos sanitarios, específicamente la infestación por organismos parasitarios, causantes de estrés, los cuales comprometen la calidad de vida de los peces y, por ende, la calidad del producto final destinado a su comercialización. Es por esto que se recomienda el establecer un control estricto de las poblaciones parasitarias presentes, ya que el hacinamiento en el que suelen estar sometidos facilita la propagación de cualquier agente infeccioso, pudiendo afectar lotes completos en cuestión de días, mermando su población, lo que se traduce en pérdidas económicas para el productor (A. Facundo, 2006).

Existe información de base que ha permitido conocer sobre el estado sanitario de la tilapia del Nilo en la estación Dulceacuícola de Divisa. En el 2006 se realizó un estudio que identificó la presencia de parásitos como la *Trichodina sp.*, así como otros agentes pertenecientes al grupo de los trematodos monogéneos y digéneos, permitiendo establecer una línea base que permitirá evaluar los cambios que se podrían estar dando en la población a lo largo del tiempo (Solís, 2006).

En Panamá, la información sobre los parásitos que afectan las piscifactorías es escasa. Tampoco se tiene claridad sobre cómo estas infestaciones afectan a los peces y su productividad. Igualmente, el conocimiento sobre el tipo de parásitos que se encuentran en estos animales y su posible potencial zoonótico no está totalmente determinado. En el mundo, este tipo de información es considerada de gran relevancia por ser un elemento que suele contribuir a valorar la calidad del producto, debido a que puede afectar tanto directa como indirectamente la salud de los consumidores, así como también, el mercado de las exportaciones comerciales de estos productos.

Para dar un ejemplo, en el 2013, el rubro de la acuicultura en Panamá generó alrededor de 19,540,998 millones de dólares (INEC, 2013), por lo que la generación de cualquier información que permita evaluar aquellos factores que impactan negativamente este sector podría considerarse de relevada importancia. Por esta razón, estudios enfocados en estos temas contribuiría favorablemente a brindar conocimientos sobre la situación sanitaria de las especies de peces utilizadas para este fin, enfocándose principalmente en aquellos parásitos presentes en estas poblaciones. En este sentido, el objetivo de

este estudio fue la identificación de los ectoparásitos presentes en los alevines de la tilapia del Nilo que se producen en Panamá. Esta información aportó al conocimiento sobre esta especie, lo que permitió elaborar estrategias para mejorar su producción, traducándose en beneficios como el mejoramiento del desarrollo económico de aquellos grupos sociales menos favorecidos que se dedican a esta actividad productiva como una alternativa para mejorar su subsistencia, además de permitir el mejoramiento de la calidad de los productos, lo que favorece positivamente su comercialización en la región.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El estudio se realizó en la estación Dulceacuícola en el año 2018, ubicada en Divisa, corregimiento de La Raya de Santa María, distrito de Calobre, provincia de Veraguas, Panamá, cuyas coordenadas geográficas son latitud 8.144027 y longitud -80.706905 (Fig. 1).

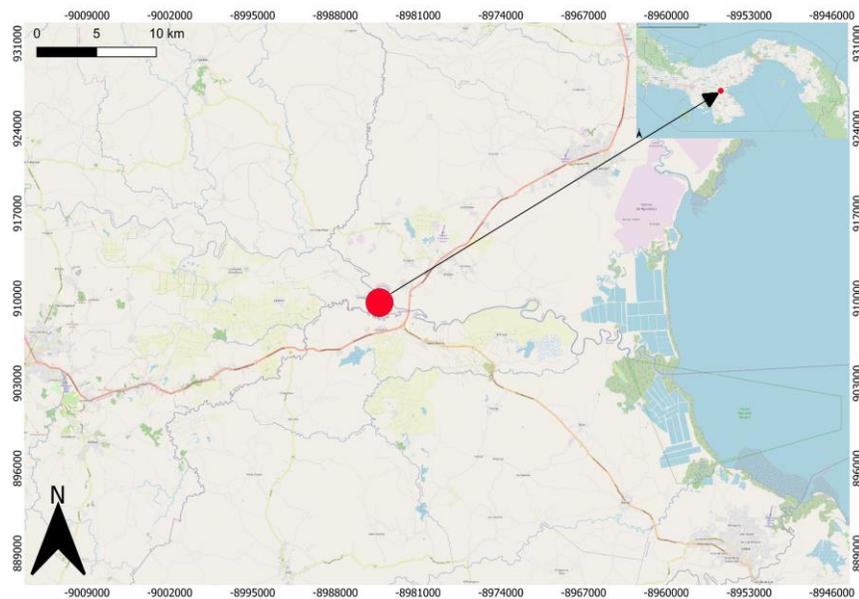


Fig. 1. Estación dulceacuícola de la ARAP, ubicada en Divisa, provincia de Veraguas, Panamá. Imagen generada con Qgis v. 3.28.3.

## **Colecta y evaluación de individuos**

### **Colecta de individuos:**

Se recolectaron alevines de la especie *O. niloticus* de 60 días posterior a la eclosión. A cada individuo recolectado se le asignó una numeración, siguiendo un orden ascendente. El número de peces recolectados se establecieron en base al número total de animales existentes en toda la explotación. Para ello, se utilizó la herramienta web denominada WinEpi (<http://www.winepi.net/f102.php>), la cual estableció como fórmula la establecida para un universo infinito.

Los alevines fueron recolectados al azar, en diferentes puntos de la pileta, utilizando una red de mano, y los peces capturados se transfirieron a bolsas plásticas con oxígeno selladas con ligas de caucho para evitar el escape del gas. Todos los peces capturados fueron preparados y transportados para su procesamiento en la estación de Maricultura del Pacífico (ARAP); ubicada en Vacamonte, Arraján, Provincia de Panamá Oeste. Allí, se transfirieron a una pecera de vidrio de 30 galones con agua de la pileta de la estación Dulceacuícola, agregándole una piedra de oxigenación para evitar el descenso de los niveles de oxígeno.

### **Evaluación de los individuos**

Los alevines fueron evaluados mediante la determinación de los siguientes parámetros morfométricos:

- Longitud: se midió desde la punta de la boca hasta la punta de la aleta caudal, utilizando un vernier calibrado en milímetros.
- Peso: se midió individualmente cada pez con una balanza digital calibrada en gramos.

### **Análisis Macroscópico**

Se observaron los animales en la pecera previa a la eutanasia. Allí se evaluó su comportamiento en búsqueda de signos clínicos asociados a la presencia de parásitos, dentro de estos signos se incluyó: movimiento opercular exacerbado o disminuido, mucosidad aumentada, lesiones en piel y nado errático. Una vez registradas las observaciones, se aplicó la eutanasia a cada individuo con una sobredosis de Benzocaina (200 mg/l). Una vez realizada la eutanasia se realizó una evaluación

completa de cada individuo para detectar lesiones o deformidades en las estructuras externas.

### **Análisis Microscópico**

Para el examen microscópico, se realizó un montaje en fresco de las siguientes estructuras:

**Mucus:** Se realizó mediante un raspado superficial de la piel por la línea media y se colocó el contenido sobre un portaobjeto para su observación.

**Aletas:** Se cortó parte de las aletas dorsal, pectoral, anal, caudal y pélvica para colocarlas sobre un portaobjeto para su observación.

**Arco Branquial:** Se realizó la disección de estas y se colocaron las laminillas branquiales en un portaobjetos para su observación.

Cuando se sospechaba la presencia de algún parásito protozoario, se colocaba Lugol en el preparado para resaltar aquellas estructuras del parásito que facilitan su identificación, como la cantidad de cilios y dientes, los cuales son difíciles de observar sin un contraste adecuado.

### **Análisis estadístico:**

Se realizó un análisis de correlación de los parámetros morfológicos y la prevalencia de parásitos, utilizando el programa Past v4.09.

## **RESULTADOS**

En el análisis de las variables se determinó que los parámetros morfométricos no presentaron correlación con las prevalencias obtenidas para cada grupo de parásito encontrado.

De los individuos recolectados, 59 resultaron positivos con al menos un tipo de ectoparásito presente en alguna de las estructuras analizadas, lo que representa una prevalencia del 79 % en la población.

Los peces que presentaron signos clínicos fueron 8 individuos (14%) mientras que los asintomáticos fueron 51 individuos (86%) de la población parasitada.

De los individuos parasitados se determinó que 28 individuos (64.4%) presentaba parasitosis de una sola especie de parásito, mientras que 21 individuos (35.6%) presentaba parasitosis por al menos 2 especies parásitos.

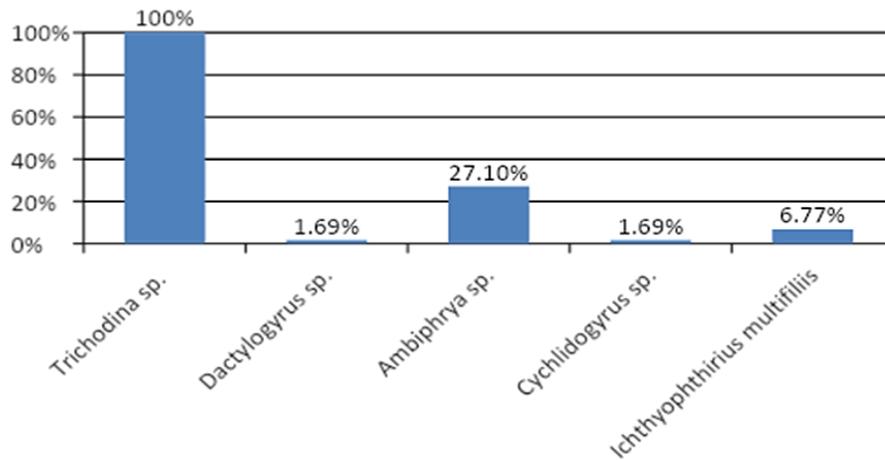


Fig.1 Especies de ectoparásitos encontrados en *Oreochromis niloticus*. Estación dulceacuícola de Divisa.

## DISCUSIÓN

Este estudio permitió conocer sobre la presencia de ectoparásitos en tilapia nilótica (*O. niloticus*) de la estación Dulceacuícola de Divisa, pudiendo así ampliar los conocimientos sobre los agentes infecciosos que afectan a esta población de gran importancia para la acuicultura del país. La prevalencia global obtenida fue del 79 %. Al comparar estos resultados con información obtenida en trabajos anteriores podemos ver claramente que la prevalencia disminuyó en un 21 %, al compararlo con el 100 % de Prevalencia descrita en 2006 (Solís.,2006).

Al considerar los factores que pudieron estar involucrados a esta notable disminución puede deberse a las mejoras en las instalaciones y por ende mejoras en el control de los parámetros fisicoquímicos del agua de las tinas en el periodo de tiempo transcurrido entre ambos estudios (Arap,2018). Esto ha generado condiciones favorables para la reproducción, permitiendo la disminución en el crecimiento de ectoparásitos. Esto lo podemos deducir ya que se ha descrito que las constantes fisicoquímicas del agua influyen directamente sobre la presencia de parásitos y sus ciclos (Gonzales, 2012; Woo, 2006).

Sobre la cantidad de ectoparásitos encontrados en los peces, el 64 % (n=38) estuvieron parasitados con un solo tipo de parásito mientras que el 36 % (n=21) por dos tipos diferentes de parásitos. Podrían existir varias explicaciones para este comportamiento, una de ellas es la descrita por algunos autores, donde se establece que aquellos individuos más estresados tienen una mayor predisposición a presentar mayor carga parasitaria (Gonzales, 2012; Ocampo & Ocampo Camberos, 1999). En este sentido, otros autores igualmente han manifestado que algunos individuos podrían presentar mayor resistencia a los organismos parásitos, por lo que no suelen estar infestados con altas densidades (Roche et al., 2010; Woo, 2006). Esto nos permite suponer que la diferencia de las prevalencias encontradas podría deberse a que se han hecho cambios en los sistemas de manejo de los peces, mejorando los procesos en las etapas de cría y levante. En este sentido, sabemos que los factores fisicoquímicos del agua afectan directamente a los animales, siendo factores desencadenantes de estrés, lo que compromete su sistema inmune, el cual está directamente relacionado en la resistencia contra microorganismos como ectoparásitos y organismos oportunistas (Ocampo & Ocampo Camberos, 1999). Igualmente, González, (2012) hace referencia de la relación entre las condiciones físico-químicas del agua con la prevalencia de ectoparásitos, indicando que la temperatura y la cantidad de amonio son factores que influyen directamente en la presentación de estos agentes en estas poblaciones. Por lo tanto, podríamos deducir que los peces que presentaron un solo tipo de parásito podrían estar mejor adaptados a las condiciones del ambiente, lo que se traduce en una mayor resistencia a agentes parasitarios presentes en el entorno.

Con relación a los tipos de parásitos encontrados, tenemos que la mayor presencia fue del protozoario del género *Trichodina* (100 %), coincidiendo con los resultados obtenidos en esta población en el 2006. Esto podría deberse a que los animales se encontraban en las mismas condiciones, las cuales son favorables para que agentes comensales como la *Trichodina sp.* (Fig.2) se multiplique y parasite a los peces, causando lesiones en piel y comprometiendo su salud (Ocampo & Ocampo Camberos, 1999). La *Trichodina sp.* no es un parásito que se alimenta de la piel del pez sino de bacterias y detritos del agua, pero si las condiciones del ambiente no son adecuadas, puede llegar a afectar a los peces, por la acción abrasiva de las estructuras esqueléticas y

dentículos presentes en el disco de adhesión del parásito, logrando dañar las células epiteliales del huésped. Esta acción, sumada a una carga parasitaria elevada compromete a la integridad del órgano, pudiendo causar la muerte por lesiones ocasionadas por organismos oportunistas como bacterias u hongos presentes en el entorno (Gonzales, 2012; Woo, 2006).



Fig. 2. *Trichodina* sp. observada con tinción con Lugol

El *Gyrodactylus* sp. (Fig. 3) fue otro parásito identificado con 1.69 % de prevalencia. Al comparar estos resultados con el descrito en el 2006, donde se reportó una prevalencia del 100 %, evidenciándose una diferencia muy marcada al compararla con los resultados actuales. También se marcaron otras diferencias, como las estructuras en las que se observó el parásito, viéndose en el estudio anterior lesiones en toda la superficie del pez, a excepción de las branquias, mientras que, en este estudio, su localización fue solo en las branquias, siendo este un lugar

inusual para su descripción (Salgado-Maldonado & Rubio-Godoy, 2014).

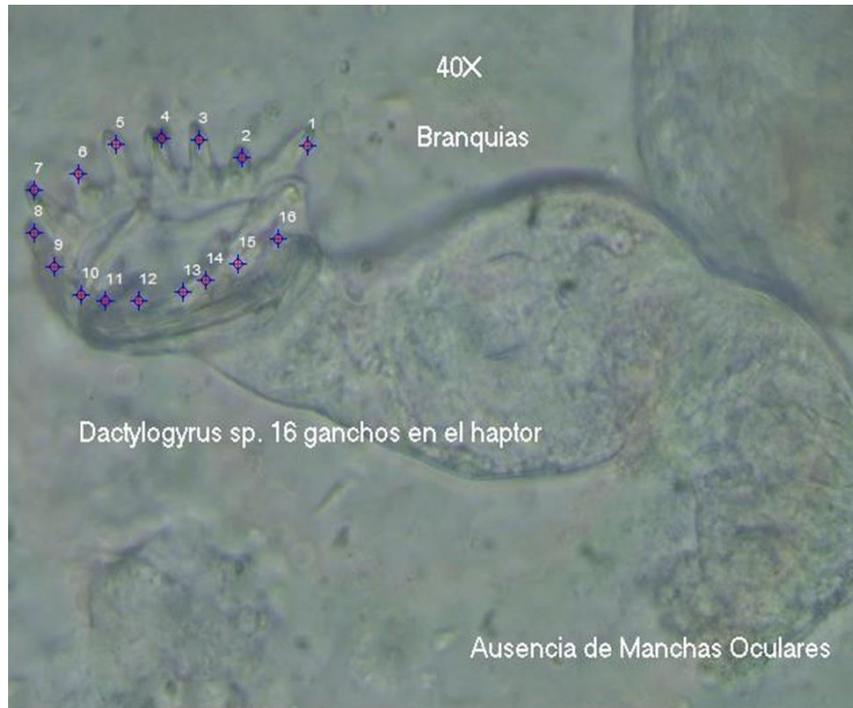


Fig. 3. *Gyrodactylus* sp. en preparado en fresco de branquias.

Por otra parte, la disminución en la prevalencia podría indicar que las condiciones fisicoquímicas del agua podrían haber mejorado en el tiempo, ya que se ha descrito que es normal encontrar estos parásitos en las granjas acuícolas con tilapia nilótica, pero son las condiciones ambientales y del agua las que determinarán que tan graves estas infestaciones pueden llegar a ser (Gonzales, 2012; Ocampo & Ocampo Camberos, 1999). A esto le podemos agregar el hecho que la tilapia nilótica es capaz de desarrollar cierto grado de resistencia a la parasitosis por *Gyrodactylus* sp., ya que ha sido encontrado en su hábitat natural a nivel mundial, viéndose igualmente en regiones donde este pez ha sido introducido. Esto nos permite asumir que la disminución en la prevalencia encontrada puede ser debido a la resistencia desarrollada por las tilapias aunado a las mejoras que se establecieron en los sistemas de manejo de las piscinas, mejorando las condiciones ambientales de las

mismas (Bunkley-williams & Williams, 1995; García-vásquez et al., 2010; Roche et al., 2010).

Otro agente que se pudo describir fue el parásito monogeneo perteneciente al género *Cichlidogyrus* sp. (Fig. 4 y Fig.5), identificándose en 1.69 % de la población estudiada. En un estudio realizado en Panamá, este agente era considerado el principal parásito encontrado en las branquias de las poblaciones silvestres de tilapias nilóticas, pudiendo referirse igualmente en poblaciones distribuidas en distintas partes del continente americano como México, Puerto Rico, Perú, Estados Unidos entre otros, siendo considerado como un parásito común para esta especie, sobretodo al encontrarse descrito igualmente en otros cíclidos nativos (Roche et al., 2010).

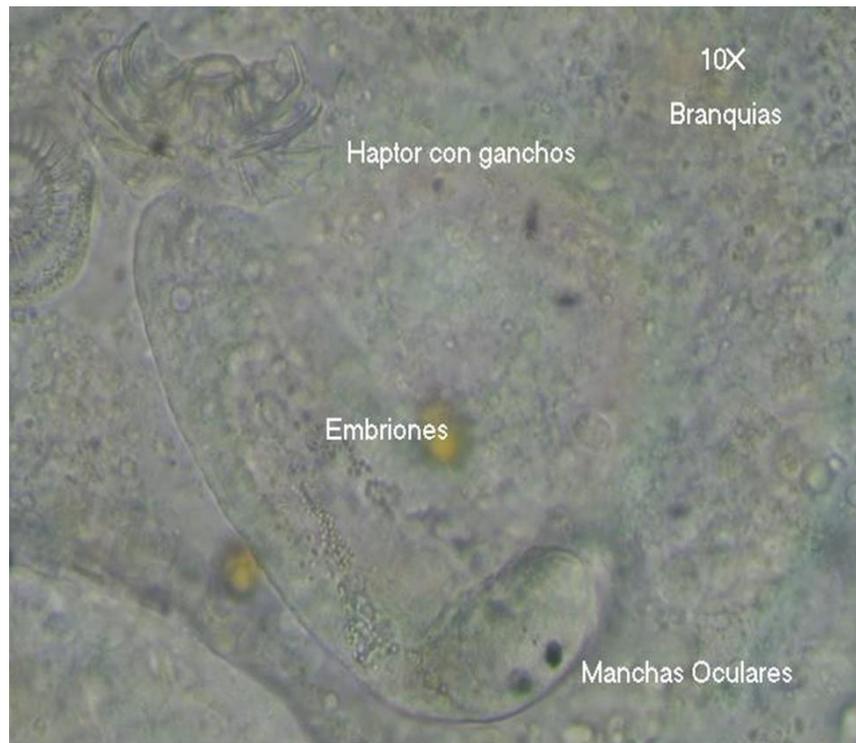


Fig. 4. *Cichlidogyrus* sp. observado en preparado en fresco de branquias.

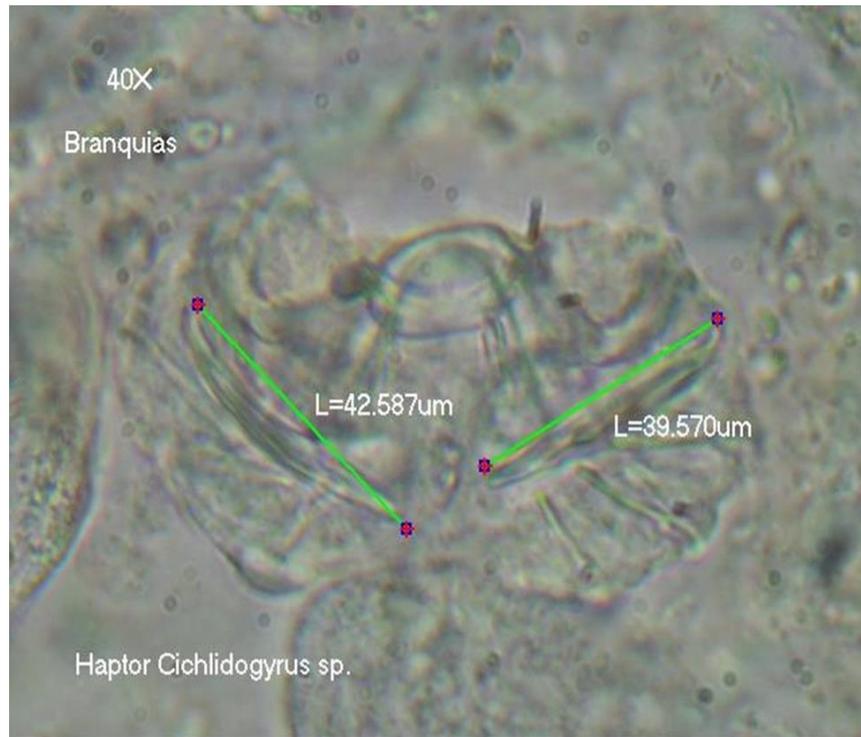


Fig. 5. Haptor de *Cichlidogyrus sp.* destacando la medida de sus macroganchos.

Su presencia se ha reportado en branquias, sin embargo, no se observaron signos clínicos (Fig. 3), por lo que se sugiere que su presencia no afecta la integridad de esta estructura, lo que permite confirmar lo descrito por (González, 2012) quien asocia la presencia de lesiones en branquias a altas prevalencias de parasitosis por *Cichlidogyrus sp.* (mayor al 70 %).

La presencia del ciliado *Amblyphria sp.* (Fig. 6) ha sido asociado con la presencia de tilapia nilótica a nivel mundial (Bunkley-williams & Williams, 1995; Gewik & Al-quraishy, 2014; Gonzales, 2012). Este estudio representa la segunda descripción de este parásito en las branquias en alevines de tilapia nilótica de la Estación Dulceacuícola, presentando una prevalencia mucho menor comparada con estudios realizados en poblaciones de otras regiones del continente (27.1 %) (Gonzales, 2012). Se conoce que está asociado a infestaciones severas

junto con otros comensales como el *Ichthyophthirius multifiliis*, siendo la principal manifestación clínica encontrada el exceso de mucus en branquias, lo que puede llegar a causar letargo, boquino y movimiento opercular irregular en los peces, como fue posible observarlos en este estudio, pudiendo ser la causa de muerte en algunos peces afectados (Gonzales, 2012).

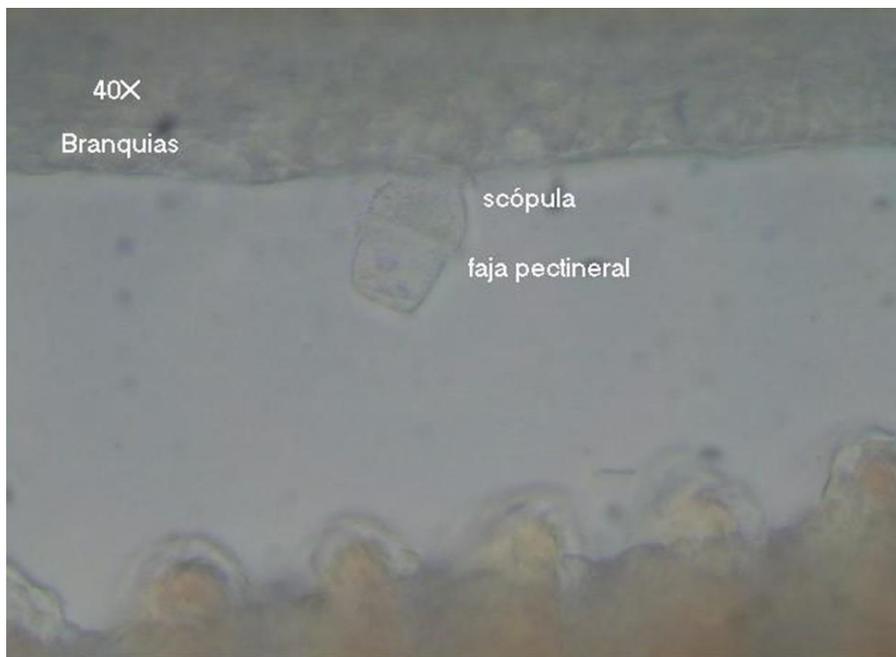


Fig. 6. *Ambiphrya sp.* observado en muestra fresca de branquias.

El último de los parásitos encontrados fue el *Ichthyophthirius multifiliis* (Fig. 7) también descrito por primera vez en esta población. Su prevalencia fue del 6.77 % pudiéndose observar junto a otros parásitos como *Trichodina sp.* y *Ambiphrya sp.*; siendo este un comportamiento que se ha referido como común para esta especie (Gewik & Alquraishy, 2014; Gonzales, 2012; Woo, 2006). La prevalencia encontrada puede deberse a las condiciones fisicoquímicas del entorno, siendo muy difíciles la realización de acciones de controlar para su eliminación, ya que son capaces de sobrevivir hasta por 6 meses en fases no infestantes (Woo, 2006) Además, cuando las condiciones son favorables, especialmente en altas temperaturas, pueden incrementar su

tasa de replicación e infestación (Bunkley-williams & Williams, 1995; Woo, 2006).

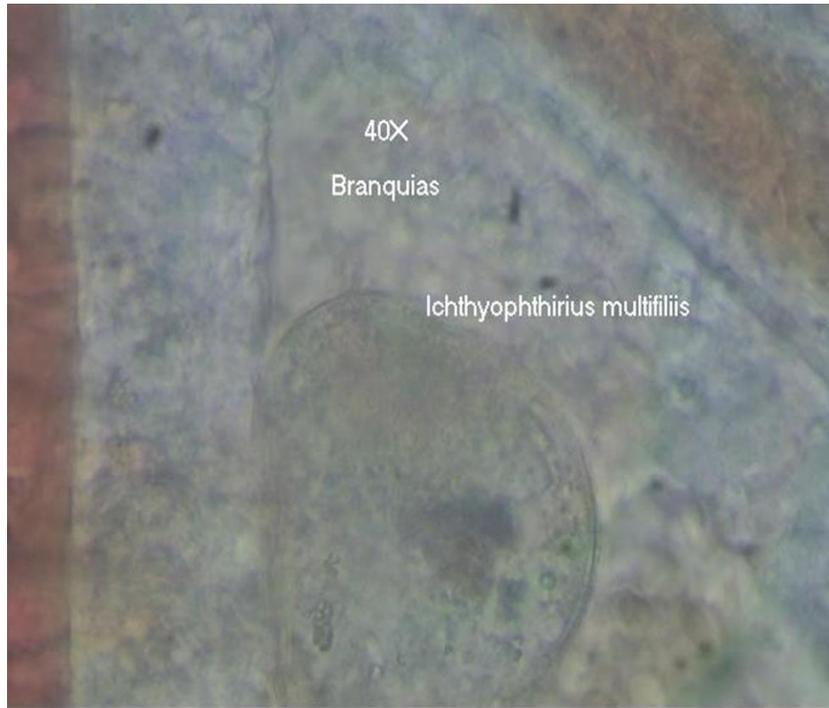


Fig. 7. *Ichthyophthirius multifiliis* observado en muestra fresca de branquias.

## CONCLUSIONES

- El grado de infestación parasitaria en alevines de tilapia nilótica de la estación Dulceacuícola de Divisa sigue siendo alta, aunque al compararlas con las prevalencias obtenidas en estudios previos, nos permite sugerir que las condiciones de manejo han mejorado en el tiempo.
- En este estudio, por medio de los análisis estadísticos, se demostró que no existe relación significativa entre los parámetros morfométricos de peso, largo y ancho de los peces con las prevalencias observadas, lo que sugiere que los factores

- que influyen no están relacionados con el animal, pudiendo estar relacionado con variables asociadas a las condiciones del ambiente donde se encuentran.
- Este trabajo corresponde al primer reporte de algunas especies de parásitos en la estación Dulceacuícola de Divisa, como *Ciclhidogyrus sp.*, e *Ichthyophthirius multifiliis*.

## AGRADECIMIENTO

La Dra. Claudia Rengifo, agradece el apoyo recibido del Sistema Nacional de Investigación (SNI-SENACYT), Panamá, Panamá.

## REFERENCIAS

ARAP. (2018), Información pública.

Bunkley-williams, L., & Williams, E. H. (1995). *Parásitos en Puerto Rico*.

FAO. (2017). Food and Agriculture Organization.

García-vásquez, A., Hansen, H., Christison, K. W., Rubio-godoy, M., Bron, J. E., Andrew, P., and García-vásquez, A. (2010). Gyrodactylids (Gyrodactylidae, Monogenea) infecting *Oreochromis niloticus niloticus* (L.) and *O. mossambicus* (Peters) (Cichlidae): A pan-global survey, 55(3), 215–229. <https://doi.org/10.2478/s11686-010-0042-2>

Gewik, M. M., & Al-quraishy, S. (2014). First records of *Ambiphrya* & *Vorticella* spp. (Protozoa, Ciliophora) in cultured Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) in the central region of Saudi Arabia. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 21(6), 520–523. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2014.01.002>

Gonzales, J. G. (2012). Parasitofauna of tilapia cause mortalities in fingerlings in two fishfarms, Lima, Peru. *Neotropical Helminthology* 6(2), 219-22, <http://www.winepi.net/f102.php>

INEC. (2013) Instituto Nacional de Estadística y Censo de Panamá.

Ocampo, A. A. De, & Ocampo Camberos, L. (1999). Diagnóstico del Estrés en Peces. *Veterinaria México*, 30(4), 337–344.

Roche, D. G., Leung, B., Mendoza, E. F., & Torchin, M. E. (2010). Higher parasite richness, abundance, and impact in native versus introduced cichlid fishes. <https://doi.org/10.1016/j.ijpara.2010.05.007>

Salgado-Maldonado, G., & Rubio-Godoy, M. (2014). Helmintos parásitos de peces de agua dulce introducidos. *Especies Acuáticas Invasoras En México*, 269–285.

Solis, Dick. (2006), Parásitos detectados en peces de agua dulce en una estación acuícola en Panamá.

Woo, P. T. K. (2006). [Book Review: *Fish Diseases and Disorders. Volume 1: Protozoan and Metazoan Infections. Second Edition.*]. *The Quarterly Review of Biology* (Vol. 82). <https://doi.org/10.1086/513384>



Tecnociencia, Vol. 25, N°2: 188-208

Julio-Diciembre 2023

ISSN L 2415-0940

## **NIVELES DE CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO PM SUSPENDIDO EN EL AIRE DURANTE 17 AÑOS DE MEDICIÓN, EN EL CAMPUS CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD DE PANAMÁ**

**Omayra J. Pérez Castro**

Universidad de Panamá, Panamá. [omayra.perezc@up.ac.pa](mailto:omayra.perezc@up.ac.pa)  
<https://orcid.org/0000-0002-7080-5598>

**Luis A. Marín**

Universidad de Panamá, Panamá. [luis.marin-d@up.ac.pa](mailto:luis.marin-d@up.ac.pa)  
<https://orcid.org/0000-0001-8580-4128>

**Juan Rodríguez**

Universidad de Panamá, Panamá. [juan-m.rodriguez-c@up.ac.pa](mailto:juan-m.rodriguez-c@up.ac.pa)  
<https://orcid.org/0000-0002-2013-6752>

**Alejandro Arroyo**

Universidad de Panamá, Panamá. [alejandror@reserma.com](mailto:alejandror@reserma.com)  
<https://orcid.org/0009-0008-0593-444X>

**Carlos Dreyfus**

Universidad de Panamá, Panamá. [carlosdreyfus@gmail.com](mailto:carlosdreyfus@gmail.com)  
<https://orcid.org/0009-0006-0647-1913>

**Bernardo Fernández**

Universidad de Panamá, Panamá. [bernardo.fernandezg@up.ac.pa](mailto:bernardo.fernandezg@up.ac.pa)  
<https://orcid.org/0000-0002-7947-3147>

DOI <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v25n2.a4072>

**Fecha de recepción:** 3 de marzo de 2023

**Fecha de aceptación:** 19 de mayo de 2023

## **RESUMEN**

Se analizaron las concentraciones diarias de material particulado en el aire (PM) en la azotea de la Rectoría de la Universidad de Panamá, con una aspiradora ubicada a 90 metros sobre el nivel del mar. Se recolectaron y analizaron muestras diarias desde enero de 2006 hasta diciembre de 2022, sumando un total de 6 209 datos. La curva de la concentración del material particulado (PM) versus el día del año es indicativa de una alta contaminación atmosférica diaria por partículas en suspensión. La concentración diaria de PM, influenciada por factores meteorológicos, sugiere una clasificación en cuatro etapas anuales con comportamiento estacional, aunque con variabilidad significativa. Estas etapas son, la estación seca con comportamiento alotrópico, la de transición con decrecimiento diario lineal, dos etapas lluviosas una moderada y la otra intensa, las cuales, juntas poseen una variación senoidal. Se encontró una alta correlación inversa de PM con la Humedad Relativa y con la precipitación y una correlación directa alta con la temperatura y la rapidez del viento y ningún tipo de correlación con la presión y la dirección del viento. Esas altas correlaciones entre PM y la meteorología son indicadoras que las PM contribuyen al cambio climático.

## **PALABRAS CLAVES**

Material particulado, contaminación atmosférica, Panamá.

## **MEASUREMENT OF POLLUTION BY PM FOR 17 YEARS IN THE CENTRAL CAMPUS OF THE UNIVERSITY OF PANAMA**

### **ABSTRACT**

The daily concentrations of PM in Panama City were studied from January 1, 2006, to December 31, 2022, which translates into many data: 6,209. The PM concentration curve versus day of year is indicative of high daily atmospheric pollution by Particulate Material (PM). Its variation allows us to suggest that we have four annual meteorological periods with a certain stable probabilistic behavior, but with great dispersion. These are the dry season with allotropic behavior, the transition season with linear decrease, the moderate rainy season, and the intense rainy season, both together with sinusoidal variation. A high inverse PM correlation was found with relative humidity and precipitation, a high direct correlation with temperature and wind speed, and no correlation with pressure and wind direction. That high correlation between PM and the meteorological variables, indicates that the PM pollution contributes to climate change.

## KEY WORDS

Particulate matter, air pollution, Panamá.

## INTRODUCCIÓN

La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2016), utilizando información obtenida vía satelital y de más de tres mil estaciones ubicadas a nivel global, ha analizado la calidad del aire, tanto en espacios cerrados como abiertos (dentro y fuera de los hogares), empleando modelos de análisis confiables. Lo que le ha permitido identificar, los factores que tienen una mayor incidencia en la salud humana:

- La inhalación de partículas suspendidas en el aire es responsable de causar la muerte prematura de 4,2 millones de personas cada año, ya que estas partículas provocan enfermedades cardiovasculares, respiratorias y cáncer.
- Los porcentajes de muertes, atribuibles al factor contaminación del aire por PM, en espacios cerrados, por ejemplo, en los hogares, en el 2016 fueron: 58% por cardiopatías isquémicas y accidentes cerebrovasculares, 18% por las enfermedades pulmonares obstructivas crónicas e infecciones respiratorias agudas y 6% por cáncer de pulmón.
- El 91% de esas muertes se producen principalmente en Regiones de Asia Sudoriental y del Pacífico Occidental, en países de medianos y bajos ingresos.
- Unos 3 000 millones de personas, del total de la población mundial, cocinan y calientan sus hogares con combustibles contaminantes con PM como biomasa y carbón, lo que les permitió concluir que *“la contaminación del aire exterior con PM y el humo en interiores representa un grave riesgo para la salud de cerca del 40% de los habitantes del planeta”*.

En los últimos 20 años, las infecciones del sistema respiratorio inferior (gripe, bronquiolitis, bronquitis aguda, neumonía) están entre las cinco primeras causas mundiales de defunciones (OMS, 2020). En vista de tanta evidencia, a partir de 2005, la OMS regularmente publica y recientemente actualizó (2021), las “Directrices sobre la Calidad del

Aire”. Dichos lineamientos (guías) tienen el propósito de orientar a los Estados miembros en la elaboración de regulaciones locales o nacionales para controlar la contaminación del aire en sus respectivos territorios. Además, ofrece información general sobre los umbrales y límites máximos de la “contaminación atmosférica”, asociados a riesgos sanitarios graves para la salud.

La contaminación del aire que se respira es un problema que viene desde hace siglos, pero pasó a primer plano en la década de 1950, cuando en Londres, una niebla (tóxica) mostró valores muy altos en los contenidos de contaminantes atmosféricos y como resultado, cerca de 12,000 personas fallecieron. Con la finalidad de disminuir la contaminación del aire, Gran Bretaña promulgó la Ley de Aire Limpio (Nieuwenhuijzen, 2021), que prohibió el uso del carbón para la calefacción.

Los contaminantes atmosféricos no solamente tienen influencia directa en la salud de los Seres Humanos, sino que también contribuyen a los cambios climáticos y del ambiente (Agencia Europea de Medio Ambiente, 2013). Se clasifican de acuerdo con varios criterios (Alejandrina, 2012) y entre los más relevantes están, por 1) su origen, en naturales y antropogénicos; 2) su reactividad química, en oxidantes o reductoras; y según 3) las fuentes emisoras, en móviles (medios de transporte) y fijas (las industrias).

Las partículas líquidas y sólidas, suspendidas en la atmósfera bajo forma de polvo, hollín, humo producido por los incendios, etc. (Viana Rodríguez, 2003), que de manera natural no forman parte del aire y lo contaminan, se les llama material particulado (PM por sus siglas en inglés). Las PM que se mantiene cierto tiempo suspendidas en el aire, se clasifican, según el tamaño de su diámetro aerodinámico (Arciniegas, 2012), en: 1) gruesas, partículas mayores de  $2,5 \mu m$ ; 2) finas, menores a  $2,5 \mu m$  y 3) ultrafinas, menores a  $0,10 \mu m$ . Pero de manera general las PM se clasifican en solo dos grupos: PM10 (gruesas) y PM2.5 (que agrupa finas y ultrafinas).

La pregunta que nace de manera natural es: ¿el aire de la urbe capitalina de Panamá está contaminado por PM? La respuesta debe basarse en evidencias científicas producto de mediciones. Primero es pertinente consultar las estadísticas panameñas sobre los efectos en la salud que

está en la morbilidad asociada a esta contaminación. El Ministerio de Salud (Estadísticas de salud, s.f.) indica que aumentaron las enfermedades: 1) de las vías respiratorias superiores e inferiores; 2) del sistema cardiovascular; 3) la diabetes mellitus; 4) las muertes por cáncer de pulmón. Con esta información, la respuesta a la pregunta al inicio de este párrafo requiere identificar las posibles fuentes de PM que estén afectando la calidad del aire, medir los niveles de contaminación por PM, analizar los resultados y verificar en qué proporción están contaminando.

Por las estadísticas de salud debe haber alta contaminación por PM en la urbe capitalina. Las potenciales causas de esa contaminación atmosférica pueden ser muchas, pero entre las de peculiar importancia están las quemadas de herbazales y los incendios forestales y el alto tráfico automotriz. La Contraloría General de la República (CGR) en su página WEB señala que, para la provincia de Panamá, las quemadas e incendios forestales, en un intervalo de 15 años que va de 2006 a 2020, se repartieron así: 94 en 2006, 348 en 2007, 109 en 2008, 140 en 2009, 42 en 2010, 58 en 2011, 32 en 2012, 50 en 2013, 2 en 2014, 636 en 2015, 715 en 2016, 87 en 2017, 178 en 2018, 239 en 2019, 70 en 2020, para un promedio de 187/año. Los eventos señalados por su influencia sobre la calidad del aire se pueden caracterizar como emblemáticos. En 2013, en Cerro Patacón un fuego tardó una semana en ser controlado. En 2018, alrededor del “Parque Nacional Camino de Cruces”, un incendio forestal consumió 15 hectáreas y otro, en Cerro Patacón, demoró varias horas en ser apagado. Últimamente, en Cerro Patacón hay varios fuegos durante el año.

Según las estadísticas de la CGR otras importantes y constantes fuentes de contaminación del aire por PM han tenido un aumento importante. Por ejemplo, el parque vehicular (que usa combustible fósil, altamente contaminante) y la actividad de la construcción (que produce mucho polvo). Lo anterior permite afirmar que el aire en la ciudad de Panamá contiene los elementos necesarios para explicar el aumento significativo de las enfermedades crónicas de las vías respiratorias, del corazón, la diabetes y el cáncer de pulmón. Por ejemplo, hay que destacar que según algunos autores (Bowe *et al.* 2018), la diabetes es una consecuencia “directa” de la baja calidad del aire en términos de material particulado.

La siguiente pregunta que cabe, de manera lógica, es: ¿se tiene información cuantitativa sobre PM en la ciudad de Panamá? La estación PAP50 ha llevado a cabo mediciones de PM de alta confianza y robustez con la finalidad de detectar material radiactivo adherido a las partículas suspendidas en el aire PM. Para medir de manera significativa el PM de manera diaria, se utiliza un sistema de alto flujo, costoso y fijo basado en gravimetría, el cual se encuentra ubicado en un lugar alto para colectar principalmente las partículas que demoran en depositarse, específicamente en la azotea del “edificio de la colina” de la Universidad de Panamá, a 90 m sobre el nivel del mar, haciendo de este sitio un lugar representativo del centro de la urbe capitalina. En este estudio se analiza la información recopilada de PM entre los años 2006 y 2022.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

El campus central de la Universidad de Panamá (UP) alberga la estación RN50 que forma parte de la red mundial que vigila el cumplimiento del Tratado de Prohibición Completa de los “Ensayos Nucleares”, CTBT. La red cuenta con cuatro tecnologías y un sistema de comunicación global. Una de esas tecnologías es de radionucleidos (RN) que tiene dos subredes, una formada por 80 estaciones para la detección de partículas radiactivas suspendidas en el aire (P). A Panamá (PA) se le asignó, la subestación PAP50 (PA por Panamá, P por Partículas y es la número 50) que recolecta durante 23,75 horas (promedio diario), el material particulado PM, con una aspiradora de alto flujo, Senya (SNOW WHITE, SW, modelo JL-900, High Volume Air Sampler, mostrada en la figura 1). Los equipos, materiales y métodos utilizados son los descritos en la metodología descritos en el Manual de Operaciones de las estaciones de radionucleidos del CTBTO (<https://www.ctbto.org/>) y tenemos la certificación internacional obtenida en el año 2005. La SW es una aspiradora de alta potencia que tiene un flujo continuo y constante de 970 m<sup>3</sup>/h y aspira diariamente un promedio de 23 000 m<sup>3</sup> de aire, durante los 365 días al año. Además de ser calibrado, el flujo es medido cada 10 minutos (in situ) en tiempo real, utilizando las variables presión

y temperatura de entrada y salida y por software se hace la corrección, con los valores de la temperatura y presión. La cúpula, por su forma semiesférica, es homogeneizadora del flujo de entrada y evita que el filtro: 1) recoja partículas que no permanecen mucho tiempo suspendidas en el aire; 2) se moje en su interior (por la lluvia); 3) tenga turbulencias; 4) reciba ráfagas de aire. En su interior se coloca el filtro 3M (certificado) colector de partículas que tiene un área efectiva de  $(53,0 \times 42,0) \text{ cm}^2$ , sobre un enrejillado aluminizado especial que ayuda a preservar la geometría e integridad del filtro ante el alto flujo.



Fig.1. Vista de la aspiradora SNOW WHITE, SW, modelo JL-900 en la azotea del edificio de la rectoría.

Los filtros 3M (certificados) son hidrofóbicos, resistentes a la aspiración con alta presión y su eficiencia en función del flujo (presión, etc. y el tamaño de las partículas) fue estudiada (Valmari & Moring, 2000) dando excelentes resultados. La aspiradora se ajusta al funcionamiento óptimo del filtro 3M para las PM. La masa inicial de los filtros es de 5,500 g (masa real de trabajo). Diariamente, a las 11:00 UTC, se realiza, en el laboratorio 110 del edificio Los Gemelos, según un protocolo estandarizado, con controles de limpieza, temperatura y de humedad relativa, el proceso de pesado previo del filtro limpio, se cambia el filtro saliente, con partículas PM, esto incluye el método de doblado, prensado y pesado, etc. (Fernández García & Pérez Castro, 2016) del dicho filtro. Se mide la cantidad de material particulado PM por un método analítico

cuantitativo (gravimétrico con balanza calibrada), cumpliendo con los Principios de Medición de la Calidad del Aire (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático INECC, 2019). Se usa una balanza Ohaus calibrada, con trazabilidad y con una precisión de 0,001 g.

La calidad de los procesos de medición llevados a cabo por la estación RN50 (entre ellos la cantidad de muestra) son controlados con el intercambio de muestras, cada seis meses, con uno de los 16 laboratorios primarios (Lab. Primario) mundiales de la red. Los últimos resultados de la Inter comparación (adjuntos) indican un excelente resultado, que ha sido la norma en la Estación (Tabla 1).

Tabla 1. Inter comparaciones con laboratorios primarios del año 2022 y 2023.

Lab. Primario	Fecha	Núm. de muestra	RN50 ( $Bq/m^3$ )	Lab. Prim. ( $Bq/m^3$ )	Dif. en %
FIL07	2022-10-28	50202209301 111	7,384 1 $\times 10^{-4}$	7,016 3 $\times 10^{-4}$	5,20
ILL09	2023-01-14	50202301141 111	2,826 1 $\times 10^{-3}$	2,873 6 $\times 10^{-3}$	1,68

### Herramientas estadísticas para el análisis de los datos recopilados por la aspiradora SW

- ANOVA de una vía, según Stames, Yates y Moore (2010), permite comparar la media de tres o más grupos en una sola variable independiente. Se utiliza cuando se tiene una variable independiente y se necesita determinar si dicha variable tiene un efecto significativo sobre la variable dependiente (Fiel, 2013). De acuerdo con Gravetter y Wallnau (2017), es una prueba global de la hipótesis nula de que todas las medias son iguales y se utiliza para determinar si al menos un grupo es significativamente diferente de los demás. Si ANOVA muestra una diferencia significativa entre los grupos (hipótesis alternativa), entonces se utiliza una prueba post-hoc para

identificar entre qué grupos existen diferencias significativas (Howell, 2012).

- TUKEY es una prueba post-hoc (Sullivan y Artino, 2013) que busca identificar qué grupos difieren significativamente entre sí después de que se haya demostrado una diferencia significativa en los resultados de la prueba ANOVA. TUKEY se centra en hacer comparaciones múltiples entre todos los pares de grupos y determinar si hay diferencias significativas en las medias y determinar continuidad (Fiel, 2013).
  
- EL COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON permite cuantificar una correlación lineal entre las muestras cuantitativas (los datos), obtenidos con dos instrumentos de medición. El rango de valores que puede tomar el coeficiente de Pearson (Triola, 2006) está entre 1 y -1 y se clasifica con los siguientes criterios: 1) un valor de -1 indica una correlación lineal negativa perfecta; 2) un valor de 0 indica ausencia total de correlación lineal entre las dos variables; 3) un valor de 1 indica una correlación lineal positiva perfecta. Los valores intermedios entre -1 y 0 indican “cierta” correlación lineal negativa, mientras que los valores entre 0 y 1 “cierta” correlación lineal positiva. Cuanto más cercano a 1 sea el valor absoluto de ese coeficiente, más fuerte será la relación lineal entre las dos variables.
- HISTOGRAMAS. Para digitalizar los datos recopilados con ambos instrumentos se construyen histogramas y se ajustan para identificar el tipo de distribución. Una de las aplicaciones más comunes de los histogramas en el análisis de datos experimentales, es la identificación del modelo probabilístico que se ajusta a los datos (Makridakis *et al.* 2008).

Por último, es necesario señalar que se usa el programa OriginPro 2021 académico para el análisis y tratamiento de los datos de este trabajo. Se cuenta con la licencia correspondiente.

## **RESULTADOS Y ANÁLISIS**

PAP50 envía una muestra de PM cada 6 meses, a uno de los 16 laboratorios primarios mundiales de radiactividad para evaluar su desempeño, lo que permite garantizar que las muestras y la información sobre radiactividad por concentración másica (C) obtenida con esas muestras de PM, es fiable, de alta calidad e Inter comparable. En consecuencia, C de las muestras de PM (Figura 2) es fiable y de alta calidad. O sea que la información, usando la concentración del material particulado PM atmosférico, obtenida por PAP50, en el área del Campus Central de la Universidad de Panamá es robusta y confiable.

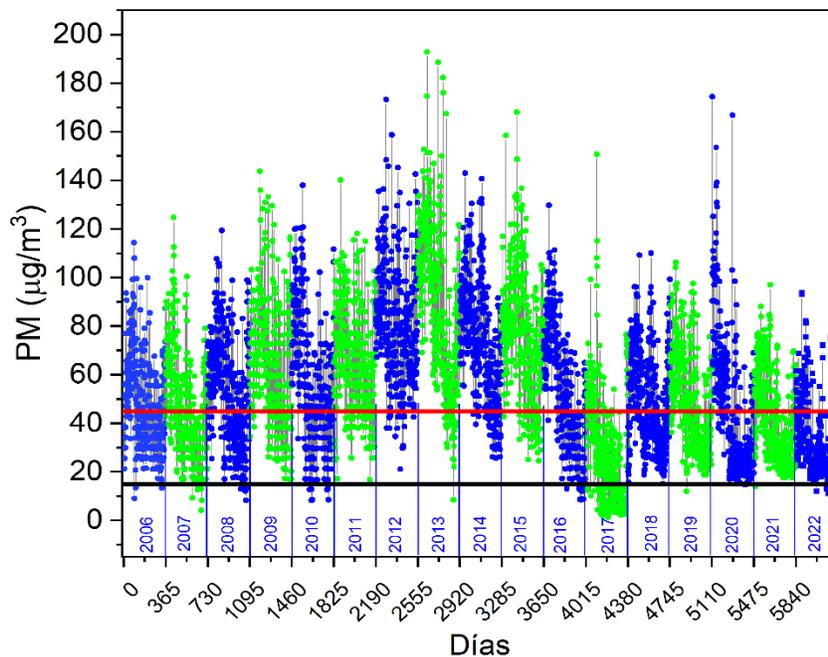


Fig.2. Valores diarios de la concentración de PM, de enero de 2006 a diciembre de 2022.

En la Figura 2 se muestran los valores diarios de C ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de PM desde el primero de enero del año 2006 hasta 31 de diciembre de 2022 (6 209 datos, es un gran número). Se observa un comportamiento colectivo que muestra una tendencia del valor promedio, a la subida de 2006 a 2013 (año con valores más altos de PM). A partir del 2013 se inicia una bajada de esos valores hasta el 2017. Del 2017 al 2022, el comportamiento cambia y se asemeja a una pequeña oscilación. Según la OMS (2021) la media anual de PM debe mantenerse por debajo de un

máximo de  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (línea en color negro) y esto no se cumple, y la media diaria debe estar por debajo de  $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (línea en rojo) y tampoco se cumple, indicando alta contaminación. Además, la data muestra alta dispersión con respecto a la media.

De lo anterior surge una pregunta natural ¿hay diferencias estadísticamente significativas entre años consecutivos? Eso requiere aplicar la prueba ANOVA de una vía (y su complemento TUKEY) a todos los datos anuales de PM del 2006 al 2022. Hay que tener presente que la hipótesis nula es que los promedios de todos los años son iguales y la hipótesis alternativa es que son diferentes y de ser así, solo habría 5% de probabilidad de que la diferencia observada sea el resultado del azar o de un error de muestreo (figura 3). Los resultados indican que las medias son diferentes.

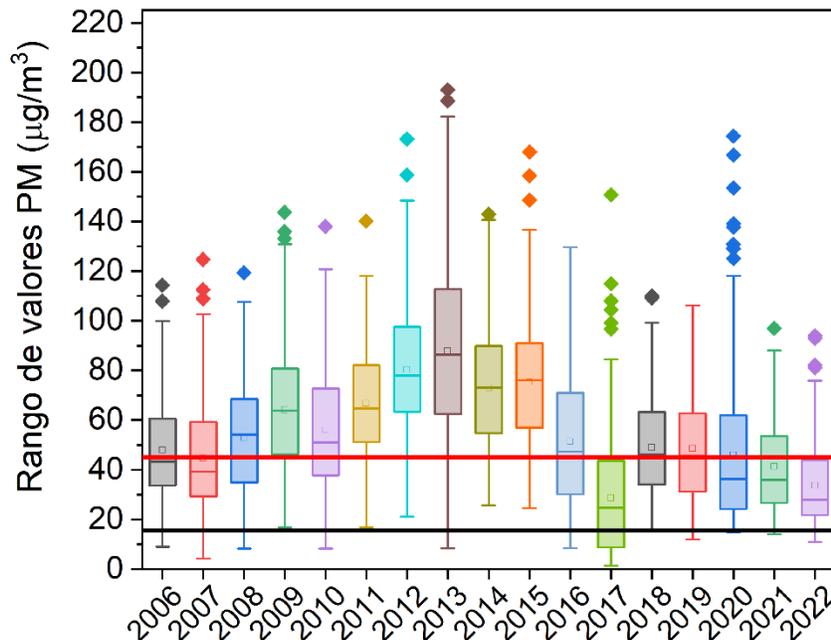


Fig.3. Representación gráfica de los valores de la media de PM, por año, del 2006 al 2022.

Se puede afirmar que hay una tendencia a una fluctuación de los valores, con un periodo de alrededor de 11 años y cuyo pico fue el año 2013 (figura 3). Estas tendencias son similares al comportamiento de los promedios de la concentración de  $^7\text{Be}$ , en función de los años que ya

fueron observadas con la detección, sobre la superficie terrestre, de este elemento (Pérez y Fernández, 2019). Lo que indica una posible relación con el Clima y la Geografía, así como con el comportamiento del astro Sol. Por otro lado, la similitud en los promedios de los años 2018, 2019 y 2020 (según la prueba TUKEY) presentados bajo forma de tabla, Figura 4, corresponden a una inflexión de la curva de la figura 3 por lo que esta prueba permite suponer que realmente si hay variaciones (ascenso o descenso de los promedios anuales).

Como se trata de cierto tipo de “big data” (6 209 datos con comportamiento complejo y con mucha dispersión anual) se deben también analizar las tendencias de los datos en función del día del año para ver sus ascensos o descensos, y sus posibles causas. Se tiene data de 17 años lo que permite trabajar con los promedios diarios de 17 años. Para ello se elaboró la representación gráfica en la figura 5a corregida con la 5b (para seguir las tendencias) con los PM de los 365 días del año (valor promedio por día del año con los promedios de los valores de 17 años).

Año	Media	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
2007	44,69								×	×	
2008	52,88					×	×				
2009	64,90				×						
2010	56,11					×					
2011	66,62				×						
2012	80,31		×								
2013	87,92	×									
2014	72,97			×							
2015	75,29		×	×							
2016	51,29					×	×	×			
2017	28,72										×
2018	48,85						×	×	×		
2019	48,52						×	×	×		
2020	45,96							×	×	×	
2021	41,31									×	
2022	33,68										×

Fig.4. Tabla de los resultados de los agrupamientos del promedio de PM por año, del 2006 al 2022 obtenidos con la prueba TUKEY.

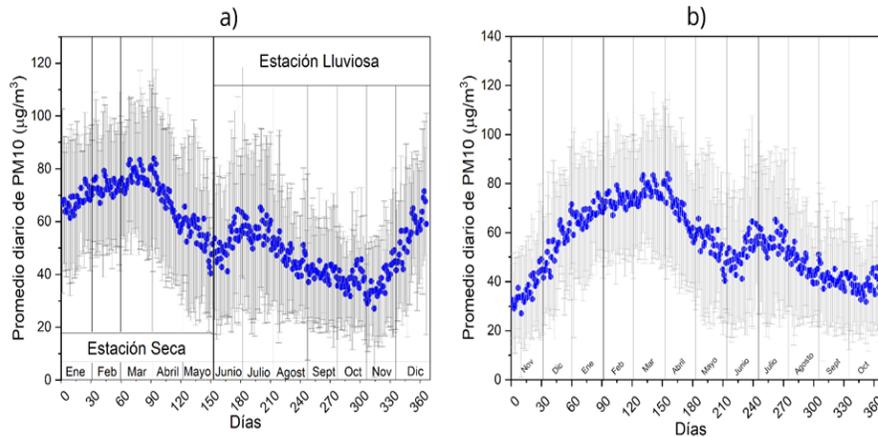


Fig. 5a y 5b. Promedio diario (por ejemplo, de todos los primeros de enero de los años 2006 al 2022).

En las figuras 5 se observan tendencias a mostrar mayores valores de contaminación (C) durante la estación seca que se inicia los primeros días de noviembre. Finaliza al llegar a un máximo a finales de marzo y con las lluvias los valores de PM tienden a disminuir generando una etapa de transición que va de abril hasta finales de mayo. En la estación lluviosa hay tendencia de la concentración de PM a fluctuar (subidas y bajadas) entre junio y julio. Es lo que se denomina el veranillo de San Juan, con dos máximos: el 24 de junio y otro hacia el 20 de julio. La tendencia siguiente es al descenso de las PM por las intensas lluvias en agosto, septiembre y octubre, que son meses más lluviosos.

El comportamiento anterior justifica el rehacer la curva 5a para ponerla bajo la forma 5b. Ello debido a que de la figura 5a se puede extraer que la tendencia al aumento de PM apreciable en enero, febrero y marzo (máximos en marzo), realmente comienza a finales de octubre del año anterior (fig. 5b). Las variaciones de la curva de la figura 5b reclasifica el comportamiento anual conocido como estaciones clásicas (seca y lluviosa) en cuatro etapas, un poco como en los hemisferios norte y sur

donde se muestran cuatro estaciones clásicas (verano, primavera, otoño e invierno). Esta clasificación está respaldada por los histogramas de los valores promedios y de las dispersiones que se ajustan muy bien con curvas de comportamiento normal (gaussianas), que le dan la estructura matemática (figura 6).

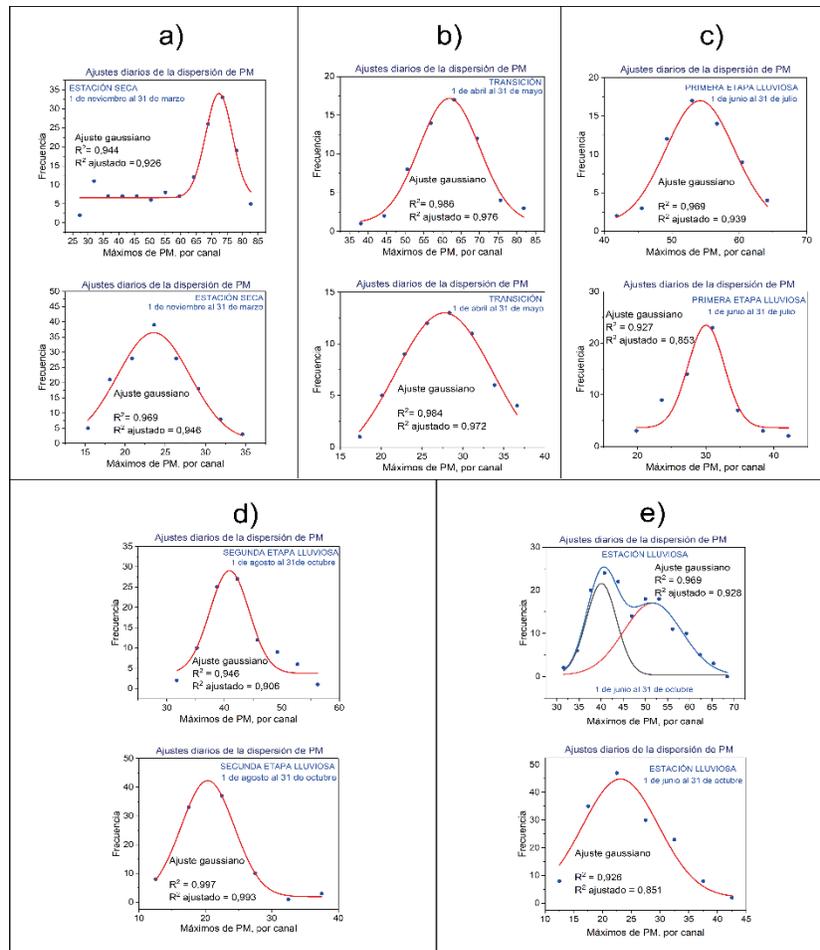


Fig. 6. Histogramas ajustados con gaussianas de los promedios y de la dispersión de los valores promedios de la estación seca, de la transición y de las (2) etapas de la estación lluviosa.

En la figura 6 se observa:

1. una estación seca (1 de nov a 31 de marzo, Fig. 6a);

2. una etapa de transición (1 de abril al 31 de mayo, Fig. 6b);
3. una estación lluviosa (Fig. 6e) con dos etapas;
  - 3.a. estación lluviosa - primera etapa (1 de junio al 31 de julio, Fig. 6c);
  - 3.b. estación lluviosa - segunda etapa (1 de agosto al 31 de octubre, Fig. 6d).

Entre las dos etapas de la estación de lluvias se observa el veranillo de San Juan o sea al final de la primera etapa e inicio de la segunda etapa lluviosa.

En este punto es necesario comentar un poco más la información que proporcionan las figuras 5 y 6. Se procedió a ajustar los datos de las estaciones seca, transición y lluviosa. Los ajustes muestran que las variaciones siguen crecimientos y descensos de la contaminación representados con combinaciones de funciones potenciales u ondulatorias de tipo senoidal. Eso incluye exponentes enteros y fraccionarios y de ambos signos. Por ejemplo, un ajuste de la estación seca conduce a un crecimiento del tipo “alométrico”  $y = Ax^p$  donde  $A = 17$  y  $p = 1/3$  o sea  $f(x) = 17x^{1/3}$ , figura 7a. La transición es lineal decreciente, figura 7b. El de la estación lluviosa se ajusta con una oscilación senoidal (figuras 7c y 7d).

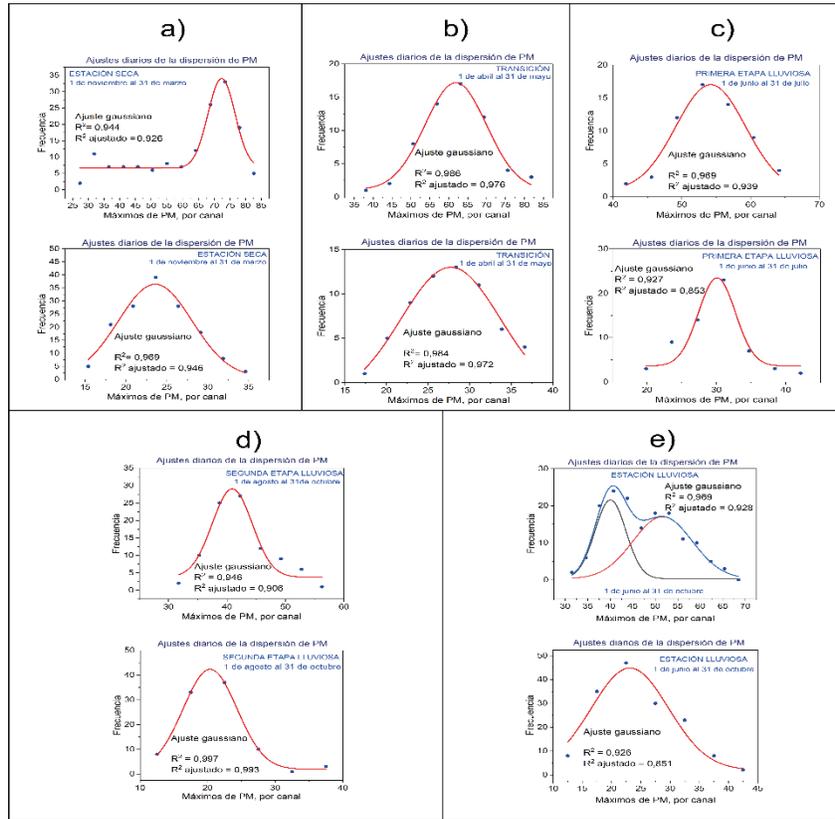


Fig. 7. Ajuste de los datos de PM para las distintas etapas.

Esos comportamientos sugieren relaciones con la meteorología, o sea que las concentraciones de PM están fuertemente correlacionadas con la meteorología.

Todo lo señalado hasta el momento orienta a la búsqueda de una correlación con las variables meteorológicas, entre otras con las variables clásicas como la precipitación y la temperatura. En consecuencia, se procede a identificar si existe algún tipo de correlación entre los valores promedio (de 2006 a 2022), por mes, normalizados, de las PM con seis variables meteorológicas básicas (precipitación, humedad relativa, presión atmosférica, temperatura, dirección y rapidez del viento). Los resultados que se describen a continuación se ven apoyados por la información de la figura 8:

1. Correlación inversa alta: de PM con la Humedad relativa (-0,897) y la precipitación (-0,851). Ver figura 8a (pero con menor dispersión de la Humedad Relativa).
2. Correlación directa alta: de PM con la Temperatura (0,826) y la rapidez del viento (0,895). Ver figura 8b (pero con menor dispersión de la Temperatura).
3. No se encontró ningún tipo de correlación de PM con la presión y la dirección del viento.

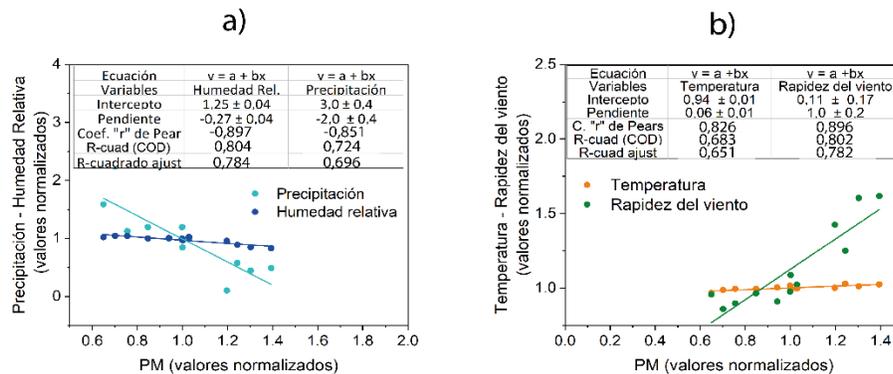


Fig. 8. Ajuste lineal entre los valores normalizados de PM con a) Precipitación y Humedad Relativa. b) Temperatura y Rapidez del viento.

Esos resultados sugieren que las concentraciones de PM son influenciadas fuertemente por las variables meteorológicas y que las altas concentraciones de PM influyen sobre varias variables meteorológicas (Figuras 8a y 8b), lo que implica que la contaminación puede generar un cambio climático en vista de la fuerte correlación entre meteorología y cambio climático. Esto lleva a la reflexión de que hay que evitar la contaminación atmosférica por PM.

## CONCLUSIONES

La Meteorología junto con la Climatología estudian la atmósfera terrestre y sus fenómenos y para ello combina elementos de determinismo, probabilidad y caos. Se basa en la física de la atmósfera y trata de predecir el comportamiento futuro de los sistemas meteorológicos utilizando modelos matemáticos. Por otro lado, siempre

hay un grado de incertidumbre en las predicciones meteorológicas. Esto se debe a que la atmósfera es un sistema complejo y no lineal, y en consecuencia, las pequeñas variaciones en las condiciones iniciales pueden impactar significativamente su comportamiento a largo plazo. Además, la Física también es una ciencia que estudia los sistemas caóticos que son altamente sensibles a las condiciones iniciales y pueden ser impredecibles a largo plazo. La concentración de PM es dependiente de la Meteorología y de la actividad humana, de allí su alta dispersión. La alta circulación vehicular y el manejo inadecuado de las reglas para el control de la contaminación, como las quemas, etc., generan alta concentración de PM. La medición muestra tendencias y relaciones con la pluviometría lo que permiten sacar conclusiones. Por ejemplo, es simplista decir que tenemos dos estaciones anuales: seca y lluviosa. En 17 años vemos tendencias que dibujan cuatro etapas anuales con cierto comportamiento probabilista estable, pero con alta dispersión. El comportamiento anual refleja influencias externas al planeta como la del astro Sol.

## REFERENCIAS

Alejandrina, G. P., Anselmo, G. F. I., Benjamín, S. G., Pilar, F. H., María, G. M. R., Carlos, B. Y. J., ... & Senén, D. A. J. (2012). Contaminación atmosférica (Vol. 6101305). Editorial UNED.

Arciniegas Suarez, C. A. (2012). Diagnóstico y control de material particulado: partículas suspendidas totales y fracción respirable PM10. *Luna Azul*, (34), 195-213.

Agencia Europea de Medio Ambiente. (2013). Cada vez que respiramos. Mejorar la calidad del aire en Europa. Copenhague. Oficina de Publicaciones de la Unión Europea. <https://www.eea.europa.eu/es/publications/senales-2013-cada-vez-que-respiramos>

Bowe, B., Xie, Y., Li, T., Yan, Y., Xian, H., & Al-Aly, Z. (2018). The 2016 global and national burden of diabetes mellitus attributable to PM2.5 air pollution. *The Lancet Planetary Health*, 2(7), e301-e312.

Estadísticas de Salud. (s.f.) Ministerio de Salud, Panamá.  
<https://www.minsa.gob.pa/informacion-salud/estadisticas-de-salud>

Estadísticas CGR. (s.f.). Contraloría General de la República, Panamá.  
<https://www.contraloria.gob.pa/estadisticas-cgr.html>

Fernández García, B., & Pérez Castro, O. (2016). Monitoreo de las partículas suspendidas en el aire en la Estación RN50. Cuaderno 4. Recuperado el 10 de febrero de 2019, de <https://www.estacionrn50.org/cuaderno-4/>

Field, A. (2013). *Discovering statistics using IBM SPSS statistics*. sage.

Gravetter, F. J., & Wallnau, L. B. (2017). Estadística para las ciencias del comportamiento (10.<sup>a</sup> ed.). Cengage Learning.

Howell, D. C. (2012). *Statistical methods for psychology* (8th ed.). Wadsworth.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio climático (INECC). (2019). Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA). Manual Principios de Medición de la Calidad del Aire. Recuperado el 11 de marzo de 2019, de <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/guias/1-%>

Makridakis, S., Wheelwright, S. C., & Hyndman, R. J. (2008). *Forecasting methods and applications*. John wiley & sons.

Nieuwenhuijzen, M. (2021). Contaminación atmosférica y la salud pública. *Investigación y Ciencias. Temas 104. Contaminación Medioambiente y Salud.*

Organización Mundial de la Salud. (2016). La OMS publica estimaciones nacionales sobre la exposición a la contaminación del aire y sus repercusiones para la salud. <https://www.who.int/es/news-room/detail/27-09-2016-who-releases-country-estimates-on-air-pollution-exposure-and-health-impact>

Organización Mundial de la Salud: <https://www.who.int/es/news-room/detail/27-09-2016-who-releases-country-estimates-on-air-pollution-exposure-and-health-impact>

Organización Mundial de la Salud. (2020). Las 10 principales causas de defunción. Recuperado de: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death>

Organización Mundial de la Salud. (2021). Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire: partículas en suspensión (PM2.5 y PM10), ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y monóxido de carbono. Resumen. Ginebra: Organización Mundial de la Salud. Licencia: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

Organización Mundial de la Salud. (22 de septiembre de 2021). Las nuevas Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire tienen como objetivo evitar millones de muertes debidas a la contaminación del aire. <https://www.who.int/es/news/item/22-09-2021-new-who-global-air-quality-guidelines-aim-to-save-millions-of-lives-from-air-pollution>

Pérez, O., & Fernández, B. (2019). Trazadores atmosféricos BE-7, K-40 Y PB-210 en la ciudad de Panamá. *Scientia*, 29(1), 44-67.

Sullivan, G. M., & Artino, A. R. (2013). Analyzing and interpreting data from Likert-type scales. *Journal of graduate medical education*, 5(4), 541-542.

Starnes, D. S., Yates, D., & Moore, D. S. (2010). *The practice of statistics*. Macmillan.

Triola, M. F., Goodman, W. M., Law, R., & Labute, G. (2006). *Elementary statistics* (p. 794). Reading: Pearson/Addison-Wesley.

Valmari, T. & Moring, M. (2000). Testing of different types of flat filtering media for IMS radionuclide stations. Contract 02/1/20/025 Testing Services. STUK-Radiation and Nuclear Safety Authority.

Research and Environmental Surveillance, Airborne Radioactivity, Finland.

Viana Rodríguez, M. (2003). Niveles, composición y origen del material particulado atmosférico en los sectores Norte y Este de la Península Ibérica y Canarias. [Tesis de Doctorado, Universitat de Barcelona.]. Dipòsit Digital de la Universitat de Barcelona.



Tecnociencia, Vol. 25, N°2: 209-231

Julio-Diciembre 2023

ISSN L 2415-0940

## FUNCIONES ABSOLUTAMENTE CONTINUAS Y EL TEOREMA FUNDAMENTAL DEL CÁLCULO

**Angela Y. Franco**

Universidad de Panamá, Centro Regional Universitario de Veraguas, Panamá.  
[angela.franco@up.ac.pa](mailto:angela.franco@up.ac.pa) <https://orcid.org/0000-0002-0538-1688>

**Jorge E. Hernández U.**

Universidad de Panamá, Centro Regional Universitario de Veraguas, Panamá.  
[jorge.hernandezu@up.ac.pa](mailto:jorge.hernandezu@up.ac.pa) <https://orcid.org/0000-0003-1153-1918>

**Edilma Judith Díaz B.**

Universidad de Panamá, Panamá. [edilma.diaz@up.ac.pa](mailto:edilma.diaz@up.ac.pa)  
<https://orcid.org/0000-0003-3949-9462>

**Daniel Vásquez S.**

Universidad de Panamá, Panamá. [daniel.vasquez@up.ac.pa](mailto:daniel.vasquez@up.ac.pa)  
<https://orcid.org/0000-0001-8048-4583>

DOI <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v25n2.a4073>

**Fecha de recepción:** 16 de febrero de 2023

**Fecha de aceptación:** 19 de mayo de 2023

### RESUMEN

El teorema fundamental del cálculo en la teoría de integración de Riemann afirma que si  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  es continua en  $[a, b]$ , entonces la función integral indefinida  $F: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  definida por  $F(x) = \int_a^x f(t)dt$  es diferenciable y  $F'(x) = f(x)$  para todo  $x \in [a, b]$ ; o sea que  $F$  es continuamente diferenciable en  $[a, b]$ . Recíprocamente, si  $f$  es continuamente diferenciable en  $[a, b]$  entonces  $\int_a^b f'(x)dx = f(b) - f(a)$ .

El objetivo de este trabajo es analizar el teorema fundamental del cálculo en la teoría de integración de Lebesgue. En particular, se introducen las funciones de variación acotada y las funciones absolutamente continuas y se prueba que las funciones absolutamente continuas son exactamente las funciones que satisfacen el teorema fundamental del cálculo en la teoría de integración de Lebesgue; o sea que una función  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  es una integral indefinida sí y solo si  $f$  es absolutamente continua en

$[a, b]$ . En este caso  $f$  es diferenciable casi en todas partes en  $[a, b]$ ,  $f'$  integrable en  $[a, b]$  y  $\int_a^b f'(x)dx = f(b) - f(a)$ .

## **PALABRAS CLAVES**

Continuidad absoluta, variación acotada, medida de Lebesgue, integral de Lebesgue, convergencia casi en todas partes, teorema fundamental del cálculo.

## **ABSOLUTELY CONTINUOUS FUNCTIONS AND THE FUNDAMENTAL THEOREM OF CALCULUS**

### **ABSTRACT**

The fundamental theorem of calculus in Riemann integration theory states that if  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  is continuous in  $[a, b]$  then the indefinite integral function  $F: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  defined by  $F(x) = \int_a^x f(t)dt$  is differentiable and  $F'(x) = f(x)$  for all  $x \in [a, b]$ , that is,  $F$  is continuously differentiable in  $[a, b]$ . Conversely, if  $f$  is continuously differentiable in  $[a, b]$  then  $\int_a^b f'(x)dx = f(b) - f(a)$ .

The objective of this work is to analyze the fundamental theorem of calculus in the Lebesgue integration theory. In particular, functions of bounded variation and absolutely continuous functions are introduced, and it is proved that absolutely continuous functions are exactly the functions that satisfy the fundamental theorem of calculus in Lebesgue integration theory. that is, a function  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  is an indefinite integral if and only if  $f$  is absolutely continuous in  $[a, b]$ . In this case  $f$  is differentiable almost everywhere in  $[a, b]$ ,  $f'$  integrable in  $[a, b]$  and  $\int_a^b f'(x)dx = f(b) - f(a)$ .

### **KEY WORDS**

Absolute continuity, bounded variation, Lebesgue measure, Lebesgue integral, convergence almost everywhere, fundamental theorem of calculus.

### **INTRODUCCIÓN**

Un teorema muy importante en el análisis real y que ha motivado el desarrollo de muchos temas es el Teorema Fundamental del Cálculo (el cual se denota por TFC), ya que es un puente que conecta las teorías de diferenciación e integración. Del análisis real básico se sabe que si una

función  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  es diferenciable en  $[a, b]$  y si  $f'$  es continua en  $[a, b]$  entonces  $f'$  es Riemann integrable en  $[a, b]$  y

$$\int_a^x f'(t)dt = f(x) - f(a), \quad \text{para todo } x \in [a, b]$$

Como por hipótesis  $f'$  es continua en  $[a, b]$ , la integral en la ecuación anterior existe como una integral de Riemann (Boyer, 2010) y (Edward, 1994). La pregunta es ¿cómo puede ser el comportamiento de la derivada  $f'$  de una función  $f$  diferenciable en  $[a, b]$ ? En esa dirección Gaston Darboux (1842-1917) probó que  $f'$  satisface la propiedad del valor intermedio en  $[a, b]$  y si  $f'$  es Riemann Integrable en  $[a, b]$ , entonces

$$\int_a^b f'(x)dx = f(b) - f(a).$$

Aunque este hecho es un progreso, la pregunta ahora es si por su naturaleza, la derivada  $f'$  de una función diferenciable en  $[a, b]$  debe ser Riemann Integrable en  $[a, b]$ . Esta pregunta fue respondida por Vito Volterra (1860-1940) quien presentó un ejemplo de una función diferenciable  $f$  en  $[a, b]$  con derivada  $f'$  acotada en  $[a, b]$  pero que no era Riemann Integrable en  $[a, b]$ ; por lo que la ecuación  $\int_a^b f'(x)dx = f(b) - f(a)$ , en este caso, no tiene sentido (Dunham, 2018) y (Gelbaum, 2003). La pregunta ahora es si en la teoría de integración de Lebesgue se satisface el teorema fundamental del cálculo. Más precisamente: si  $f$  es diferenciable casi en todas partes (c.t.p) en  $[a, b]$  y  $f'$  es Lebesgue integrable en  $[a, b]$ , entonces

$$\int_a^x f' = f(x) - f(a), \quad \text{para todo } x \in [a, b]$$

donde la integral es en el sentido de Lebesgue. En general, la respuesta es no. En efecto, la función de Cantor  $C: [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$  es creciente y continua en  $[a, b]$ , diferenciable c.t.p en  $[0, 1]$  con  $C'(x) = 0$  para todo punto  $x$  que no pertenece al conjunto de Cantor. Sin embargo,  $C(0) = 0, C(1) = 1$  y, por lo tanto,

$$0 = \int_0^1 C'(x)dx \neq C(1) - C(0) = 1$$

donde la integral es en el sentido de Lebesgue (Heil, 2010), (Natanson, 2016) y (Krantz, 2018).

El objetivo de este trabajo es caracterizar las funciones que satisfacen el teorema fundamental del cálculo en la teoría de integración de Lebesgue. Para tal efecto se presentarán las propiedades más importantes de las funciones de variación acotada y las funciones absolutamente continuas; así como algunos resultados sobresalientes de la teoría de integración de Lebesgue. Este tema es fundamental en la teoría del análisis real y ha sido objeto de muchos estudios por lo que la mayoría de los resultados no son nuevos, lo que es nuevo es el enfoque.

## **CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE LA TEORÍA DE INTEGRACIÓN DE LEBESGUE**

Cada vez que se use la palabra medida en este trabajo se supondrá que es la medida de Lebesgue en  $\mathbb{R}$ . Como es usual en el análisis real, se usará  $\mu^*$  para indicar la medida exterior de Lebesgue y  $\mu$  para indicar la medida de Lebesgue en  $\mathbb{R}$ . Si  $A$  es un subconjunto medible de  $\mathbb{R}$  entonces  $\mu^*(A) = \mu(A)$ .

Definición 1: Sea  $A$  un subconjunto de  $\mathbb{R}$ .  $A$  es un conjunto nulo o de medida cero si  $\mu^*(A) = 0$ . En este caso  $A$  es un conjunto medible y  $\mu(A) = 0$ .

Una propiedad que es satisfecha para todos los puntos de un conjunto  $A \subset \mathbb{R}$ , excepto posiblemente para los puntos que pertenecen a un subconjunto  $E \subset A$  tal que  $\mu(E) = 0$ , se dice que es satisfecha casi en todas partes de  $E$ . Se abreviará “casi en todas partes” por “c.t.p”.

Es conveniente usar un lenguaje relativamente informal para referirse a conjuntos de medida cero. Si  $P(x)$  es una propiedad aplicable a los elementos de un conjunto  $A$ , se dirá que

“ $P(x)$  para casi todo  $x \in A$ ” ó “ $P(x)$  c.t.p en  $A$ ”

para indicar que  $\{x \in A: P(x) \text{ es falso}\}$  tiene medida cero. Por ejemplo, si  $f, g: A \subset \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  son funciones, se dice que  $f = g$  c.t.p en  $A$  si  $\mu(\{x \in A: f(x) \neq g(x)\}) = 0$ .

Por otro lado, si  $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$  es una sucesión de funciones con dominio común  $A$  y  $f: A \rightarrow \mathbb{R}$  una función, entonces la sucesión  $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$  converge (puntualmente) c.t.p en  $A$  si  $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$  converge a  $f$  en  $A - B$  donde  $\mu(B) = 0$

En el siguiente teorema se presentan algunas caracterizaciones de los conjuntos medibles que permiten utilizar la medida de Lebesgue desde >diferentes ángulos (Orchinnikov, 2013).

Teorema 1: Sea  $A$  un subconjunto de  $\mathbb{R}$ . Los siguientes enunciados son equivalentes.

- i)  $A$  es medible
- ii) Para cada  $\varepsilon > 0$  existe un conjunto abierto  $\mathcal{O}$  en  $\mathbb{R}$  tal que  $A \subset \mathcal{O}$  y  $\mu^*(\mathcal{O} - A) < \varepsilon$ .
- iii) Para cada  $\varepsilon > 0$  existe un conjunto cerrado  $F$  en  $\mathbb{R}$  tal que  $F \subset A$  y  $\mu^*(A - F) < \varepsilon$ .
- iv) Existe un conjunto  $G_\delta$   $G$  tal que  $A \subset G$  y  $\mu^*(G - A) = 0$ .
- v) Existe un conjunto  $F_\sigma$   $F$  tal que  $F \subset A$  y  $\mu^*(A - F) = 0$ .

Dado un subconjunto medible  $A$  de  $\mathbb{R}$  de medida finita, si  $f: A \rightarrow \mathbb{R}$  es una función acotada y medible, entonces  $f$  es Lebesgue integrable en  $A$ ; es decir,  $\int_A f < \infty$ . De hecho, si  $A$  es un conjunto medible de medida finita y  $f: A \rightarrow \mathbb{R}$  es acotada entonces  $f$  es Lebesgue integrable en  $A$  si y solo si  $f$  es medible en  $A$ .

Si  $A = [a, b]$  se usarán las notaciones  $\int_a^b f$  ó  $\int_a^b f(x) dx$  para indicar la integral de Lebesgue  $\int_{[a,b]} f$ . Para indicar la integral de Riemann se usará la notación  $(R) \int_a^b f(x) dx$ . El siguiente teorema muestra que la integral de Lebesgue es una extensión de la integral de Riemann (Krantz, 2018), (Tao, 2011).

Teorema 2: Sea  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  una función acotada en  $[a, b]$ . Si  $f$  es Riemann integrable en  $[a, b]$  entonces  $f$  es Lebesgue integrable en  $[a, b]$  y

$$(R) \int_a^b f(x) dx = \int_a^b f(x) dx = \int_a^b f = \int_{[a,b]} f$$

De ahora en adelante la palabra integral significa la integral de Lebesgue, a menos que explícitamente se indique lo contrario.

En los siguientes teoremas de convergencia se supondrá que  $A$  es un subconjunto medible de  $\mathbb{R}$  con medida finita (Krantz, 2018), (Natanson, 2016), (Tao, 2011).

Teorema 3 (convergencia acotada): Sea  $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$  una sucesión de funciones definidas y medibles en  $A$  y  $f: A \rightarrow \mathbb{R}$  una función. Suponga que existe un  $M > 0$  tal que  $|f_n(x)| \leq M$  para todo  $x \in A, n \in \mathbb{N}$ . Si  $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$  converge a  $f$  en  $A$ , entonces  $f$  es integrable en  $A$  y

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_A f_n = \int_A f.$$

Teorema 4: Sea  $f: A \rightarrow \mathbb{R}$  una función medible. Entonces

$$\int_A f = 0 \text{ si y solo si } f(x) = 0 \text{ c. t. p en } A$$

Teorema 5 (Lema de Fatou): Sea  $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$  una sucesión de funciones no negativas y medibles definidas en  $A$  y  $f: A \rightarrow \mathbb{R}$  una función. Si  $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$  converge a  $f$  c.t.p en  $A$  entonces

$$\int_A f \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \int_A f_n$$

Teorema 6 (Convergencia Monótona): Sea  $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$  una sucesión creciente de funciones no negativas y medibles definidas en  $A$  y  $f: A \rightarrow \mathbb{R}$  una función. Si  $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$  converge a  $f$  c.t.p en  $A$  entonces

$$\int_A f = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_A f_n$$

Teorema 7 (Convergencia Dominada): Sea  $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$  una sucesión de funciones medibles en  $A$  y  $f: A \rightarrow \mathbb{R}$  una función. Suponga que existe una función integrable  $g: A \rightarrow \mathbb{R}$  tal que  $|f_n(x)| \leq g(x)$  para todo  $x \in A, n \in \mathbb{N}$ . Si  $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$  converge a  $f$  c.t.p en  $A$ , entonces  $f$  es integrable en  $A$  y

$$\int_A f = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_A f_n$$

Teorema 8: Sea  $f: A \rightarrow \mathbb{R}$  una función medible.  $f$  es integrable en  $A$  si y solo si, para todo  $\varepsilon > 0$  existe un  $\delta > 0$  tal que si  $E$  es un subconjunto medible de  $A$  con  $\mu(A) < \delta$  entonces  $\int_E |f| < \varepsilon$ .

Definición 2: Sea  $\mathcal{F}$  una familia de funciones medibles en  $A$ .  $\mathcal{F}$  es uniformemente integrable o equi-integrable en  $A$  si para todo  $\varepsilon > 0$  existe un  $\delta > 0$  tal que para toda  $f \in \mathcal{F}$ ,

Si  $E$  es un subconjunto medible de  $A$  con  $\mu(A) < \delta$  entonces  $\int_E |f| < \varepsilon$ .

Teorema 9 (Convergencia de Vitali): Sea  $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$  una sucesión de funciones uniformemente integrables en  $A$  y  $f: A \rightarrow \mathbb{R}$  una función. Si  $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$  converge a  $f$  c.t.p en  $[a, b]$ , entonces  $f$  es integrable en  $A$  y

$$\int_A f = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_A f_n$$

Teorema 10: Sea  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  una función integrable. Entonces  $f(x) = 0$  c.t.p en  $[a, b]$  si y solo si  $\int_{x_1}^{x_2} f = 0$  para todo  $[x_1, x_2] \subset [a, b]$ .

Finalmente, en el siguiente teorema se caracterizan las funciones Riemann integrables.

Teorema 11: Sea  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  una función acotada. Entonces  $f$  es Riemann integrable en  $[a, b]$  sí y solo si  $f$  es continua c.t.p en  $[a, b]$ .

## FUNCIONES DE VARIACIÓN ACOTADA Y ABSOLUTAMENTE CONTINUAS

Una función  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  es monótona si ella es creciente o decreciente en  $[a, b]$ . Además, si  $f$  es monótona entonces el conjunto

$$Disc(f) = \{x \in [a, b]: f \text{ es discontinua en } x\}$$

es a lo sumo enumerable y, las discontinuidades de  $f$  son de saltos (Folland, 2007). También se tiene el siguiente resultado debido a Lebesgue.

Teorema 12 (Lebesgue): Sea  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  una función monótona. Entonces  $f$  es diferenciable c.t.p en  $[a, b]$ .

Del teorema 12 se deduce que la diferencia de dos funciones crecientes en un intervalo  $[a, b]$  es diferenciable c.t.p en  $[a, b]$ . En lo que sigue se caracteriza la clase de funciones que se pueden expresar como la diferencia de dos funciones crecientes en el intervalo no degenerado  $[a, b]$  o sea que  $a < b$ .

Sea  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  una función y considere la partición  $P = \{x_0, x_1, \dots, x_n\}$ , donde  $a = x_0 < x_1 < \dots < x_{n+1} = b$ . La norma de  $P$  se denota por  $\|P\|$  y se define por

$$\|P\| = \sup\{x_{i+1} - x_i: i = 0, 1, \dots, n\}.$$

La familia de todas las particiones de  $[a, b]$  se denota por  $\mathcal{P}([a, b])$ . La expresión

$$V_P = \sum_{i=0}^n |f(x_{i+1}) - f(x_i)|$$

se llama la variación de  $f$  con respecto a la partición  $P$ .

Definición 3: Sea  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  una función. La variación total de  $f$  en  $[a, b]$  es

$$V_a^b(f) = \sup\{V_P: P \in \mathcal{P}([a, b])\}.$$

$f$  es de variación acotada en  $[a, b]$  si  $V_a^b(f) < \infty$ . El conjunto de las funciones de variación acotada en  $[a, b]$  se denota  $V[a, b]$ .

Ejemplo 1

- i) Sea  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  una función monótona en  $[a, b]$
- Si  $f$  es creciente en  $[a, b]$  entonces  $V_P(f) = f(b) - f(a)$  para toda  $P \in \mathcal{P}([a, b])$ . Por lo tanto,  $V_a^b(f) = f(b) - f(a) < \infty$ .
  - Si  $f$  es decreciente en  $[a, b]$ , entonces  $V_P(f) = f(a) - f(b)$  para toda  $P \in \mathcal{P}([a, b])$ . Por lo tanto,  $V_a^b(f) = f(a) - f(b) < \infty$ .

Así  $f$  es de variación acotada en  $[a, b]$  y  $V_a^b(f) = |f(b) - f(a)|$ .

ii) Si  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  es una función lipschitziana en  $[a, b]$  con constante de Lipschitz  $c$ , entonces  $f$  es de variación acotada en  $[a, b]$  y  $V_a^b(f) \leq c(b - a)$ .

iii) Si  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  es diferenciable en  $[a, b]$  y  $f'$  es acotada en  $[a, b]$ , entonces  $f$  es de variación acotada en  $[a, b]$ . En particular, si  $f$  es continuamente diferenciable en  $[a, b]$ , entonces  $f$  es de variación acotada en  $[a, b]$ .

Propiedades: Sean  $f, g: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  funciones.

1. Sea  $P \in \mathcal{P}([a, b])$ . Si  $P'$  es un refinamiento de  $P$  (o sea que  $P' \in \mathcal{P}([a, b])$  y  $P \subset P'$ ), entonces  $V_P(f) \leq V_{P'}(f)$ .

2. Si  $c \in (a, b)$ , entonces  $f \in V[a, b]$  sí y solo si  $f \in V[a, c]$  y  $f \in V[c, b]$ . Además, si  $f \in V[a, b]$  entonces

$$V_a^b(f) = V_a^c(f) + V_c^b(f)$$

3. Si  $f \in V[a, b]$  y  $[c, d] \subset [a, b]$  entonces  $f \in V[c, d]$  y

$$V_a^d(f) - V_a^c(f) = V_c^d(f) \geq 0.$$

4. Si  $f, g \in V[a, b]$  y  $k \in \mathbb{R}$  entonces  $|f|, kf, f \pm g, fg \in V[a, b]$ .

Además, si  $\frac{1}{g}$  es acotada en  $[a, b]$  entonces  $\frac{1}{g} \in V[a, b]$ .

Sea  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  una función de variación acotada en  $[a, b]$ . Entonces, por la propiedad 2, se puede definir la función  $V: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  por

$$V(x) = \begin{cases} V_a^x(f) & \text{si } a < x \leq b \\ 0 & \text{si } x = a \end{cases}$$

Por la propiedad (3) se tiene que  $V$  es creciente en  $[a, b]$ .  $V$  es llamada la función de variación total de  $f$  en  $[a, b]$ .

Suponga que  $a \leq c < d \leq b$  y tome la partición  $P = \{c, d\}$  de  $[c, d]$ . Entonces

$$f(c) - f(d) \leq |f(d) - f(c)| = V_P(f) \leq V_c^d(f) = V_a^d(f) - V_a^c(f)$$

de donde

$$\begin{aligned} f(c) + V_a^c(f) &\leq f(d) + V_a^d(f) \\ f(c) + V(c) &\leq f(d) + V(d) \\ (f + V)(c) &\leq (f + V)(d) \end{aligned}$$

Lo que implica que  $f + V$  es creciente en  $[a, b]$ . Así se puede enunciar el siguiente teorema.

**Teorema 13 (Jordan):** Sea  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  una función. Entonces  $f \in V[a, b]$  sí y solo si  $f$  se puede expresar como la diferencia de dos funciones crecientes en  $[a, b]$ . En este caso se tiene que

$$f(x) = (f + V)(x) - V(x), \text{ para todo } x \in [a, b]$$

Lo que es conocido como la descomposición de Jordan de  $f$ .

Demostración.

Suponga que  $f \in V[a, b]$ . Entonces, por lo probado anteriormente, las funciones  $V$  y  $f + V$  son crecientes en  $[a, b]$  y  $f = (f + V) - V$ . Recíprocamente, suponga que  $f = g + h$  en  $[a, b]$ , donde  $g$  y  $h$  son funciones crecientes en  $[a, b]$ . Luego, por el Ejemplo 1 se tiene que  $g, h \in V[a, b]$ . Por las propiedades de las funciones de variación acotada, se tiene que  $f = g - h \in V[a, b]$ .

Teorema 14: Sea  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  una función creciente. Entonces  $f'$  es integrable en  $[a, b]$  y

$$\int_a^b f' \leq f(b) - f(a)$$

Demostración.

Como  $f$  es monótona en  $[a, b]$  se tiene que  $f$  es medible en  $[a, b]$ . Por el teorema 12  $f$  es diferenciable c.t.p en  $[a, b]$ . Extienda  $f$  que tome el valor  $f(b)$  en el intervalo  $(b, b + 1]$ . Para cada  $n \in \mathbb{N}$  defina las funciones  $f_n, g_n: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  por

$$f_n(x) = \frac{f\left(x + \frac{1}{n}\right) - f(x)}{\frac{1}{n}} \quad \text{y} \quad g_n(x) = \frac{1}{\frac{1}{n}} \int_x^{x + \frac{1}{n}} f \quad (\text{función valor promedio de } f)$$

Luego,  $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$  es una sucesión de funciones medibles no negativas que converge a  $f'$  c.t.p en  $[a, b]$ . Por el Teorema 5

$$\int_a^b f' \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \int_a^b f_n$$

Por otro lado, como  $f$  es creciente en  $[a, b]$  y constante en  $\left[b, b + \frac{1}{n}\right]$ , haciendo cambio de variables, para cada  $n \in \mathbb{N}$  se tiene que

$$\begin{aligned}
\int_a^b f_n &= \int_a^b \frac{f\left(x + \frac{1}{n}\right) - f(x)}{\frac{1}{n}} \\
&= \frac{1}{n} \int_a^b f\left(x + \frac{1}{n}\right) - \frac{1}{n} \int_a^b f(x) \\
&= \frac{1}{n} \int_{a+\frac{1}{n}}^{b+\frac{1}{n}} f - \frac{1}{n} \int_a^b f \\
&= \frac{1}{n} \int_b^{b+\frac{1}{n}} f - \frac{1}{n} \int_a^{a+\frac{1}{n}} f \\
&= f(b) - \frac{1}{n} \int_a^{a+\frac{1}{n}} f \\
&\leq f(b) - f(a)
\end{aligned}$$

Por consiguiente

$$\int_a^b f' \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \int_a^b f_n \leq \limsup_{n \rightarrow \infty} \int_a^b f_n \leq f(b) - f(a)$$

Observación: Note que de la demostración del Teorema 14, se deduce que si  $a \leq c < d \leq b$ , entonces

$$\int_c^d f_n = g_n(d) - g_n(c)$$

Teorema 15: Sea  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  una función de variación acotada. Entonces  $f$  es diferenciable c.t.p en  $[a, b]$  y  $f'$  es integrable en  $[a, b]$ .

Demostración.

Como  $f \in V[a, b]$  por el Teorema 13, existen dos funciones crecientes  $g, h: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  tal que  $f = g - h$ . Como, por el Teorema 12,  $f$  y  $g$  son

diferenciables c.t.p en  $[a, b]$ , se tiene que  $f = g - h$  es diferenciable c.t.p en  $[a, b]$  y  $f' = g' - h'$  c.t.p en  $[a, b]$ . Finalmente, como por el Teorema 14,  $g'$  y  $h'$  son integrables en  $[a, b]$ , se tiene que  $f'$  es integrable en  $[a, b]$ .

Definición 4: Sea  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  una función.  $f$  es absolutamente continua en  $[a, b]$  si para cada  $\varepsilon > 0$  existe un  $\delta > 0$  tal que para toda colección finita y disjunta  $\{(a_k, b_k)\}_{k=1}^n$  de intervalos abiertos en  $(a, b)$  tal que

$$\text{Si } \sum_{k=1}^n (b_k - a_k) < \delta, \text{ se tiene que } \sum_{k=1}^n |f(b_k) - f(a_k)| < \varepsilon.$$

Propiedades: Sea  $f, g: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  funciones.

1. Se  $f$  es absolutamente continua en  $[a, b]$  entonces  $f$  es uniformemente continua en  $[a, b]$  (solo se debe tomar  $n = 1$  en la Definición 4). La recíproca no es cierta. La función  $f: [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$  definida por

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x = 0 \\ x \operatorname{sen} \left( \frac{\pi}{2x} \right) & \text{si } 0 < x \leq 1 \end{cases}$$

es uniformemente continua en  $[0, 1]$  pero no es absolutamente continua en  $[0, 1]$ .

2. Si  $f$  es lipschitziana en  $[a, b]$  entonces  $f$  es absolutamente continua en  $[0, 1]$ .

3. Si  $f$  es diferenciable en  $[a, b]$  y  $|f'(x)| \leq M$  para todo  $x \in [a, b]$  entonces  $f$  es lipschitziana en  $[a, b]$  y, por ende, absolutamente continua en  $[a, b]$ .

4. Si  $f$  y  $g$  son absolutamente continuas en  $[a, b]$  y  $k \in \mathbb{R}$  entonces  $|f|, kf, f \pm g$  y  $fg$  son absolutamente continuas en  $[a, b]$ . Además, si existe un  $c > 0$  tal que  $|g(x)| \geq c$  para todo  $x \in [a, b]$ , entonces  $\frac{1}{g}$  es absolutamente continua en  $[a, b]$ .

Teorema 16: Sea  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  una función absolutamente continua en  $[a, b]$ . Entonces  $f$  es de variación acotada en  $[a, b]$ . Más aun,  $f$  es la diferencia de dos funciones crecientes y absolutamente continuas en  $[a, b]$ .

Demostración.

Sea  $\varepsilon = 1$ . Como  $f$  es absolutamente continua en  $[a, b]$ , existe un  $\delta > 0$  tal que para toda colección finita y disjunta  $\{(a_k, b_k)\}_{k=1}^n$  de intervalos abiertos en  $(a, b)$  con  $\sum_{k=1}^n (b_k - a_k) < \delta$  se tiene que  $\sum_{k=1}^n |f(b_k) - f(a_k)| < 1$ .

Sea  $P = \{x_0 = a, x_1, x_2, \dots, x_N = b\}$  una partición fija de  $[a, b]$  tal que  $\|P\| < \delta$ . Sea  $\alpha_0 = x_{i-1} < \alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_{k_i} = x_i$  una partición del intervalo  $[x_{i-1}, x_i]$ . Entonces  $\sum_{j=1}^{k_i} (\alpha_j - \alpha_{j-1}) = x_i - x_{i-1} < \delta$ . Por lo tanto,  $\sum_{k=1}^n |f(\alpha_j) - f(\alpha_{j-1})| < 1$ . Esto implica que  $V_{x_{i-1}}^{x_i}(f) \leq 1$  para todo  $i = 1, 2, \dots, N$ . Luego, por las propiedades de la variación total de una función, se tiene que

$$V_a^b(f) = V_{x_0}^{x_1}(f) + V_{x_1}^{x_2}(f) + \dots + V_{x_{N-1}}^{x_N}(f) \leq N$$

Como  $N$  es fijo, se tiene que  $f$  es de variación acotada en  $[a, b]$ .

Por la descomposición de Jordan y como la suma y diferencia de funciones absolutamente continuas es absolutamente continua, para probar que  $f$  es la diferencia de dos funciones crecientes y absolutamente continuas, es suficiente probar que la función variación total de  $f$  es absolutamente continua. Sea  $\varepsilon > 0$ . Como  $f$  es absolutamente continua en  $[a, b]$  existe un  $\delta > 0$  tal que para toda colección finita y disjunta  $\{(a_k, b_k)\}_{k=1}^n$  de intervalos abiertos en  $(a, b)$  con  $\sum_{k=1}^n (b_k - a_k) < \delta$  se tiene que  $\sum_{k=1}^n |f(b_k) - f(a_k)| < \frac{\varepsilon}{2}$ . Sea  $\{(c_k, d_k)\}_{k=1}^n$  una colección finita y disjunta de intervalos abiertos de  $(a, b)$  tal que  $\sum_{k=1}^n (d_k - c_k) < \delta$ . Para cada  $k = 1, 2, \dots, n$  sea  $P_k$  una partición del intervalo  $[c_k, d_k]$ . Entonces

$$\sum_{k=1}^n V_{P_k}(f) < \frac{\varepsilon}{2}$$

Tomando supremo cuando  $k = 1, 2, \dots, n$  y  $P_k \in \mathcal{P}([c_k, d_k])$  se tiene que

$$\sum_{k=1}^n V_{c_k}^{d_k}(f) \leq \frac{\varepsilon}{2} < \varepsilon$$

Como  $V_{c_k}^{d_k}(f) = V_a^{d_k}(f) - V_a^{c_k}(f)$  se tiene que si  $\sum_{k=1}^n (d_k - c_k) < \delta$  entonces

$$\sum_{k=1}^n |V(d_k) - V(a_k)| = \sum_{k=1}^n |V_a^{d_k}(f) - V_a^{c_k}(f)| = \sum_{k=1}^n V_{c_k}^{d_k}(f) < \varepsilon$$

lo que implica que la función variación total  $V$  de  $f$  es absolutamente continua en  $[a, b]$ .

En el siguiente teorema se caracterizan las funciones absolutamente continuas.

**Teorema 17:** Sea  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  una función continua y sea  $\mathcal{F} = \{f_n: n \in \mathbb{N}\}$  la familia de funciones definidas por

$$f_n(x) = \frac{f\left(x + \frac{1}{n}\right) - f(x)}{\frac{1}{n}}$$

(Ver demostración del Teorema 14). Entonces,  $f$  es absolutamente continua en  $[a, b]$  sí y solo si  $\mathcal{F}$  es uniformemente integrable en  $[a, b]$ .

**Demostración.**

De la observación del Teorema 14 se tiene que si  $a \leq c < d \leq b$ .

Entonces

$$\int_c^d f_n = g_n(d) - g_n(c)$$

donde  $g_n$  es la función valor promedio de  $f$  definida por

$$g_n(x) = \frac{1}{\frac{1}{n}} \int_x^{x+\frac{1}{n}} f$$

Suponga que la familia  $\mathcal{F}$  es absolutamente integrable en  $[a, b]$ . Sea  $\varepsilon > 0$ . Entonces existe un  $\delta > 0$  tal que si  $A$  es un conjunto medible con  $\mu(A) < \delta$  entonces  $\int_A |f_n| < \frac{\varepsilon}{2}$  para todo  $n \in \mathbb{N}$ . Sea  $\{(a_k, b_k)\}_{k=1}^m$  una colección finita y disjunta de intervalos abiertos en  $(a, b)$  tal que  $\sum_{k=1}^m (b_k - a_k) < \delta$ . Para todo  $n \in \mathbb{N}$  y  $k = 1, 2, \dots, m$  se tiene que

$$g_n(b_k) - g_n(a_k) = \int_{a_k}^{b_k} f_n$$

Por lo tanto,

$$\sum_{k=1}^m |g_n(b_k) - g_n(a_k)| \leq \sum_{k=1}^m \int_{a_k}^{b_k} |f_n| = \int_A |f_n|$$

donde  $A = \cup_{k=1}^m (a_k, b_k)$  y  $\mu(A) < \delta$ . Por lo tanto

$$\sum_{k=1}^m |g_n(b_k) - g_n(a_k)| < \frac{\varepsilon}{2} \text{ para todo } n \in \mathbb{N}$$

Pero como  $f$  es continua en  $[a, b]$  se tiene que

$$\lim_{n \rightarrow \infty} g_n(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\frac{1}{n}} \int_x^{x+\frac{1}{n}} f = f(x)$$

de donde

$$\sum_{k=1}^m |f(b_k) - f(a_k)| \leq \frac{\varepsilon}{2} < \varepsilon$$

Por consiguiente,  $f$  es absolutamente continua en  $[a, b]$ .

Suponga ahora que  $f$  es absolutamente continua en  $[a, b]$ . Luego, por el Teorema 16,  $f$  es la diferencia de dos funciones crecientes y absolutamente continuas. De esta forma, se puede suponer, sin pérdida de generalidad, que  $f$  es creciente. Por lo tanto, las funciones  $f_n$  son no negativas. Se debe probar que para todo  $\varepsilon > 0$  existe un  $\delta > 0$  tal que para todo conjunto medible  $A$  de  $[a, b]$  con  $\mu(A) < \delta$  se tiene que

$$\int_A f_n < \varepsilon, \quad \text{para todo } n \in \mathbb{N}$$

Sea  $A$  un conjunto medible de  $[a, b]$ . Luego, por el Teorema 1, existe un conjunto  $G_\delta$  tal que  $A \subset G$  y  $\mu(G - A) = 0$ . Pero todo conjunto  $G_\delta$  es la intersección de una sucesión decreciente de conjuntos abiertos. Además, todo conjunto abierto es la unión disjunta de una colección enumerable de intervalos abiertos y, por lo tanto, todo conjunto abierto es la unión de una sucesión creciente de conjuntos abiertos, siendo cada uno la unión de una colección disjunta y finita de intervalos abiertos. Luego, por la continuidad de la integral, es suficiente determinar un  $\delta > 0$  tal que para toda colección finita y disjunta  $\{(a_k, b_k)\}_{k=1}^n$  de intervalos abiertos en  $(a, b)$  se tiene que  $\int_A f_n < \frac{\varepsilon}{2}$ , para todo  $n \in \mathbb{N}$ , donde  $A = \bigcup_{k=1}^n (a_k, b_k)$  y  $\mu(A) < \delta$ ; lo cual se deja al lector.

## EL TEOREMA FUNDAMENTAL DEL CÁLCULO PARA LA INTEGRAL DE LEBESGUE

Sea  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  una función continua. De la sección anterior se tiene que

$$\int_a^b f_n = g_n(b) - g_n(a), \quad \text{para todo } n \in \mathbb{N}$$

donde

$$f_n(x) = \frac{f\left(x + \frac{1}{n}\right) - f(x)}{\frac{1}{n}} \quad y \quad g_n(x) = \frac{1}{n} \int_x^{x+\frac{1}{n}} f$$

Por lo tanto, como  $f$  es continua en  $[a, b]$ , se tiene que

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_a^b f_n = \lim_{n \rightarrow \infty} (g_n(b) - g_n(a)) = f(b) - f(a).$$

Teorema 18: Sea  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  una función absolutamente continua en  $[a, b]$ . Entonces  $f$  es diferenciable c.t.p en  $[a, b]$ ,  $f'$  es integrable en  $[a, b]$  y

$$\int_a^b f' = f(b) - f(a)$$

Demostración.

Como  $f$  es absolutamente continua en  $[a, b]$ , por los Teoremas 15 y 16  $f$  es diferenciable c.t.p en  $[a, b]$  y  $f'$  es integrable en  $[a, b]$ . Por lo tanto, la sucesión  $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$  converge c.t.p a  $f'$  en  $[a, b]$ . Por el Teorema 17, la familia  $\mathcal{F} = \{f_n: n \in \mathbb{N}\}$  es uniformemente integrable en  $[a, b]$ . Luego, por el Teorema 9,

$$\int_a^b f' = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_a^b f_n$$

pero

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_a^b f_n = f(b) - f(a)$$

por lo tanto,

$$\int_a^b f' = f(b) - f(a).$$

Definición 5: Sea  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  una función continua.  $f$  es una integral indefinida (de Lebesgue) si existe una función integrable  $g: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  tal que

$$f(x) = f(a) + \int_a^x g$$

En este caso se dice que  $f$  es la integral indefinida de  $g$  en  $[a, b]$ .

En el siguiente teorema se caracterizan las funciones que son integrales indefinidas.

Teorema 19: Sea  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  una función. Entonces,  $f$  es absolutamente continua en  $[a, b]$  sí y solo si  $f$  es una integral indefinida.

Demostración.

Suponga que  $f$  es absolutamente continua en  $[a, b]$ . Luego,  $f$  es absolutamente continua en  $[a, x]$  para todo  $x \in (a, b]$ . Por el Teorema 18  $f$  es diferenciable c.t.p en  $[a, x]$  y

$$\int_a^x f' = f(x) - f(a)$$

o sea que

$$f(x) = f(a) + \int_a^x f'$$

Por lo tanto,  $f$  es la integral indefinida de  $f'$  en  $[a, b]$ .

Recíprocamente, suponga que  $f$  es una integral indefinida de  $g$  en  $[a, b]$ .

Sea  $\varepsilon > 0$ . Como  $|g|$  es integrable en  $[a, b]$ , por el Teorema 8 existe un  $\delta > 0$  tal que si  $A$  es un subconjunto medible de  $[a, b]$  con  $\mu(A) < \delta$ , entonces  $\int_A |g| < \varepsilon$ . Sea  $\{(a_k, b_k)\}_{k=1}^n$  una colección finita y disjunta de intervalos abiertos de  $(a, b)$  tal que  $\sum_{k=1}^n (b_k - a_k) < \delta$ . Entonces  $A = \cup_{k=1}^n (a_k, b_k)$  es un subconjunto medible de  $[a, b]$  con  $\mu(A) < \delta$ .

Luego por las propiedades de monotonía y aditividad de la integral se tiene que

$$\begin{aligned}
\sum_{k=1}^n |f(b_k) - f(a_k)| &= \sum_{k=1}^n \left| \left( f(a) + \int_a^{b_k} g \right) - \left( f(a) + \int_a^{a_k} g \right) \right| \\
&= \sum_{k=1}^n \left| \int_{a_k}^{b_k} g \right| \\
&\leq \sum_{k=1}^n \int_{a_k}^{b_k} |g| \\
&= \int_A |g| \\
&< \varepsilon
\end{aligned}$$

Esto implica que  $f$  es absolutamente continua en  $[a, b]$ .

Teorema 20: Sea  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  una función monótona. Entonces,  $f$  es absolutamente continua en  $[a, b]$  sí y solo si  $\int_a^b f' = f(b) - f(a)$ .

Demostración

Suponga que  $f$  es absolutamente continua en  $[a, b]$ , entonces por el Teorema 18,  $f$  es diferenciable c.t.p  $[a, b]$ ,  $f'$  es integrable en  $[a, b]$  y  $\int_a^b f' = f(b) - f(a)$ ; independientemente de la hipótesis de monotonía.

Suponga ahora que  $f$  es creciente (en caso contrario tome  $-f$  en lugar de  $f$ ) y que  $\int_a^b f' = f(b) - f(a)$ . Sea  $x \in [a, b]$ . Por la aditividad sobre el dominio de integración, se tiene que

$$0 = \int_a^b f' - (f(b) - f(a)) = \left[ \int_a^x f' - (f(x) - f(a)) \right] + \left[ \int_x^b f' - (f(b) - f(x)) \right].$$

Por el Teorema 14 se tiene que

$$\int_a^x f' - (f(x) - f(a)) \leq 0 \quad \text{y} \quad \int_x^b f' - (f(b) - f(x)) \leq 0$$

Por lo tanto,

$$\int_a^x f' - (f(x) - f(a)) = 0 \quad \text{y} \quad \int_x^b f' - (f(b) - f(x)) = 0.$$

Así

$$f(x) = f(a) + \int_a^x f'$$

y  $f$  es la integral indefinida de  $f'$ . Luego por el Teorema 19  $f$  es absolutamente continua en  $[a, b]$ .

Teorema 21: Sea  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  una función integrable. Entonces

$$\frac{d}{dx} \left( \int_a^x f \right) = f(x) \quad \text{c. t. p en } [a, b]$$

Demostración.

Sea  $F: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  la función definida por  $F(x) = \int_a^x f$ . Como  $F$  es una integral indefinida por los Teoremas 18 y 19,  $F$  diferenciable c.t.p en  $[a, b]$  y  $F'$  es integrable en  $[a, b]$ . Esto implica que  $F' - f$  es integrable en  $[a, b]$ .

Sea  $[x_1, x_2] \subset [a, b]$ . Por el Teorema 18 y las propiedades de linealidad y aditividad sobre el dominio de integración, se tiene que

$$\begin{aligned} \int_{x_1}^{x_2} (F' - f) &= \int_{x_1}^{x_2} F' - \int_{x_1}^{x_2} f \\ &= F(x_2) - F(x_1) - \int_{x_1}^{x_2} f \\ &= \int_a^{x_2} f - \int_a^{x_1} f - \int_{x_1}^{x_2} f \\ &= 0 \end{aligned}$$

Luego, por el Teorema 10,  $(F' - f)(x) = 0$  c.t.p en  $[a, b]$ ; es decir,

$$\frac{d}{dx} \left( \int_a^x f \right) = f(x) \text{ c.t.p en } [a, b].$$

## CONCLUSIONES

1. Sea  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  una función. Si  $f \in V[a, b]$ , entonces, por el Teorema 13,  $f(x) = g(x) - h(x)$  donde  $g$  y  $h$  son funciones crecientes en  $[a, b]$ . Luego, por el Teorema 12,  $g$  y  $h$  son diferenciables c.t.p en  $[a, b]$ . Esto implica que  $f$  es diferenciable c.t.p en  $[a, b]$  y

$f'(x) = g'(x) - h'(x)$  c.t.p en  $[a, b]$ . Además, por el Teorema 15,  $f'$  es integrable en  $[a, b]$ .

2. Sea  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  una función. Por el Teorema 19,  $f$  es absolutamente continua en  $[a, b]$  sí y solo si  $f$  es una integral indefinida. En este caso,  $f$  es diferenciable c.t.p en  $[a, b]$ ,  $f'$  es integrable en  $[a, b]$  y

$$\int_a^b f' = f(b) - f(a)$$

Además, si  $f'(x) = 0$  c.t.p en  $[a, b]$  entonces  $f$  es constante en  $[a, b]$ .

3. Sea  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  una función de variación acotada. Como  $f$  es diferenciable c.t.p en  $[a, b]$  y  $f'$  es integrable en  $[a, b]$ , se pueden definir las funciones  $g, h: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  por

$$g(x) = \int_a^x f' \quad \text{y} \quad h(x) = f(x) - g(x)$$

Por el Teorema 19  $g$  es absolutamente continua en  $[a, b]$  y, por el Teorema 16  $g$  es de variación acotada en  $[a, b]$ . Además, por el Teorema 21,  $h'(x) = 0$  c.t.p en  $[a, b]$ . Así  $f = g + h$ , donde  $g$  es absolutamente continua y  $h$  es singular (o sea, de variación acotada y con derivada nula c.t.p en  $[a, b]$ ). Esta descomposición de una función de variación acotada es llamada una descomposición de Lebesgue de  $f$

## REFERENCIAS

Boyer, C.B. & Merzbach C.B. 2010. A History of Mathematics. Wiley. USA.

Dunham, W. 2018. The Calculus Gallery: Masterpieces from Newton to Lebesgue. Princeton University Press. USA.

Edward, C.H. 1994. The Historical Development of the Calculus. Springer-Verlag. USA.

Folland, G.B. 2007. Real Analysis: Modern Techniques and Their Applications. Wiley. USA

Gelbaum, B.R. & Olmsted, J.M.H. 2003. Counter-example in Analysis. Dover Publications, Inc. USA.

Heil, C. 2010. Introduction to Real Analysis. Springer. USA.

Krantz, S. G. 2018. Elementary Introduction to the Lebesgue Integral. Taylor & Francis Group. USA.

Natanson, I.R. 2016. Theory of Functions of Real Variable. Volume I. Dover Publications, Inc. USA.

Orchinnikov, S. 2013. Measure, Integral, Derivative: A Course on Lebesgue's Theory. Springer. USA.

Tao, T. 2011. An Introduction to Measure Theory. American Mathematical Society. USA.



**METALES TRAZAS (CU, CD, PB) EN AGUA, SEDIMENTO Y TEJIDO BLANDO DE *LEUKOMA ASPERIMMA* (LAMELLIBRANCHIA: VENERIDAE), EN LA PLAYA BIQUE, PACIFICO DE PANAMÁ.**

**Juan Antonio Gómez H**

Universidad de Panamá, Panamá. [juanay05@hotmail.com](mailto:juanay05@hotmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-9320-1674>

**Orlando Leone**

Universidad de Panamá, Panamá. [orlandoleone@gmail.com](mailto:orlandoleone@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-5106-1167>

**Janzel Villalaz**

Universidad de Panamá, Panamá. [janzelvillalaz@yahoo.com](mailto:janzelvillalaz@yahoo.com)  
<https://orcid.org/0000-0001-8914-3216>

**Italo Goti**

Universidad de Panamá, Centro Regional de Azuero, Panamá. [italo.goti@up.ac.pa](mailto:italo.goti@up.ac.pa)  
<https://orcid.org/0000-0001-5702-5389>

DOI <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v25n2.a4074>

**Fecha de recepción:** 29 de marzo de 2023

**Fecha de aceptación:** 24 de mayo de 2023

**RESUMEN**

Se colectaron muestras de agua, sedimento y tejido blando de *Leukoma asperrima*, en tres estaciones perpendiculares a la línea de agua, en playa Bique, Panamá, para determinar la concentración de metales traza cobre (Cu), cadmio (Cd) y plomo (Pb), en marea baja de sicigia entre diciembre y junio de 2021. Los parámetros fisicoquímicos se determinaron con una sonda multiparamétrica, las muestras de las tres matrices fueron colectadas y preservadas hasta su tratamiento. Se observó mayor concentración de cobre y cadmio en agua, plomo en sedimento y cobre en el tejido blando. El cobre presentó valores más altos en agua en temporada seca, mientras que en sedimento y tejido blando predominó en la lluviosa, el cadmio mostró valores más

elevados en temporada lluviosa en las tres matrices, mientras que la concentración de plomo fue mayor en agua y sedimento en la temporada lluviosa y en el tejido blando, durante la seca. Los valores encontrados de los tres metales trazan en tejido de *L. asperrima* no superan los límites permisibles para consumo humano según las normas internacionales.

## **PALABRAS CLAVES**

Molusco bivalvo, concentración, contaminación, iones metálicos, Pacífico de Panamá

## **TRACE METALS (CU, CD, PB) IN WATER, SEDIMENT AND SOFT TISSUE OF LEUKOMA ASPERIMMA (LAMELLIBRANCHIA: VENERIDAE), AT BIQUE BEACH, PANAMA PACIFIC.**

### **ABSTRACT**

Samples of water, sediment, and soft tissue of *Leukoma asperrima* were collected at three stations perpendicular to the water line at Bique Beach, Panama, to determine the concentration of trace metals copper (Cu), cadmium (Cd), and lead (Pb), at the low tide of syzygy between December and June 2021. The physical-chemical parameters were determined with a multiparametric probe, and the samples of the three matrices were collected and preserved until their treatment. Higher concentrations of copper and cadmium in water, lead in sediment, and copper in soft tissue was observed. Copper presented higher values in water in the dry season, while in sediment and soft tissue, it predominated in the rainy season, cadmium showed higher values in the rainy season in the three matrices, while lead concentration was higher in water and sediment. in the rainy season and the soft tissue, during the dry season. The values found for the three trace metals in *L. asperrima* tissue do not exceed the permissible limits for human consumption according to international standards.

### **KEY WORDS**

Bivalve mollusks, concentration, pollution, metal ions, Panama Pacific.

### **INTRODUCCIÓN**

En los últimos años, se ha observado que la contaminación se ha acentuado como consecuencia de las actividades humanas; en ecosistemas acuáticos se ha determinado la presencia de innúmeros sustancias químicas (Neff, 2002), específicamente, 65 elementos traza en invertebrados marinos (Eisler, 2010), que provienen de agroquímicos

como pesticidas, y fungicidas, principalmente (Bellas et al 2023), cuya toxicidad depende de las concentraciones debido a factores biológicos, como edad, proximidad a la fuente, variaciones de los parámetros físico-químicos y la interacción con otras sustancias (Hernández-Almaraz et al., 2018), entre estas, sustancias nocivas que llegan al ecosistema acuático de fuentes hídricas procedentes de residuos industriales, agrícolas o domésticos en los que se encuentran metales traza que no pueden ser descompuestos y al depositarse en el sedimento no sufren cambio alguno (Codina y Pérez, 2001), a pesar de que en niveles bajos son aceptados como constituyentes naturales de los organismos, además de encontrarse de manera natural en la corteza continental (Mataba et al., 2016).

Numerosos estudios han abordado este problema y existe unidad de criterio en la comunidad científica respecto al carácter tóxico de los mismos para los seres vivos y sus efectos negativos en el ambiente acuático (González y Moreno, 2004).

Los impactos resultantes sobre los humanos son diversos y complejos, al constituir compuestos biotóxicos que alteran y modifican las estructuras que dificultan reacciones fisiológicas (Mahurpawar, 2015), debido a que las sales solubles en el agua acompañadas de estos metales los hace tóxicos, por la interacción de estas con variaciones de la temperatura, en altas concentraciones (Hernández-Almaraz et al., 2018) y acumulables en los organismos que los absorben y a su vez son fuente de contaminación en la red trófica, que al ser ingeridos pueden producir daños severos (Ríos y Escala, 2002).

Una de las principales características del medio marino la constituyen sus condiciones fisicoquímicas relativamente constantes; sin embargo, ciertos organismos adaptados a estas podrían aceptar ligeros cambios ambientales (Flores y Pilar, 1987). Los metales llegan a peces y moluscos que los bioacumulan y se torna un peligro para el consumo humano (Nwajei et al., 2012, Wang y Lu, 2017); en el caso particular de *Leukoma asperimma*, distribuida en la costa pacífica panameña, es una vía de ingreso de metales a la población que la consume, por su importancia como fuente de alimento para los moradores de las comuidades aledañas a la playa Bique (López et al., 2005).

Por las razones antes expuestas, es indispensable conocer el nivel de concentración y distribución de los iones metálicos, su origen y efectos contaminantes para darles un manejo adecuado, ya que las consecuencias en los organismos biológicos y sobre los humanos, producen alteraciones al ser incorporados en su dieta (Durán et al., 2004).

En este estudio se analiza el contenido de metales traza: cobre, cadmio y plomo en agua, sedimento y tejido blando de *L. asperrima*, en Playa Bique y la variación entre la temporada seca y lluviosa durante el período de muestreo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La playa Bique se encuentra en la Bahía Bique, Distrito de Arraiján, aproximadamente a unos 22,8 Km. de la ciudad de Panamá. Está situada a 8° 53' 27" y 9° 53' 01" N y 79° 39' 27" y 79° 39' 44" O, con vegetación predominante de mangle de los géneros *Rhizophora*, *Avicennia* y *Laguncularia* y un litoral cubierto de sedimento areno fangoso, zona natural de desarrollo de *L. asperrima* y fuertemente explotada por los pobladores del área, que constituye en la principal fuente económica y alimentaria (Figura 1).

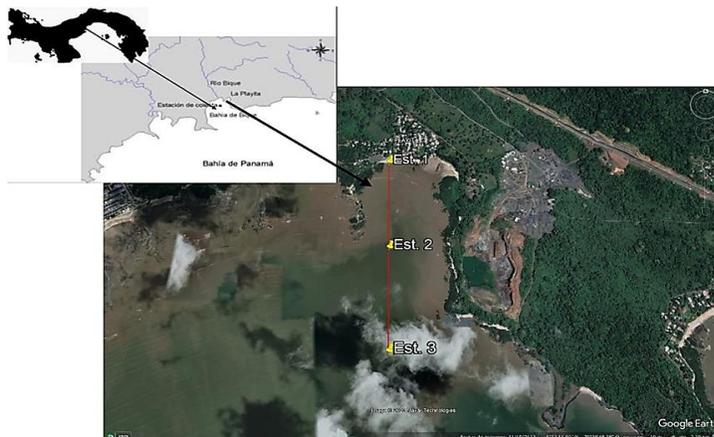


Figura 1 Mapa de localización del área de estudio, playa Bique, Pacífico de Panamá. (modificado de Grajales & Vergara, 2004)

Se establecieron tres estaciones de muestreo con una distancia aproximada de 500 m entre cada una, desde el punto de línea de agua en la playa, hacia mar afuera, en un transepto perpendicular a la costa. Las colectadas se realizaron durante períodos de mayor amplitud de marea baja de sicigia.

Se colectaron 100 ml de agua por triplicado en cada estación con botellas de plástico, el sedimento se obtuvo mediante un nucleador de PVC de 4" de diámetro, introducido 20 cm en el sedimento y los organismos se recolectaron al azar y colocados en bolsas de plástico y preservados, hasta ser procesados.

Se determinó los parámetros fisicoquímicos, temperatura y salinidad en cada estación con ayuda de una sonda multifuncional Modelo YSI; en el agua y el sedimento se determinaron los metales traza: cobre (Cu), cadmio (Cd.) y plomo (Pb) y en veinte organismos, por estación, los cuales fueron disecados para extraer el tejido blando, durante los meses de temporada seca: diciembre, febrero y marzo y lluviosa: abril, mayo y junio.

Los individuos colectados en el área de estudio se trasladaron al laboratorio para la disección y extracción de tejidos blandos, deshidratados a 60 °C por 48 horas a peso constante y luego fueron pesados y homogeneizados. El tejido seco fue pulverizado y se extrajo un gramo de tejido y las respectivas repeticiones, para proceder a digerir en una mezcla de ácido nítrico al 50 % y peróxido de hidrógeno al 30 % por una hora, a 100°C. Las cenizas fueron disueltas con 10 mL de ácido nítrico y filtradas con papel Whatman No. 42. El volumen obtenido fue aforado con agua desionizada en frascos volumétricos de 25 mL. La extracción de metales trazas en tejido blando se determinó a través de la metodología de Dalziel y Baker (1983).

La concentración de los estándares utilizado para establecer la curva de calibración fue determinada por absorción atómica mediante atomización electrotérmica con grafito pirolítico, acondicionado en Pd/reductor, y se corrigió la señal no atómica con lámpara de deuterio. Se aplicaron las longitudes de onda para cada metal; 324,7 nm para Cu, 228,8 nm para Cd y 217,0 nm para Pb, de acuerdo con la metodología establecida por el fabricante del equipo (Shimadzu). Para su

optimización se siguió la metodología analítica del Standard Methods of Examination of Water and Wastewater (2016). La precisión de la curva de calibración obtenida fue igual o menor al 2 % y los límites de detección fueron Cu (1 µg/L), Cd (0,1 µg/L) y Pb (1 µg/L). Los blancos fueron determinados en cada conjunto de lecturas, cuyos valores estuvieron por debajo del 1 % de la muestra. Los datos obtenidos de los estándares de concentración fueron expresados en ppb (ng/mL).

Las lecturas se realizaron en el Laboratorio de Absorción Atómica 216 de la Vicerrectoría de Investigación (VIP) de la Universidad de Panamá. En la preparación de los estándares de calibración, se utilizaron patrones concentrados calidad AAS de 1 000 mg/L de la marca Merck (Single Element Standard Certipur for AAS) y se prepararon soluciones madres intermedias de 100 mg/L, 10,0 mg/L y 1,00 mg/L y estándares diarios frescos de 5,0 µg/L a 100 µg/L de cobre y plomo. Para el cadmio los estándares diarios fueron de 0,50 µg/L a 10 µg/L. Se realizaron las curvas de calibración en su intervalo óptimo de concentración para cada elemento y se leyeron mediante un espectrofotómetro de Absorción Atómica EAA Shimadzu 6800 con horno de grafito (EAA/HG), auto-muestrador ASC-6100 con capacidad de 50 viales. Las rampas y parámetros instrumentales fueron las recomendadas por el fabricante del EAA.

De las muestras tratadas se extrajeron alícuotas de 1,00 mL, colocadas en el auto-muestrador y leídas secuencialmente en el EAA/HG; se intercalaron nuevamente los estándares diarios frescos de cada elemento cada 5 lecturas. Las muestras fuera del intervalo de los estándares fueron diluidas hasta lectura dentro del rango óptimo y corregidas por dilución.

Un gramo de sedimento seco fue tratado en medio ácido/oxidante, de igual manera que el material biológico y aforados en frascos volumétricos de 25 mL. Alícuotas de éstas fueron colocadas en el auto-muestrador y leídas por EAA/HG de igual manera que las muestras de material biológico. Las muestras de aguas fueron colocadas directamente en el auto-muestrador y leídas por EAA/HG. Los resultados en medio acuoso se reportan en ppb (ng/mL), mientras que los valores de metales en sedimento y tejido blando total se expresaron en µg/g.

La normalidad y homocedasticidad de los datos se determinaron mediante las pruebas de Lilliefors y Levene, respectivamente, debido a la falta de normalidad y la no estabilidad de la varianza se utilizaron pruebas no paramétricas. Se representó la estadística descriptiva de cada uno de los metales traza a través de figuras de caja y bigotes. Se utilizó el análisis de componentes principales (PCA) para determinar la variabilidad de los datos en las matrices agua, sedimento y tejido blando. La variación temporal se evaluó mediante la prueba de Kruskal Wallis, la diferencia entre temporada seca y lluviosa se estimó por medio de la prueba de U de Mann-Whitney. La relación entre metales traza, en cada matriz, se analizó con la correlación de Spearman.

Los valores de las figuras en las tres matrices (agua, sedimento y tejido) se representaron en escalas distintas debido a que cada metal presentó variabilidades diferentes, para facilitar la comparación visual por matriz.

## **RESULTADOS**

La temperatura del sedimento, durante el período de estudio, varió entre 24,2 y 35 °C, con promedio de  $30,03 \pm 3,57$  °C. Durante la temporada seca el promedio fue de  $28,40 \pm 3,93$  °C, mientras que, en la lluviosa,  $31,67 \pm 2,87$  °C. La salinidad fluctuó entre 28,0 y 36,9 ups, con promedio de  $33,82 \pm 3,10$  ups durante los seis meses de colecta; en temporada seca el promedio fue de  $32,00 \pm 3,46$  ups y en la lluviosa,  $35,63 \pm 1,48$  ups.

La temperatura más baja se presentó en marzo y la más alta en junio; la salinidad aumentó sistemáticamente de diciembre a mayo para luego descender levemente hasta junio (Figura 2).

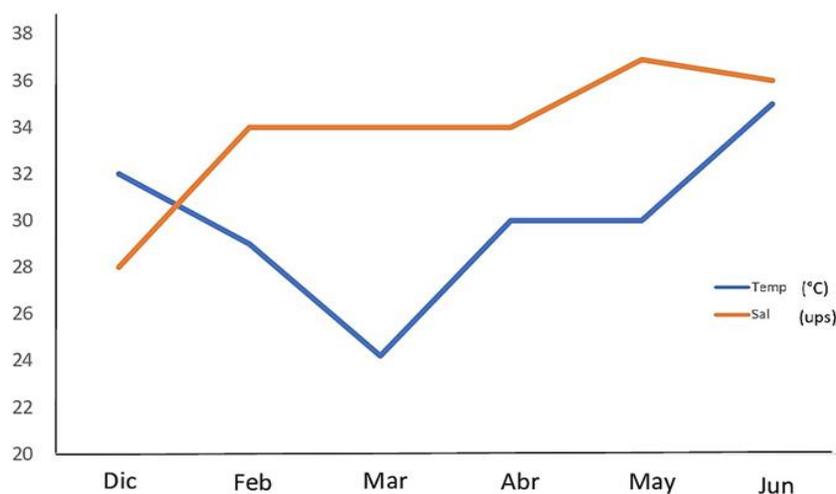


Figura 2 Variación de la temperatura (°C) y salinidad (ups) en playa Bique, Panamá, durante el período de estudio.

La concentración de cobre en agua, durante el período de estudio, presentó un promedio de  $116,78 \pm 76,47 \mu\text{g/g}$ , con mínimo de 52 y máximo de  $462 \mu\text{g/g}$ . En el sedimento la media fue de  $112,46 \pm 155,13 \mu\text{g/g}$  y varió de 37 a  $873 \mu\text{g/g}$ ; en el tejido blando el promedio fue de  $10,28 \pm 4,30 \mu\text{g/g}$ , con fluctuación entre 3,8 y  $23,1 \mu\text{g/g}$ . El cadmio en agua indicó un promedio de  $3,03 \pm 1,39 \mu\text{g/g}$ , con mínimo de 0,6 y máximo de  $6,3 \mu\text{g/g}$ . En el sedimento la media fue de  $0,07 \pm 0,042 \mu\text{g/g}$  y varió de 0,004 a  $0,247 \mu\text{g/g}$  y en el tejido blando el promedio fue de  $0,60 \pm 0,21 \mu\text{g/g}$ , entre 0,23 y  $1,08 \mu\text{g/g}$ . El plomo mostró en agua un promedio de  $4,28 \pm 1,05 \mu\text{g/g}$ , con mínimo de 0,5 y máximo de  $7,9 \mu\text{g/g}$ . En el sedimento la media fue de  $16,88 \pm 6,15 \mu\text{g/g}$  y varió de 5,8 y  $33,8 \mu\text{g/g}$  y en el tejido blando el promedio fue de  $0,09 \pm 0,045 \mu\text{g/g}$ , entre 0,03 y  $0,27 \mu\text{g/g}$ . Los resultados de la concentración en las matrices agua, sedimento y tejido blando fueron transformados a logaritmo de base 10 para destacar la variabilidad de las concentraciones entre las matrices, ya que, con los datos crudos, el cobre enmascara los otros metales (Figura 3).

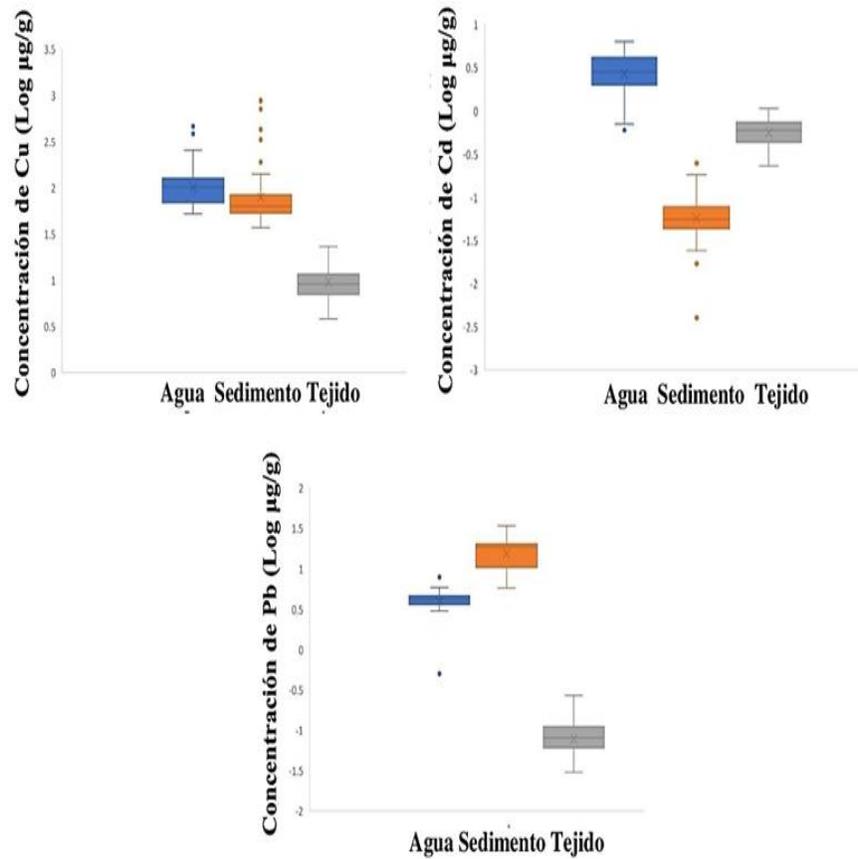


Figura 3 Concentración de cobre, cadmio y plomo (en logaritmo de  $\mu\text{g/g}$ ) en agua, sedimento y tejido blando

Con la finalidad de visualizar el nivel de concentración de metales con respecto a los límites permisibles propuestos por diversos organismos internacionales, se incluyen los señalados para cobre (Cu), cadmio (Cd) y plomo (Pb) (Tabla 1).

Cuadro 1. Valores permisibles de cobre (Cu), cadmio (Cd) y plomo (Pb) (en  $\mu\text{g/g}$ ) propuestos por agencias internacionales.

<b>Referencia</b>	<b>Cu</b>	<b>Cd</b>	<b>Pb</b>
FDA	4,0		1,7
CODEX STAN FAO	32,5	2,0	
Programa Monitoreo Moluscos <i>Mytilus edulis</i>		10 - 20	7 - 13
Programa Monitoreo Moluscos <i>Crassostrea virginica</i>		7 - 15	1,0-2,2
Ministerio Agricultura Reino Unido	20		
Dept. Salud, Australia	70	2,0	2,5

Nota: Valores en  $\mu\text{g/g}$  (no transformados a logaritmo de base 10) para contrastarlos con los datos expresados en el párrafo anterior a la Figura 3. Fuente: FAO, 1995; FDA, 2001; Nauen, 1983 y NOAA, 1995.

El metal traza que mejor explica la variabilidad en la matriz agua fue el cobre (Cu), en la matriz sedimento estuvo representada por cobre (Cu) y plomo (Pb), mientras que en el tejido de *L. asperrima*, el cobre (Cu) y cadmio (Cd) explicaron la variabilidad (Figura 4).

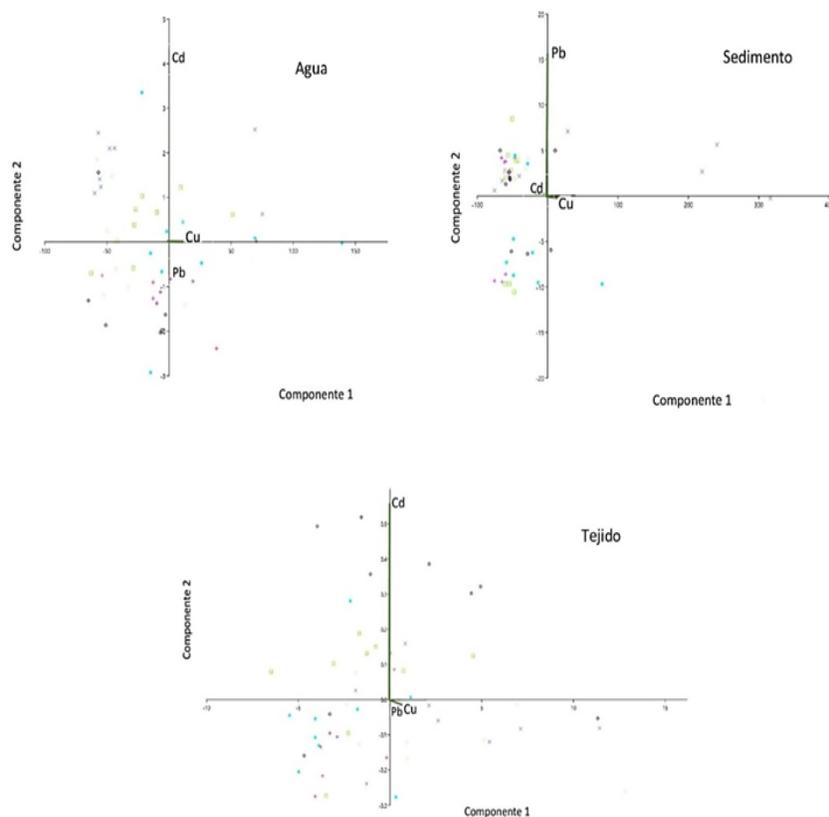


Figura 4. Análisis de componentes principales (PCA) de los metales traza en agua, sedimento y tejido blando. Los colores representan las distintas estaciones de colecta con sus respectivas repeticiones.

En la matriz agua, el cobre no presenta diferencia significativa entre meses de colecta ( $H = 8,43$   $p = 0,1338$ ), sin embargo, el cadmio presentó diferencia altamente significativa ( $H = 25,53$   $p = 0,0001$ ), específicamente entre febrero y abril ( $z = 4,30$   $p < 0,05$ ) y entre abril y junio ( $z = 2,93$   $p < 0,05$ ), mes con concentración más alta (Figura 5). El plomo ( $H = 15,6$   $p = 0,0093$ ), muestra diferencias entre diciembre y abril ( $p = 0,0069$ ), diciembre y junio ( $p = 0,0054$ ), febrero y junio ( $p = 0,0488$ ), marzo y abril ( $p = 0,0106$ ) y entre marzo y junio ( $p = 0,0080$ ) (Figura 5), este último mes mostró los valores más elevados.

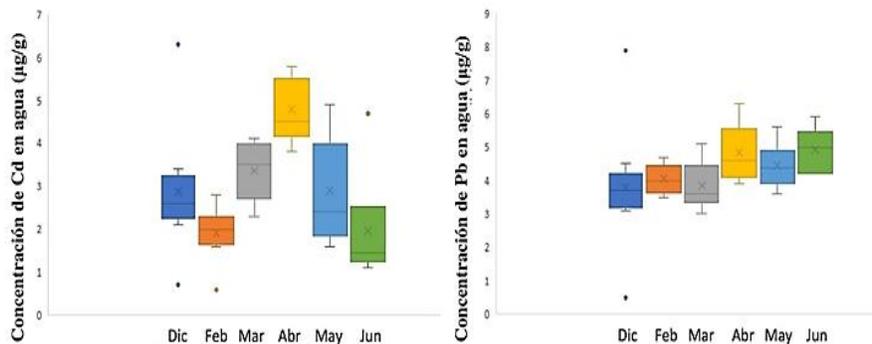


Figura 5. Variación de cadmio (Cd) y plomo (Pb) en la matriz agua, entre los meses de muestreo.

En la matriz sedimento, el cobre (Cu) presentó diferencia significativa ( $H = 13,73$   $p = 0,0174$ ), entre diciembre y febrero ( $z = 2,94$   $p < 0,05$ ), mientras que el cadmio (Cd) mostró diferencia altamente significativa ( $H = 16,11$   $p = 0,0065$ ), entre diciembre y junio ( $z = 2,94$   $p < 0,005$ ) (Figura 6). El plomo (Pb) no mostró diferencias estadísticas ( $p = 0,0901$ )

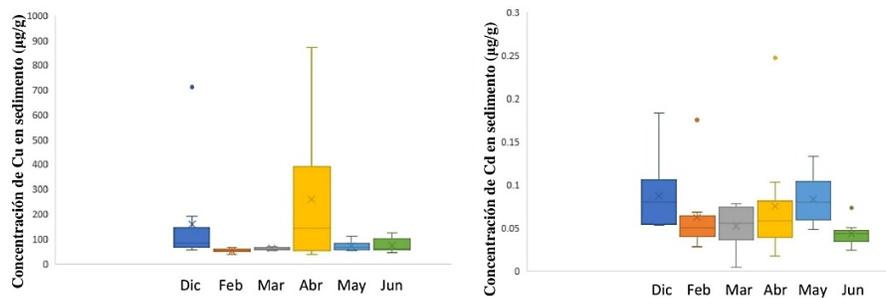


Figura 6. Concentración de cobre (Cu) y cadmio (Cd) en la matriz sedimento, entre meses de muestreo.

En el tejido blando de *L. aspérrima*, se registró diferencias altamente significativas en los tres metales, con respecto a los meses de colecta, cobre (Cu) ( $H = 17,31$   $p = 0,0039$ ), entre diciembre y abril ( $z = 2,93$   $p < 0,05$ ), el cadmio (Cd) ( $H = 21,25$   $p = 0,0007$ ), entre diciembre y junio ( $z = 2,93$   $p < 0,05$ ) y febrero y junio ( $z = 2,93$   $p < 0,05$ ) con valores más elevados en este último mes. El plomo ( $H = 15,39$   $p = 0,0088$ ) entre febrero, con valores más altos y junio ( $z = 2,93$   $p < 0,05$ ) (Figura 7).

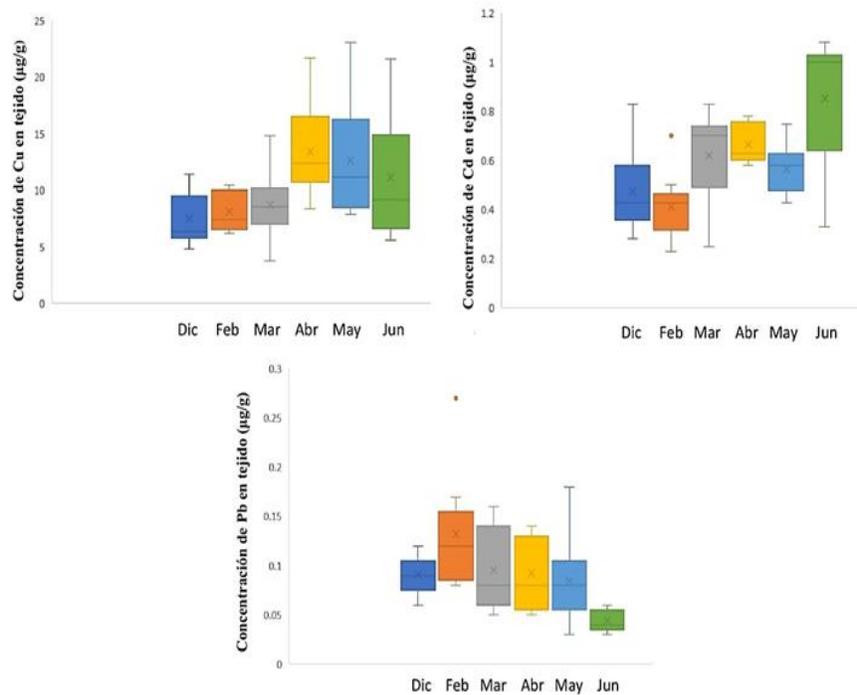


Figura 7. Concentración de cobre (Cu), cadmio (Cd) y plomo (Pb) en tejido blando de *L. asperima* durante los meses de muestreo.

El cobre en el agua presentó valores menores en temporada lluviosa, sin embargo, en el sedimento y tejido blando, las concentraciones fueron superiores en dicha época (Figura 8). Se observó diferencia significativa en la concentración entre estas dos temporadas en agua ( $U = 195,5$   $p = 0,0153$ ) y en tejido ( $U = -3,7843$   $p = 0,0004$ ), no así en sedimento ( $U = 287,5$   $p = 0,1828$ ).

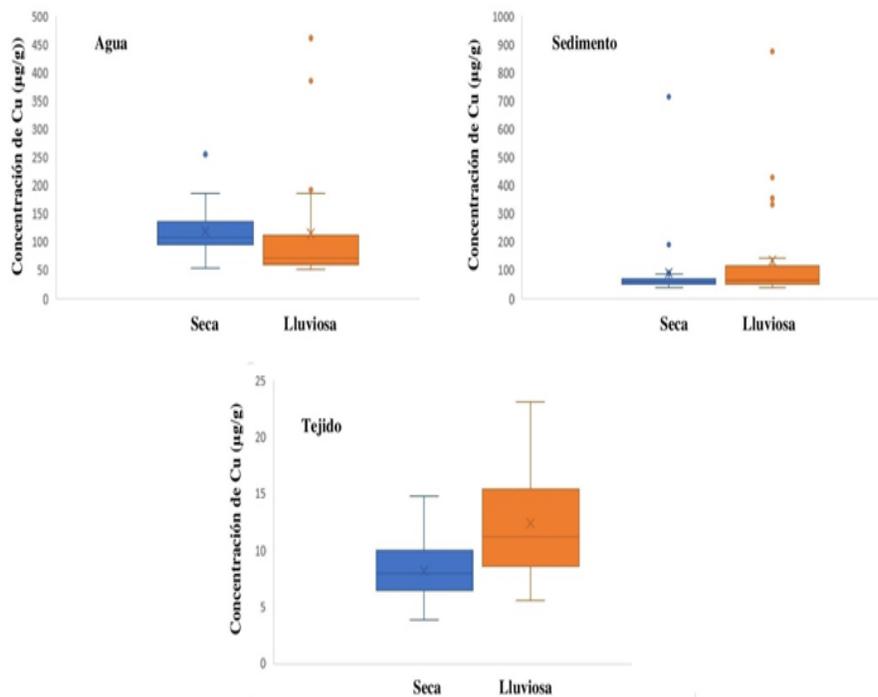


Figura 8. Concentración de cobre en agua, sedimento y tejido en temporada seca y lluviosa.

La variación del cadmio entre temporadas en las tres matrices mostró valores levemente superiores en la época lluviosa (Figura 9). No existe diferencia estadística entre temporadas en agua ( $t = -1,6983$   $p = 0,0957$ ), ni en sedimento ( $t = -0,101$   $p = 0,92$ ), mientras que en tejido se observó diferencia altamente significativa ( $t = -3,7843$   $p = 0,0004$ ).

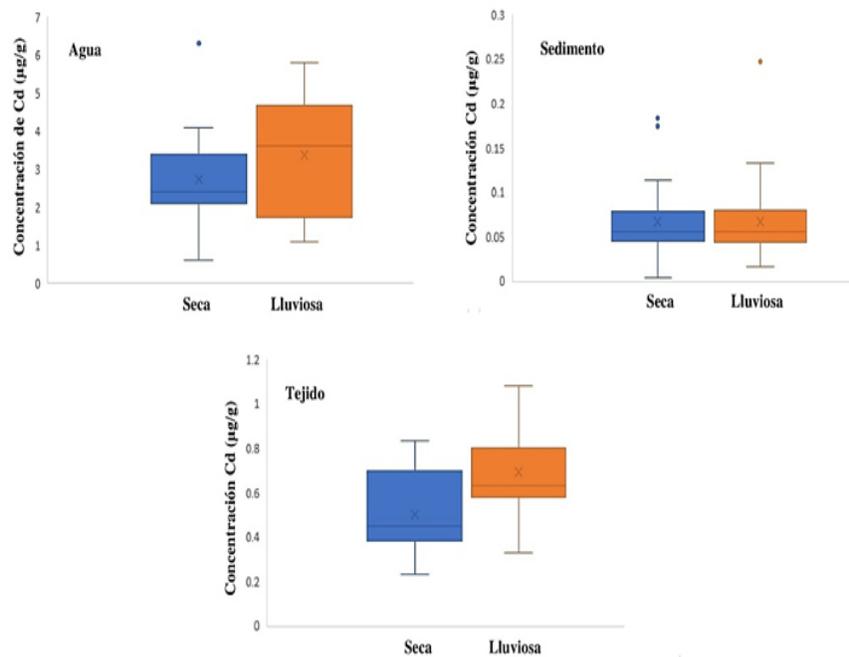


Figura 9. Concentración de cadmio en agua, sedimento y tejido en temporada seca y lluviosa.

El plomo presentó valores menores en temporada seca en agua y sedimento, sin embargo, en época lluviosa los organismos mostraron concentraciones menores en el tejido blando en esta temporada (Figura 10). Este metal presentó diferencias estadísticas entre temporadas en las tres matrices: agua ( $U = 133,5$   $p = 0,0003$ ), sedimento ( $U = 238$   $p = 0,0286$ ) y tejido blando ( $t = 3,443$   $p = 0,0011$ ).

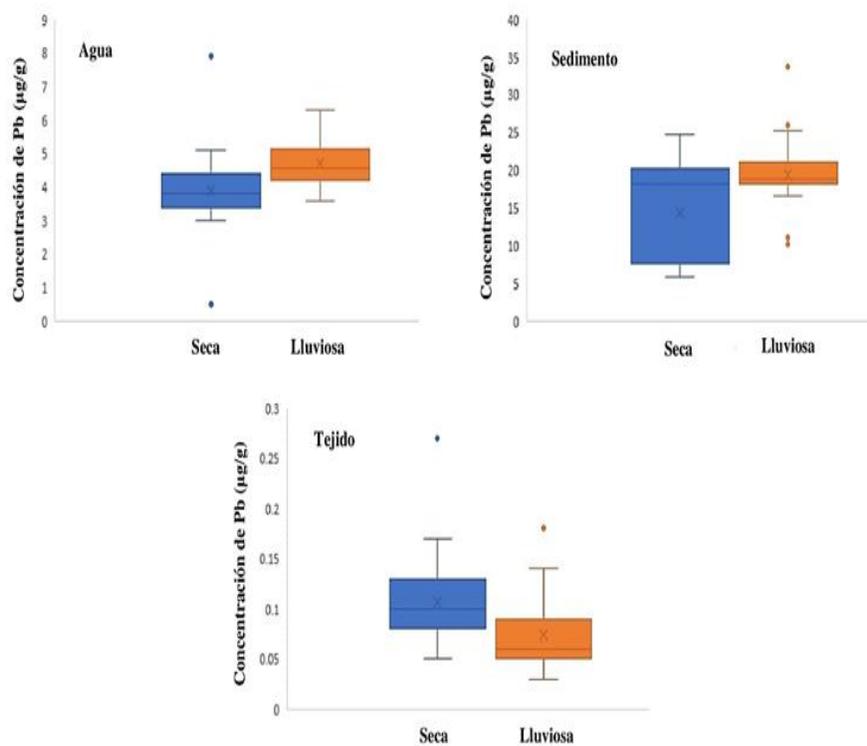


Figura 10. Concentración de plomo en agua, sedimento y tejido blando en temporada seca y lluviosa.

En tejido blando, durante la temporada seca los tres metales mostraron correlación altamente significativa entre sí, directamente proporcional cobre (Cu) y cadmio (Cd) ( $r_s = 0,3582$   $p = 0,001$ ), cobre (Cu) y plomo (Pb)  $r_s = 0,5122$   $p < 0,0001$ ), mientras que cadmio (Cd) y plomo (Pb) mostraron correlación inversa ( $r_s = -0,4762$   $p < 0,0001$ ). Por el contrario, en temporada lluviosa el cobre (Cu) y el cadmio (Cd) no presentaron relación entre ellos ( $p = 0,4867$ ), el cobre (Cu) y plomo (Pb) mostraron correlación altamente significativa y directamente proporcional ( $r_s = 0,7425$   $p < 0,0001$ ) y el cadmio (Cd) y plomo (Pb), inversamente proporcional ( $r_s = -0,4561$   $p < 0,0001$ ).

La variación de las concentraciones de metales traza en las diferentes matrices en temporada lluviosa con respecto a la seca, presenta mayor aumento en agua; en cobre, la proporción fue de 1,37, en cadmio 1,11 y para plomo 1,44. En las matrices sedimento y tejido blando, la relación de cadmio y plomo es menor a 1,0 contrario al cobre en sedimento que mostró valores de 1,45 y en tejido con 1,62.

## **DISCUSIÓN**

Las variables fisicoquímicas presentan una relación inversamente proporcional de acuerdo con lo esperado y mostraron valores semejantes a los reportados por López et al. (2005) en la misma zona de estudio.

Los valores encontrados de cobre (Cu) en agua y sedimento en este estudio son superiores al obtenido en el estuario Paranaguá, Paraná, Brasil por Oliveira (2019), quien reporta, valores inferiores a 0,005  $\mu\text{g/g}$  en agua y sedimento valores entre 2,05 y 2,46  $\mu\text{g/g}$ . Senez-Mello et al. (2020) reportan, en la desembocadura del estuario Potengi, Rio Grande do Norte, Brasil, 0,03  $\mu\text{g/g}$  en agua, mientras que, en el sedimento, valores entre 12,13  $\mu\text{g/g}$  y 42,17  $\mu\text{g/g}$ . En sedimentos de la Bahía de Panamá se reportan valores entre 17  $\mu\text{g/g}$  a 45  $\mu\text{g/g}$  (Gómez et al., 2006) y en el puerto de Güiría, Venezuela se señala valores entre 6 a 24  $\mu\text{g/g}$  (Fuentes, 2008).

La concentración de cadmio (Cd) obtenida supera los valores reportados por Oliveira (2019) en Brasil, con concentraciones inferiores a 0,003  $\mu\text{g/g}$  en agua e inferiores a 0,35  $\mu\text{g/g}$  en sedimento. En la Bahía de Panamá, Gómez et al. (2006) indican valores entre 0,13 a 0,58  $\mu\text{g/g}$ , mientras que, en el puerto de Güiría, Venezuela, Fuentes (2008), reporta valores no detectables hasta 0,05  $\mu\text{g/g}$ , ambos en muestras de sedimento.

La concentración de plomo (Pb) en agua y sedimento reportadas por Oliveira (2019) en el estuario de Paranaguá señalan valores de 0,01  $\mu\text{g/g}$  y 7,08 a 7,88  $\mu\text{g/g}$  respectivamente, inferiores a los de la presente investigación. En muestras de sedimentos de Panamá, valores entre 19 y 433  $\mu\text{g/g}$  (Gómez et al., 2006) y en Venezuela, se señala valores no detectables hasta 35  $\mu\text{g/g}$  (Fuentes, 2008).

En el tejido blando de *Leukoma asperriama*, el valor promedio de cobre (Cu) obtenido en la presente investigación está dentro del ámbito que proponen Carrasco Peña y Webster Coello (2016) en Ecuador, con valores entre 10,62 a 16,34 µg/g en la misma especie. En otros bivalvos, como es el caso de *Anadara tuberculosa* en Panamá, se reportan valores entre 0,08 µg/g a 0,58 µg/g, en temporada seca (Durán et al., 2004); en *Mytella guyanensis* Oliveira (2019) indica valores no detectables en las muestras de verano, contrario a lo reportado por Carrasco Peña y Webster Coello (2016) para la misma especie en Ecuador, con valores de 21,05 a 31,78 µg/g.

En *Crassostrea gigas* Góngora-Gómez et al. (2017), en el Golfo de California, reportan promedio de 52,42 µg/g, mientras que en *Atrina maura*, se observa concentraciones de 13,0 µg/g (Góngora-Gómez et al., 2018). En Brasil, Senez-Mello et al. (2020), indica concentraciones de 88,92 µg/g en *C. rhizophorae*.

El cadmio (Cd) en tejido de *L. asperrima*, Carrasco Peña y Webster Coello (2016) reportan concentración entre 0,52 y 0,56 µg/g, valores inferiores a los obtenidos en este estudio. En *A. tuberculosa*, Durán et al. (2004) indican valor promedio de 3,90 µg/g; Frías-Espiricueta et al. (2005) señalan en *Crassostrea corteziensis* valores entre 1,1 y 6 µg/g, en *Mytella strigata* Frías-Espiricueta et al. (2008) reportan valores entre 5,11 y 7,09 µg/g, y en *M. squalida*, 2,59 a 4,13 µg/g en Sinaloa, México. Abdalha (2013) presenta la concentración media en tejido de *Ruditapes decussates* de 2,063 ±0,26 µg/g, valores superiores a los reportados en esta investigación.

Oliveira (2019) en *Mytella guyanensis* y *Atrina maura*, en Brasil, señala valores no detectados. En el Golfo de California, Góngora-Gómez et al. (2017), en *C. gigas*, indica 10,26 µg/g, superior al reportado para *L. asperrima*, en este estudio. *Mytella guyanensis*, en Ecuador, Carrasco Peña y Webster Coello (2016) presenta valores inferiores, con 0,08 a 0,17 µg/g y en el estuario del río Ipojuca, Pernambuco, Brasil, *Anomalocardia brasiliensis* y *Iphigenia brasiliensis*, presentan valores de 271 µg/g y 121 µg/g respectivamente (Silva et al., 2013), muy superiores a los encontrados en *L. asperrima*.

En tejido de *L. asperrima*, Carrasco Peña y Webster Coello (2016) reporta valores de plomo (Pb) entre 0,23 y 0,25 µg/g, superiores al de este estudio, sin embargo; Durán y Gómez (2001) en *A. tuberculosa* indican promedio de 7,79 µg/g, en *M. guyanensis*, se observa valores inferiores a 0,00089 µg/g, límite de detección (Oliveira, 2019). En el Golfo de California, *C. gigas*, se obtiene un promedio de 2,18 µg/g y *A. maura*, concentraciones entre 2,3 µg/g a 4,6 µg/g (Góngora-Gómez, 2017 y 2018), superiores al presente estudio. Valores extremos se han reportado en Brasil, en *A. brasiliiana* con 1117 µg/g y en *I. brasiliensis* 933 µg/g (Silva et al., 2013).

Al contrastar los valores obtenidos en tejido blando, del presente estudio, con los reportados por las organizaciones internacionales de salud, estos se mantienen por debajo de los permisibles, lo cual indica que el área donde *L. asperrima* se desarrolla probablemente no muestra problemas de contaminación severa.

La variabilidad en las matrices expresadas mediante el PCA refleja la importancia del cobre en el agua, el cobre y el plomo en el sedimento y el cobre y cadmio en el tejido, en el componente PC1 del análisis. Jesús (2011) destaca al cobre como el principal metal que explica la variabilidad en el tejido de *Anomalocardia brasiliiana*, a diferencia de Liu et al. (2019) quienes muestran al plomo en el tejido de diversos organismos marinos, incluidos los moluscos.

La abundancia de metales traza está definida por la secuencia: Cu > Pb > Cd en las tres matrices. Sin embargo, en *Anadara tuberculosa*, en Isla Taborcillo, Punta Chame, Panamá, Durán et al. (2004) encontraron Pb > Cd > Cu. En *Arca zebra* la secuencia reportada por Narváez Hernández et al. (2010) en Isla de Cubagua, Venezuela, es de Cu > Cd > Pb). Góngora-Gómez et al. 2017 reporta en *Crassostrea gigas*, del Golfo de California, México, una secuencia de orden Cu > Cd > Pb, al igual en *Tivela mactroides*, en Playa Güiría, Venezuela (Acosta y Lodeiros, 2004). En el estuario de Cananeia, Brasil, Barros y Barbieri (2012) en *Crassostrea brasiliiana* muestran una secuencia de Pb > Cu con ausencia de Cd.

En tejido blando, el cobre y el cadmio muestran aumento a través del período de estudio, en particular, a partir de la temporada lluviosa, no así el plomo, que disminuye la concentración sistemáticamente. Silva et al. (2013) indican concentraciones de hasta 893  $\mu\text{g/g}$  de cobre en tejido de *Anomalocardia brasiliiana* (Veneridae) en marzo, inicio de las lluvias y de 377  $\mu\text{g/g}$  en *Iphigenia brasiliensis* (Donacidae) en julio. La concentración de cadmio varió entre 1  $\mu\text{g/g}$  en marzo hasta 187  $\mu\text{g/g}$  en enero en *A. brasiliiana* y en *I. brasiliensis* de 1  $\mu\text{g/g}$  en julio a 117  $\mu\text{g/g}$  en marzo. El plomo varió de 7  $\mu\text{g/g}$  en marzo a 1 117  $\mu\text{g/g}$  en enero, en *A. brasiliiana*, y de 6  $\mu\text{g/g}$  en junio a 993  $\mu\text{g/g}$  en marzo en *I. brasiliensis*. Estos valores superan a los reportados en esta investigación y coinciden con los aumentos de concentración en temporada lluviosa.

La variación temporal durante los meses de colecta, el aumento de la concentración de los metales traza, se relaciona con el inicio de la temporada lluviosa, a pesar de que no se observa diferencias estadísticas entre ambas temporadas. El cobre encontrado en el sedimento y el cadmio en agua y sedimento no muestran diferencia, contrario al plomo, donde se observa un aumento sostenido. Las proporciones reportadas para la temporada lluviosa, con respecto a la seca, muestra un incremento que no supera valores de 1,0 a excepción de cobre en las tres matrices, lo cual puede ser explicado por el transporte de metales traza adheridos al sedimento, que provienen de la erosión de las cuencas hidrográficas, que desembocan en la costa. Estudio realizado por Patteli (2014) indica concentraciones de metales en sedimento luego de fuertes lluvias en Italia; Bakary et al. (2015) señalan incremento de metales traza en temporada lluviosa en Costa de Marfil, con aumento de la proporción en sedimento de 1,6 de cobre y 2,7 de cadmio.

En tejido de *Crassostrea rizophorae* Alfonso et al. (2013) reportan mayor concentración de cobre y cadmio entre los meses de mayo y septiembre, temporada lluviosa, en la bahía de Mochima, Venezuela. Sin embargo, Milazzo et al. (2014), en la desembocadura del Rio São Paulo, Bahía de Todos lo Santos, Brasil, indican valores mayores en temporada seca, con respecto a la lluviosa, en esta misma especie.

Estudio realizado por Jara-Marini et al. (2013) en bivalvos *Crassostrea corteziensis*, *C. gigas*, *Anadara tuberculosa*, *Chione fluctifraga* y *C. gnidia*, el cobre resultó ser más alto en *C. corteziensis* que en las otras

especies, con promedio de 68,66  $\mu\text{g/g}$  en temporada lluviosa y 83,16  $\mu\text{g/g}$  en lluviosa. Los valores de las concentraciones medias de cadmio en temporada lluviosa presenta valores menores en las dos especies de *Crassostrea*, los cuales varían entre 0,28 a 0,31  $\mu\text{g/g}$ , sin embargo, en temporada seca se observan valores promedio que fluctuaron entre 0,47 a 0,54  $\mu\text{g/g}$  en todas las especies estudiadas.

En el caso del plomo, en temporada lluviosa *C. corteziensis* y *A. tuberculosa* presentan concentraciones más elevadas, entre 3,61 y 4,06  $\mu\text{g/g}$ , mientras que en la seca, *C. gnidia* muestra un promedio más alto, de 4,07  $\mu\text{g/g}$ . Estas diferencias encontradas en ambas temporadas se debe, probablemente, al régimen alimentario de estas, en las cuales *A. tuberculosa* es detritívora, mientras las demás son filtradoras.

No obstante, las concentraciones arriba señaladas no dejan claro el comportamiento de estos metales en el tejido de *L. aspérrima*, a pesar de ser un organismo filtrador por excelencia, la incorporación de metales va a depender de aquellas microalgas distribuidas en la columna de agua que sirven de fuente de alimento y que son incorporadas en el proceso de filtración por parte de la especie en estudio, tal es el caso de *Tetraselmis chuii*, *Rhodomonas salina*, *Chaetoceros sp.*, *Isochrysis galbana* y *Nannochloropsis gaditana*, cuya toxicidad va a depender, entre otras cosas, del tamaño de las células que promueve que aquellas más grandes tengan mayor capacidad de concentrar metales (Debelius et al., 2009), de tal manera que la incorporación por parte de *L. aspérrima* puede estar, probablemente, influenciada no solo por la ingestión de agua filtrada y partículas de sedimento, sino también por la fuente de alimento, basada en diversidad de especies de microalgas.

Los metales presentan correlación positiva significativa en temporada seca, a excepción de Cd vs Pb cuya relación es inversa; en temporada lluviosa Cu y Pb se relacionan directamente y Cd y Pb inversamente. En tejido de *Mytilus galloprovincialis* Szefer (2004), en la península de Corea, reporta correlación positiva entre los tres metales arriba mencionados, a diferencia, Wang et al. (2005) muestran la falta de relación de estos en tejido de *Mytilus edulis* y *Crassostrea talienwhanensis* en el Mar de Bohai, China.

## CONCLUSIONES

La variación encontrada de los parámetros fisicoquímicos en la playa entre la temporada seca y lluviosa se comporta de manera contraria a lo que ocurre regularmente en la masa de agua de la Bahía de Panamá, en ambas temporadas, donde la relación de la salinidad y temperatura es inversa, sobre todo por el efecto del fenómeno de afloramiento de inicios de año.

Las concentraciones reportadas para las matrices agua, sedimento y tejido blando de *L. asperrima* no supera los límites máximos permisibles para consumo humano.

La importancia de la presencia de cada uno de los metales, en las diferentes matrices, de acuerdo con la variabilidad, se expresa de manera diferente, donde resalta el cobre en agua, el plomo en el sedimento y el cobre y cadmio en el tejido blando.

La concentración de metales traza en agua fue mayor en temporada seca debido al aporte ambiental, contrario a lo observado en sedimento y en especial en tejido blando, en época lluviosa, por la bioacumulación.

De acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio podemos señalar que el área de colecta de *L. asperrima*, sigue manteniendo la característica de una zona de extracción segura debido a que las concentraciones de metales traza no ofrecen peligro para el consumo humano.

## REFERENCIAS

Abdallah, M.A.M. (2013). Bioaccumulation of heavy metals in mollusca species and assessment of potential risks to human health. *Bull. Environ. Cont. Toxicol.*, 90: 552-557.

Acosta, V., & Lodeiros, C. (2004). Metales pesados en la almeja *Tivela mactroides* Born, 1778 (Bivalvia: Veneridae) en localidades costeras con diferentes grados de contaminación en Venezuela. *Cienc. Mar.*, 30(2): 323-333.

Alfonso, J.A., Handt, H., Mora, A., Vásquez, Y., Azocar, J., & Marcano, E., (2013). Temporal distribution of heavy metal concentrations in oysters *Crassostera rhizophorae* from the central Venezuelan coast. *Mar. Poll. Bull.*, 73: 394-398.

Bakary, I., Yao, K.M., Etchian, O.A., Soro, M.B., Trokourey, A., & Bockra, Y., (2015). Zinc, copper, cadmium, and lead concentrations in water, sediment, and *Anadara senilis* in a tropical estuary. *Environ. Monit. Assess.*, 187:762.

Barros, D., & Barbieri, E. (2012). Análise da ocorrência de metais Ni, Zn, Cu, Pb e Cd em ostras (*Crassostrea brasiliana*) e sedimentos coletados em Estuário de Cananeia -SP (Brasil). *O Mundo da Saúde*, S.P. 36(4): 635-642.

Carrasco Peña, R., & Webster Coello, R. (2016). Capacidad bioacumuladora de metales pesados en moluscos bivalvos de los esteros del cantón Balao. [Tesis] Universidad del Azuay.

Codina, J., & Pérez, A. (2001). Metales pesados como polucionantes tóxicos. *Enviro. Contam. Toxicol.*, 25: 250-254.

Dalziel, J., & Baker, C. (1983). Analytical methods for measuring metals by atomic absorption spectrophotometry. *FAO Fish. Tech. Pap.* 212. 14-20.

Debelius, B., Foja, J.M., DelValls, A., & Lubián, L.M., (2009). Toxicity and bioaccumulation of copper and lead in five marine microalgae. *Ecotox. Environ. Safety*, 72: 1503-1513.

Durán I.L., & Gómez, J.A. (2001). “Concentración de Fe, Cu y Zn en los tejidos de *A. tuberculosa* (Pelecípoda. Arcidae) durante la estación lluviosa y seca (octubre 1998-marzo 1999) en Punta Chame, Panamá, Rep. de Panamá”. *Scientia*, 26(1): 43-51.

Durán, I.L., Fuentes, M.V., & Gómez H, J.A. (2004). Concentración de cadmio, plomo y cobre en *Anadara tuberculosa* del manglar de la Isla Taborcillo, Punta Chame, República de Panamá. *Tecnociencia*, 6(2): 91-104.

Eisler, R. (2010). *Compendium of trace metals and marine biota: Volume 1: Plants and Invertebrates*. Elsevier Science, Oxford

FAO (1995). CODEX STAN 193. Norma general del codex para los contaminantes y las toxinas presentes en los alimentos y piensos.

FDA (2001). Fish and fisheries products hazards and controls guidance.

Flores G., & Pilar A. (1987). Contaminación del pescado y sus productos por metales pesados. FONAIAP DIVULGA No.25 (<http://www.ceniap.gov.ve/pbd/RevistasTecnicas/FonaiapDivulga/fd25/texto/contaminacion.htm>)

Frías-Espericueta, M.G, Osuna-López, J.I., Flores-Reyes, S., López-López, G., & Izaguirre-Fierro, G. (2005). Heavy metals in oyster *Crassostrea corteziensis* from Urias lagoon, Mazatlán, Mexico; associated to different anthropogenic discharges. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 74: 996-1002.

Frías-Espericueta, M.G., Osuna-López, J.I., Voltolina, D., López-López, G., Izaguirre-Fierro, G., & Muy-Rangel, M.D., (2008). The metal content of bivalve mollusks of a coastal lagoon of NW Mexico. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 80: 90-92.

Fuentes, M.V. (2008). Metales pesados Cu, Cr, Ni, Zn, Pb y Cd en los sedimentos del muelle pesquero de Güira, Estado Sucre, Venezuela. *Tecnociencia*, 10(2): 61-79.

Gómez H., J.A., Fuentes, M.V., Leone, O., & Vega, C.A. (2006). Características geoquímicas de los sedimentos superficiales de la Bahía de Panamá. *Tecnociencia*, 8(1): 113-132.

Góngora-Gómez A.M., García-Ulloa, M., Muñoz-Sevilla, N.P., Domínguez-Orozco, A.L., Villanueva-Fonseca, B.P., Hernández-Sepúlveda, A., & Ortega Izaguirre, R. (2017). Heavy-metal contents in oysters (*Crassostrea gigas*) cultivated on the southeastern coast of the Gulf of California, Mexico. *Hidrobiológica*, 27 (2): 219-227.

Góngora-Gómez, A.M., Domínguez-Orozco, A.L., Villanueva-Fonseca, B.P., Muñoz-Sevilla, N.P., & García-Ulloa, M. (2018). Seasonal levels of heavy metals in soft tissue and muscle of the pen shell *Atrina maura* (Sowerby, 1835) (Bivalve: Pinnidae) from a farm in the southeastern coast of the Gulf of California, Mexico. *Rev. Int. Contam. Amb.*, 34(1): 57-68.

González A., & Moreno C. (2004). Contaminación de metales pesados en organismos marinos (Incorporación del Cadmio en *Pentamera chierchia*), Echenodermata: Holothuroidea. [Tesis Universidad de Panamá].

Hernández-Almaraz, P., Méndez Rodríguez, L., Serviere Zaragoza, E., & González Aravena, M. (2018). *Consumidores primarios: bioacumulación y transferencia de metales a invertebrados*. En Jaime, M. y Hernández Almaraz, P. (Eds.) Bioacumulación y transferencia de metales y contaminantes emergentes a través de las cadenas tróficas marinas. SAMSARA Ed. 62-81.

Jara-Marini, M.E., Tapia-Alcaraz, J.N., Dumer-Gutierrez, J.A., García-Rico, L, García-Hernández, J., & Páez-Osuna, F. (2013). Comparative bioaccumulation of trace metals using six filter feeder organisms in a coastal lagoon ecosystem (of the central-east Gulf of California). *Environ. Monit. Assess.*, 185: 1071-1085.

Jesús R.S. (2011). Metais traço em sedimentos e no molusco bivalve *Anomalocardia brasiliiana* (GMELIN, 1791) Municípios de Madre de Deus e de Saubara, Bahia. [Tese] Universidad Federal da Bahia.

Liu, Q., Xu, X., Zeng, J., Shi, X., Liao, Y., Du, P., Tang, Y., Huang, W., Chen, Q., & Shou, L. (2019). Heavy metal concentrations in commercial marine organisms from Xiangshan Bay, China, and the potential health risks. *Mar. Poll. Bull.*, 141: 215-226.

López, I., Luna, I.G, Gutierrez, A., & Villaláz, J. (2005). Ciclo reproductivo de la almeja blanca *Prothotaca asperrima* (Pelecypoda: Veneridae) en la playa Bique, Arraiján. *Tecnociencia* 7(1), 43-53.

Mahurpawar, M. (2015). Effects of heavy metals on human health. *Int. J. Res. Granthaalayah*, 530, 1-7.

Mataba, G.R., Veerhaert, V., Blust, R., & Bervoets, L. (2016). Distribution of trace elements in the aquatic ecosystem of the Thigithe river and the fish *Laebo victorinus* in Tanzania and possible risks for human consumption. *Sci. Total Environm.* 547:48-59.

Milazzo, A.D.D., Silva, A.C.M., Oliveira, D.A.F., & Cruz, M.J.M. (2014). The influence of seasonality (dry and rainy) on the bioavailability and bioconcentration of metals in an estuarine zone. *Est. Coast. Shelf Sci.*, 149: 143-150.

Narváez Hernández, M., Astudillo, L.R., & Prin, J.L. (2010). Determinación de metales pesados en el tejido comestible del molusco *Arca zebra* comercializado en el Estado Nueva Esparta, Venezuela. *Saber*, 22(2): 141-148.

Nauen, C.E. (1983). Compilation of legal limits for hazardous substances in fish and fisheries products. FAO Fisheries Circular No., 764.

Neff, J.M. (2002). *Bioaccumulation in marine organism. Effects of contaminants from oil well produced water.* Elsevier.

NOAA. (1995). International Mussel Watch Project. Final Report. Technical Memorandum NOS ORCA 95.

Nwajei, G.E., Obi-Iyeke, G.E., & Okwagi, P. (2012). Distribution of selected trace metal in fish parts from the river Nigeria. *Res. J. Recent Sci.* 1(1):81-84.

Oliveira A.P.F. (2019). Determinação de metais na água, sedimento e em moluscos bivalves do complexo estuarino de Paranaguá, Paraná, Brasil. [Tese] Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Pattelli, G., Rimondi, V., Benvenuti, M., Chiarantini, L., & Colica, A. (2014). Effects of the November 2012 flood event on the mobilization

of Hg from the Mount Amiata mining district to the sediments of the Paglia River basin. *Minerals*, 4, 241–256.

Ríos, M., & Scala, E. (2002). Contaminación de metales pesados (Cd, Cu, Pb) en peces [Tesis] Universidad de Panamá.

Senez-Mello, T.M., Crapez, M.A.C., Ramos e Silva, C.A., Silva, E.T., & Fonseca, E.M. 2020. Heavy metals bioconcentration in *Crassostrea rhizophorae*: A site-to-site transplant experiment at the Potengi estuary, Rio Grande do Norte, Brazil. *Scientific Reports* 10:246. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-57152-w>

Silva, M.G.E.P., Macêdo, S.J., & Silva, H.K.P. (2013). Avaliação das concentrações de metais-traço em moluscos bivalves *Anomalocardia brasiliiana* (Gmelin, 1791) e *Iphigenia brasiliensis* (Lamarck, 1818) no estuário do rio Ipojuca – Ipojuca – PE, Brasil. *Trop. Oceanogr.*, Recife, 41(1-2), 154-172.

Standard Methods for the examination of water and wastewater. (2016). 24 ed. APHA. 2671 p.

Szefer, P., Kim, B.S., Kim, C.K., Kim, E.H., & Lee, C.B. (2004). Distribution and co associations of trace elements in soft tissue and byssus of *Mytilus galloprovincialis* relative to the surrounding seawater and suspended matter of the southern part of the Korean Peninsula. *Environ. Poll.*, 129: 209-228.

Wang, W.X., & Lu, G. (2017). *Heavy metals in bivalve mollusks*. Chem. Cont. Residues Food. Woodhead Publishing. In 553-594.

Wang, Y., Liang, L., Shi, J., & Jiang, G. (2005). Study on the contamination of heavy metals and their correlations in mollusks collected from coastal sites along the Chinese Bohai Sea. *Env. Int.*, 31: 1103-1113.