



REPORTES CIENTÍFICOS

D E L A F A C E N

ISSN 2078-399X (impreso)

ISSN 2222-145X (online)

Volumen 9

Número 1

2018

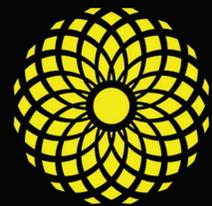
Estimación de dosis glandular promedio de pacientes expuestos a exámenes mamográficos convencionales.

Aplicación de modelos de series de tiempo a un componente iónico (alcalinidad total) indicativo de la calidad del agua en el embalse de Yacyreta.

Importancia del índice de dosis en tomografía computarizada (CTDI) para la protección radiológica de los pacientes sometidos a estudios tomográficos.

Diversidad de vertebrados muertos por atropellamiento vehicular y zonas de mayor impacto en la Ruta III General Elizardo Aquino, Paraguay.

Análisis crítico de la biogeografía del Paraguay.



FACEN

Facultad de Ciencias
Exactas y Naturales

PUBLICACIÓN CIENTÍFICA
DE LA FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN-PARAGUAY

REPORTES CIENTÍFICO DE LA FACEN



Reportes Científicos de la FACEN, es una revista de acceso libre y gratuito y es la publicación científica oficial de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional de Asunción. Es emitida semestralmente y publica artículos originales, artículos de revisión, tópicos actuales, reportes de casos, comunicaciones cortas y cartas al editor, en las áreas de Biología, Química, Física, Matemática Pura, Matemática Estadística, Geología, Biotecnología y Tecnología de Producción. Los trabajos y opiniones publicados en la revista son de exclusiva responsabilidad de los autores.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN

Prof. Lic. Abel Bernal Castillo M.Sc.
Rector

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

Prof. Constantino Nicolás Guefos Kapsalis, MAE
Decano

Dirección Web

www.facen.una.py

REPORTES CIENTÍFICOS DE LA FACEN

Dirección postal

Reportes Científicos de la FACEN, Dirección de
Investigación, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales,
Campus Universitario, Casilla de Correo 1039, San Lorenzo,
Paraguay

Teléfono/Fax

595 21 585600 interno 237

E-mail

reportescientificos@gmail.com

Dirección web

<http://www.facen.una.py/es/publicaciones-cientificas/>

Editor en Jefe

Lic. Fernando José Méndez Gaona, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - Universidad Nacional de Asunción

Comité Editorial Nacional

Dr. Bolívar Rafael Garcete Barrett
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Universidad Nacional de Asunción

Lic. Nery López
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Universidad Nacional de Asunción

M. Sc. Andrea Weiler de Albertini
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Universidad Nacional de Asunción

M. Sc. Fredy Julián Gómez Grance
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Universidad Nacional de Asunción

M. Sc. Miguel Ángel Martínez Cabrera
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Universidad Nacional de Asunción

M. Sc. Danilo Fernández Ríos
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Universidad Nacional de Asunción

Dra. Celeste Vega
Centro para el Desarrollo de Investigación Científica

Dra. Miriam Rolon
Centro para el Desarrollo de Investigación Científica

Dra. Antonieta Rojas de Arias
Organización Panamericana de la Salud - Paraguay

Comité Editorial Internacional

Dr. Robert Owen
Texas Tech University - Estados Unidos

Dra. Ana Honfi
Universidad Nacional de Misiones - Argentina

Dr. Julio Daviña
Universidad Nacional de Misiones - Argentina

Dr. Nicolás Niveiro
Universidad Nacional del Nordeste - Argentina

Dra. María Paula Badenes
Universidad Nacional de La Plata - Argentina

Dr. Anselmo Mc Donald
Universidad de Panamá - Panamá

Dr. José Seguinot
Universidad de Puerto Rico - Puerto Rico

Dr. Ángel Vara Vela
Universidad de São Paulo - Brasil

Dr. Fábio Luis Teixeira Gonçalves
Universidad de São Paulo - Brasil

Dr. Víctor Velázquez
Universidad de São Paulo - Brasil

Dr. Sebastián Simondi
Universidad Nacional de Cuyo - Argentina

Rep. cient. FACEN	San Lorenzo (Paraguay)	Vol. 9, Nº 1	enero-junio de 2018	ISSN 2078-399X (versión impresa) ISSN 2222-145X (versión online)
-------------------	------------------------	--------------	---------------------	---

REPORTES CIENTÍFICOS DE LA FACEN

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Rep. cient. FACEN	San Lorenzo (Paraguay)	Vol.9, N° 1	enero-junio de 2018	ISSN 2078-399X (versión impresa) ISSN 2222-145X (versión online)
-------------------	------------------------	-------------	---------------------	---

ARTÍCULOS ORIGINALES

- 3-8 **Fredy J. Gómez Grance & Analiz López Espinoza.** Estimación de dosis glandular promedio de pacientes expuestos a exámenes mamográficos convencionales.
- 9-23 **Teófilo Díaz, Pedro Puig, Gabriela Damilano & Juan Mereles.** Aplicación de modelos de series de tiempo a un componente iónico (alcalinidad total) indicativo de la calidad del agua en el embalse de Yacyreta.
- 24-30 **Freddy J. Gómez Grance & Yamila L. Rodríguez Zárate.** Importancia del índice de dosis en tomografía computarizada (CTDI) para la protección radiológica de los pacientes sometidos a estudios tomográficos.
- 31-41 **Aurora Ortega & Andrea Weiler.** Diversidad de vertebrados muertos por atropellamiento vehicular y zonas de mayor impacto en la Ruta III General Elizardo Aquino, Paraguay.
- 42-50 **Ignacio Avila Torres, Guillermo D'Elía, Christian Vogt Penzkofer & Bolívar Garcete-Barrett.** Análisis crítico de la biogeografía del Paraguay.



ESTIMACIÓN DE DOSIS GLANDULAR PROMEDIO DE PACIENTES EXPUESTOS A EXÁMENES MAMOGRÁFICOS CONVENCIONALES

ESTIMATION OF AVERAGE GLANDULAR DOSE IN PATIENTS EXPOSED TO CONVENTIONAL MAMMOGRAPHY EXAMS

FREDY J. GÓMEZ GRANCE¹ & ANALIZ LÓPEZ ESPINOZA¹

¹Laboratorio de Ciencias Radiológicas e Imagenología. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad Nacional de Asunción. Email: fjgrance@yahoo.com

¹Laboratorio de Ciencias Radiológicas e Imagenología. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad Nacional de Asunción.

Resumen: El indicador dosimétrico apropiado de la dosis de radiación recibida por pacientes en exámenes de mamografía es la Dosis Glandular Promedio (DGP). El objetivo del trabajo es estimar las DGP clínicas usando las ecuaciones paramétricas de Matsumoto et. al. (2003) y determinar la coincidencia con las estimaciones de Dance et. al. (2000). Para ello, se colectaron datos de kVp, mAs, espesor de mama comprimida (EMC), edad y combinación ánodo/filtro de 50 pacientes quienes fueron sometidos a exámenes de mamografía convencional. Estos datos fueron introducidos en las ecuaciones paramétricas para estimar la dosis glandular promedio. Los resultados fueron comparados con las curvas propuestas por Dance et al. (2003), donde se observa que los valores estimados en este trabajo se encuentran por debajo de los límites aceptables. Con estos resultados podemos inferir que las ecuaciones de Matsumoto son viables para estimar la DGP clínicas impartidas por mamógrafos que utilicen combinación de ánodo/filtro de Mo/Mo.

Palabras Clave: Mamografía, Glandularidad, Dosis Glandular Media.

Abstract: The appropriate dosimetric indicator of the radiation dose received by patients in mammography exams is the Average Glandular Dose (PGD). The objective of the study is to estimate the clinical DGP using the parametric equations of Matsumoto et. al. (2003) and to determine the degree of accuracy compared with the estimates of Dance et al (2000). For this, data of kVp, mAs, thickness of compressed breast, age and anode / filter combination of 50 patients who underwent conventional mammography examinations were collected. These factors were introduced in the parametric equations to estimate the doses. The results were compared with the curves proposed by Dance, where it is observed that the values estimated in this work are below the acceptable limits. With these results we can infer that the Matsumoto equations are viable to estimate DGP imparted by mammographers using a Mo / Mo anode / filter combination.

Key Words: Mammography, Glandularity, Average Glandular Dose.

INTRODUCCIÓN

La mamografía es el examen radiológico mayormente utilizado para la detección precoz del cáncer de mama, ya que el rango de energías que se utiliza (25 keV-40 keV) permite distinguir tejido cancerígeno del tejido fibroglandular y adiposo del cual está compuesto la mama (Bushberg, 2012).

La Dosis absorbida asociada a la exposición en exámenes de mamografía es la DGP, que se define como la dosis absorbida en promedio en el tejido glandular, excluyendo la piel, de una mama comprimida uniformemente con una composición de 50% de tejido adiposo y un 50% de tejido glandular, de

tal manera que para efectos estocásticos, la ICRP recomienda a la DGP como el indicador dosimétrico apropiado (TRS 457 OIEA, 2007).

El acervo bibliográfico referente a la estimación de la DGP es amplio, es así que existen protocolos internacionales como por ejemplo del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), la Guía Europea (EUREF) (Perry *et al.*, 2014), la Asociación Americana de Físicos Médicos (AAPM) y otros protocolos adaptados a estos, que se utilizan para la estimación de las dosis, tanto de referencia como las dosis clínicas. Una de las ecuaciones para determinar la DGP clínica utilizada por la Guía Europea (Perry *et al.*, 2014), basado en el trabajo de

Dance et. al. (2000), se muestra en la Ecuación (1)

$$DGP = k_i \cdot g \cdot c \cdot s \quad (mGy) \quad (1)$$

En donde:

- k_i : es el kerma incidente en aire sin retrodispersión en la superficie de entrada de un fantoma de PMMA que simula una mama estándar comprimida de 50 mm y composición de 50% tejido glandular y 50% de tejido adiposo.
- “g”: corrige la expresión por calidad de haz para una mama de 50% de glandularidad.
- “c”: corrige la expresión para otras glandularidades de mama, diferentes al 50%.
- “s”: corrige la expresión por la influencia de la combinación ánodo/filtro y es adimensional.

La DGP clínica no se puede medir directamente, sino que es estimada a partir de: la medida del kerma incidente en aire, la determinación del HVL y la selección de los factores "c" y "g" en cada exposición clínica particular (EUREF, 2013).

Debido a lo anterior, se introducen varias incertidumbres en la estimación de a DGP, de tal manera que varios autores han determinado ecuaciones paramétricas mediante simulaciones por Monte Carlo, donde se modelan geometrías de mamas con diferentes espesores y porcentajes de glandularidad diferentes, expuestos a una fluencia de fotones de Rx del espectro usado en mamografía (Boone (2002), Robson (2001), Matsumoto et. al. (2003)).

Es así que Matsumoto et. al. (2003) determinó ecuaciones paramétricas para estimar la DGP para las combinaciones ánodo/filtro correspondiente a Mo/Mo, Mo/Rh y Rh/Rh, dichas ecuaciones pueden ser utilizadas en dosimetría clínica, mediante parámetros dosimétricos que dependen de kVp, el mAs y EMC; y se describen a continuación:

- La energía efectiva (E_{eff}) está relacionada con el voltaje del tubo V (kVp) mediante la siguiente ecuación:

$$E_{eff} = a_1 V + a_2 \quad (2)$$

- Con la E_{eff} se puede calcular con las ecuaciones (3) y (4) el parámetro de carga X_{mAs} en unidades mR/mAs y el factor de conversión de DgN en unidades de (mGy/mR):

$$X_{mAs} = a_3 E_{eff}^2 - a_4 E_{eff} + a_5 \quad (3)$$

$$DgN = (a_6 E_{eff} - a_7) \cdot 10^{-3} \quad (4)$$

- Con las medidas de DFP (distancia fuente película) y valores de EMC se determina el factor de corrección por distancia SSD_{cf} mediante la expresión:

$$SSD_{cf} = \left(\frac{DFP}{DFP - EMC} \right)^2 \quad (5)$$

Los coeficientes de las ecuaciones anteriores varían para cada combinación ánodo/ filtro, siendo los valores para Mo/Mo los mostrados en la Tabla 1.

Para otras combinaciones ánodo/filtro se pueden consultar en el trabajo de Matsumoto et. al. (2003).

Por último, la DGP se estima multiplicando el mAs indicado en el mamógrafo por los valores determinados en las ecuaciones anteriores, mediante la expresión:

$$DGP(mGy) = mAs \cdot X_{mAs} \cdot D_{gN} \cdot SSD_{cf} \quad (6)$$

Luego del análisis de la bibliografía relacionada, este trabajo pretende estimar la Dosis Glandular Promedio con las ecuaciones de Matsumoto et. al. (2003) y compararlas con la curva teórica dadas por Dance et. al. (2000), demostrando de esta manera la viabilidad del método de Matsumoto aplicada a una dosimetría clínica.

Tabla 1: Coeficientes de las ecuaciones de Matsumoto et. al.(2003) para combinación Mo/Mo.

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
0,1325	11,80	2,1329	57,784	392,71	0,3962	4,3178

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se basa en el uso de las ecuaciones de Matsumoto et. al. (2003) para la estimación de la Dosis Glandular Promedio de pacientes expuestas a exámenes de mamografía filmica. Para ello, se registraron los parámetros técnicos de exposición de 50 pacientes, quienes fueron sometidas a exámenes de mamografía con un mamógrafo convencional y en todos los casos fueron realizadas proyecciones Cráneo – Caudal (CC) y Medio – Lateral – Oblicua (MLO) en cada mama.

a. Control de Calidad de Mamógrafo.

Se realizaron los controles de calidad del equipo antes de coleccionar los datos de los pacientes sometidos a exámenes mamográficos, para asegurar su confiabilidad.

En tal sentido, se realizaron pruebas de linealidad de la exposición con la carga, precisión y exactitud del: potencial, tiempo, exposición; determinación de la DGP de referencia y el HVL del equipo.

Todas las pruebas y determinaciones fueron realizadas con un detector de estado sólido UNFORS MAM con una incertidumbre de medición de dosis de $\pm 5 \mu\text{Gy}$ y el fantoma de mama ACR (Figura 1), empleando el Manual de Control de Calidad de mamógrafos convencionales TECDOC 1517 (OIEA, 2006). El equipo es un mamógrafo convencional GENERAL ELECTRIC, modelo Senographe 800 T, cuyas combinaciones de ánodo filtro disponibles son Mo/Mo y Mo/Rh.

b. Registro de datos y determinación de DGP.

Los datos de exposición fueron registrados en una planilla Excel, en donde se anotaron los siguientes parámetros técnicos: espesor de mama comprimida (EMC), potencial (kV), carga (mAs), combinación ánodo/filtro y la DFP, los cuales fueron extraídos de las placas radiográficas impresas, y la selección de los parámetros técnicos fue efectuado por el Control Automático de Exposición.

El kVp registrado en la planilla anterior fue utilizado en la Ecuación (2) para determinar la energía efectiva. El resultado de dicha ecuación fue usado



Figura 1: Exposición del fantoma ACR.

para determinar el factor de carga X_{mAs} y el factor DgN mediante las ecuaciones (3) y (4), respectivamente. Además, los valores de EMC y DFP fueron reemplazados en la Ecuación (5) para determinar el factor SSD_{cf} y por último, el mAs registrado fue multiplicado por los parámetros dosimétricos

anteriormente calculados para determinar la DGP con la ecuación (6).

Se graficaron las DGP en función del EMC para compararlas con las curvas teóricas de Dance et. al. (2000) del Protocolo Europeo (Perry *et al.*, 2014). Dichas curvas representan los valores de tolerancia y los valores realizables de las dosis en función del espesor de mama.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las estimaciones de la DGP utilizando las ecuaciones de Matsumoto arrojaron resultados esperados para la dosimetría clínica, y son fuertemente dependientes de los controles de calidad realizados y el método empleado.

En ese sentido, el control de calidad del equipo resultados óptimos, es decir, todos los parámetros evaluados se encuentran dentro de la tolerancia aceptada por el TECDOC 1517, con la cual se asume una alta confiabilidad en los datos colectados.

Es así que los valores de EMC varían desde 3,1 cm hasta 10,1 cm, los cuales fueron clasificados en tres categorías: pequeñas aquellas EMC menores o iguales a 4,5 cm; medianas entre 4,6 y 5,5 cm y grandes a partir de 5,6 cm en adelante, con lo cual se observó que la mayoría de las pacientes monitoreadas se encuentran en la categoría de mamas grandes.

Ramos & Villareal (2009), también utilizaron las Ecuaciones de Matsumoto et.al. (2003) en la estimación de DGP de 162 mujeres, donde reportaron un valor promedio de 1,2 mGy para un espesor de 5 cm de mama comprimida y una combinación Mo/Mo, en un rango de 0,8 mGy a 1,8 mGy, mientras que en este trabajo se observa que la DGP promedio en una proyección CC para un EMC de 5 cm es de $1,35 \pm 0,42$ mGy, en un rango comprendido entre 0,93 mGy a 1,93 mGy.

En la figura 2 se muestra una gráfica donde se puede notar que la DGP estimada en este trabajo varían entre 0,7 mGy y 2,5 mGy para EMC comprendidos entre 4,5 cm y 5,5 cm.

Los valores de dosis mostrados para ese rango de EMC están en tolerancia con los protocolos internacionales y se corresponden con el rango de

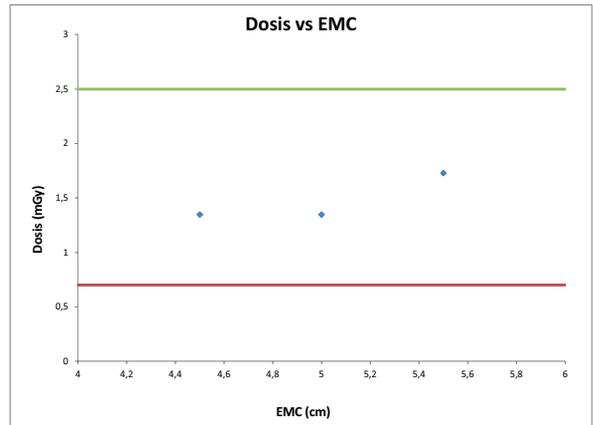


Figura 2: Dosis estimadas y comparadas con el método de Matsumoto para proyecciones CC.

valores reportados por Ramos & Villareal usando el mismo método de cálculo.

Además, los valores de dosis estimados fueron graficados en función del EMC, clasificando los datos por el tipo de proyección realizada. En el mismo gráfico también se trazaron las curvas teóricas de Dance et. al. (2000), tal como se muestra en la Figura 3.

El estudio revela que existe una asimetría entre ambas mamas en la mayoría de los casos y que, para una proyección Medio Lateral Oblicua, el espesor de mama comprimida es mayor, por lo que la dosis reportada también es mayor.

También se puede observar en los gráficos de la

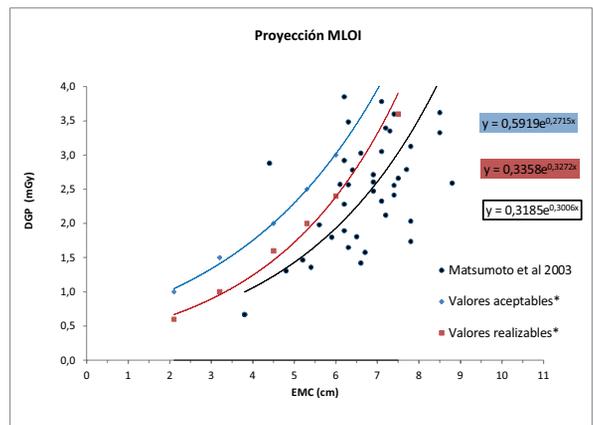


Figura 3: Relación de DGP en función de EMC comparadas con Dance et.al.(2000), para mamas derecha (D) y mamas izquierda (I).

Figura 3, que algunos puntos con igual EMC tienen valores diferentes de DGP. Esto se debe a la diferencia en mAs de dichas exposiciones, cuyo valor es seleccionado por el Control Automático de Exposición, que a su vez, realiza la selección de los parámetros técnicos dependiendo de la composición de la mama. En ese sentido, se observa que las DGP son menores para una mujer de mayor edad que tiene el mismo EMC que una mujer joven, ya que la glandularidad de la mama disminuye con la edad. Es así que tenemos, por ejemplo, una DGP de 0,91 mGy para una mujer de 71 años de edad con EMC de 5 cm y 1,35 mGy para una mujer de 43 años de edad con el mismo EMC.

Un aspecto importante de este trabajo, consiste en que las curvas teóricas de Dance et.al. (2000) se presentan como dosis en función del espesor de mama y no en función de espesores equivalentes de PMMA, por tanto, se observa que la curva de ajuste de los datos obtenidos son más similares a las curvas teóricas.

Con lo anterior se ha probado que las ecuaciones de Matsumoto son útiles para realizar una dosimetría clínica que servirá para conocer las dosis de radiación que reciben las pacientes expuestas a estudios mamográficos.

CONCLUSIONES

Después del análisis de los datos y discusiones en donde encontramos que la tendencia entre las DGP de este trabajo y las teóricas son similares, podemos afirmar que las ecuaciones de Matsumoto et al (2003), pueden utilizarse para la verificación de las dosis clínicas recibidas en exámenes de mamografía convencional.

La gran mayoría de los valores de DGP estimados se encuentran por debajo del límite inferior propuesto por Dance et al (2000), sin embargo, se pueden ver algunos valores que superan estos límites, principalmente para la proyección Medio Lateral Oblicua, por lo tanto las dosis en estas proyecciones son mayores que las CC para una misma mama, lo cual nos sugiere que la compresión realizada es menor en la proyección MLO.

Ya que la estimación de las DGP con el método presentado depende de los parámetros técnicos:

kVp, mAs y EMC, se recomienda realizar un estricto control de calidad al mamógrafo, principalmente al Control Automático de Exposición y al compresor de mama, con lo cual se garantizará la correcta selección de kV y mAs.

Este monitoreo evidenció que existen mujeres que se realizan mamografías desde los 33 años en adelante y hasta los 71 años de edad. Para estos casos, no podrían aplicarse la metodología descrita en el Protocolo Europeo (Perry *et al.*, 2014), debido a que el factor "c" introducido por Dance et. al. (2000), es dependiente de la edad de las pacientes, por lo que, las ecuaciones de Matsumoto et.al. (2003) es una solución viable.

AGRADECIMIENTOS

A las siguientes instituciones que permitieron el uso de equipos y recursos humanos para la realización del presente trabajo: Imagen Médica S.R.L y la FACEN-UNA.

LITERATURA CITADA

- Boone, J.M. (1999) Glandular breast dose for monoenergetic and high-energy x-ray beams: Monte Carlo assessment. *Radiology*, 213: 23–37
- Bushberg, J.T., Seibert, J.A., Leidholdt, E.M. & Boone, J. M. (2012) *The essential physics of medical imaging*. Third Edition. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins. 1030p.
- Bouzarjomehri, F. & Moostar, A. (2006) The study of Mean Glandular Dose in Mammography in Yazd and the factors affecting it. *Journal of Radiology*, 4(1): 29-35.
- Dance, D.R., Skinner, C.L., Young, K.C., Beckett, J.R & Kotre, C.J. (2000) Additional factors for the estimation of mean glandular breast dose using the UK mammography dosimetry protocol. *Physics in Medicine & Biology*, 45(1): 3225-3240.
- Perry, N., Broeders, M., Wolf, C., Törnberg, S., Holland, R. & Karsa, L. (2006) *European Guidelines for Quality Assurance in Breast Cancer Screening and Diagnosis*. Fourth Edition. Luxembourg. 4016 pp.
- Kawaguchi, A., Matsunaga, Y., Oysuka, T. & Suzuki, S. (2013) Patient investigation of aver-

- age glandular dose and incident air kerma for digital mammography. *Radiological Physics and Technology*, 7(1): 102:108.
- Matsumoto, M., Inoue, S., Honda, I., Yamamoto, S., Ueguchi, T., Ogata, Y. & Johkoh, T. (2003) Real time estimation system for mean glandular dose in mammography. *Radiation Medicine*, 21(6):280-284.
- Organismo Internacional De Energía Atómica (2006) Control de Calidad en Mamografía. Viena: OIEA. vii + 138 pp.
- Ramos, O. & Villareal, M. (2009). Determinación de un método de cálculo de dosis glandular promedio en exámenes de mamografía convencional. *Revista Chilena de Radiología*, 15(4): 197-200.
- Robson, K.J. (2001). A parametric method for determine mammographic X-Ray tube output and half value layer. *The British Journal of Radiology*, 74(1): 335-340.
- Viloria, C., Puertas, A. & Morales, J. (2009). Comparación de la DGM en pacientes según el porcentaje de glandularidad de la mama. *Revista Colombiana de Física*, 41(3): 668-670.
- Young, K.C & Burch, A. (2000). Radiation dose received in the UK Breast Screening Program in 1997 and 1998. *The British Journal of Radiology*, 73(1): 278-287.

APLICACIÓN DE MODELOS DE SERIES DE TIEMPO A UN COMPONENTE IÓNICO (ALCALINIDAD TOTAL) INDICATIVO DE LA CALIDAD DEL AGUA EN EL EMBALSE DE YACYRETA

APPLICATION OF MODELS FOR TIME SERIES TO AN IONIC COMPONENT (TOTAL ALKALINITY) INDICATIVE OF WATER QUALITY IN

THE YACYRETA RESERVOIR

TEÓFILO DÍAZ¹, PEDRO PUIG², GABRIELA DAMILANO³ & JUAN MERELES⁴

¹Departamento de Estadística, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Asunción. E-mail: teoadiazg@gmail.com

²Universidad Autónoma de Barcelona. E-mail: ppuig@mat.uab.cat

³Universidad Nacional de Río Cuarto. Córdoba, Argentina. E-mail: gdamilano@gmail.com

⁴Departamento de Estadística, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Asunción. E-mail: jimereles1991@gmail.com

Resumen: El embalse de Yacyretá proporciona energía eléctrica a Paraguay y Argentina sobre el río Paraná. Es importante verificar el impacto que la formación del embalse ha generado sobre la calidad del agua evaluando sus componentes iónicos. El trabajo consiste en verificar los cambios ocurridos en uno de estos componentes, la Alcalinidad Total, en el espacio-tiempo, con modelos de series temporales, durante el periodo comprendido desde febrero/2001 a noviembre/2010. Los objetivos específicos fueron: analizar los datos de manera descriptiva y su interpretación; construir un modelo univariante que describa el comportamiento; seleccionar el mejor modelo y prever los valores futuros. Se usaron los datos de 3 estaciones del programa de monitoreo de calidad del agua del EBY/FACEN. Con los datos originales se crearon nuevas series que corresponden a las diferencias entre puntos de muestreo. Se utilizó el enfoque de Box-Jenkins y el principio de parsimonia para la elección de modelos. Las series originales y sus transformadas se analizaron mediante modelos ARIMA estacionales (SARIMA(p,d,q) x(P,D,Q)_{s=12}), con datos incompletos. Tanto para las series originales como para sus transformadas se analizaron y compararon aquellos modelos con menor AIC. El mejor modelo univariado de las series originales resultó ser $m_1 = \text{SARIMA}(1,1,1) \times (0,1,1)_{12}$ y para las series transformadas $m_6 = \text{SARIMA}(2,0,2) \times (0,1,1)_{12}$. Las series originales presentan comportamientos similares, con ligera tendencia lineal creciente con pendiente constante, con estacionalidad anual y con varianza constante. Idénticas características presentan las series transformadas pero sin tendencia. No existen variaciones espaciales, pero sí temporales para las series originales, observando que los valores aumentan con el tiempo. Las series transformadas presentan un comportamiento similar aunque sin tendencia. Las predicciones son factibles, para series originales hasta los 20 meses y las transformadas hasta 12 meses posteriores. Utilizando los valores comprendidos desde diciembre/2010 a agosto/2015, tanto para las series originales como para las transformadas, se comprobó que los modelos seleccionados son fiables, ya que la mayoría de los datos cayeron dentro de los intervalos de predicción.

Palabras Clave: Series de Tiempo; Componentes Iónicos (Alcalinidad Total), Calidad de Agua; Embalse de Yacyreta.

Abstract: The Yacyreta reservoir provides electric energy to Paraguay and Argentina on the Parana river. It is important to verify the impact that the formation of the reservoir has generated on the quality of the water evaluating its ionic components. This assignment consists in verifying the changes occurred in one of the ionic components, Total Alkalinity, in space-time, with models for time series, during the period among february 2001 and november 2010. The specific aims were: to analyze and interpret the data and in a descriptive way, to build a univariate model that describes the behavior, to select the best model and predict the future values. Data corresponding to three stations were used, from the EBY/FACEN's water quality monitoring program. New series that correspond to the differences among points were created with the original data of sampling. The Box-Jenkins model and the principle of parsimony were used for the choosing of models. The original series and their transformed was analyzed through ARIMA stationary models (SARIMA(p,d,q)(P,D,Q)_{s=12}). The dates present absent values that occupy only 2.5% of the total group and that are not excluded according the procedure established by Vo-Day (1978) for ARIMA models with incomplete data. Both the original series

and their transforms were analysed and compared those models with lower AIC. The best univariate model of the original series resulted to be $m_1 = \text{sarima}(1,1,1)(0,1,1)_{12}$ and for the best univariate model for the transformed series data was $m_6 = \text{sarima}(2,0,2)(0,1,1)_{12}$. The original series presents similar behaviors, with a slight constant linear tendency with constant pendient, with annual stationarity and constant variance. The transformed series present identical traits, but without the tendency. There are no spatial variations, but there are temporal variations for the original series; observing the values are increase with time. The transformed series present a similar behavior although without tendency. Predictions are feasible for original series up to 20 months and for transformed series up to 12 months later. Using the values from December 2010 to August 2015, both for the original and for the transformed series, it was found that the selected models are reliable, since most of the data fell within the prediction intervals.

Keywords: *Time Series; Ionic Components (Total Alkalinity), Water Quality; Yacyreta reservoir.*

INTRODUCCIÓN

A comienzos del siglo XX aparecieron los primeros antecedentes sobre estudios relativos al aprovechamiento del río Paraná, época en que la generación de electricidad se basaba fundamentalmente en la utilización del carbón mineral, muy escaso en estas latitudes. Paraguay y Argentina a través de sus gobiernos y un convenio firmado el 23 de enero de 1958, decidieron realizar estudios técnicos de cara a la obtención de energía eléctrica del río Paraná, a la altura de las islas de Yacyretá y de Apipé, y así mejorar las condiciones de navegabilidad de dicho río. Luego de la crisis mundial petrolera, en 1973 se hizo eco la construcción el Embalse de Yacyretá, comenzando a generar energía en septiembre de 1994 (<http://www.eby.gov.py/index.php/institucional/historia>, 2018).

No obstante, la creación de embalses altera el comportamiento de la circulación de las aguas, provocando cambios sustanciales en las concentraciones de compuestos químicos que son arrastrados hacia las profundidades (O'Conner, 1976). Muchos lagos y embalses poseen una entrada y una salida, por lo que son considerados ríos de caudal lento, y el tiempo de residencia asegura que las aguas se clarificarán por la actividad bacteriana, eliminando materia orgánica además de los procesos de floculación y sedimentación, convirtiéndose en sedimentadores de partículas (Steele, 1971).

De hecho, las aguas superficiales, en particular, son recursos renovables con una capacidad limitada de recuperación ante los impactos negativos de la actividad humana. Su calidad influye en los usos del agua de lagos, mares, ríos y otras fuentes de aguas

superficiales o subterráneas, que depende del uso que se le da. En este sentido, y dado que el agua es un recurso natural escaso, su calidad, entendida como la capacidad intrínseca que tiene el agua para responder a los usos que se podría obtener de ella, debe ser protegida, defendida y gestionada apropiadamente.

El agua pura es un líquido incoloro, inodoro e insípido, cuyos parámetros son características físicas, químicas, biológicas y radiológicas que permiten detectar cuál es el grado de contaminación que presenta (Valencia, 2007). No obstante, toda agua contiene algo de sal, incluso las denominadas dulces, sin embargo, el problema surge cuando aumenta hasta el grado en que se amenaza la vida de poblaciones de flora y fauna acuática o se inutiliza para regar o beber (Interconsulting Bureau S.L., 2017).

Normalmente la salinidad de las aguas dulces está definida completamente por cuatro Cationes principales y por tres Aniones, de manera que la presencia natural de estos componentes en concentraciones apropiadas define la tipología del agua y su calidad. Teóricamente, la suma de los aniones en la muestra de agua, expresada en mgL^{-1} , debe ser exactamente igual a la suma de los cationes expresada de la misma forma (Guía Operativa GEMS/AGUA, 1994).

Diversos estudios (ver Rodríguez et al. 2001) muestran que la *Alcalinidad Total*, como ion mayoritario, es fundamental para definir la composición iónica (tipología del agua) midiendo así su calidad; razón por la cual se ha seleccionado esta variable para estudiar su comportamiento, en las tres esta-

ciones de muestreo (Entrada, Centro y Salida) del Embalse de Yacyretá.

La Alcalinidad Total, HCO_3^- , es una medida de los compuestos alcalinos o básicos que están presentes en el agua; regularmente se encuentra en forma de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de calcio, potasio, sodio y magnesio. Cada compuesto produce su alcalinidad específica, pero para fines de calidad y tratamiento del agua se considera la suma de todas ellas (Alcalinidad Total), cuyos límites razonables están entre 30 mgL^{-1} y 250 mgL^{-1} . Si es inferior a 10 mgL^{-1} no es deseable porque convierte el agua en muy corrosiva, ya que las bajas concentraciones disminuyen la capacidad amortiguadora del agua, existiendo el riesgo de que se produzcan fuertes variaciones de pH; por el contrario, las altas concentraciones pueden provocar depósitos salinos en suelos agrícolas por la evaporación.

En este sentido, el presente trabajo consiste en verificar a través de modelos de series temporales los cambios ocurridos con la formación del Embalse de Yacyretá en la *Alcalinidad Total* en el transcurso del tiempo (periodo desde febrero/2001 a agosto/2015) y espacio (tres estaciones de muestreo). A tal fin, se plantearon como objetivos: estudiar el comportamiento espacio-temporal, analizar los datos observados de manera descriptiva, construir un modelo univariante que describa el comportamiento del proceso, seleccionar el modelo de mejor ajuste en las tres estaciones de muestreo y predecir el comportamiento futuro de la serie a partir del modelo elegido para determinar el posible impacto del embalsamiento sobre este componente.

MATERIALES Y MÉTODOS

La central hidroeléctrica Yacyretá se ubica a 83 m sobre el nivel del mar, sobre un tramo del río Paraná a unos 2 km. aguas abajo de los rápidos de Apipé, al S.E. de la República del Paraguay y N.E. de la República Argentina, situándose las obras de cabecera en Rincón Santa María (R.A.), N.O. de la Isla Yacyretá (R.P.) y tierra firme paraguaya, próxima a la ciudad de Ayolas (Departamento de Misiones, Paraguay) e Ituzaingó (Provincia de Corrientes Argentina). El complejo dista a 90 km del eje de

Encarnación-Posadas, a 320 km de Asunción y a 1470 km de la ciudad de Buenos Aires medidos sobre la vía navegable. El embalse posee su margen derecha (MD) sobre la República de Paraguay y su margen izquierda (MI) en la República Argentina (Carrizo & Brunstein, 2010; <http://www.eby.gov.py>, 2018).

Los monitoreo sobre la calidad del agua en dicha zona, principalmente se realizan en tres estaciones o puntos de muestreo, como son: Entrada, Centro y Salida del Embalse de Yacyretá. El primer punto corresponde al Eje Candelaria-Campichuelo [EI-1C] considerado como Entrada; el segundo al Centro del Embalse ubicado a 60 km aproximadamente agua abajo de la Entrada [EI-4C(s)] y el último, Eje Itá Ybaté-Panchito López considerado como Salida [EI-8C] (Ubicado a 80 km aproximadamente del Centro del Embalse).

En este trabajo, se utilizaron datos provenientes de distintos convenios sobre Calidad del Agua, que la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FACEN) viene desarrollando con la Entidad Binacional Yacyreta (EBY). Abarca el periodo de febrero/2001 a noviembre/2010, por una parte (para construcción de los modelos), y desde diciembre/2010 a agosto/2015 (para validación de los modelos), en las tres estaciones de muestreo [Entrada (E_t), Centro (C_t) y Salida (S_t)]. La toma de muestras se hizo de manera mensual en un total de 118 meses, en la primera parte, y con mediciones discontinuas en la segunda parte con un total de 25 datos, entre ellos trimestrales y bimestrales, sobre todo a partir del octubre/2012.

Particularmente, se utilizaron los valores correspondientes a la variable *Alcalinidad Total* expresadas en mgL^{-1} y considerada como ión mayoritario, como componente cuyo comportamiento temporal y espacial mediante modelos de series temporales es objeto del presente estudio. Además, se construyeron nuevas series cronológicas, a partir de los datos originales que corresponden a los valores de las diferencias en cada uno de los puntos de muestreo [Entrada vs Centro (EC_t), Entrada vs Salida (ES_t) y Centro vs Salida (CS_t)].

En este trabajo, en primer lugar, los datos fue-

ron analizados de manera descriptiva, enfocando tal análisis en la medidas de tendencias centrales y de variaciones, para la *Alcalinidad Total*, que forma parte de los *componentes iónicos*. Luego, se han hecho ajustes con los llamados modelos *ARIMA estacionales*, indicados también como *SARIMA* (p, d, q) $x(P, D, Q)_s$, siguiendo los pasos de la metodología propuesta por Box y Jenkins (1976), que es una metodología unificada para estudiar series estacionarias y no estacionarias, estacionales o no, mediante el componente aleatorio puro reflejado en los residuos (Viñals, 2001).

Las series no estacionarias son las mas habituales y algunas de ellas necesitan ser diferenciadas un cierto número de veces para convertirlas en estacionarias. Un tipo de serie no estacionaria es aquella que presenta estacionalidad, lo que significa que su valor esperado no es constante pero varía con una pauta cíclica, $E(Z_t) = E(Z_{t+s})$ (Peña, 2005). Todos estos modelos en su mayoría restringen su uso a series completas de datos tomados en intervalos regulares. Sin embargo, los datos relacionados con la calidad del agua en la mayoría de los casos no presentan estas características, ya sea por variaciones en los métodos de análisis, imposibilidad de medición por falta de agua en ciertos meses del años, etc. (García, 1989).

Afortunadamente, la falta de mediciones en los datos analizados en este trabajo no son excesivas, solo representando el 2.5% del total del conjunto de datos observados. Estos valores no han sido reemplazados, ya que no superan el 10% como límite (y tampoco se encuentran muy próximos al primer valor) establecido por Vo-Day (1978) para la estimación de modelos ARIMA en series imcompletas.

En este sentido, cualquier modelo ARIMA estacional (Peña, 2005), que en términos del operador retardo B tiene la forma:

$$\Phi_p(B^S)\Theta_p(B)\Delta_S^D\Delta^dZ_t = \theta_q(B)\Theta_Q(B^S)A_t \dots\dots (1)$$

donde $\Phi_p(B^S) = 1 - \Phi_1B^S - \Phi_2B^{S^2} - \dots - \Phi_pB^{Sp}$ es el operador autoregresivo (AR) estacional de orden p, $\Theta_p(B) = 1 - \theta_1B - \theta_2B^2 - \dots - \theta_pB^p$ es el operador AR regular de orden p, $\Delta_S^D = (1 - B)^D$ y $\Delta^d = (1 - B)^d$,

representan las diferencias estacionales, y regulares, $\Theta_Q(B^S) = 1 + \Theta_1B^S + \Theta_2B^{S^2} + \dots + \Theta_QB^{SQ}$ es el operador media móvil (MA) estacional de orden Q, $\theta_q(B) = 1 + \theta_1B + \theta_2B^2 + \dots + \theta_qB^{Sq}$ es el operador MA regular de orden q y A_t es un proceso de ruido blanco.

Para la selección y evaluación de los modelos de series temporales se utilizaron, los Criterios de información de Akaike (AIC), la metodología de Box y Jenkins y el Principio de Parsimonia (Peña, 2005). En específico, la metodología de Box y Jenkins (1976), consta de tres etapas: (1) *Identificación* del posible modelo ARIMA que sigue la serie, (2) *estimación* de los parámetros (y su error estándar) de las partes AR y MA del modelo por máxima verosimilitud y los residuos del modelo, (3) *diagnosis del modelo*, mediante sus residuos, que no debe contener información para que el modelo sea bueno y poder utilizar para previsión.

No obstante, las predicciones tienen poca utilidad sin una medida de su precisión, y para ello la distribución de los errores de predicción y los intervalos de confianza de las predicciones son técnicas usuales imprescindibles (Peña, 2005). Sin embargo, la información contenida en la autocorrelación (ρ_k) es otro punto importante para la precisión de las predicciones, ya que un valor no nulo (significativo) indica que existe correlación entre informaciones separadas k unidades de tiempo, es decir, la historia se transmite k unidades de tiempo más allá, por lo tanto, las predicciones serían factibles para $t + k$ unidades temporales (Viñals, 2001).

Las construcciones de los modelos de series temporales así como las estimaciones y las validaciones fueron realizados en este trabajo mediante los siguientes pasos: a) Ajustes individuales para cada una de las estaciones de muestreo, b) Unificación de los modelos (modelo más razonable) teniendo en cuenta lo seleccionado previamente, c) Evaluación de la predicción mediante las gráficas de los valores reales con los valores estimados incluyendo los intervalos de confianza de dichas predicciones, para verificar que los valores reales de las series (a partir de diciembre/2010), caen o no dentro de los intervalos de las predicciones; el mismo enfoque

Tabla 1. Modelos SARIMA($p, 1, q$)x($P, 1, Q$)_{s=12} ajustados en las series originales (Fuente: Díaz, 2013).

$m_1 = SARIMA(1, 1, 1)(0, 1, 1)_{12}$
$m_2 = SARIMA(0, 1, 1)(0, 1, 1)_{12}$
$m_3 = SARIMA(0, 1, 2)(0, 1, 1)_{12}$

se utilizó para los datos transformados, eligiendo el modelo más razonable con el criterio de AIC, de Box-Jenkins y con el principio de parsimonia.

Tanto en las series originales como en las transformadas (Tabla 1 y Tabla 2), se seleccionaron aquellos modelos SARIMA (p, d, q)x(P, D, Q)_{s=12} con menor AIC. Para las series originales se consideró una diferencia regular ($d = 1$) debido a la tendencia, y una diferencia estacional ($D = 1$) debido a la estacionalidad anual ($s = 12$). En cambio las series transformadas (EC_t , ES_t y CS_t) se consideraron como estacionarias ($d = 0$) pero con diferencia estacional ($D = 1$), dando lugar a los modelos SARIMA (p, d, q)x(P, D, Q)_{s=12}, estacionales sin tendencia.

El procesamiento de datos se llevó a cabo con Excel office 2007, SPSS11.5 (FACEN) para el análisis descriptivo preliminar y R-Proyect 3.4.4 para realizar el ajuste de modelos de series temporales.

RESULTADOS

Análisis Descriptivo

En principio y con el objeto de ofrecer una síntesis de las características estadísticas de las muestras de agua según su distribución espacial en todo el período estudiado, se realizó un análisis descriptivo de la *Alcalinidad Total* registrada en cada una de las

Tabla 2. Modelos SARIMA($p, 0, q$)x($P, 1, Q$)_{s=12} ajustados en las series transformadas (Fuente: Díaz, 2013).

$m_1 = (0, 0, 0)(0, 1, 1)_{12}$
$m_2 = (0, 0, 0)(1, 1, 1)_{12}$
$m_3 = (0, 0, 0)(0, 1, 2)_{12}$
$m_4 = (0, 0, 1)(0, 1, 1)_{12}$
$m_5 = (1, 0, 0)(0, 1, 1)_{12}$
$m_6 = (2, 0, 2)(0, 1, 1)_{12}$
$m_7 = (1, 0, 1)(0, 1, 1)_{12}$
$m_8 = (0, 0, 1)(0, 1, 2)_{12}$
$m_9 = (2, 0, 1)(0, 1, 1)_{12}$

tres estaciones de muestreo. Del análisis univariado (Tabla 3) se desprende que: el promedio presenta un incremento desde la entrada al centro y desde el centro a la salida, siendo igual la mediana en todos los puntos; las modas presentan un incremento desde la entrada al centro, disminuyendo desde el centro a la salida; la variabilidad de los datos se incrementa desde la entrada al centro y disminuye desde el centro a la salida.

La gráfica de las series cronológicas originales (Figura 1), muestra el comportamiento temporal de la *Alcalinidad Total* en cada uno de los puntos de muestreo. Presentan una estructura muy similar a lo largo del tiempo para cada una de las estaciones; una tendencia lineal creciente constante y suave, donde los valores se repiten cada año aproximadamente [estacionalidad de orden 12 ($s=12$)]. Se observa también una varianza constante, sobre todo

Tabla 3. Estadísticos descriptivos principales de *Alcalinidad Total*, por estaciones de muestreo (Fuente: Díaz, 2013).

Estaciones de Muestreo	Media	Mediana	Moda	Mínimo	Máximo	Rango	Desviación Típica
Entrada	19,46	19,80	20,00	16,00	22,50	6,50	1,19
Centro	19,49	19,80	20,50	15,80	22,50	6,70	1,31
Salida	19,60	19,80	20,00	16,40	22,50	6,10	1,17

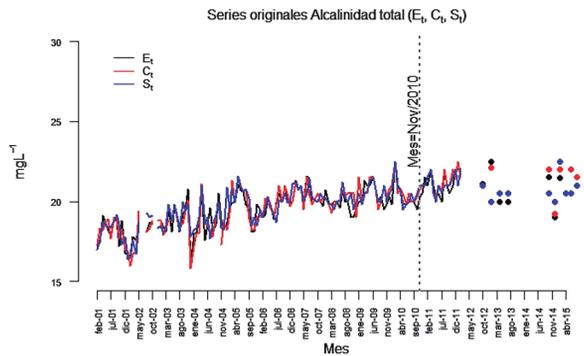


Figura 1. Comportamiento de la Alcalinidad Total (serie original) por estaciones de muestreo (E_t , C_t y S_t).

en los meses posteriores a oct/2005, un poco más inestables en las observaciones anteriores hasta oct/2003.

Modelos de series temporales univariadas

La construcción de modelos se ha realizado para *Alcalinidad Total* en las tres estaciones de muestreo: Entrada (E_t), Centro (C_t) y Salida (S_t), y también para las nuevas series construidas a partir de las series originales mediante la transformación de las diferencias de valores entre dichas estaciones: Entrada vs Centro (EC_t), Entrada vs Salida (ES_t) y Centro vs Salida (CS_t)¹. Para tal fin, se evaluaron estos modelos mediante el criterio de la significación de los coeficientes del modelo, el estudio de la Función de AutoCorrelación (ACF) y de la Función de AutoCorrelación Parcial (PACF) de los residuos, y la valoración de los valores predichos. Todo ello forma parte de la metodología de Box-

Jenking (1976).

Modelos para series cronológicas originales

a) Alcalinidad Total (Entrada)

En la *entrada*, los modelos m_1 , m_2 , y m_3 presentan las siguientes características resumidas en la Tabla 4: El modelo m_1 tiene un AIC = 287,91, tres coeficientes de los cuales uno es no significativo (ar_1 o θ_1), buenas predicciones y los residuos (Error) pueden considerarse como ruidos blancos. El modelo m_2 con un AIC = 288,59; dos coeficientes todos significativos; predicciones razonables (variabilidad creciente) y los residuos son ruidos blancos. El modelo m_3 con un AIC = 288,17; tres coeficientes de los cuales, uno es no significativo (ma_2 o θ_2); predicciones buenas y los residuos son ruidos blancos.

b) Alcalinidad Total (Centro)

En el *centro*, los modelos m_1 , m_2 , y m_3 presentan las siguientes características: El modelo m_1 tiene un AIC = 298,60; tres coeficientes de los cuales uno es no significativo (sma_1 o Θ_1); buenas predicciones y los residuos son ruidos blancos. El modelo m_2 con un AIC = 303,34; dos coeficientes, todos significativos; predicciones razonables (variabilidad creciente) y los residuos no discrepan demasiado del ruido blanco (1 coeficiente fuera de la banda de confianza). El modelo m_3 con un AIC = 300,85; tres coeficientes todos significativos; buenas predicciones y los residuos son ruidos blancos (Tabla 5).

Tabla 4. Resumen de los modelos m_1 , m_2 y m_3 ajustados para *Alcalinidad Total* en la entrada. **Abreviaturas:** Coef) Coeficiente; **Sig)** Significativo; **RB)** Ruido Blanco (Fuente: Díaz, 2013).

Alcalinidad Total (Entrada)	AIC	Coef. Sig.	Coef. No Sig.	Total Coef.	Predicción	Error
$m_1 = SARIMA(1,1,1) \times (0,1,1)_{12}$	287,91	2	1 (ar_1 o θ_1)	3	Bueno	RB
$m_2 = SARIMA(0,1,1) \times (0,1,1)_{12}$	288,59	2	0	2	Razonable	RB
$m_3 = SARIMA(0,1,2) \times (0,1,1)_{12}$	288,17	2	1 (ma_2 o θ_2)	3	Bueno	RB

¹En este apartado C_t y S_t representan los valores de las series cronológicas originales de Alcalinidad Total en las estaciones *Centro* y *Salida*, y no las componentes de las series de tiempos *Ciclo* y *Estacionalidad*.

Tabla 5. Resumen de los modelos m_1 , m_2 y m_3 ajustados para *Alcalinidad Total* en el centro. **Abreviaturas:** **Coef**) Coeficiente; **Sig**) Significativo; **RB**) Ruido Blanco; **NRB**) No Ruido Blanco (Fuente: Díaz, 2013).

Alcalinidad Total (Centro)	AIC	Coef. Sig.	Coef. No Sig.	Total Coef.	Predicción	Error
$m_1 = \text{SARIMA}(1,1,1) \times (0,1,1)_{12}$	298,60	2	1 (sm_{a_1} o θ_1)	3	Bueno	RB
$m_2 = \text{SARIMA}(0,1,1) \times (0,1,1)_{12}$	303,34	2	0	2	Razonable	NRB
$m_3 = \text{SARIMA}(0,1,2) \times (0,1,1)_{12}$	300,85	3	0	3	Bueno	RB

c) Alcalinidad Total (Salida)

En la *salida*, los modelos m_1 , m_2 , y m_3 presentan las siguientes características: El modelo m_1 tiene un AIC = 273,14; tres coeficientes, todos significativos; buenas predicciones y los residuos son ruidos blancos. El modelo m_2 con un AIC = 278,02; dos

coeficientes, todos significativos; malas predicciones (muchoa variabilidad) y los residuos son ruidos blancos. El modelo m_3 con un AIC = 277,77; tres coeficientes, todos significativos; buenas predicciones y los residuos no se comportan como ruido blanco (coeficiente fuera de los límites de confianza) [Tabla 6].

Tabla 6. Resumen de los modelos m_1 , m_2 y m_3 ajustados para *Alcalinidad Total* en la salida. **Abreviaturas:** **Coef**) Coeficiente; **Sig**) Significativo; **RB**) Ruido Blanco; **NRB**) No Ruido Blanco (Fuente: Díaz, 2013).

Alcalinidad Total (Salida)	AIC	Coef. Sig.	Coef. No Sig.	Total Coef.	Predicción	Error
$m_1 = \text{SARIMA}(1,1,1) \times (0,1,1)_{12}$	273,14	3	0	3	Bueno	RB
$m_2 = \text{SARIMA}(0,1,1) \times (0,1,1)_{12}$	278,02	2	0	2	Malo	RB
$m_3 = \text{SARIMA}(0,1,2) \times (0,1,1)_{12}$	277,77	3	0	3	Bueno	NRB

Unificación de modelos para Alcalinidad Total (serie original)

Con el objeto de seleccionar un modelo razonable que describa el comportamiento de *Alcalinidad Total* y poder prever sus valores futuros, se han ajustados los modelos (m_1 , m_2 , y m_3) previamente seleccionados en cada una de las estaciones, evaluados mediante

la metodología mencionada anteriormente. A continuación se presentan los resúmenes de éstos modelos ajustados en la tres estaciones (entrada, centro y salida), con los respectivos valores de AIC, significación de los coeficientes del modelo, residuos y las predicciones según sean sus comportamientos en el transcurso de un tiempo prolongado.

Tabla 7. Resumen del modelo $m_1 = \text{SARIMA}(1,1,1) \times (0,1,1)_{12}$ ajustado en la entrada, centro y salida para *Alcalinidad Total*. **Abreviaturas:** **Coef**) Coeficiente; **Sig**) Significativo; **RB**) Ruido Blanco (Fuente: Díaz, 2013).

Alcalinidad Total $m_1 = \text{SARIMA}(1,1,1) \times (0,1,1)_{12}$	AIC	Coef. Sig.	Coef. No Sig.	Total Coef.	Predicción	Error
Entrada	287,91	2	1 (ar_1 o θ_1)	3	Bueno	RB
Centro	298,60	2	1 (sm_{a_1} o θ_1)	3	Bueno	RB
Salida	273,14	3	0	3	Bueno	RB

a) $m_1 = SARIMA(1,1,1)x(0,1,1)_{12}$

Este modelo m_1 tiene un menor AIC en la salida (273,14), seguido al que corresponde en la entrada (287,91) y por último la del centro (298,60); uno de los coeficientes del modelo es no significativo

(ar_1 o θ_1) en la entrada y (sma_1 o Θ_1) en el centro, pero en la salida todos son significativos; las predicciones son muy buenas y los residuos son ruidos blancos en todas las estaciones de muestreo (Tabla 7).

Tabla 8. Resumen del modelo $m_2 = SARIMA(0,1,1)x(0,1,1)_{12}$ ajustado en la entrada, centro y salida para *Alcalinidad Total*. **Abreviaturas: Coef)** Coeficiente; **Sig)** Significativo; **RB)** Ruido Blanco; **NRB)** No Ruido Blanco (Fuente: Díaz, 2013).

Alcalinidad Total $m_2 = SARIMA(0,1,1)x(0,1,1)_{12}$	AIC	Coef. Sig.	Coef. No Sig.	Total Coef.	Predicción	Error
Entrada	288,59	2	0	2	Razonable	RB
Centro	303,34	2	0	2	Razonable	NRB
Salida	278,02	2	0	2	Malo	NRB

b) $m_2 = SARIMA(0,1,1)x(0,1,1)_{12}$

El modelo m_2 tiene un menor AIC en la salida (278,02), seguido al que corresponde en la entrada (288,59) y por último la del centro (303,34); todos los coeficientes del modelo son significativos; las predicciones son razonables en la entrada y centro (variabilidad creciente), sin embargo son malos en la salida (variabilidad muy amplia); los residuos son ruidos blancos en la entrada y no tan malos (un coeficiente apenas significativo) en el centro y salida (Tabla 8).

de los coeficientes del modelo es no significativo (ma_2 o θ_2) en la entrada, sin embargo en el centro y la salida todos los son; las predicciones son muy buenas en todas las estaciones; los residuos son ruidos blancos en la entrada y centro, no así en la salida (un coeficiente significativo) [Tabla 9].

Modelo mas razonable en las tres estaciones de muestreo de las series originales

Desde el punto de vista de la parsimonia de los modelos (menos parámetros), el modelo m_2 es el mas razonable, contiene solo dos parámetros estimados, además todos son significativos, sin embargo, no proporciona buenas predicciones en la entrada y centro, aún peor en la salida (mucho variabilidad). Por otro lado los residuos son buenos en la entrada,

c) $m_3 = SARIMA(1,1,2)x(0,1,1)_{12}$

El modelo m_3 tiene un menor AIC en la salida (277,77), seguido al que corresponde en la entrada (288,17) y por último la del centro (300,85); uno

Tabla 9. Resumen del modelo $m_3 = SARIMA(1,1,2)x(0,1,1)_{12}$ ajustado en la entrada, centro y salida para *Alcalinidad Total*. **Abreviaturas: Coef)** Coeficiente; **Sig)** Significativo; **RB)** Ruido Blanco; **NRB)** No Ruido Blanco (Fuente: Díaz, 2013).

Alcalinidad Total $m_3 = SARIMA(1,1,2)x(0,1,1)_{12}$	AIC	Coef. Sig.	Coef. No Sig.	Total Coef.	Predicción	Error
Entrada	288,17	2	1(ma_2 o θ_2)	3	Bueno	RB
Centro	300,85	3	0	3	Bueno	RB
Salida	277,77	3	0	3	Bueno	NRB

Tabla 10: Detalles del modelo m_1 seleccionado para predecir la *Alcalinidad Total* en las tres estaciones de muestreo (Entrada, Centro y Salida). (Fuente: Díaz, 2013).

Alcalinidad Total				
$m_1 = SARIMA(1, 1, 1)(0, 1, 1)_{12}$				
Estaciones de Muestreos		$(ar_1, \sigma\theta_1)$	$(ma_1, \sigma\theta_1)$	$(sma_1, \sigma\Theta_1)$
Entrada	Coefficientes:	0,20	-0,92	-0,81
	s,e,	0,11	0,06	0,12
	Li	-0,02	-1,03	-1,06
	Ls	0,42	-0,81	-0,57
$\hat{\theta}^2 = 0,78; AIC = 287,91$				
Centro	Coefficientes:	0,32	-0,97	-0,97
	s,e,	0,11	0,06	0,70
	Li	0,11	-1,09	-2,33
	Ls	0,52	-0,84	0,39
$\hat{\theta}^2 = 0,79; AIC = 298,60$				
Salida	Coefficientes:	0,38	-0,96	-0,83
	s,e,	0,10	0,05	0,13
	Li	0,18	-1,04	-1,10
	Ls	0,58	-0,87	-0,57
$\hat{\theta}^2 = 0,67; AIC = 273,14$				

Abreviaturas. s,e: Error Estándar; Li: Límite Inferior; Ls: Límite Superior

no siendo así en el centro y la salida (un coeficiente significativo). Por lo tanto, este modelo no puede ser considerado como el más razonable para describir el comportamiento de la variable *Alcalinidad Total* (series originales), en las tres estaciones de muestreo, espacial y temporal, en el embalse de Yacyreta.

Los modelos m_1 y m_3 tienen tres parámetros estimados, mayor número que en m_2 . En el caso del

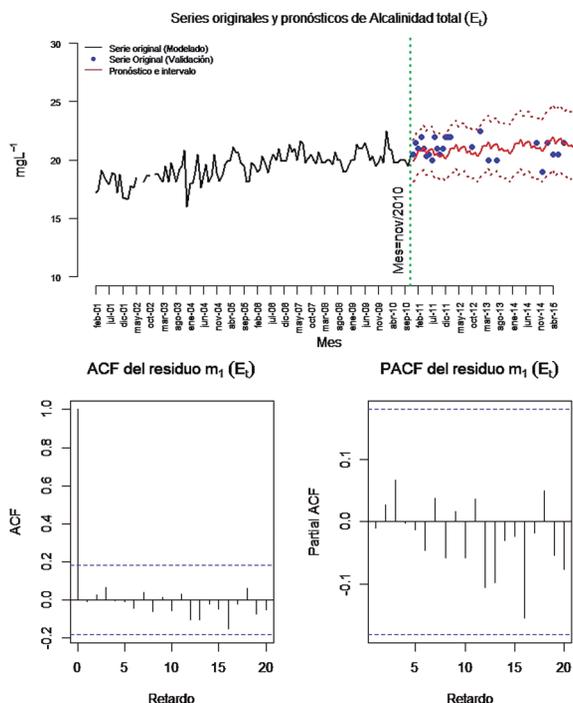


Figura 2: Serie original, valores predichos con el modelo m_1 e Intervalos de Confianza del 95%, ACF y PACF del residuo, para *Alcalinidad Total* en Entrada.

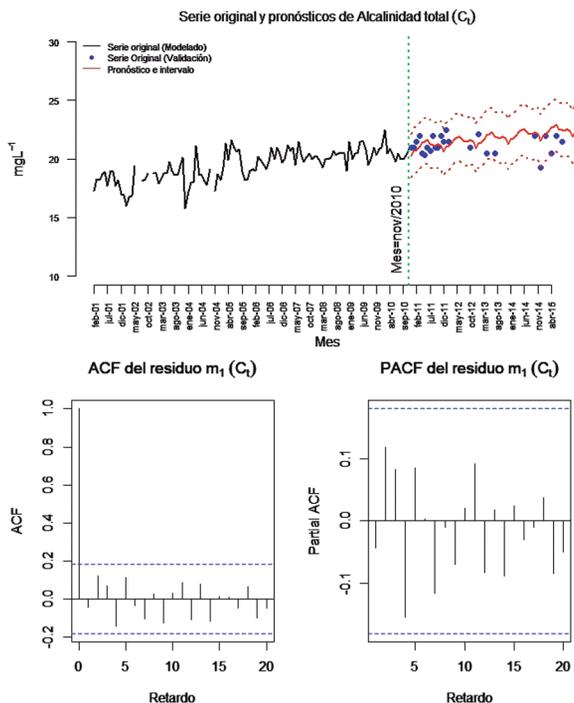


Figura 3: Serie original, valores predichos con el modelo m_1 e Intervalos de Confianza del 95%, ACF y PACF del residuo, para *Alcalinidad Total* en el Centro.

modelo m_1 (Tabla 10; Figuras 2, 3 y 4), contiene un coeficiente no significativo correspondiente a la parte autorregresiva en la entrada (ar_1 o θ_1) y la de media móvil estacional en el centro (sma_1 o Θ_1), sin embargo, en la salida todos son significativos. Además, genera buenas predicciones, donde los residuos son ruidos blancos en todas las estaciones de muestreo.

El modelo m_3 contiene un coeficiente no significativo correspondiente a la parte de media móvil regular en la entrada (ma_2 o θ_2), sin embargo, en el centro y la salida todos son significativos; también genera buenas predicciones en todas las estaciones, no obstante, en la entrada y centro los residuos son ruidos blancos, y no tan bueno en la salida (un coeficiente significativo).

Al eliminar el coeficiente no significativo del modelo m_3 , éste queda con la misma característica presentada por el modelo m_2 , que ya se había descartado; por lo tanto, m_3 tampoco puede ser considerado como un modelo razonable para describir el

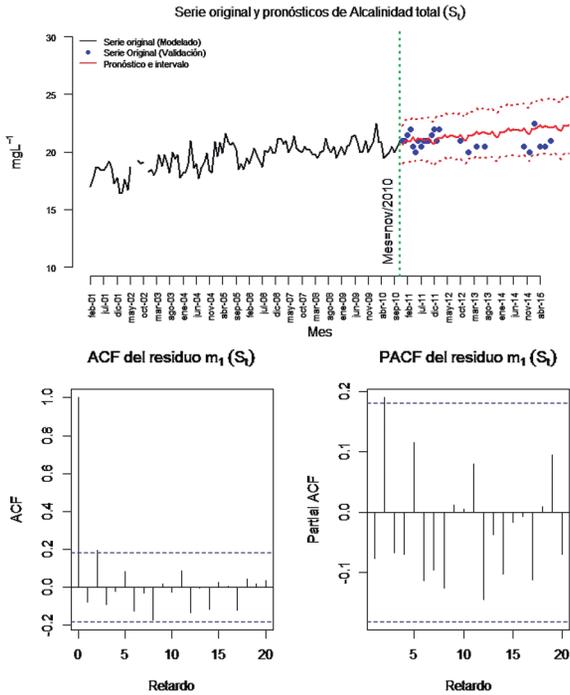


Figura 4: Serie original, valores predichos con el modelo m_1 e Intervalos de Confianza del 95%, ACF y PACF del residuo, para *Alcalinidad Total* en la Salida.

comportamiento de las series en la tres estaciones de muestreo.

A pesar de que el modelo m_1 tiene coeficiente no significativo (Tabla 10; Figura 2, 3 y 4), en las demás características (predicciones y residuos) funciona bien; además, posee un menor valor de AIC en todas las estaciones de muestreo que los demás modelos (m_2 y m_3), cumpliendo así con las condiciones que se esperaría de un buen modelo según la metodología de Box-Jenkins.

Por lo tanto, el $m_1 = SARIMA(1,1,1)x(0,1,1)_{12}$ queda como el modelo que proporciona un ajuste más razonable, para describir el comportamiento de la Alcalinidad Total (series originales) en las tres estaciones de muestreo (Entrada, Centro y Salida), en el embalse de Yacyreta, para el periodo que va de febrero de 2001 a noviembre de 2010.

Utilizando la ecuación (1), el modelo m_1 queda expresado en las tres estaciones (E_t , C_t y S_t) con sus coeficientes estimados (Tabla 10) de la siguiente manera:

• **Entrada (E_t):**

$$E_t - 1,20E_{t-1} + 0,20E_{t-2} - E_{t-12} + 1,20E_{t-13} - 0,20E_{t-14} = A_t - 0,92A_{t-1} - 0,81A_{t-2} + 0,75A_{t-3} \tag{2}$$

• **Centro (C_t):**

$$C_t - 1,32C_{t-1} + 0,32C_{t-2} - C_{t-12} + 1,32C_{t-13} - 0,32C_{t-14} = A_t - 0,97A_{t-1} - 0,97A_{t-2} + 0,94A_{t-3} \tag{3}$$

• **Salida (S_t):**

$$S_t - 1,38S_{t-1} + 0,38S_{t-2} - S_{t-12} + 1,38S_{t-13} - 0,38S_{t-14} = A_t - 0,96A_{t-1} - 0,83A_{t-2} + 0,80A_{t-3} \tag{4}$$

Estabilidad del modelo seleccionado, $m_1 = SARIMA(1,1,1)x(0,1,1)_{12}$

Es importante valorar la estabilidad del modelo m_1 que hemos obtenido utilizando los datos del periodo febrero/2001 a noviembre/2010. Para ello, utilizamos un grupo de mediciones posteriores a dicho periodo, siendo algunas de ellas mensuales, y otras bimestrales y trimestrales, correspondientes al periodo desde diciembre/2010 a agosto/2015.

En este sentido (Figura 2, 3 y 4; abajo), al analizar las graficas de los valores reales de las series en las tres estaciones de muestreo con las correspondientes predicciones generadas por el modelo m_1 , se ha encontrado que todos los datos observados están dentro de los intervalos de predicciones para las tres estaciones, a excepción en el centro, con un dato por debajo de límite inferior de predicción. Esto indica que el modelo m_1 que hemos selecciondo predice de manera coherente los valores de las series originales de la Alcalinidad total en las tres

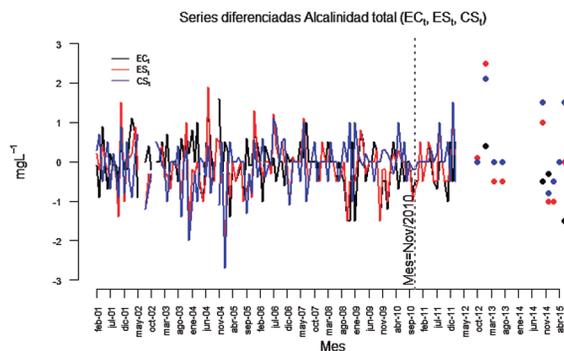


Figura 5. Comportamiento de la Alcalinidad Total de las tres series transformadas (EC_t , ES_t y CS_t).

Tabla 11. Resumen del modelo $m_6 = SARIMA(2,0,2)x(0,1,1)_{12}$ ajustado en la EC_t , ES_t y CS_t para *Alcalinidad Total*. **Abreviaturas:** **Coef**) Coeficiente; **Sig**) Significativo; **RB**) Ruido Blanco (Fuente: Díaz, 2013).

Alcalinidad Total $m_6 = SARIMA(2,0,2)x(0,1,1)_{12}$	AIC	Coef. Sig.	Coef. No Sig.	Total Coef.	Predicción	Error
Entrada vs Centro (EC_t)	208,17	5	0	5	Bueno	RB
Entrada vs Salida (ES_t)	222,74	5	0	5	Bueno	RB
Centro vs Salida (CS_t)	226,74	4	$1(ma_2 \text{ o } \theta_2)$	5	Bueno	RB

estaciones de muestreo. Por tanto, este modelo es fiable y estable con el paso del tiempo.

Modelos para Series Transformadas

Con las nuevas series construidas para Alcalinidad Total a partir de las diferencias de valores entre cada estación de muestreo (EC_t , ES_t y CS_t), se pretende verificar la estabilidad de las variaciones de los datos originales, así como, si existe diferencia significativa entre las tres estaciones de muestreo del periodo considerado, a través de modelos de series temporales, en el Embalse de Yacretá. La Figura 5, muestra el comportamiento de las tres series transformadas en el tiempo-espacio, cuyos valores oscilan alrededor del cero (media) en el tiempo, sin ninguna tendencia, con lo cual no se necesitaría de una diferencia regular para ser estacionaria ($d=0$); sin embargo, muestran un patrón que se repite cada año, donde: EC_t depende de EC_{t-s} , EC_{t-s^2} , ...; ES_t de ES_{t-s} , ES_{t-s^2} , ...; CS_t de CS_{t-s} , CS_{t-s^2} , ...; donde S , indica la estacionalidad anual ($S = 12$).

Modelo conjunto más razonable de las series transformadas

Teniendo en cuenta el mismo criterio de selección del mejor modelo que hemos utilizado para los valores originales de la Alcalinidad Total, se han ajustado los 9 modelos mencionados anteriormente (m_1, m_2, \dots, m_9) de la forma $SARIMA(p,0,q)x(P,I,Q)_{12s}$ a las tres series de diferencias de valores (EC_t , ES_t y CS_t). Estos modelos en la mayoría de los casos no generan buenos resultados para estas series, a excepción del modelo $m_6 = SARIMA(2,0,2)x(0,1,1)_{12}$. La

Tabla 10, muestra el resumen de este modelo m_6 , considerado como el mejor modelo, pues, tiene un menor AIC en EC_t (AIC=208,17), seguido del que corresponde para ES_t (AIC=222,74) y por último del CS_t (AIC=226,74); uno de los coeficientes de este modelo es no significativo (ma_2 o θ_2) en CS_t ; sin embargo las predicciones son muy buenas y los residuos se comportan como ruidos blancos en todas las estaciones de muestreo.

A pesar de que el modelo m_6 contiene un coeficiente no significativo, en las demás características funciona bien (buenas predicciones y los residuos son ruidos blancos) lo que se espera de buen modelo bajo el criterio de Box-Jenkins. Es la razón por la cual consideramos que el modelo más razonable para las tres series transformadas es el m_6 .

Utilizando la ecuación (1), el modelo estimado m_6 se expresa en función de sus coeficientes (Tabla 12) de la siguiente manera:

Tabla 12: Detalles del modelo m_6 ajustado para *Alcalinidad Total* en las tres series transformadas (EC_t , ES_t y CS_t) (Fuente: Díaz, 2013).

Alcalinidad Total $m_6 = SARIMA(2,0,2)x(0,1,1)_{12}$						
Estaciones de Muestreos		$(ar_1 \text{ o } \theta_1)$	$(ar_2 \text{ o } \theta_2)$	$(ma_1 \text{ o } \theta_1)$	$(ma_2 \text{ o } \theta_2)$	$(sma_1 \text{ o } \theta_1)$
Entrada vs Centro (EC_t)	Coeficientes:	-0,42	-1,00	0,43	1,00	-0,62
	s.e.	0,03	0,01	0,08	0,10	0,11
	Li	-0,47	-1,02	0,28	0,80	-0,84
	Le	-0,36	-0,98	0,58	1,19	-0,40
$\delta^2 = 0,37$; AIC = 208,17						
Entrada vs Salida (ES_t)	Coeficientes:	0,40	-0,86	-0,54	1,00	-0,84
	s.e.	0,07	0,08	0,05	0,10	0,18
	Li	0,27	-0,98	-0,65	0,80	-1,20
	Le	0,54	-0,73	-0,43	1,20	-0,48
$\delta^2 = 0,38$; AIC = 222,74						
Centro vs Salida (CS_t)	Coeficientes:	0,35	-0,82	-0,45	1,00	-1,00
	s.e.	0,07	0,07	0,13	0,56	0,17
	Li	0,21	-0,96	-0,70	-0,09	-1,33
	Le	0,50	-0,68	-0,19	2,09	-0,67
$\delta^2 = 0,36$; AIC = 226,74						

Abreviaturas. s.e.) Error Estándar; Li) Límite Inferior; Le) Límite Superior

• Entrada vs Centro (EC_t):

$$EC_t + 0,42EC_{t-1} + EC_{t-2} - EC_{t-12} - 0,42 EC_{t-13} - EC_{t-14} = A_t + 0,43A_{t-1} + A_{t-2} - 0,62A_{t-12} - 0,27A_{t-13} - 0,62A_{t-14} \quad (5)$$

• Entrada vs Salida (ES_t):

$$ES_t - 0,40ES_{t-1} + 0,86ES_{t-2} - ES_{t-12} + 0,40ES_{t-13} - 0,86ES_{t-14} = A_t - 0,54A_{t-1} + A_{t-2} - 0,84A_{t-12} + 0,45A_{t-13} - 0,84A_{t-14} \quad (6)$$

• Centro vs Salida (CS_t):

$$CS_t - 0,35CS_{t-1} + 0,82CS_{t-2} - CS_{t-12} + 0,35CS_{t-13} - 0,82CS_{t-14} = A_t - 0,45A_{t-1} + A_{t-2} - A_{t-12} + 0,45A_{t-13} - A_{t-14} \quad (7)$$

Estabilidad del modelo seleccionado, $m_6 = SARIMA(2,0,2)x(0,1,1)_{12}$

Evaluamos la estabilidad del modelo obtenido con estas series, utilizando el mismo período para los datos y el mismo método gráfico mencionado anteriormente para las series originales. En este sentido (Figura 6, 7 y 8; abajo), al comparar las gráficas de los valores transformados de las series

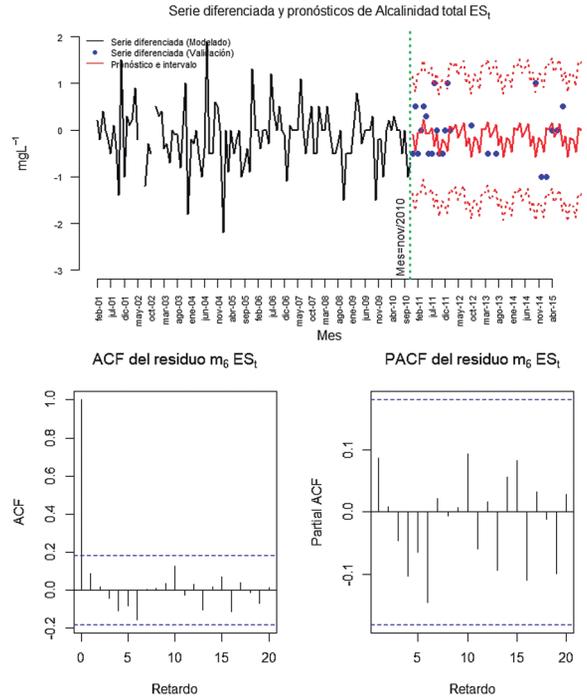


Figura 7. Serie transformada (ES_t), valores predichos con el modelo m_6 con su Intervalo de Confianza del 95%, ACF y PACF de los residuos para *Alcalinidad Total*.

con las correspondientes predicciones generadas por el modelo m_6 , se ha encontrado que entre la entrada-centro y entrada-salida, todos los valores observados están dentro de los intervalos de predicción. Sin embargo, para el centro-salida el 16% de los valores se encuentran por encima del límite superior de predicción, con un valor mas alejado que el resto. Todo ello es indicativo de la confiabilidad del modelo seleccionado para estas series de datos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La presente investigación se ha centrado en el estudio de la distribución temporal (de febrero/2001 a noviembre/2010 para el modelado, y de diciembre/2010 a agosto/2015 para la validación de dicho modelo) y espacial (Entrada, Centro y Salida) de uno los componentes iónicos que define la calidad del agua del Embalse de Yacuyretá. Específicamente, y con el fin de determinar el posible impacto del embalsamiento sobre la componente *Alcalinidad Total* y prever su comportamiento futuro, se han

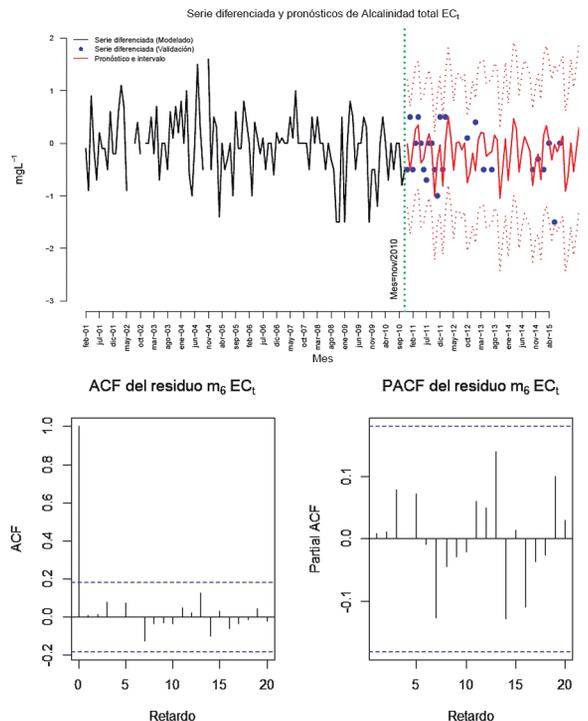


Figura 6. Serie transformada (EC_t), valores predichos con el modelo m_6 con su Intervalo de Confianza del 95%, ACF y PACF de los residuos para *Alcalinidad Total*.

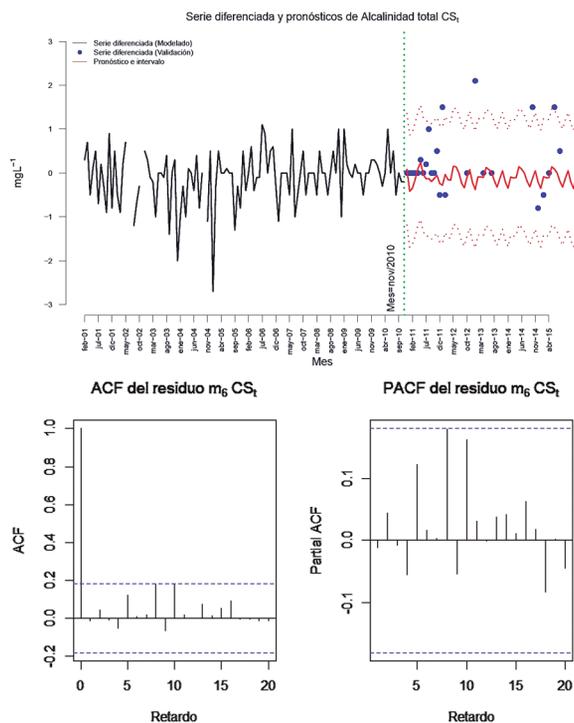


Figura 8. Serie transformada (CS_t), valores predichos con el modelo m_6 con su Intervalo de Confianza del 95%, ACF y PACF de los residuos para *Alcalinidad Total*.

utilizado modelos de series temporales.

El análisis descriptivo de esta variable, seleccionada en cada una de las tres estaciones de muestreo, revela las siguientes características químicas de las muestras de agua según su distribución espacial en el periodo de modelado: Los valores centrales (promedio, mediana y moda), los promedios presentan un incremento de la entrada al centro y del centro a la salida, siendo iguales las medianas en todos los puntos; las modas tienen un incremento de la entrada al centro, disminuyendo del centro a la salida; las variaciones se incrementan de la entrada al centro y disminuyen del centro a la salida.

Las series originales de *Alcalinidad Total* durante el periodo *febrero/2001 a agosto/2015* en las tres estaciones de muestreo tienen comportamientos similares a lo largo del tiempo y del espacio, con una ligera tendencia lineal creciente constante y estacionalidad anual, con varianza constante. Idénticas características presentan las series de

las diferencias, pero en este caso sin tendencia.

Utilizando las 118 mediciones mensuales disponibles (febrero/2001 a noviembre/2010), se han construido diferentes modelos y se han evaluado mediante el criterio de Box y Jenkins, tanto para las series originales como para las transformadas obtenidas mediante las diferencias de valores entre estaciones de muestreo. Además, con los datos observados desde diciembre/2010 a agosto/2015 se evaluó la estabilidad de los modelos seleccionados mediante las gráficas de los valores observados y predichos de las series, junto con los intervalos de confianza (95%) de las predicciones.

- a) En el caso de las series originales se han comparado los 3 modelos que presentaban un menor AIC; el mejor modelo predictivo univariado resultó ser el $m_1 = SARIMA(1,1,1)x(0,1,1)_{12}$.

Utilizando la ecuación (1), el modelo m_1 se expresa en función de sus coeficientes de la siguiente manera:

- Entrada (E_t):

$$E_t - 1,20E_{t-1} + 0,20E_{t-2} - E_{t-12} + 1,20E_{t-13} - 0,20E_{t-14} = A_t - 0,92A_{t-1} - 0,81A_{t-2} + 0,75A_{t-13} \quad (2)$$

- Centro (C_t):

$$C_t - 1,32C_{t-1} + 0,32C_{t-2} - C_{t-12} + 1,32C_{t-13} - 0,32C_{t-14} = A_t - 0,97A_{t-1} - 0,97A_{t-2} + 0,94A_{t-13} \quad (3)$$

- Salida (S_t):

$$S_t - 1,38S_{t-1} + 0,38S_{t-2} - S_{t-12} + 1,38S_{t-13} - 0,38S_{t-14} = A_t - 0,96A_{t-1} - 0,83A_{t-2} + 0,80A_{t-13} \quad (4)$$

- b) En el caso de las series de diferencias entre estaciones, se han ajustados 9 modelos que correspondían a aquellos con menores valores de AIC, con el mismo criterio de valoración aplicado a las series originales. El $m_6 = SARIMA(2,0,2)x(0,1,1)_{12}$ resultó ser el mejor modelo para estas tres series.

Utilizando la ecuación (1), el modelo m_6 se expresa en función de sus coeficientes de la siguiente manera:

- Entrada vs Centro (EC_t):

$$EC_t + 0,42EC_{t-1} + EC_{t-2} - EC_{t-12} - 0,42 EC_{t-13} - EC_{t-14} \\ = A_t + 0,43A_{t-1} + A_{t-2} - 0,62A_{t-12} - 0,27A_{t-13} - 0,62A_{t-14} \quad (5)$$

- Entrada vs Salida (ES_t):

$$ES_t - 0,40ES_{t-1} + 0,86ES_{t-2} - ES_{t-12} + 0,40ES_{t-13} - 0,86 \\ ES_{t-14} = A_t - 0,54A_{t-1} + A_{t-2} - 0,84A_{t-12} + 0,45A_{t-13} - \\ 0,84A_{t-14} \quad (6)$$

- Centro vs Salida (CS_t):

$$CS_t - 0,35CS_{t-1} + 0,82CS_{t-2} - CS_{t-12} + 0,35CS_{t-13} - 0,82 \\ CS_{t-14} = A_t - 0,45A_{t-1} + A_{t-2} - A_{t-12} + 0,45A_{t-13} - A_{t-14} \quad (7)$$

En vista de los resultados se llega así a la conclusión de que no existen variaciones espaciales pero sí temporales para las series originales, ya que se obtiene un modelo único con coeficientes muy similares para las tres series. Para el caso de las series transformadas el resultado es muy similar, destacando en este caso la ausencia de una tendencia lineal creciente.

Con los modelos seleccionados, las predicciones son factibles, en el caso de las series originales hasta los 20 meses posteriores de la última observación (julio/2012) y en el caso de las series transformadas hasta los 12 meses posteriores (noviembre/2011). En ambos casos las predicciones son buenas, pues generan variabilidades con amplitud pequeña y constante. Además, se mantiene la tendencia en el caso de la serie original y la ausencia de tendencia para la transformada, en el transcurso del tiempo y espacio.

Este trabajo, como cualquier otro, no está cerrado y tiene sus limitaciones, lo que permite detallar las siguientes recomendaciones y líneas futuras de investigación:

- Realizar un seguimiento de las demás variables principales del compuesto iónico en forma univariada, para predecir el comportamiento de cada una de ellas. Además, y debido a que en general el agua dulce se caracteriza como bicarbonatada cálcica, estudiar las componentes Alcalinidad Total y Calcio al mismo tiempo.
- También sería interesante hacer un estudio de los componentes iónicos en forma conjunta,

es decir aplicar modelos de series de tiempo multivariados, lo que permitiría una apreciación más razonable del comportamiento de las variables que definen la calidad de agua y una estimación más precisa de su desempeño futuro en el Embalse de Yacyretá.

- Por otro lado, es recomendable replicar estos análisis tanto univariado, bivariado y multivariado para otros puntos de muestreo, lo que permitiría una apreciación más desagregada y focalizada del comportamiento de las variables que definen la calidad de agua y una estimación más precisa de su desempeño futuro en el Embalse de Yacyretá.

AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FACEN) y a la Entidad Binacional Yacyretá (EBY) por permitir el acceso a la base de datos para hacer posible este trabajo, al Prof. MSc. Hugo Rojas, al Prof. Lic. Jaime Alex Miquel, y la Est. Lilian Celeste González Riveros, por toda la colaboración y el apoyo brindado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Box, G. E. P. & Jenkins, G. M. (1976). Time Series Analysis: Forecasting and Control. Ann Arbor: University of Michigan / Holden Day. 575 pp.
- Carrizo, S. & Brunstein, F. (2010). La represa de Yacyretá en el desarrollo energético y territorial. Ciencia & Trópico, 34(2): 389-406.
- Entidad Binacional Yacyretá. 2018. Historia de la EBY. Disponible: <http://www.eby.gov.py/index.php/institucional/historia>. Consultado el 20/09/18.
- Entidad Binacional Yacyretá. Ubicación de la EBY. Disponible: <http://www.eby.gov.py/index.php/chy/ubicacion>. Consultado el 20/09/18.
- Díaz, T. (2013). Aplicación de Modelos de Series de Tiempo a un componente iónico (Alcalinidad Total) de la calidad del agua del Embalse de Yacyretá. Tesis (MSc.). San Lorenzo: FACEN-UNA. 86 p.

- García, C. G. (1989). Análisis estadístico comparativo de series cronológicas de parámetros de calidad del agua; valoración de diferentes modelos de predicción. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España. 712 p. Disponible en: http://oa.upm.es/1887/1/CONCEPCION_GONZALEZ_GARCIA_a.pdf. Consultado el 28/03/2012.
- Guía Operativa GEMS/AGUA. (1994). Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Tercera edición. Mendoza, Argentina. 207 p.
- Interconsulting Bureau S.L. (2017). Calidad de agua: Usos y aprovechamiento. Primera Edición. ICB-Editores, Ediciones de la U: Bogotá. 182p.
- Leiva, A. (1995). Introducción al Análisis de las series de tiempo. Universidad Nacional del Cuyo: Mendoza. 343 p.
- O'Comer, D. J. (1976). The concentration of dissolved solids and river flow, *Water Resources Research*, Vol. 12, Nº 2, abril, pp. 279-294. En, ROJAS, H. 2013. Sólidos de suspensión, erosión y sedimentación en un tramo del río paraná, Embalse de Yacyretá. Reportes Científicos de la FACEN (PY), Vol.4, Nº1, junio, pp. 34-44.
- Peña, D. (2005). Análisis de Series Temporales, Ciencias Sociales. Editorial Alianza. Madrid, España. 591 p.
- Rodríguez, M. I., Granero, M., Bustamante, M. A., Avena, M., Bonfanti, E., Busso, F. & Girbal, A. (2001). Composición iónica del embalse San Roque (Córdoba, Argentina) y su relación con el proceso de eutroficación. Seminario Internacional de Gestión Ambiental e Hidroelectricidad. INA. Complejo Hidroeléctrico Salto Grande, Entre Ríos, Argentina. 9 p.
- Stile, T. E. (1971). The role of network design in the management and control of streamflow water quality, *Proceeding of the U.S.-Japan Bilateral Seminar in Hydrology*, Honolulu, Hawai, enero, in *Systems Approach to Hydrology* (Ed. V. Yevjevich) pp. 395-423. En, ROJAS, H. (2013). Sólidos de suspensión, erosión y sedimentación en un tramo del río paraná, Embalse de Yacyretá. Reportes Científicos de la FACEN (PY), Vol.4, Nº1, junio, pp. 34-44.
- Valencia, J. L. (2007). Estudio Estadístico de la Calidad de las Aguas en la Cuenca Hidrográfica del Río Ebro. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España. 338 p. Disponible en: http://oa.upm.es/454/1/JOSE_LUIS_VALENCIA_DELFA.pdf. Consultado el 28/03/2012 y
- Viñals, P. (2001). Series temporales. Primera Edición. Ediciones UPC. Barcelona, España. 167p.
- Vo-Day, T. (1978). "Analyse de series chronologiques avec données manquantes". *Memoire de maîtrise*, Dept. d'IRO, Univ. de Montréal.

IMPORTANCIA DEL ÍNDICE DE DOSIS EN TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA (CTDI) PARA LA PROTECCIÓN RADIOLÓGICA DE LOS PACIENTES SOMETIDOS A ESTUDIOS TOMOGRÁFICOS

IMPORTANCE OF THE DOSE INDEX IN COMPUTED TOMOGRAPHY FOR THE RADIOLOGICAL PROTECTION OF PATIENTS SUBMITTED TO TOMOGRAPHIC STUDIES

FREDDY J. GÓMEZ GRANCE^{1,2} & YAMILA L. RODRIGUEZ ZÁRATE¹.

¹Laboratorio de Ciencias Radiológicas e Imagenología. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad Nacional de Asunción. ²Email: fjgrance@yahoo.com

Resumen: La Tomografía Computarizada (CT) es un procedimiento radiológico que utiliza radiación ionizante para obtener imágenes transversales de alta calidad del cuerpo explorado, dichas imágenes son reconstruidas mediante software que a su vez informa el valor del Índice de Dosis en Tomografía Computarizada (CTDI), con el cual se puede estimar la dosis absorbida por el paciente. La presente revisión del estado del arte tiene como objetivo: Analizar la importancia de los reportes del CTDI en los estudios Tomográficos, para la Protección Radiológica del paciente. La metodología empleada en esta investigación se basa en un estudio descriptivo, de corte transversal y retrospectivo, pues se limitó a la búsqueda exhaustiva de informaciones relacionadas a la Protección Radiológica del Paciente y la Dosis entregada por los Tomógrafos. Una vez recolectados y procesados los datos bibliográficos, se realizó una evaluación de cada artículo encontrado, con el objeto de emitir una opinión concluyente sobre la importancia del CTDI, en tal sentido observamos la mayor cantidad de publicaciones dedicadas a la determinación del CTDI y no a la evaluación de las dosis efectivas, además de encontrarse accidentes referentes a sobre exposición durante un estudio tomográfico. Por lo que concluimos que mediante el conocimiento del CTDI se logra identificar rangos de dosis que sobrepasen los valores de referencias, estimar el riesgo biológico asociado a una exploración mediante el cálculo de dosis efectiva y optimizar los protocolos empleados para poder garantizar la Protección Radiológica de los pacientes, evitando así accidentes o incidentes en los servicios de Radiodiagnóstico.

Palabras Clave: Tomografía Computarizada, CTDI, Protección Radiológica.

Abstract: Computed Tomography (CT) is a radiological procedure that uses ionizing radiation to obtain high-quality cross-sectional images of the scanned body. These images are reconstructed using software that in turn informs the value of the Computed Tomography Dose Index (CTDI), with which can estimate the absorbed dose by the patient. The present review of the state of the art aims to: Analyze the importance of CTDI reports in tomographic studies, for the Radiological Protection of the patient. The methodology used in this investigation is based on a descriptive, cross-sectional and retrospective study, since it was limited to the exhaustive search of information related to the Radiological Protection of the Patient and the dose delivered by the CT. Once the bibliographic data was collected and processed, an evaluation of each article found was made, in order to issue a conclusive opinion about the importance of the CTDI, in this sense we observed the largest number of publications dedicated to the determination of the CTDI and not to the evaluation of effective doses, in addition to finding accidents related to overexposure during a tomographic study. Therefore, we conclude that by knowing the CTDI, it is possible to identify dose ranges that exceed the reference values, estimate the biological risk associated with an exploration by calculating the effective dose and optimize the protocols used to guarantee the Radiological Protection of the patients, thus avoiding accidents or incidents in the Radiological services.

Key Words: Computed Tomography, CTDI, Radiological Protection.

INTRODUCCIÓN

La Tomografía Computarizada (CT) es un procedimiento radiológico que utiliza radiación ionizante

para obtener imágenes transversales de alta calidad del cuerpo explorado, dichas imágenes son reconstruidas mediante softwares (Passariello &

Mora, 1995).

La técnica de CT es considerada como el procedimiento radiológico con mejores posibilidades de diagnóstico, que otros métodos Imagenológicos, esto se debe a que las imágenes obtenidas son de alta calidad (Lewitt et al., 2003).

La dosis utilizada en los equipos de CT para la adquisición de las imágenes son mayores en comparación a otros equipos convencionales (Equipos de Rayos X, Mamografía, Densitometría Osea). Y según un estudio de la National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP-160), llevado a cabo en Estados Unidos, muestra que la exploración con CT no son las pruebas médicas más frecuentemente solicitadas, pero son las que generan más dosis absorbida al paciente, contribuyendo en casi el 50% de la dosis impartidas en las prácticas médicas.

El estudio de la dosis absorbida en Tomografía Computarizada se realiza mediante los descriptores de dosis con los cuales se estiman la dosis recibida por el paciente en la exploración. En todos los exámenes realizados con CT se visualizan los descriptores de dosis: CTDI volumétrico (CTDIvol) y el producto dosis longitud (DLP) para cada paciente, en el monitor de la consola y se almacenan en un rubro denominado “protocolo del paciente” o “información de dosis” (Mendizábal, 2012).

Por lo anterior este trabajo tiene como finalidad el análisis bibliográfico de la importancia que tiene el CTDI en estudios Tomográficos para la Protección Radiológica de los Pacientes.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología para la revisión del estado del arte, fue descriptiva y retrospectiva, y llevada a cabo desde agosto a noviembre del 2017. Las informaciones se obtuvieron de libros, artículos científicos y tesis (fuentes primarias y secundarias), de bases de datos: Scielo, Cicco, MedicLatina, ScienceDirect.

La búsqueda se limitó a documentos en inglés y español. Se analizaron los títulos y resúmenes de cada artículo encontrado, estudiando la relevancia para acceder a los textos completos y de esta manera

poder describir el conocimiento actual sobre el tema de investigación.

Una vez recolectadas y procesadas las informaciones, se realizó una discusión sobre los puntos referentes a la Protección Radiológica del Paciente y la Dosis entregadas por los tomógrafos, para poder dar una opinión de las mismas y de esta manera obtener resultados que permita cumplir con los objetivos trazados.

RESULTADO Y DISCUSIÓN

Con la revisión del estado del arte se logra obtener las siguientes informaciones, que permiten asentar la importancia que tiene el conocimiento del CTDI.

La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) Publicación 105 (2011), menciona que en las exposiciones médicas de los pacientes:

“No se aplica los límites de dosis ya que la radiación ionizante, utilizada en el nivel apropiado de dosis con un objetivo médico particular, es una herramienta esencial que causará más beneficio que daño”(Comisión Internacional de Protección Radiológica [ICRP], 2011).

Dicha premisa se basa en los beneficios obtenidos, tanto en diagnóstico como en el tratamiento de enfermedades con radiaciones ionizantes, en donde se ha observado que el beneficio que recibe el paciente es mayor al daño que pudiera recibir. Por tal motivo toda práctica médica en Tomografía Computarizada debe estar justificada y optimizada para que la dosis utilizada garantice los esperados beneficios médicos.

En consecuencia la aplicación de los principios de Optimización y Justificación puede lograr evitar exposiciones potenciales y accidentales, los cuales son altamente probables sin el manejo adecuado de los parámetros técnicos, ya que si la exposición a los rayos X implica dosis altas de radiación, el paciente podría sufrir algún efecto determinístico, como se muestra en la Figura 1.

El efecto observado en la Figura 1, comprueba que una mala utilización de los parámetros técnicos y el desconocimiento de los descriptores de dosis, derivan en accidentes radiológicos. Lo expuesto se



Figura 1. Pérdida de cabello (Alopecia) en pacientes que recibieron sobredosis de radiación. (Fuente: The New York Times, 2010).

sustenta con publicaciones realizadas por diferentes grupos de investigadores como el de Jiménez *et al.*, s.f.; quienes midieron los descriptores de dosis de CT y evaluaron las dosis recibidas por pacientes adultos y pediátricos expuestos a examen de Tomografía Computarizada de cráneo, tórax y abdomen

en dos centros hospitalarios de Radiodiagnóstico.

Para evaluar las dosis efectivas recibidas por los pacientes, dichos investigadores determinaron el CTDI_w (ponderado) y DLP, teniendo en cuenta los parámetros técnicos y los protocolos de exámenes empleados, obteniendo de esta manera los valores mostrados en la Tabla 1.

Mediante estos valores (Tabla 1) concluyeron que:

“No existen diferencias entre los parámetros técnicos empleados para un mismo procedimiento en los distintos grupos de edades, lo que provoca el aumento de la probabilidad de exposición innecesaria de niños a altas dosis de radiación” (Jiménez, *et al.*, s.f).

Con la conclusión obtenida por los investigadores se observa que: los centros médicos no ajustan los parámetros técnicos para obtener una imagen tomográfica de sus pacientes, en especial para la población pediátrica, evidenciando que los niños reciben mayor dosis efectiva. Por ello es conveniente conocer los CTDI y los parámetros técnicos utilizados que influyen en la cantidad de dosis administrada al paciente para optimizar los protocolos empleados.

En otra investigación realizada por Vergara, *et al.* (2003): se realizó la optimización de los protocolos empleados, mediante la reducción de la corriente del tubo (mAs), eliminación de cortes de bajo rendimiento diagnóstico, incorporación de información diagnóstica ausente y la eliminación del uso de contraste. El protocolo optimizado de esta manera logró reducir las dosis al paciente, hasta el 50% de sus valores originales, sin disminuir la calidad diagnóstica de la imagen.

Lo anterior demuestra la necesidad de controlar los protocolos empleados, para poder excluir estudios innecesarios, donde el diagnóstico no amerite su realización, y que modificando los parámetros técnicos de exploración en este caso el mAs, se logra disminuir significativamente la dosis al paciente, sin comprometer la calidad de imagen.

Otro estudio realizado por Andisco, *et al.* (2010), consistió en determinar cuales son los protocolos

Tabla 1. Valores medios de las magnitudes dosimétricas calculadas por rango de edad y centro de salud. ND = no disponible. (Fuente: Jiménez, *et al.*, [s.f].)

Centro	Edad	Cráneo			Tórax			Abdomen		
		CTDIw (mGy)	DLP (mGy.cm)	E (mSv)	CTDIw (mGy)	DLP (mGy.cm)	E (mSv)	CTDIw (mGy)	DLP (mGy. cm)	E (mSv)
A	0-1	23,3	276	3,03	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
	1-5	23,3	284,4	1,90	13,9	201,5	5,24	6,1	105,0	3,15
	5-10	23,3	285,5	1,42	N/D	N/D	N/D	6,1	134,6	2,69
	10-15	23,3	287,8	0,92	13,9	284,9	3,70	10,8	329,5	4,94
B	Adultos	15,6	171,2	0,36	14,3	400,4	5,65	10,8	221,8	3,32

habitualmente utilizados en estudios de CT en una institución determinada, y luego modificando los mismos parámetros que Vergara, *et al.* (2003), lograron obtener el siguiente resultado:

“Reducción de las dosis entre un 20% a un 30%, sin perder la calidad diagnóstica ni presentar inconvenientes para el diagnóstico al grupo médico que trabaja en la institución” (Andisco, *et al.*, 2010).

Se debe tener en cuenta que optimizar no solo significa reducir la dosis, sino emplear una dosis razonable que garantice obtener una buena calidad de imagen para el diagnóstico. Sin embargo, esto se puede lograr, no solo con el cambio del mAs, sino que también con la modificación de parámetros que inciden de manera directa, en la calidad de la imagen, como ser: kVp, pitch, CAE, etc.

Por tal motivo, se considera necesario que luego de optimizar los protocolos, se realicen los controles de calidad de las imágenes, para verificar su confiabilidad en el momento de la evaluación clínica por parte del grupo médico.

Para estimar las dosis recibidas por los pacientes las Guías Europeas de Criterios de Calidad (TCDM) para CT del año 2008 y la Asociación Americana de Físicos Médicos (AAPM) recomiendan:

“Utilizar el valor del DLP multiplicado por un factor constante “K”, para determinar las dosis efectivas en exploraciones

tomográficas.” (American Association of Physicists in Medicine [AAPM], 2008).

Dicha constante K fue calculada por TCDM y la AAPM reportando valores que difieren en al menos 10%. En un artículo publicado por Mendizábal (2012), la autora calcula la dosis efectiva utilizando la constante que recomienda la AAPM para un niño de 10 años, cuyo DLP es 630 mGy.cm y el valor K (AAPM)= 0,0042 mSv/mGy.cm, siendo la dosis efectiva igual a 2,64 mSv.

La k propuesta por las Guías Europeas (TCDM) no puede ser utilizada en este ejemplo, debido a que estos solo tienen en cuenta la radiosensibilidad de un paciente adulto. Sin embargo la k propuesta por la AAPM, fue calculada teniendo en cuenta la edad, sexo y tamaño de los pacientes, y se muestra en la Tabla 2.

Observaciones realizadas por D. Granados (2016) en un Tomógrafo Siemens-Sensation 64, del Hospital Universitario Río Ortega de Valladolid (HURH) en un paciente de 26 años de edad, visualizo en la consola del equipo el valor de DLP igual a: 756 mGy·cm, el cual es utilizado para determinar las dosis efectivas.

Mediante el uso del DLP y las constantes K estimadas por los diferentes grupos, se pudo demostrar que los valores de dosis efectiva difieren según el siguiente ejemplo:

$$E (AAPM) = 756(mGy \cdot cm) \times 0,0021(mSv/mGy \cdot cm) = 1,5876mSv.$$

Tabla 2. Dosis efectiva normalizada por producto dosis-longitud (DLP) para adultos (de tamaño estándar) y pacientes pediátricos de varias edades en varias regiones del cuerpo. (Fuente: APPM, 2008).

Región del cuerpo	k (mSv / mGy. cm)				
	0 años	1 años	5 años	10 años	Adultos
Cabeza y cuello	0.013	0.0085	0.0057	0.0042	0.0031
Cabeza	0.011	0.0067	0.0040	0.0032	0.0021
Cuello	0.017	0.012	0.011	0.0079	0.0059
Tórax	0.039	0.026	0.018	0.013	0.014
Abdomen y pelvis	0.049	0.030	0.020	0.015	0.015
Tronco	0.044	0.028	0.019	0.014	0.015

$$E (TCDM) = 756(mGy.cm) \times 0,0023(mSv/mGy.cm) = 1,7388mSv. \text{ (Granados, 2016)}$$

Por todo lo mencionado y como lo indica Wintermark & Lev.

“Los radiólogos y tecnólogos deben estar familiarizados con los índices de dosis que normalmente se muestran en la consola del escáner de CT. Estos índices incluyen el índice volumétrico de dosis de CT (CTDIvol) y el producto de dosis-longitud (DLP)” (Wintermark & Lev, 2010).

Los radiólogos deben conocer el CTDIvol y el DLP, y lo importante que es el reporte de los mismos para conocer las dosis absorbidas, estimar los posibles riesgos de una sobre exposición que causaría efectos biológicos determinísticos y aplicar los Principios de Protección Radiológica.

Lo anterior fue enfatizado por Wintermark & Lev en el siguiente párrafo:

“Los radiólogos tienen la responsabilidad ante sus pacientes, de educar a sus colegas clínicos, sobre la trascendencia de considerar las dosis de radiación como un indicador importante para determinar si un estudio de imagen está justificado, especialmente cuando pueden ser necesarios varios estudios CT o estudios fluoroscópicos durante una sola admisión” (Wintermark & Lev, 2010).

Para cumplir con la responsabilidad anteriormente citada, es necesario que los médicos radió-

logos y licenciados radiólogos, estén capacitados, tengan información continua y creciente respecto a las dosis de radiación y su implicancia en la salud y Protección Radiológica del paciente.

Por otra parte, la optimización de la práctica médica implica el trabajo multidisciplinario para el conocimiento de la dosis de radiación, su medición, y correcta aplicación en el servicio médico de Tomografía Computarizada, para de esta manera reducir los incidentes y evitar los accidentes radiológicos.”

Experiencias recientes refuerzan los argumentos relacionados con la aplicación de la optimización, la justificación y las dosis de referencia que deben implementarse en las instalaciones médicas, en ese sentido la falta de estos pilares de la Protección Radiológica ocasionó el siguiente reporte de accidentes en CT: en el 2009 la Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos (FDA), emitió una notificación en donde:

“En un hospital estadounidense, fueron sometidos un total de 385 pacientes a estudios de perfusión cerebral por CT que sufrieron posteriormente alopecia (pérdida de cabello) limitada en la zona de exploración. Debido a ajustes incorrectos en la consola del escáner de CT” (Wintermark & Lev, 2010).

Otro reporte fue lo ocurrido en el Hospital de la Comunidad de MadRiver (Figura 2) en donde:

“Un niño de 23 meses recibió una sobre-



Figura 2. Quemaduras por irradiación. (Fuente: The New York Times, 2009).

exposición luego de varias CT de cabeza y cuello, las consecuencias fueron quemaduras por irradiación en las mejillas y alrededor de la cabeza y el cuello” (Johnston, 2008).

Las lecciones aprendidas de estos accidentes concluyeron que el evento iniciador fue causado por desconocimiento de la importancia de los médicos prescriptores de dosis por parte de los operadores del equipo de CT.

CONCLUSIÓN

Luego de recopilar información en artículos y publicaciones científicas, se observó que existen más publicaciones en donde se determina el CTDI y no se evalúa la dosis efectiva entregada a los pacientes por los equipos de CT, por lo que es necesario entonces, conocer y determinar los descriptores de dosis utilizados (CTDIvol y DLP) en nuestro medio.

La importancia de conocer el CTDIvol y el DLP, radica en la estimación de las dosis entregadas al paciente, las cuales deben encontrarse dentro de los Niveles de Referencias Nacionales comparables con los reportados internacionalmente.

Sin embargo, no se cuenta con dichos niveles de referencia en el país, lo cual consideramos un obstáculo para realizar la optimización de los protocolos empleados, mejorar la calidad de las

imágenes tomográficas y de esta manera impartirle al paciente una dosis razonable que garantice el propósito médico.

Otras de las ventajas de la utilización de los descriptores de dosis es que, mediante el DLP y la constante “k” propuesta por las Guías Europeas o la AAPM, se puede calcular la dosis efectiva que recibe el paciente y con ello conocer el riesgo biológico asociado a la exploración.

Es relevante mencionar que los operadores de los equipos de CT, deben estar entrenados y capacitados para la correcta utilización de los parámetros técnicos (mAs, kVp, pitch), ya que éstos influyen en los valores de CTDI que, a su vez, influyen en la calidad de la imagen.

Se podrá minimizar la probabilidad de exposiciones accidentales que derivan en efectos biológicos perjudiciales para la salud, con la consecuente reducción de la probabilidad de accidentes en los servicios de Tomografía.

Los accidentes deben servir como ejemplo para tomar conciencia de la importancia que tiene, la implementación de la justificación y la optimización, y además, los operarios deben conocer los indicadores de dosis y así garantizar la Protección Radiológica de los pacientes.

LITERATURA CITADA

- American Association of Physicists in Medicine (AAPM). (2008). Measurement, reporting, and management of radiation dose in CT: report of AAPM Task Group 23.
- Andisco, D., Blanco, S., Buzzzi, A., & Ballester, S. (2010). Optimización Interdisciplinaria de Protocolos en Tomografía Computada a partir de la modificación del mA y del control del ruido en la imagen. *Revista Argentina de Radiología*, 74(4), 397-402.
- Bogartz, G., Golding, S. J., Jurik, A. G., Leonardi, M., van Persijn van Meerten, E., Rodriguez, R., y otros. (2004). *European Guidelines for Multislice Computed Tomography. Appendix A MSCT Dosimetry*. Recuperado de http://www.biophysicssite.com/html/msct_quality_criteria_2004.html

- Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP). (2011). Publicación 105. Protección Radiológica en Medicina, 1ra ed. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Sociedad Argentina de Radioprotección.
- Granados, D. (2016). *Métodos de Estimación de Dosis a Pacientes en Tomografía Computarizada* (Trabajo de Grado). España: Universidad Valladolid. UVA Biblioteca Universitaria. Recuperado el Septiembre de 2017, de <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/19015>
- Jiménez, M., Machado, A., Otaño, A., Zúñiga, D., Perdomo, J., & Rodríguez, G. (s.f). *Evaluación de la dosis recibida por pacientes adultos y pediátricos en exámenes de tomografía computarizada*. Recuperado el 22 de Septiembre de 2017, de http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/45/017/45017231.pdf
- Johnston, R. (2008). *Arcata medical radiography accident, 2008*. Recuperado el Septiembre de 2017, de <http://www.johnstonsarchive.net/nuclear/radevents/2008USA2.html>
- Lewitt, R.M.; Member, S.; Matej, S. & Member, S. (2003). Overview of Methods for Image Reconstruction From Projections in Emission Computed Tomography. *Proceedings of the IEEE* 91(10), 1588-1611
- Mendizábal, A. L. (2012). Radiación ionizante en tomografía computada: un tema de reflexión. *Anales de Radiología México*, 2, 90-97.
- Passariello, G., & Mora, F. (1995). *Imágenes Médicas: Adquisición, Análisis, Procesamiento e Interpretación* (1era ed.). Venezuela: Universidad Simón Bolívar.
- The New York Times. (2009). Radiation Overdoses Point Up Dangers of CT Scans. Recuperado el 21 de mayo de 2018, de <https://www.nytimes.com/2009/10/16/us/16radiation.html>
- The New York Times. (2010). *After Stroke Scans, Patients Face Serious Health Risks*. Recuperado el 21 de mayo de 2018, de <https://www.nytimes.com/2010/08/01/health/01radiation.html>
- Vergara E, M., Castro S, M., Matas N, J., Arias B, M., Martínez C, G., & Rosales L, J. (2003). *Reduccion de dosis al paciente en TC: un estudio de resultados en la practica clinica*. *Revista Chilena de Radiología*, 9(1), 29-32.
- Wintermark, M., & Lev, M. (2010). FDA Investigates the Safety of Brain. *American Journal of Neuroradiology AJNR*, 31(1), 2-3.

DIVERSIDAD DE VERTEBRADOS MUERTOS POR ATROPELLAMIENTO VEHICULAR Y ZONAS DE MAYOR IMPACTO EN LA RUTA III GENERAL ELIZARDO AQUINO, PARAGUAY

DIVERSITY OF VERTEBRATES AFFECTED BY ROADKILL AND AREAS OF GREATEST IMPACT IN RUTA III GENERAL ELIZARDO AQUINO, PARAGUAY

AURORA ORTEGA¹ & ANDREA WEILER²

¹Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Agrarias, Carrera de Ingeniería Ambiental. Email: auror91@hotmail.com

²Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Biología, Laboratorio de Zoología. Email: andreaweiler1@gmail.com

Resumen: Aunque el atropellamiento de animales en carreteras ha sido ampliamente evaluado en el mundo, en Paraguay existen pocos estudios al respecto. Este trabajo aporta a la comprensión de la problemática de mortalidad de fauna silvestre por atropellamiento vehicular en la Ruta III Gral. Elizardo Aquino, cuantificando los atropellamientos de fauna silvestre, identificando taxonómicamente las especies muertas por atropellamiento, y determinando las áreas de mayor impacto de colisión vehicular. Se escogieron 120 km de carretera, para realizar muestreos dos veces al mes, desde abril hasta octubre de 2015, recorriendo en vehículo a 60 km/h. Dentro del mismo se tomaron seis transectos para recorridos a pie, a fin de detectar especies pequeñas. Los individuos encontrados fueron listados, fotografiados, georreferenciados e identificados hasta el nivel taxonómico más exacto posible. Se obtuvieron 109 individuos de 34 especies. Los resultados indican que los reptiles tienen el mayor número de especies afectadas por colisiones vehiculares (38%), mientras que los mamíferos registran la mayor cantidad de individuos muertos por atropellamiento (47%). Las especies más frecuentemente atropelladas fueron *Cercocyon thous*, *Caracara plancus* y *Eumeces notaeus*. Las áreas más críticas respecto a atropellamientos corresponden a las zonas del arroyo Hondo y de los ríos Piribebuy e Yhaguy, donde existe menor presencia humana y hábitats mejor conservados. Son necesarias adecuaciones de las infraestructuras viales existentes que funcionen como pasos de fauna no específicos.

Palabras Clave: carreteras, colisiones, mortalidad, anfibios, reptiles, aves, mamíferos

Abstract: Although the collision of animals on roads has been widely evaluated in the world, there are few studies in Paraguay. This work contributes to the understanding of the problem of mortality of wildlife by vehicular traffic in Route III Gral. Elizardo Aquino, quantifying the roadkill's of wildlife, identifying taxonomically the species, and determining the areas of greatest impact of vehicular collision. We chose 120 km of road, to carry out samplings twice a month, from April to October 2015, traveling by vehicle at 60 km per hour. Six transects were established for walking, in order to detect small species. The individuals found were listed, photographed, georeferenced and identified up to the most accurate taxonomic level possible. As a result, 109 individuals of 34 species were recorded. The results suggest that reptiles have the highest number of species affected by vehicular collisions (38%), while mammals have the highest number of individuals run over (47%). The most frequent species were *Cercocyon thous*, *Caracara plancus* and *Eumeces notaeus*. The most critical areas in relation to roadkill's correspond to the zones of the Arroyo Hondo, and the Piribebuy and Yhaguy rivers, where there is less human presence and better conserved habitats. Adaptations of the existing road infrastructures is needed to ensure non-specific fauna passages for wildlife.

Key words: highways, collisions, mortality, amphibians, reptiles, birds, mammals.

INTRODUCCIÓN

Las carreteras son elementos claves en el desarrollo socio económico del país, sirven como medio de comunicación y como vía de transporte y comercialización de productos. Estas tienen va-

rios efectos sobre la fauna silvestre y sus hábitats. La fragmentación de hábitats con el consecuente aislamiento de poblaciones es, sin duda, el mayor impacto negativo de las obras viales (Clevenger & Huijser, 2011; Heilman, et al., 2002). Sin embargo, el atropellamiento vehicular de fauna silvestre es

el impacto más fácilmente reconocible debido a la presencia de animales muertos en las carreteras (Arroyave et al., 2006). Estas colisiones vehiculares, además, causan daños materiales y ponen en riesgo la vida de los automovilistas (Malo et al., 2004).

Existen varios factores que inciden en el atropellamiento de fauna silvestre. Por un lado, las características de las carreteras. El buen estado del asfalto y las secciones rectas de rutas facilitan que los vehículos alcancen mayor velocidad favoreciendo los atropellamientos (Pozo et al., 2008; Artavia, 2014). Respecto a la intensidad del tráfico vehicular, se podría pensar que a mayor tráfico mayor número de atropellamientos, pero las investigaciones no siempre corroboran esta afirmación (Arroyave et al., 2006).

Por otro lado, influyen las características del hábitat que cortan. La topografía y el grado de fragmentación de los ecosistemas naturales pueden causar que la fauna silvestre sea forzada a cruzar por segmentos de la carretera aumentando las posibilidades de colisiones (Clevenger et al., 2003; Pozo et al., 2008). Además, el propio comportamiento de los animales silvestres influye. Muchas veces, estos son atraídos a las carreteras buscando alimentarse de otros animales atropellados (Delgado et al., 2004; Adán et al., 2007; Chacón, 2011); o, como es el caso de los reptiles, buscando absorber el calor acumulado (Arroyave et al., 2006). Las aves, por su capacidad de vuelo, tienen ventaja para evitar colisiones, mientras que animales de movimientos lentos o visión pobre facilitan el atropellamiento (Gómez & Monge-Nájera, 2000; Pozo et al., 2008; Laurance, 2009).

Finalmente, los factores climáticos también afectan a los atropellamientos de fauna. En primavera-verano, cuando se intensifican las lluvias e inicia el período reproductivo de muchos vertebrados, como los anfibios, estos son atropellados en grandes números (Clevenger et al., 2003; Espinosa et al., 2012). Recientemente, Colino-Rabanal et al. (2017) hallaron que la fase lunar también influye en las colisiones nocturnas a fauna silvestre, siendo el período de luna llena el de mayor número de

accidentes.

Los efectos de las rutas del Paraguay sobre los animales silvestres han sido pobremente caracterizados. La principal referencia nacional al respecto es la de Cartes et al. (2010), quienes citan fauna atropellada en tres tramos de la Ruta IX Carlos Antonio López, los cuales atraviesan ecosistemas chaqueños húmedos y xerófitos. En el citado estudio, los autores contabilizaron 3046 vertebrados atropellados entre los años 2003 a 2005, de los cuales, 2168 fueron anfibios, 96 aves, 374 mamíferos y 346 reptiles.

El presente trabajo pretende aportar a la comprensión de la problemática de mortalidad de fauna silvestre por atropellamiento vehicular en la Ruta III Gral. Elizardo Aquino. Para ello, se han cuantificado los vertebrados silvestres muertos por atropellamiento, identificado taxonómicamente las especies registradas. Además, se han identificado las áreas de mayor impacto de colisión vehicular sobre la fauna nativa.

METODOLOGÍA

Área de Estudio

La investigación se desarrolló en la Región Oriental de Paraguay, en un tramo de 120 km de la Ruta III Gral. Elizardo Aquino entre las coordenadas 25°7'49,66"S; 57°26'44,8"W y 24°43'3,44"S; 56°32'12,78"W, el cual atraviesa en parte los departamentos Central (distrito Limpio), Cordillera (distritos Emboscada, Arroyos y Esteros, y Juan de Mena), y San Pedro (distritos 25 de Diciembre y San Estanislao) (Figura 1).

El área de estudio corresponde a la ecorregión Chaco Húmedo (Olson et al., 2001), donde predominan tres formaciones naturales en "mosaico" de acuerdo a las variaciones del suelo y del relieve. Las zonas anegables por corto tiempo son ocupadas por bosques de especies como *Handroanthus heptaphyllus* (lapacho), *Enterolobium contortisiliquum* (timbo) y *Inga uruguensis* (inga guasu); estas comunidades están asociadas con las sabanas hidromórficas de *Copernicia alba* (karanda'y), inundables por mayores periodos; y con humedales donde se encuentran *Eichornia azurea* (aguape),

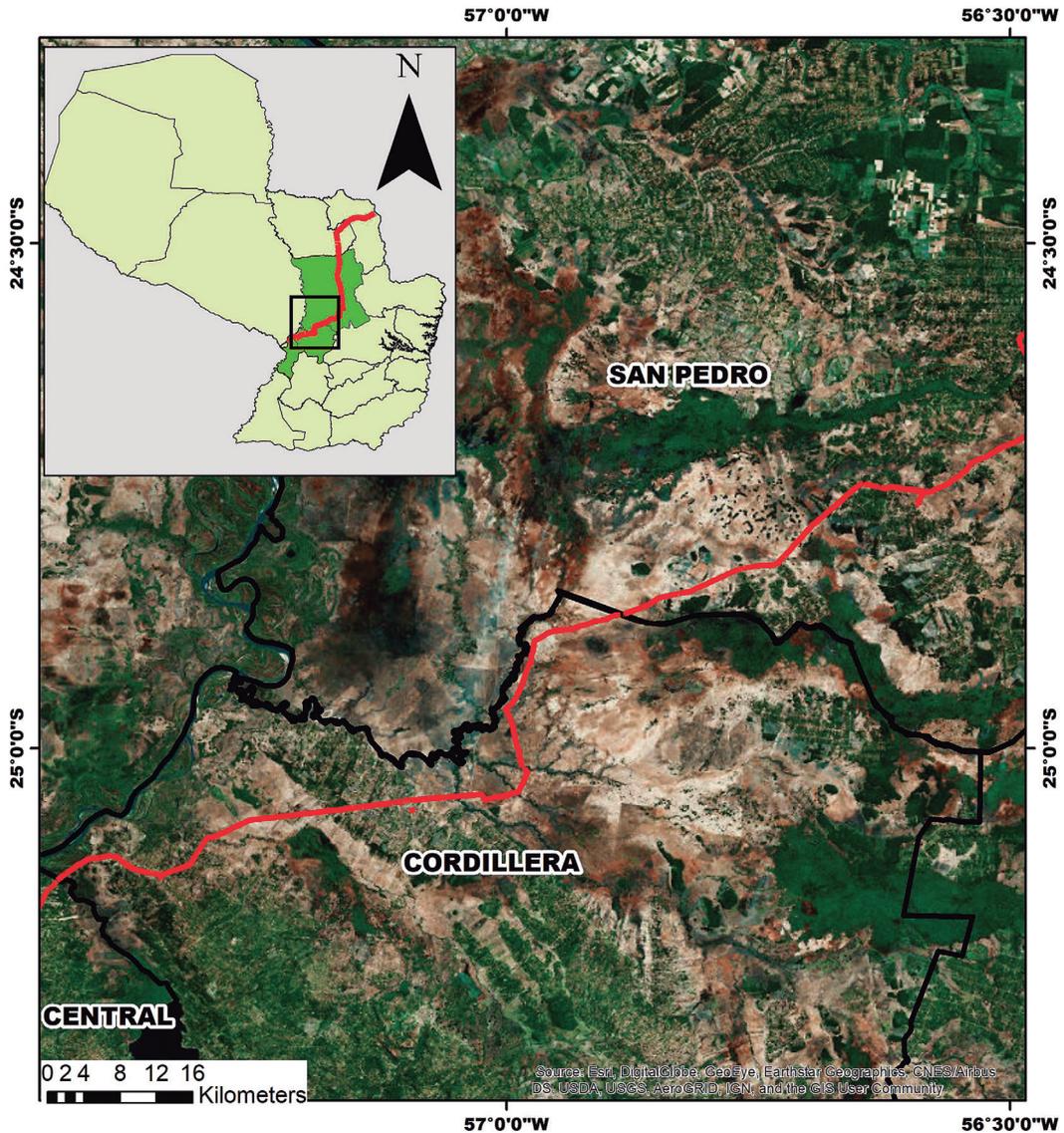


Figura 1. Tramo estudiado de la Ruta III General Elizardo Aquino.

Thalia geniculata (peguajó), *Canna glauca* (achira) y otras herbáceas. Algunas especies de fauna características de la ecorregión son *Eunectes notaeus* (kuriju), *Dendrocygna viduata* (suiriri), e *Hydrochaeris hydrochaeris* (carpincho) (Mereles, 2010; Mereles et al. 2013).

Muestreo

Se realizaron once salidas de campo diurnas entre abril y octubre de 2015, con una frecuencia de dos

salidas mensuales. En las cuales, 120 km fueron recorridos en vehículo a una velocidad de 60 km/h, y se incluyeron recorridos a pie en seis transectos de la ruta, de 1,5 km de longitud cada uno, ubicados en la intersección de la ruta con bosques en galería (Figura 2). Se registraron todos los vertebrados muertos por atropellamiento vehicular en los carriles o en las banquetas.

Cada animal atropellado fue georreferenciado, identificado, registrado en planilla y fotografiado. Individuos que requirieron confirmación de

identificación a nivel de especie, mediante claves taxonómicas, fueron colectados. Todos los restos de ejemplares fueron removidos de la ruta para evitar doble conteo. No se realizaron muestreos en días lluviosos. Los especímenes colectados fueron depositados en la Colección Zoológica de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional de Asunción (CZCEN) bajo el permiso de colecta otorgado por la Secretaría del Ambiente número 142/2015.

Para la identificación taxonómica se recurrió a la literatura disponible. Anfibios: Weiler et al. (2013). Reptiles: Cacciali (2009), Cabrera (2009), Cacciali

& Cabral (2015). Aves: Narosky & Yzurieta (2006). Mamíferos: Redford & Eisenberg (1992), Wallace et al. (2010).

Análisis de datos

Se registró la riqueza de especies atropelladas, y mediante el software EstimateS 9.1.0 se calculó la curva de acumulación de especies y los índices de Chao₁ y Chao₂ (Moreno, 2001). Además, se establecieron zonas de mayor impacto de atropellamientos mediante la estimación de densidad de Kernel utilizando el software libre QGIS 2.8.

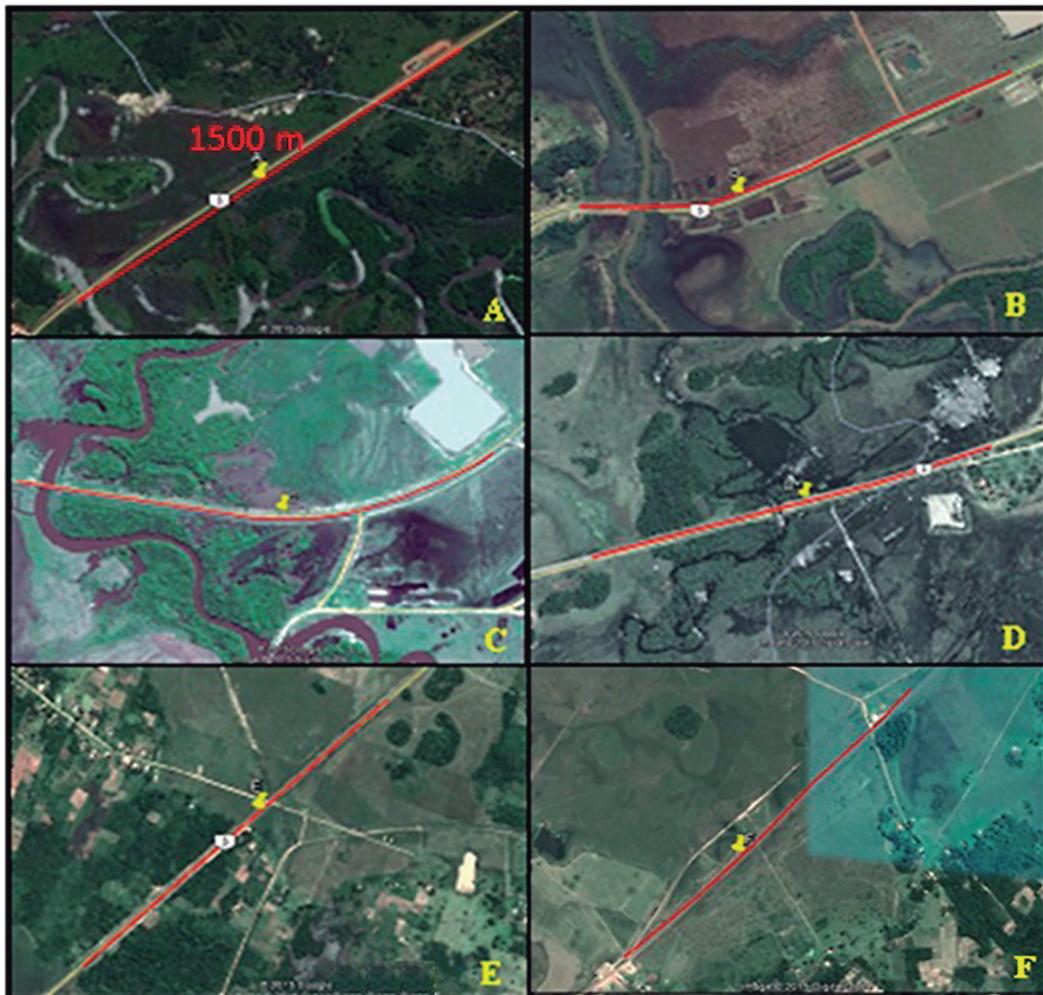


Figura 2. Transectos recorridos a pie. **A)** Río Salado. **B)** Río Piribebuy. **C)** Río Yhaguy. **D)** Arroyo Tobatiry. **E)** 25 de Diciembre. **F)** San Estanislao.



Figura 3. Algunos individuos muertos por atropellamiento: **A)** *Rhinella schneideri*. **B)** *Eunectes notaeus*. **C)** *Bothrops alternatus*. **D)** *Hydrodynastes gigas*. **E)** *Sibynomorphus turgidus*. **F)** *Ophiodes intermedius*. **G)** *Caracara plancus*. **H)** *Aramus guarana*. **I)** *Colaptes campestris*. **J)** *Crotophaga ani*. **K)** *Cerdocyon thous*. **L)** *Cavia aperea*. **M)** *Procyon cancrivorus*. **N)** *Tamandua tetradactyla*. **O)** *Didelphis albiventris*. **P)** *Sylvilagus brasiliensis*.

RESULTADOS

Abundancia y riqueza de animales muertos por atropellamiento vehicular

Se registraron 109 individuos muertos por atropellamiento en el tramo estudiado (Figura 3). Los mamíferos fueron los más afectados con 51 individuos (47%), seguidos de los reptiles con 30 individuos (28%), las aves con 22 individuos registrados (20%), y finalmente los anfibios con seis registros (6%). Sin embargo, considerando la cantidad de especies registradas por taxón, los reptiles (con 13 especies) y las aves (con 12 especies) fueron las

más afectadas. Por otro lado, se registraron ocho especies de mamíferos y, finalmente, los anfibios que fueron representados por una sola especie (Cuadro 1).

El 41% de las especies registradas correspondieron a la herpetofauna. Los reptiles representaron el 38% de las especies, mientras que los anfibios constituyeron el 3%. La boa de humedales, *Eunectes notaeus*, fue el reptil con mayor número de registros totalizando seis individuos, seguido por *Sibynomorphus turgidus* con cuatro individuos muertos por atropellamiento.

Tabla 1. Especies atropelladas por clases con sus cantidades.

ESPECIE	CANTIDAD
ANFIBIOS	
<i>Rhinella schneideri</i>	6
REPTILES	
<i>Eunectes notaeus</i>	6
<i>Sibynomorphus turgidus</i>	4
<i>Helicops leopardinus</i>	3
<i>Clelia clelia</i>	3
<i>Philodryas patagoniensis</i>	3
<i>Bothrops alternatus</i>	2
<i>Hydrodynastes gigas</i>	2
<i>Philodryas aestiva</i>	2
<i>Boiruna maculata</i>	1
<i>Boa constrictor amarali</i>	1
<i>Chironius quadricarinatus</i>	1
<i>Ophiodes intermedius</i>	1
<i>Erythrolamprus poecilogyrus</i>	1
AVES	
<i>Caracara plancus</i>	8
<i>Aramus guarauna</i>	3
<i>Buteogallus meridionalis</i>	2
<i>Megascops choliba</i>	1
<i>Milvago chimango</i>	1
<i>Athene cunicularia</i>	1
<i>Milvago chimachima</i>	1
<i>Tyto alba</i>	1
<i>Bubulcus ibis</i>	1
<i>Colaptes campestris</i>	1
<i>Crotophaga ani</i>	1
<i>Tyrannus melancholicus</i>	1
MAMÍFEROS	
<i>Cercopithecus thous</i>	25
<i>Cavia aperea</i>	9
<i>Procyon cancrivorus</i>	8
<i>Tamandua tetradactyla</i>	3
<i>Didelphis albiventris</i>	2
<i>Myocastor coypus</i>	2
<i>Dasyurus novemcinctus</i>	1
<i>Sylvilagus brasiliensis</i>	1

Las aves representaron el 35% de las especies registradas. El carancho (*Caracara plancus*) fue el ave con mayor impacto de atropellamiento vehicular registrando ocho eventos, seguido del karáu (*Aramus guarauna*) con tres colisiones. El resto de las especies fueron representaciones únicas de aves rapaces.

Finalmente, los mamíferos con ocho especies, contribuyeron al 24 % del total de especies atropelladas. De ellas, las más registradas fueron el aguara'i (*Cercopithecus thous*) con 25 individuos, la especie con mayor número de atropellos del estudio; el apere'a (*Cavia aperea*) y el aguara pope (*Procyon cancrivorus*), con nueve y ocho registros respectivamente.

Mediante los predictores de Chao₁ y Chao₂ se estimó que entre 50 y 52 especies son las que tienen probabilidad de atropellamiento en el área muestreada. Según los resultados del presente estudio, es de esperar que se registren 18 especies mediante estudios más exhaustivos en el área (Figura 4).

Áreas de mayor impacto

Se obtuvieron tres áreas con mayor concentración de atropellamientos de fauna silvestre (Figura 5). La primera área (A), en la cual predominan los humedales, habiendo además remanentes boscosos y bosques en galería, abarcó 4,7 km de ruta, es en general rectilínea (de los 24°51'58,40"S; 56°52'52,95"O a los 24°50'56,1"S; 56°50'20,18"O). Esta área se relaciona con el curso del arroyo Hondo, el cual cruza por debajo de la ruta mediante varias alcantarillas.

La segunda área (B), es la del río Piribeby, comprende bosques en galería, rodeados de una matriz constituida principalmente por sabanas hidromórficas de *Copernicia alba*, implica 4 km de carretera (entre 25°5'47,78"S; 57°18'9,09"O y 25°4'42,05"S; 57°16'14,52"O), y en el trazado del puente hay una curva. La tercera área (C), correspondiente al río Yhaguy, bordeado por bosques que cruzan una matriz de sabanas de *Copernicia alba*, constituye 3,5 km de ruta (desde 25°2'46,95"S; 57°3'31,08"O hasta 25°1'56,40"S; 57°2'7,66"O), y contiene una curva. Los tres sitios poseen principalmente comunidades naturales relacionadas con el agua, como

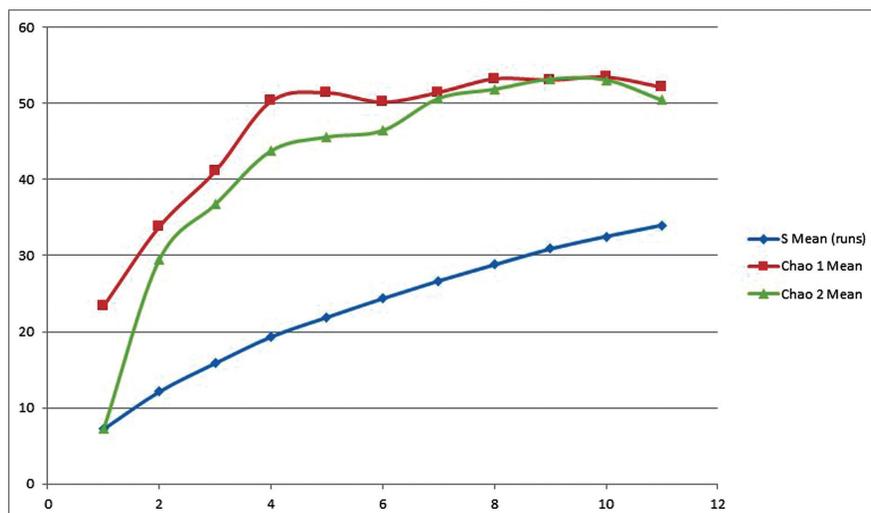


Figura 4. Curvas de predicción de Chao 1 y Chao 2.

bosques en galería, campos inundables y sabanas de *Copernicia alba*.

DISCUSIÓN

Abundancia y riqueza de animales muertos por atropellamiento

Los mamíferos tuvieron una mayor cantidad de individuos muertos por atropellamiento ante las demás clases, coincidiendo con lo hallado por Omena-Junior et al. (2013), quienes obtuvieron un mayor número de registros de mamíferos, seguida de aves y finalmente herpetofauna. Esto pudo deberse a que el tamaño y textura de la piel de dichos animales favorece su permanencia en la ruta un mayor tiempo respecto a otros grupos taxonómicos (Aguirre, 2014). Santos et al. (2011), encontraron que la mayoría de los anfibios desaparecía rápidamente dado su tamaño corporal pequeño y su tegumento poco resistente.

El alto número de registros de muerte por atropellamiento de *Cerdocyon thous*, coincide con los resultados obtenidos en investigaciones de otros países latinoamericanos como Colombia (Delgado, 2007; Monroy et al., 2015) y Brasil (Vieira, 1996). La actividad nocturna de la especie facilita el encandilamiento por los faros de vehículos; adicionalmente, el ser carroñero lo acerca a las rutas para alimentarse de otros animales muertos. Cartes

et al. (2010) encontraron resultados similares en la Ruta IX Carlos Antonio López. Otra especie frecuentemente registrada fue *Procyon cancrivorus*, igualmente nocturna, que también incluye carroña en su dieta y que posee afinidad por hábitats próximos al agua (Wallace et al., 2010), como lo son los humedales del área de estudio.

Con respecto a las aves, su capacidad de vuelo les otorga mayores posibilidades de evitar atropellamientos y de volar luego de ser heridas, muriendo fuera de la ruta (Trejo & Seijas, 2003; Pozo et al., 2008), factores que podrían incidir en un subregistro. *Caracara plancus* es el ave que obtuvo la mayor frecuencia de atropellamiento, la especie fue comúnmente observada durante el muestreo alimentándose de fauna atropellada. Esto coincide con los resultados de otros investigadores, que han encontrado que las aves con hábitos rapaces son frecuentemente colisionadas mientras se alimentan de carroña (Noss, 2002; Cartes et al., 2010; Chacón, 2011). En cuanto a las demás aves, más de la mitad son rapaces y/o carroñeras; hecho que pudo haberlas atraído a la ruta en busca de otros animales muertos por atropellamiento (Arroyave et al., 2006).

En cuanto a reptiles, *Eunectes notaeus* fue la especie registrada con mayor frecuencia, esto pudo deberse a que el área de estudio abarca grandes humedales y zonas inundables, y a que el gran tamaño corporal de la especie favoreció su mayor

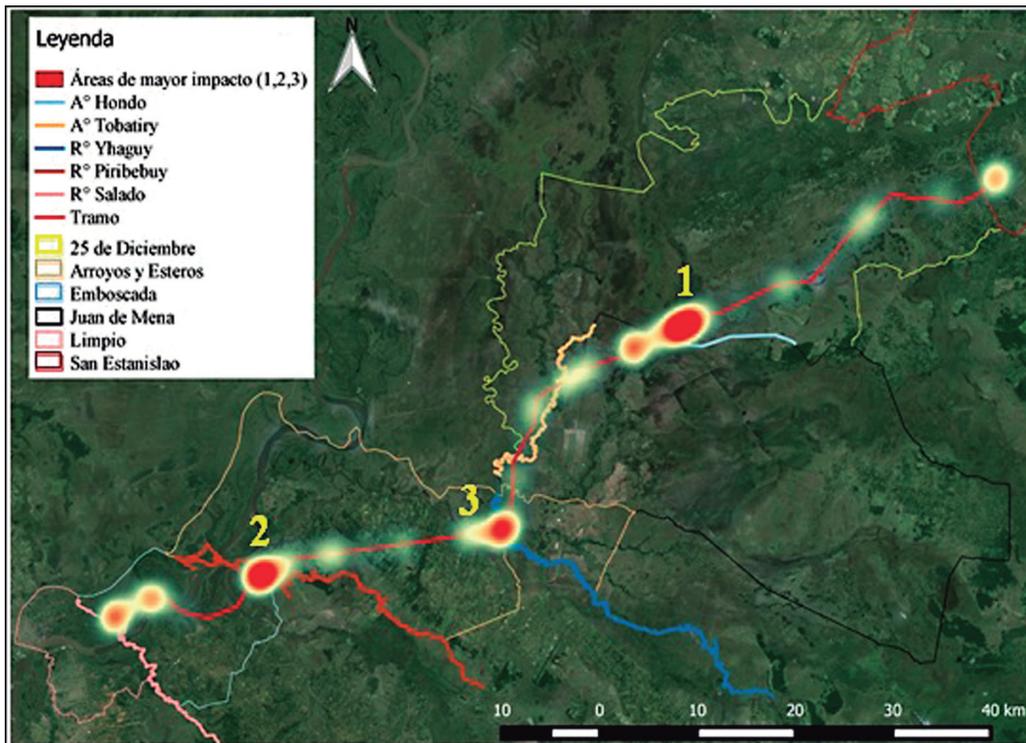


Figura 5. Áreas con mayor impacto de atropellamiento vehicular de fauna silvestre.

permanencia en la ruta respecto a especies de menor tamaño. El único lagarto encontrado fue *Ophiodes intermedius*. Monroy et al. (2015) obtuvieron también una sola especie de lagarto muerto por atropellamiento vehicular en Colombia, a pesar de que los reptiles constituyeron el grupo con mayor registro de muertes en carretera.

En anfibios, el registro de una sola especie, *Rhinella schneideri*, pese a la diversidad de anfibios de la zona (Weiler et al., 2013), pudo haberse debido a una subrepresentación de la muestra asociada a la metodología utilizada, ya que estudios de atropellamiento vehicular en anfibios requieren muestreos mucho más frecuentes que los realizados. Además, el presente trabajo se realizó mayoritariamente en otoño e invierno, evitándose el muestreo en días lluviosos, factores que pudieron también haber influido en los pocos registros de este taxón. El tamaño grande, y la piel dura y gruesa de *Rhinella schneideri*, pudieron haber favorecido su permanencia en la ruta por mayor tiempo en comparación con los demás anfibios (Santos et al., 2011), favoreciendo

los registros de esta especie.

Según los índices de $Chao_1$ y $Chao_2$, se espera un mayor número de especies muertas por atropellamiento. Probablemente, la metodología utilizada no fue la más apropiada para todos los grupos taxonómicos evaluados, subestimando el problema ocasionado por atropellamiento vehicular. Trabajos de investigación que incluyan un mayor esfuerzo, abarcando el verano y una mayor frecuencia de muestreo, son necesarios para determinar mejor el impacto que las colisiones vehiculares causan a las poblaciones de fauna silvestre.

Áreas de mayor impacto

Como consecuencia de la predominancia de humedales y zonas inundables, en estas áreas existen hábitats naturales mejor conservados, más continuos, sin asentamientos humanos permanentes, o si los hay, estas son viviendas aisladas, excepto una pequeña parte del área B, al Oeste del río Piribebuy. El mosaico de varios tipos de hábitats, la existencia de áreas boscosas asociadas a espacios

abiertos y la casi ausencia de edificaciones, son factores que pueden influenciar una mayor riqueza (Malo et al., 2004), esto a su vez podría ser la causa del mayor registro de individuos muertos por atropellamiento. Además, muchas de las especies con registros elevados, son comunes en hábitats asociados a cuerpos de agua o humedales (Cacciali, 2009; Wallace et al., 2010; Cartes et al., 2010), esto pudo contribuir a la concentración de puntos de atropellamiento en estas tres áreas, las cuales incluyen intersecciones de la ruta con cursos de agua.

Si bien las secciones rectas favorecerían el atropellamiento de fauna (Artavia, 2014), como de hecho ocurrió con el segmento de ruta más afectado de entre los tres (área A), las curvas de la ruta, en las otras dos áreas de alto impacto, pudieron incidir en la visibilidad de los conductores.

CONCLUSIONES

Mediante el presente trabajo se ha caracterizado el atropellamiento vehicular de fauna silvestre en el tramo estudiado de la Ruta III General Elizardo Aquino, encontrándose que especies carroñeras, nocturnas y de movimientos lentos fueron las más afectadas. Estudios con una o más réplicas diarias y mayor frecuencia y duración son necesarios para esclarecer la problemática ocasionada por atropellamientos vehiculares. Las áreas críticas de atropellamiento identificadas correspondieron a cruces de cauces hídricos con comunidades naturales hidromórficas poco perturbadas. Se recomienda la adecuación de las infraestructuras viales existentes en las tres áreas identificadas, la colocación de cartelería indicativa de cruce de fauna y la modificación de puentes y alcantarillas para que funcionen como pasos de fauna no específicos.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo de familiares y amigos de A.O. A la FACEN en nombre de sus profesores Karina Núñez, Katia Airaldi, Frederick Bauer y Pastor Pérez por su colaboración para identificar especies. Asimismo, a Pier Cacciali por confirmar dos identificaciones de serpientes. Al Dr. Salvador Peris, de

la Universidad de Salamanca, por sus comentarios y sugerencias. Al Laboratorio de Zoología y la Colección Zoológica de la FACEN (CZCEN), por la recepción de los especímenes colectados.

LITERATURA CITADA

- Adán, J., Ayuso, A., & Rodríguez, A. (2007). Efectos de las infraestructuras viarias en los vertebrados. En J. Barea-A., M. Moleón, R. Travesí, E. Ballesteros, J. Luzón, & J. Tierno, J. (Eds), *Biodiversidad y conservación de fauna y flora en ambientes mediterráneos* (pp. 839-858). Granada, España: Sociedad Granatense de Historia Natural.
- Aguirre, G. (2014). Métodos de estimación, captura y contención de anfibios y reptiles. En Gallina, S., & C. López. (Eds), *Manual de técnicas para el estudio de la fauna* (pp 63-84). México D.F., México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Instituto de Ecología, Universidad Autónoma de Querétaro.
- Arroyave, M., Gómez, C., Gutiérrez, M., Múnera, D., Zapata, P., Vergara, I., Andrade, L., & Ramos, K.. (2006). *Impactos de las carreteras sobre la fauna silvestre y sus principales medidas de manejo*. Revista EIA, (5) 45-57.
- Artavia, A. (2014). *Identificación y caracterización de cruces de fauna silvestre en la sección de la ampliación de la carretera nacional Ruta 32, Limón, Costa Rica* (tesis de posgrado). CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- Cabrera, M. (2009). *Lagartos del centro de la Argentina*. Córdoba, Argentina: The Rufford Foundation.
- Cacciali, P. (2009). *Guía para la identificación de 60 serpientes del Paraguay*. Asunción, Paraguay: Guyra Paraguay.
- Cacciali, P., & Cabral, H. (2015). The genus *Chironius* (Serpentes, Colubridae) in Paraguay: composition, distribution, and morphology. *Basic and Applied Herpetology*, 29, 51-60
- Cartes, J., Morales, C., López, N., Motte, M., & Vitale, C. (2010). Mortandad de fauna nativa



- silvestre por atropellamiento en la Ruta 9 “Carlos A. López” (Transchaco). *Revista de la Sociedad Científica del Paraguay*, 15(2), 191-202.
- Chacón, E. (2011). Atropello de vertebrados en una carretera secundaria en Costa Rica. *Cuadernos de Investigación UNED*, 3(1), 81-84.
- Clevenger, A., Chruszcz, B., & Gunson, K. (2003). Spatial patterns and factors influencing small vertebrate fauna road-kill aggregations. *Biological Conservation*, 109(1), 15-26.
- Clevenger, A., & Huijser, M. (2011). Wildlife crossing structure handbook: Design and evaluation in North America. Technical report No. FHWA-CFL/TD-11-003. Bozeman, USA: Western Transportation Institute.
- Colino-Rabanal, V., Langen, T., Peris, S., & Lizana, M. (2017). Ungulate: vehicle collision rates are associated with the phase of the moon. *Biodiversity and Conservation*. 1-14. doi: doi.org/10.1007/s10531-017-1458-x
- Colwell, R. K. (2013). EstimateS: Statistical estimation of species richness and shared species from samples. Version 9.1
- Delgado, C.A. (2007). Muerte de mamíferos por vehículos en la vía del Escobero, Envigado (Antioquia), Colombia. *Actual Biol*, 29(87):229-233.
- Delgado, J.D., Arévalo, J.R., & Fernández, J.M. (2004). Consecuencias de la fragmentación viaria: efectos de borde de las carreteras en la Laurisilva y el pinar de Tenerife. En J.M. Fernández, y C. Morici. (Eds.) *Ecología Insular* (pp. 181- 225). La Palma, España: Centro Universitario de Estudios Sociales.
- Espinosa, A., Serrano, J., & Montori, A. (2012). Incidencia de los atropellos sobre la fauna vertebrada en el Valle de El Paular. LIC “Cuenca del río Lozoya y Sierra Norte”, *Munibe*, 1(60), 209-236.
- Gómez, P., & Monge-N., J. (2000). Fauna silvestre víctima de las carreteras: el caso de Costa Rica, *Repertorio Científico*, 6(8 y 9), 47-50.
- Heilman, G., Strittholt, J., Slosser, N., & Dellasala, D. (2002). Forest fragmentation of the conterminous United States: assessing forest intactness through road density and spatial characteristics. *Bio-science*, 52(5), 411-422.
- Laurance, W. (2009). Carretera a la ruina: la expansión de las redes de transporte pone en peligro la biodiversidad global. En BBVA (Ed). *Las múltiples caras de la globalización*. Recuperado de https://www.bbvaopenmind.com/wp-content/uploads/static/pdf/198_WILLIAM_F_LAURANCE.pdf
- Malo, J., Suárez, F., & Díez, A. (2004). Can we mitigate animal-vehicle accidents using predictive models?, *Journal of Applied Ecology*, 41(4): 701-710.
- Mereles, F., Cartes, J.; Clay, R.; Cacciali, P.; Paradedá, C.; Rodas, O.; Yanosky, A. (2013). Análisis cualitativo para la definición de las ecorregiones de Paraguay occidental. *Paraquaria Nat.* (2):12-20
- Mereles, F. (2010). Acerca del estado de conservación de las formaciones vegetales en algunas áreas del Chaco húmedo boreal. *Revista de la Sociedad Científica del Paraguay*, 15(2), 171-189.
- Monroy, M.C., A. De La Ossa-Lacayo., & J. De La Ossa. (2015). Tasa de atropellamiento de fauna silvestre en la vía San Onofre – María la baja, Caribe Colombiano. *Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas*, 27: 88-95.
- Moreno, C. (2001). *Métodos para medir la biodiversidad*. Recuperado de <http://entomologia.rediris.es/sea/manytes/metodos.pdf>
- Narosky, T., & Yzurieta, D. (2006). *Guía para la identificación de aves de Paraguay*. Asunción, Paraguay: Mazzini.
- Noss R. 2002 The ecological effects of roads. Consultado junio 10, 2015, en: <http://www.ecoaction.org/dt/roads.html>.
- Omena-Junior R, Pantoja-Lima J, Santos ALW, Ribeiro GAA, Aride PHR. (2013). Caracterização da fauna de vertebrados atropelada na rodovia BR – 174, Amazonas, Brasil. *Rev. Col. Ciencia*

- Animal, 4(2):291-307.
- Pozo, G., Bonilla, Y., & Pozo, F. (2008). Las carreteras y su impacto sobre la fauna silvestre en una region de la cuenca baja del río Usumacinta. En A. Sánchez, M. Hidalgo, S. Arriaga, W. Contreras (Comps.). *Perspectivas de la Zoología Mexicana* (pp. 253-265) Villahermosa, México: Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. División Académica de Ciencias Biológicas.
- QGIS Development Team, (2016). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <https://qgis.org>.
- Redford, K., & Eisenberg, J. (1992). *Mammals of the Neotropics: The Southern Cone*. Illinois, USA: University of Chicago Press.
- Santos, S., Carvalho, F., & Mira, A. (2011). How long do the dead survive on the Road? Carcass persistence probability and implications for road-kill monitoring surveys. *PLoS ONE*, 6(9) 1-12.
- Trejo, A., & Seijas, S. (2003). Una estimación de aves muertas en ruta en el Parque Nacional Nahuel Huapi, noroeste de la Patagonia argentina. *Hornero*, 18(2): 97-101.
- Vieira E.M. (1996). Highway mortality of mammals in central Brazil. *Journal of the Brazilian Association for the Advancement of Science*, 48:270-272.
- Wallace, R., Gómez, H., Porcel, Z., Rumiz, D. (Eds). (2010). *Distribución, ecología y conservación de los mamíferos medianos y grandes de Bolivia*. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia: Centro de Ecología Difusión Simón I. Patiño.
- Weiler, A., Núñez, K., Airaldi, K., Lavilla, E., Peris, S., y Baldo, D. (2013). *Anfibios del Paraguay*. San Lorenzo, Paraguay: Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - Universidad Nacional de Asunción, Universidad de Salamanca.

ANÁLISIS CRÍTICO DE LA BIOGEOGRAFÍA DEL PARAGUAY

CRITICAL ANALYSIS OF THE BIOGEOGRAPHY OF PARAGUAY

Ignacio Avila Torres^{1,4}, Guillermo D'Elía², Christian Vogt¹ & Bolívar R. Garcete-Barrett^{1,3}

¹Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Biología. ⁴Email: riavilat@gmail.com.

²Instituto de Ciencias Ambientales y Evolutivas, Facultad de Ciencias, Universidad Austral de Chile.

³Museo Nacional de Historia Natural del Paraguay, Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sustentable.

Resumen: En el Paraguay, las ecorregiones están establecidas en la Resolución SEAM N° 614/2013, la cual a su vez está basado en trabajos realizados en 1990 para la región Oriental y un mapa de ecorregiones de la región Occidental resultado de talleres de expertos. Hay pocos antecedentes de estudios sobre la biogeografía del Paraguay, pero dos de ellos influenciaron en la identificación de áreas biogeográficas del Paraguay: Así las ecorregiones de la Región Oriental de Acevedo *et al.* (1990) y las regiones ornitogeográficas de Hayes (1995) muestran que estuvieron inspiradas en la definición de las regiones forestales de Tortorelli (1967). Así mismo, la propuesta de Dinerstein *et al.* (1995) influenció en las propuestas desarrolladas por Clay *et al.* (2005), Cacciali (2010) y Avila (2018).

Palabras claves: Biogeografía, Ecorregiones, Paraguay, río Paraguay.

Abstract: In Paraguay, ecoregions were established by Resolution SEAM No. 614/2013; this legislation was based on studies carried out in 1990 for the Eastern region and an expert based map of Chacoan ecoregions. There are few studies about the biogeography of Paraguay, but two of them were very important towards the identification of the biogeographical areas of Paraguay: The ecoregions of eastern Paraguay by Acevedo *et al.* (1990) and the ornitogeographical regions by Hayes (1995), were influenced by the definition of the forest regions of Tortorelli (1967). Likewise, the proposal of Dinerstein *et al.* (1995) influenced the proposals developed by Clay *et al.* (2005), Cacciali (2010) and Avila (2018).

Keys words: Biogeography, Ecoregions, Paraguay, Paraguayan river.

INTRODUCCIÓN

Importancia de los estudios biogeográficos

El conocimiento de la distribución geográfica de los organismos tiene varias aplicaciones en el campo de la biogeografía, conservación, ecología, para entender los efectos del cambio climático, entre otros. Según Espinosa *et al.* (2001), un análisis biogeográfico desde la perspectiva ecológica generalmente persigue concluir en sistemas cartográficos de áreas naturales, aunque bajo un enfoque de biogeografía histórica. El objetivo principal es comprender los patrones de distribución de los taxones en el espacio y a través del tiempo (Morrone, 2012; Zunino & Zullini, 2003). Esta disciplina puede ayudar a derivar en un marco de referencia para hacer evaluaciones de prioridades de conservación a escala local.

La biodiversidad, su abundancia y riqueza hacen al equilibrio de los ecosistemas (Schwartz *et al.*, 2000). Un ecosistema equilibrado garantiza la producción sostenible en el territorio, es por ello que es importante conocer todas las variables que hacen al ecosistema y la biodiversidad es parte esencial del mismo.

La gran mayoría de las políticas públicas de conservación y uso del hábitat del Paraguay han basado sus decisiones y conclusiones en hipótesis biogeográficas desarrolladas en el siglo pasado, sobre todo por Dinerstein *et al.* (1995) (Figura 1), quienes propusieron ecorregiones basadas únicamente en información proveniente de sistemas de información geográfica. Como ejemplo podemos citar a la “Estrategia Nacional y Plan de Acción para la conservación de la Biodiversidad del Paraguay 2004-2009” (SEAM, 2003), el “In-



Figura 1. Ecorregiones según Dinerstein *et al.* (1995). 1) Chaco Seco. 2) Pantanal. 3) Chaco Húmedo. 4) Cerrado. 5) Bosque Atlántico del Alto Paraná.

forme Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Paraguay” (SEAM, 2007) o el “Informe Nacional sobre el estado de los recursos fitogenéticos para la agricultura y la alimentación. Segundo Informe” (MAG, 2008).

Recién en el año 2013, la Secretaría del Ambiente emitió la Resolución SEAM N° 614 que rige en la elaboración de políticas públicas referentes a la conservación del Paraguay. En esta resolución se establecen las ecorregiones para las Regiones Oriental y Occidental del Paraguay (Figura 2). Esta propuesta oficial explica que las ecorregiones establecidas para la región Oriental son las propuestas por el trabajo denominado “*Áreas Prioritarias para la Conservación en la Región Oriental del Paraguay*”, publicado en el año 1990 por el Centro de Datos para la Conservación de la Subsecretaría de Estado de Recursos Naturales y Medio Ambiente; mientras que las ecorregiones de la región Occidental se definieron a través de un mapa de ecorregiones resultado de talleres de expertos realizados durante el año 2012, donde no está explícito que metodología o criterios se aplicaron.



Figura 2. Ecorregiones según Resolución SEAM N° 614/13. 1) Chaco seco. 2) Pantanal. 3) Chaco húmedo. 4) Cerrado. 5) Médanos. 6) Aquidaban. 7) Amambay. 8) Litoral central. 9) Selva central. 10) Bosque Atlántico del Alto Paraná. 11) Ñeembucu.

Antecedentes de estudios biogeográficos del Paraguay

Hay pocos antecedentes de estudios sobre la biogeografía del Paraguay. Félix de Azara (1808) hizo una descripción de la flora y fauna de las distintas regiones que recorrió. En el siglo XX, observamos estudios biogeográficos de carácter regional o continental (Cabrera & Willink, 1973; Dinerstein *et al.*, 1995; Holdridge, 1947; Hueck, 1978; Udvardy, 1975). Los primeros trabajos que tratan de esclarecer algunos aspectos biogeográficos del Paraguay desde la perspectiva forestal son los realizados por Tortorelli (1967) (Figura 3), Ferreiro (1981) y Sanjurjo (1989), quienes zonificaron y describieron las zonas forestales del Paraguay. Bertoni & Gorham (1973) en su estudio de la geografía del Paraguay desarrollaron descripciones naturales del paisaje.

Años más tarde, el Ministerio de Agricultura y Ganadería, a través del Centro de Datos para la Conservación (Acevedo *et al.*, 1990), publica el trabajo denominado “*Áreas Prioritarias para la Conservación en la Región Oriental del Pa-*

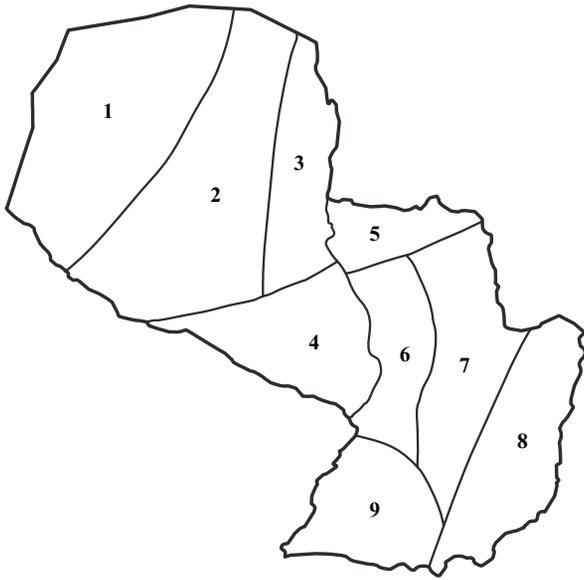


Figura 3. Regiones forestales descritas por Tortorelli (1967). 1) Monte occidental. 2) Parque chaqueño. 3) Bosque chaqueño. 4) Sabana arbolada chaqueña. 5) Bosque del norte. 6) Parque del río Paraguay. 7) Selva central. 8) Selva del Alto Paraná. 9) Sabana arbolada oriental.

raguay”, donde aplicaron criterios de geología, suelos, cobertura vegetal y biodiversidad para definir las “Eco-regiones” de la Región Oriental del País (Figura 4).

Spichiger *et al.* (1995) realizaron un estudio de las floras leñosas del periodo Pleistocénico tardío y Holoceno del Paraguay, proponiendo una regionalización solapada con ecotonos de los diferentes tipos de flora. Oakley & Prado (2011) analizaron el dominio fitogeográfico de los Bosques Secos Estacionales Neotropicales del Paraguay, describiendo sus áreas de influencia biogeográfica en ambas grandes regiones del país. Myers (1982) analizó la hipótesis de vicarianza y de dispersión para explicar las diferencias que encuentra en la composición de los ensamblajes de micromamíferos de la Región Oriental y del Chaco.

El primer trabajo con una metodología que incluyó herramientas estadísticas multivariadas es el realizado por Hayes (1995), el cual a partir de una matriz de presencia de especies de aves correlacionó la riqueza de la avifauna con regiones bióticas previamente seleccionadas, describiendo áreas biogeo-

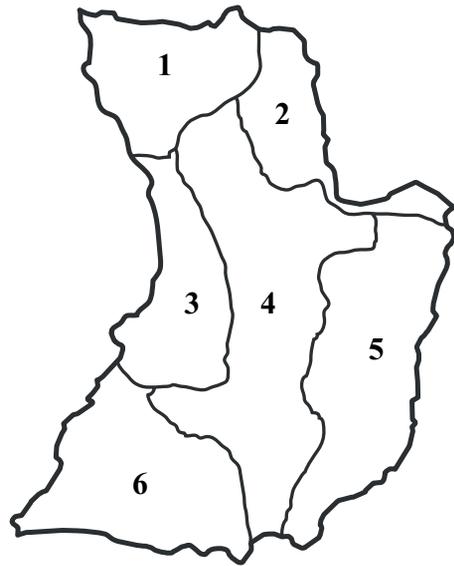


Figura 4. Ecorregiones de la Región Oriental del Paraguay según Acevedo *et al.* (1990). 1. Aquidaban. 2. Amambay. 3) Litoral central. 4) Selva central. 5) Bosque Atlántico del Alto Paraná. 6) Ñeembucu.

gráficas que denominó “Regiones Ornitogeográficas” del Paraguay (Figura 5). Spichiger *et al.* (2006) presentaron un estudio de regionalización de la flora boscosa del país, mediante el análisis estadístico de la distribución de 39 especies de árboles. Rumbo (2010) realizó un trabajo similar al de Hayes (1995), analizando especies de mamíferos, utilizando una matriz de presencia/ausencia y correlacionándolas con las ecorregiones descritas por Dinerstein *et al.*, (1995). Mereles *et al.* (2013) analizaron imágenes satelitales, describiendo de esta forma Ecorregiones de la Región Occidental del Paraguay. Cacciali *et al.* (2016), describieron siete ecorregiones basados en las propuestas de Clay *et al.* (2005), Dinerstein *et al.* (1995) y Keel *et al.* (1993).

Asimismo encontramos estudios que modifican la hipótesis ecorregional de Dinerstein *et al.* (1995); estos son los realizados por Clay *et al.* (2005), describiendo lo que denominó *Pastizales Mesopotámicos* en el sur de la Región Oriental (Figura 6), y Cacciali & Ubilla (2016) y Cacciali (2010) nombrando la ecorregión *Paraguay Central*, también en la Región Oriental (Figura 7). Por su parte, Mereles (2013) y Mereles *et al.* (2013)

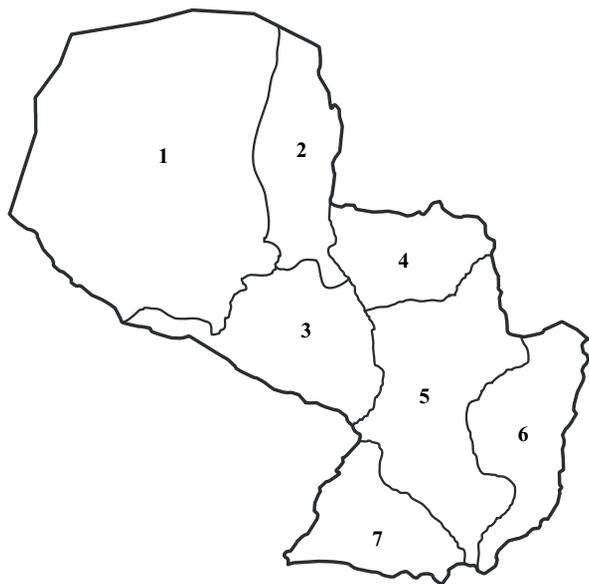


Figura 5. Regiones ornitogeográficas descritas por Hayes (1995). 1) Alto Chaco. 2) Matogrosense. 3) Bajo Chaco. 4) Campos Cerrados. 5) Paraguay Central. 6) Alto Paraná. 7) Ñeembucú.

describieron formaciones vegetales del Chaco paraguayo, y Avila (2017) realiza un análisis de patrones de distribución de reptiles identificando 11 áreas de endemismos, una de las cual coincide con la ecorregión de *Pastizales Mesopotámicos* descrita por Clay *et al.* (2005). Finalmente, Ávila (2018) en su tesis de maestría identifica y analiza áreas de endemismos de 300 especies de plantas, insectos, anfibios, reptiles y aves, generando una propuesta biogeográfica en la cual propone la existencia de siete biorregiones (Figura 8).

En resumen, se puede decir que son pocos los estudios sobre biogeografía histórica del Paraguay, siempre utilizando un solo grupo taxonómico, como ser especies leñosas forestales (Oakley & Prado, 2011; Spichiger *et al.*, 2006), aves (Hayes, 1995), mamíferos (Myers, 1982; Rumbo, 2010), reptiles (Avila, 2017; Cacciali & Ubilla, 2016). La tesis de Avila (2018) es hasta ahora el único trabajo que analiza patrones de distribución de diferentes grupos taxonómicos para la identificación de regiones biogeográficas basadas en la presencia de taxones.

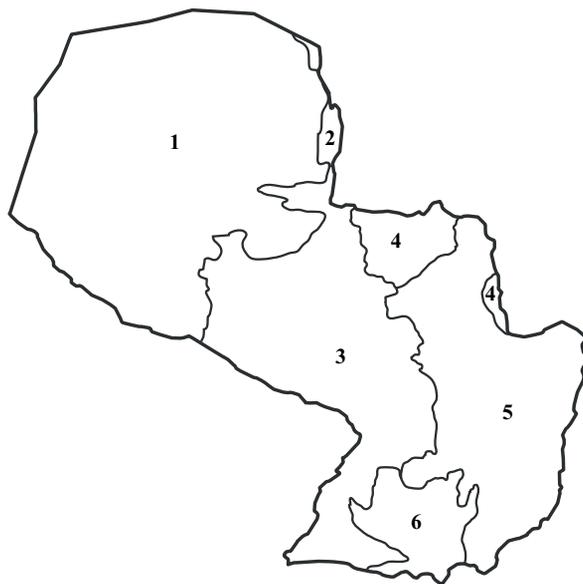


Figura 6. Ecorregiones del Paraguay según Clay *et al.* (2005). 1) Chaco Seco. 2) Pantanal. 3) Chaco Húmedo. 4) Cerrado. 5) Bosque Atlántico del Alto Paraná. 6) Pastizales Mesopotámicos.

DISCUSIÓN

Biogeografía de la Región Oriental

Tortorelli (1967) es el primero que ensaya una bio-regionalización del Paraguay, describiendo 5 regiones fitogeográficas al este del río Paraguay (Figura 3). Posteriormente, Acevedo *et al.* (1990) describen 6 ecorregiones en la Región Oriental (Figura 4) que corresponden a las regiones forestales de Tortorelli (1967), exceptuando que la selva central de Tortorelli (1967) es subdividida en el extremo noreste de la región, denominando dicha área la ecorregión *Amambay* en correspondencia departamento homónimo. Hayes (1995) describe 4 regiones ornitológicas en la región Oriental (Figura 5), en la cual su región denominada *Paraguay Central* incluye al *Parque del Río Paraguay* (Tortorelli, 1967) y a la ecorregión *Litoral Central* (Acevedo *et al.*, 1990).

Como propias del este del Paraguay, Dinerstein *et al.* (1995) describen 2 ecorregiones, el *Bosque Atlántico del Alto Paraná* y el *Cerrado*, este último en tres pequeñas porciones de territorio en el extremo Norte y Este de la Región Oriental (Figura 1). Dinerstein *et al.* (1995) no

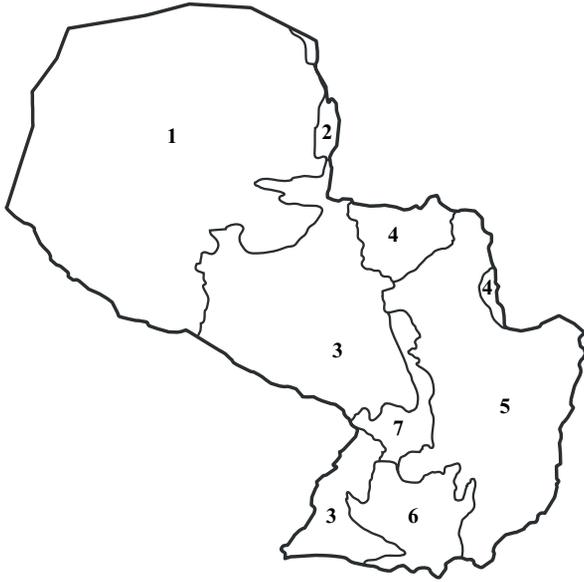


Figura 7. Ecorregiones según Cacciali (2010). 1) Chaco Seco. 2) Pantanal. 3) Chaco Húmedo. 4) Cerrado. 5) Bosque Atlántico del Alto Paraná. 6) Pastizales Mesopotámicos. 7) Paraguay Central.

consideran a la Región Oriental como una región separada del Chaco por el río Paraguay como un límite natural entre ambas regiones; más bien, describen como Chaco Húmedo a toda la zona oeste de la Región Oriental, así la región que Acevedo *at al.* (1990) y Hayes (1995) describieron como *Ñeembucú* (Figura 4 y 5) y a la *Savana Arbolada Oriental* (sensu Tortorelli, 1967) son parte del mismo (Figura 3).

Posteriormente, Clay *et al.* (2005) modificaron la ecorregión del *Chaco húmedo* en el extremo Sur del Paraguay en una ecorregión que denominaron *Pastizales Mesopotámicos* (Figura 6). Cacciali (2010) delimitó una ecorregión que denomina *Paraguay Central*, modificando la ecorregión del *Chaco húmedo* en la parte central y limitando con el río Paraguay (Figura 7) y Avila (2018) identificó áreas de endemismos en los *Pastizales Mesopotámicos* descritos por Clay *et al.* (2005), renombrándolo como *Sabanas Mesopotámicas* y a la parte sur del *Paraguay Central* de Cacciali (2010), en lo que le denominó *Ecorregión Cordillera de los Altos* (Figura 8).



Figura 8. Ecorregiones según Avila (2018). 1) Chaco Seco. 2) Pantanal. 3) Chaco Húmedo. 4) Cerrado. 5) Bosque Atlántico del Alto Paraná. 6) Sabanas Mesopotámicas. 7) Cordillera de los Altos.

Biogeografía de la Región Occidental o Chaco

Tortorelli (1967) describió cuatro regiones fitogeográficas forestales en el Chaco (Figura 3). Posteriormente, Hayes (1995) definió tres regiones ornitogeográficas en esta región (Figura 5); éstas coinciden en lo que el primero llamó *Bosque chaqueño* y Hayes (1995) la región *Matogrosense*, así como la *Savana arbolada chaqueña* y el *Bajo Chaco* respectivamente. Así mismo, si se unen el *Parque chaqueño* y el *Monte occidental* se constituiría el *Alto Chaco de Hayes* (1995). Dinerstein *et al.* (1995) identificaron tres ecorregiones en el occidente paraguayo (Figura 1): el *Chaco Húmedo*, que sobrepasa los límites del río Paraguay e ingresa profundamente en la Región Oriental, el *Chaco Seco*, que integra en el este Chaqueño a la región ornitogeográfica *Matogrosense* y la zona forestal *Bosque chaqueño*, y la ecorregión del *Pantanal* que en un estrecho margen corre paralela al Río Paraguay (Figura 1).

Mereles *et al.* (2013) modifican las ecorregiones del Chaco, describiendo 5 ecorregiones e incluyendo por primera vez una ecorregión denominada *Médanos* en el límite Noroeste del Chaco

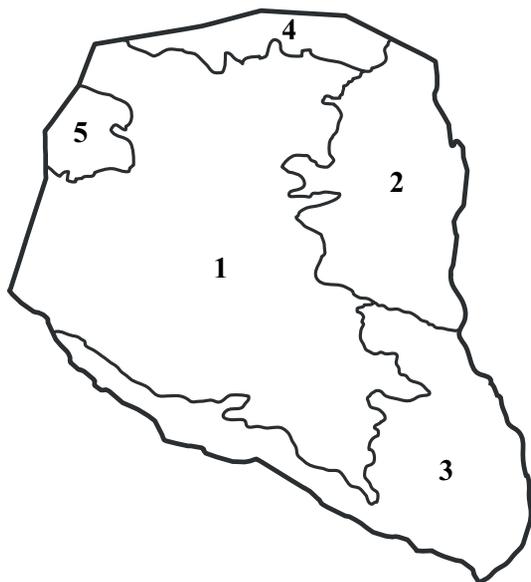


Figura 9. Ecorregiones del Chaco según Mereles *et al.* (2013). 1) Chaco seco. 2) Pantanal. 3) Chaco húmedo. 4) Cerrado. 5) Médanos.

y la ecorregión del *Cerrado* en el extremo norte de la región Occidental (Figura 9). La ecorregión del *Pantanal* se extiende desde el río Paraguay en el este chaqueño hasta el Chaco central. El *Chaco Seco* se restringe al centro y Oeste de la región englobando a la ecorregión *Médanos* y el *Chaco Húmedo* ocupa el valle de inundación del río Pilcomayo en la frontera con la Argentina y el sur del Chaco (Figura 9). Avila (2018), modificó la ecorregión *Pantanal* (sensu Dinerstein *et al.*, 1995) en un área que abarca una región que va desde la frontera con Bolivia y hacia el Sur en una franja de 100 Km paralela al río Paraguay hasta unos 200 Km al sur del mismo (Figura 8).

El río Paraguay como barrera biogeográfica

Ya desde los inicios de los estudios biogeográficos del Paraguay, el río Paraguay se describe separando dos regiones bien diferenciadas en lo biótico (Bertoni & Gorham, 1973). Tortorelli (1967), Ferreiro (1981) y Sanjurjo (1989) zonificaron y describieron zonas forestales del Paraguay en sus respectivos trabajos, señalando formaciones forestales de la Región Oriental y de la Región Occidental por separado, siempre teniendo al río Paraguay como

un límite natural entre ambas regiones.

Myers (1982) afirmó que el río es un límite zoogeográfico inusualmente agudo a medida que atraviesa el territorio del Paraguay, concluyendo que la diferencia de riqueza de micromamíferos que encontró a ambos lados del río, se ajusta mejor a un modelo de dispersión que a uno vicariante. Giarla & Jansa (2014), que estudiaron a los marsupiales del género *Thylamys*, encontraron que *T. macrurus* habita el margen este del río, mientras que *T. pusillus* el margen oeste. Siendo que ambos habitan el mismo tipo de hábitat, argumentaron la posibilidad que el río Paraguay sea un límite de dispersión efectiva, añadiendo que las dos especies no son taxones hermanos. Si las hipótesis de Myers (1982) y Giarla & Jansa (2014) de que el río Paraguay es una barrera eficaz para la dispersión de la fauna se corroboran, el mismo patrón se vería reflejado en la identificación de áreas de endemismos propias en ambos márgenes del río. La hipótesis biogeográfica de Hayes (1995) refleja dicha idea, fijando al río Paraguay como barrera en la definición de sus regiones ornitogeográficas (Figura 5). Willig *et al.* (2000) realizaron un análisis de ocurrencia de especies de murciélagos, concluyendo que los ensamblajes de murciélagos no corresponden a las 7 regiones ornitogeográficas descritas por Hayes (1995); más bien encontraron diferencias significativas entre el este del río Paraguay con dominio de filostómidos, mientras que en las regiones xéricas al oeste del río hay un dominio de los molósidos.

Spichiger *et al.* (2006) han concluido que el Paraguay está dividido en dos regiones florísticamente diferenciadas. Una de éstas es la región Chaqueña, en donde describen 3 comunidades vegetales en la que denomina A0, correspondiente a la vegetación del Chaco Húmedo, A1 y A2 en el Chaco Seco. La segunda es la Región Oriental donde se describen 3 comunidades florísticas denominadas B0, en el valle de inundación del Río Paraguay y que se considera como un ecotono entre las comunidades propiamente chaqueñas, y las otras comunidades de la región Oriental, B1, correspondiente al Bosque Atlántico del Alto Paraná y al B2 con vegetación propia del Cerrado. A su vez, Mereles (2013)

también describió al Paraguay dividido en dos regiones naturales muy características, la región Oriental y la Occidental o Chaco, separadas por el río Paraguay, aunque aclara que en el medio de las formaciones vegetales del Chaco seco y de los bosques húmedos del oriente hay una zona ecotonal.

Por su parte, Cacciali & Ubilla (2016) en su estudio de 180 especies de reptiles a través de un análisis de parsimonia de endemismos (PAE), obtuvieron resultados que no son concluyentes, aunque evidenciaron la presencia de patrones de distribución que coinciden con áreas propias de la Región Chaqueña. Así identificaron áreas de endemismos en el Chaco Seco, diferenciado del Chaco Húmedo y en este último, elementos taxonómicos propios del Pantanal, así mismo, identifican áreas de endemismos en la Región Oriental, en el Cerrado y en el Bosque Atlántico del Alto Paraná. De la Sancha *et al.* (2017) sostuvieron que el río Paraguay es considerado un límite biogeográfico relevante, separando al Paraguay en una región oriental y en otra occidental. Esta hipótesis está basada en que de las 181 especies registradas de mamíferos nativos del Paraguay, el 32% solo se encuentra al este del Río Paraguay, el 19.3% solo al oeste del río. Es interesante observar que casi la mitad de las especies (48.6%) se distribuyen en ambas regiones, es decir, el río Paraguay sería eficaz como barrera biogeográfica para aproximadamente la mitad de las especies de mamíferos del Paraguay.

Dinerstein *et al.* (1995) mostraron al río Paraguay como parte integrante de la ecorregión del Chaco Húmedo y en el extremo Norte del Paraguay el río se integra a la ecorregión del Pantanal, no siendo considerado como límite natural entre ecorregiones. Rumbo (2010), analizó la similitud de riqueza mastozoológica presente en cada ecorregión propuesta por Dinerstein *et al.* (1995), reportando que la máxima similitud se dio entre el Bosque Atlántico del Alto Paraná y el Chaco Húmedo, señalando mayor afinidad entre estas dos ecorregiones que entre el Chaco Seco y el Chaco Húmedo. A nuestro parecer, esto coincide con la distribución de los Bosques Secos Estacionales Neotropicales

(Oakley & Prado, 2011; Moggi *et al.*, 2015). En sus resultados se observa que el patrón de distribución de la mastofauna analizada, es coherente con el modelo ecorregional propuesto por Dinerstein *et al.* (1995).

CONCLUSIÓN

Existieron dos trabajos que marcaron un camino en la identificación de áreas biogeográficas del Paraguay: Tortorelli (1967) inspiró el delineado de las ecorregiones de la Región Oriental de Acevedo *et al.* (1990) y las regiones ornitogeográficas de Hayes (1995), y la propuesta de Dinerstein *et al.* (1995) influyó en las propuestas desarrolladas por Clay *et al.* (2005), Cacciali (2010) y Avila (2018). Sin embargo, todas estas propuestas, así como las propuestas gubernamentales de zonificación del país, han carecido de métodos claros en sus propuestas o han sido hechas en base a grupos taxonómicos específicos. Una propuesta que integre la mayor cantidad posible de grupos de seres vivos y aplicando métodos bien definidos es por lo tanto necesaria a fin de establecer zonificaciones más robustas, tal como lo propone la tesis de Avila (2018). Como factor contrario a un estudio más integrativo, cabe recordar que Cacciali & Ubilla (2016) y Avila (2018) señalan que hay muchos vacíos de información de la riqueza taxonómica en grandes partes del territorio nacional, lo que dificulta de sobremanera la identificación de áreas biogeográficas por métodos biogeográficos históricos. Por lo tanto, también son necesarios mayores esfuerzos de colecta en áreas poco estudiadas del territorio de la República.

AGRADECIMIENTOS

Especial agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología – CONACYT, por el cofinanciamiento con recursos del FEEI del proyecto PINV 15-751 “Análisis Biogeográfico del Paraguay.

LITERATURA CITADA

Acevedo, C., Fox, J., Gauto, R., Granizo, T., Keel, S., Pinazzo, J., Spinzi, L., Sosa, W. & Vera, V. (1990). Áreas prioritarias para la conser-

- vacación en la región oriental del Paraguay. Asunción: *CDC/DPNVS/SSRNMA/MAG*. Pp.: 99.
- Avila, I. (2017). Análisis biogeográfico del Paraguay a través de la identificación de áreas de endemismos de la herpetofauna (Reptilia). En *Libro de resúmenes de la III Jornada Paraguaya de Herpetología*. Pp.: 23.
- Avila, I. (2018). Análisis biogeográfico del Paraguay a través de la identificación de áreas de endemismos (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay. Pp.: 95.
- Bertoni, G. T., & Gorham, J. R. (1973). The Geography of Paraguay. En J. R. Gorham (Ed.), *Ecological Essays*. Miami: *Academy of the Arts and Sciences of the Americas*. Pp.: 9-32.
- Cabrera, A., & Willink, A. (1973). Biogeografía de América Latina. Washington D.C.: Monografía 13. Serie de Biología. *Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos*. Pp.: 120.
- Cacciali, P. (2010). Distribución y Afinidades Biogeográficas de la Familia Gymnophthalmidae de Paraguay (Reptilia : Sauria). *Reportes Científicos de la FACEN*, 1: 10-16.
- Cacciali, P., & Ubilla, M. (2016). Distribución de reptiles en Paraguay: un aporte al conocimiento de su biogeografía. *Boletín del Museo Nacional de Historia Natural del Paraguay*, 20: 5-30.
- Cacciali, P., Scott, N. J., Luz, A., Ortíz, A., Fitzgerald, L. A., & Smith, P. (2016). The Reptiles of Paraguay : Literature , Distribution , and an Annotated Taxonomic Checklist. *Special Publication of the Museum of Southwestern Biology*, (11), 1-373.
- Clay, R., De Egea, J., & Del Castillo, H. (2005). Ecorregiones de Paraguay. En Atlas de las Aves de Paraguay. Asunción: *Guyra Paraguay*. Pp.: 6-9.
- De La Sancha, N., Lopez-Gonzalez, C., D'elia, G., Myers, P., Valdez, L., & Ortiz, M. L. (2017). An annotated checklist of the mammals of Paraguay. *THERYA*, 8: 241-260.
- Dinerstein, E., Olson, D. M., Graham, D. J., Webster, A. L., Primm, S. A., Bookbinder, M. P., & Ledec, G. (1995). Una evaluación del estado de conservación de las ecoregiones terrestres de América latina y el Caribe. Washington D.C.: *WWF - World Bank*. Pp.: 135.
- Espinosa, D., Aguilar, C., & Escalante, T. (2001). Endemismo, áreas de endemismo y regionalización biogeográfica. En J. Llorente-Bousquets & J. Morrone (Eds.), *Introducción a la biogeografía en Latinoamérica: teorías, conceptos, métodos y aplicaciones*. Mexico: *Las Prensas de Ciencias*. Pp.: 31-37.
- Ferreiro, O. (1981). Aproximación hacia una clasificación de las formaciones forestales del Paraguay. *Torrialba, Costa Rica: CATIE*. Pp.: 1-13.
- Giarla, T. C., & Jansa, S. A. (2014). The role of physical geography and habitat type in shaping the biogeographical history of a recent radiation of Neotropical marsupials (Thylamys: Didelphidae). *Journal of Biogeography*, 41: 1547-1558.
- Hayes, F. (1995). Status, distribution and biogeography of the birds of Paraguay. *Monographs in field Ornithology, 1. American Birding Association*. Pp.: 230.
- Holdridge, L. (1947). Determination of world plant formations from simple climatic data. *Science*, 105: 367-368.
- Huek, K. (1978). Los bosques de sudamérica: ecología, composición e importancia económica. *Sociedad Alemana de Cooperación Técnica GTZ*. Pp.: 476.
- Keel, S., Gentry, A., & Spinzi, L. (1993). Using vegetation analysis to facilitate the selection of conservation sites in eastern Paraguay. *Conservation Biology*, 7: 66-75.
- MAG. (2008). Informe Nacional sobre el estado de los recursos fitogenéticos para la agricultura y la alimentación. Segundo Informe. *Ministerio de Agricultura y Ganadería*, Asunción. Pp.: 103.

- Mereles, F. (2013). Acerca de las extensiones de cerrados y cerradones en el Paraguay. *Paraquaria Natural*, 1: 35-38.
- Mereles, F., Cartes, J. L., Clay, R. P., Cacciali, P., Paradedá, C., Rodas, O., & Yanosky, A. (2013). Análisis cualitativo para las definiciones de las ecorregiones de Paraguay occidental. *Paraquaria Natural*, 6: 12-20.
- Morrone, J. (2012). Sistemática, biogeografía, evolución: los patrones de la biodiversidad en tiempo-espacio. *Textos de biología, Universidad Nacional Autónoma de México*. Pp.: 124.
- Myers, P. (1982). Origins and affinities of the mammal fauna of Paraguay. En M. A. Mares & H. Genoways (Eds.), *Mammalian biology in South America*. Pymatuning Laboratory of Ecology, University of Pittsburgh. Pp.: 85-93.
- Oakley, L. J., & Prado, D. E. (2011). El dominio de los bosques secos estacionales neotropicales y la presencia del arco pleistocénico en la República del Paraguay, *Rojasiana*, 10: 55-75.
- Rumbo, M. (2010). Análisis Biogeográfico de los Mamíferos de Paraguay. *Boletín del Museo Nacional de Historia Natural del Paraguay*, 16: 18-29.
- Sanjurjo, M. (1989). Regiones Forestales del Paraguay. *La Revista Crítica*, 3: 53-64.
- Schwartz, M., Brigham, C., Hoeksema, J., Lyons, K., Mills, M., & Van Mantgem, P. (2000). Linking biodiversity to ecosystem function: implications for conservation ecology. *Oecologia*, 122: 297-305.
- SEAM. (2003). Estrategia Nacional y Plan de Acción para la conservación de la Biodiversidad del Paraguay 2004-2009. *SEAM/PNUD/GEF*, Asunción. Pp.: 105.
- SEAM. (2007). Informe nacional de áreas silvestres protegidas del Paraguay. *SEAM/PNUD/GEF*, Asunción. Pp.: 84.
- Spichiger, R., Palese, R., Chautems, A., & Ramella, L. (1995). Origin, affinities and diversity hot spots of the Paraguayan dendrofloras. *Candollea*, 50, 515-537.
- Spichiger, R., Bise, B., Calenge, C., & Chatelain, C. (2006). Biogeography of the forest of the Paraguay-Paraná basin. En R. T. Pennington, G. P. Lewis, & J. A. Ratter (Eds.), *Neotropical Savannas and Seasonally Dry Forest. Plant Diversity, Biogeography and Conservation*, CRC Press Taylor & Francis Group. Pp.: 193-211.
- Tortorelli, L. (1967). Formaciones forestales y maderas del Paraguay. *Boletín del Instituto Foresal. Latinoamericano*. 24: 3-34.
- Udvardy, M. (1975). A classification of the biogeographical provinces of the world. *IUCN Occasional Paper no. 18, International Union for Conservation of Nature and Natural Resources*. Pp.: 1-48.
- Willig, M., Presley, S., Owen, R., & Lopez-Gonzalez, C. (2000). Composition and structure of bat assemblages in Paraguay : a subtropical – temperate interface. *Journal of Mammalogy*, 81: 386-401.
- Zunino, M., & Zullini, A. (2003). Biogeografía: la dimensión espacial de la evolución. *Fondo de Cultura Económica*. México, D. F. Pp.: 359.

GUÍA PARA LOS AUTORES

Reportes Científicos de la FACEN, es una revista de acceso libre y gratuito y es la publicación científica oficial de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional de Asunción. Es emitida semestralmente y publica **Artículos originales, Artículos de revisión, Tópicos actuales, Reportes de casos, Comunicaciones cortas y Correspondencia**, en las áreas de Biología, Química, Física, Matemática Pura, Matemática Estadística, Geología, Biotecnología y Tecnología de Producción. Los principales criterios para la selección de los artículos son la solidez científica y la originalidad del tema. Los trabajos y opiniones publicados en la revista son de exclusiva responsabilidad de los autores. El idioma oficial de la revista es el español, pero se aceptan trabajos en inglés y en portugués. No existe costo de publicación para los autores.

El trabajo será enviado en formato electrónico a la dirección email de la revista (reportescientificos@gmail.com), consistiendo en archivos de texto, archivos de planilla electrónica y archivos de imagen. **El archivo principal de texto debe contener únicamente texto, sin ilustraciones ni tablas embebidas**, sino únicamente las respectivas citas a las mismas en el texto (numeradas secuencialmente). **Las tablas e ilustraciones deberán ser remitidos en formato digital en archivos independientes**. Los respectivos archivos deberán indicar en su nombre a qué número de tabla o ilustración corresponden.

El archivo de texto debe ser producido con Microsoft Word® u otro editor de texto perfectamente compatible. El texto deberá estar en letra Times New Roman, tamaño 11. Todo trabajo llevará en su primera página los siguientes elementos: **a) el Título** en español e inglés, **b) la lista de Autores** con nombre y apellido, **c) la Afiliación** laboral de cada autor, **d) un Resumen** de un máximo de 250 palabras en español, **e) un máximo de 7 Palabras clave** en español, **f) un Abstract** en inglés, correspondiente a la versión en español y **g) un máximo de 7 Key words** en inglés, correspondientes a la versión en español. **En caso de trabajos en Portugués** se añaden Título, Resumen y Palavras chave en dicho idioma. El resumen sólo podrá obviarse en el caso de Editoriales, Comunicaciones cortas y Correspondencias presentadas como tales. El cuerpo principal del texto podrá contener, según el contexto del trabajo, las secciones de **1) Introducción, 2) Materiales y métodos (o sólo uno de ellos de acuerdo al caso), 3) Resultados, 4) Discusión, 5) Conclusión, 6) Agradecimientos y 7) Literatura citada**. Tales secciones podrán sufrir fusión o no existir, de acuerdo a la metodología de trabajo o enfoque dados por el autor, así como al tipo de escrito (Artículo original, Comunicación corta, etc.) como haya sido presentado por autor o como lo decida el comité editorial. **Los pies de figuras y tablas** deberán ir al final del texto, a continuación de la sección de literatura citada.

Las citas bibliográficas deberán seguir las normas APA. Según estas normas, el año va entre paréntesis y se destacan el autor y año en las citas en texto: “Según González (1999)” o “El método es reciente (González, 1999)”. Para la lista en la sección de Literatura citada la secuencia lógica y formato es de “Autor. (Año). Título. Publicador, Volumen(Número): Páginas.”, poniéndose siempre primero el apellido de cada autor, seguido de sus correspondientes iniciales y separados por comas, con el último autor separado por un signo de ampersand. Se aplicará cursivas respectivamente en el título si se trata de un libro o tesis, o en el publicador si se trata de un artículo. Se ilustra en los siguientes ejemplos:

González, A.P. (1999). *Métodos de análisis crítico*. Asunción: Editorial Nueva. 120 pp.

González, A.P., Martínez, G.T. & Robledo, H.A. (1999). Análisis de la producción científica del país. *Revista de Filosofía Científica*, 45(2): 56-61.

Las tablas y cuadros deberán presentarse en archivos de Microsoft Excell® u otro programa perfectamente compatible, aunque en muchos casos se aceptan también tablas embebidas en archivo de Microsoft Word®, siempre que sea en archivo separado del de texto. **Las ilustraciones (graficos, imágenes, fotos, dibujos, mapas, esquemas o láminas completas) deberán presentarse cada una en un archivo aparte**, en formato JPG o TIF, generados en Adobe Photoshop u otro programa de procesamiento de imágenes. Deberá cuidarse que posean buen enfoque, claridad y contraste, que tengan una resolución mínima de 300 dpi y máxima de 1000 dpi y teniendo en cuenta que su anchura máxima en la revista será de 16 cm.

El proceso de evaluación incluye una primera revisión por el Comité Editorial para determinar si el artículo corresponde a la línea editorial y si cumple con los criterios generales de publicación. Una vez que el artículo se considere pertinente, se someterá a por lo menos dos revisores especialistas en el tema, de cuya opinión depende la aceptación definitiva del artículo. Si existiera una contradicción en la opinión de ambos especialistas, se someterá al Comité editorial o en caso contrario se solicitará una tercera opinión de un tercer especialista. El dictamen podrá ser aceptado, rechazado o condicionado, que será comunicado por escrito al autor principal en un plazo no mayor de tres meses de la recepción del material original. Si el dictamen es condicionado, el autor deberá remitir la nueva versión impresa y en formato digital en el plazo que se le indique que no podrá exceder de los 30 días posteriores a la recepción de la comunicación.

REPORTES CIENTÍFICOS

DE LA FACEN

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Rep. cient. FACEN	San Lorenzo (Paraguay)	Vol. 9, Nº 1	enero-junio de 2018	ISSN 2078-399X (versión impresa) ISSN 2222-145X (versión online)
-------------------	------------------------	--------------	---------------------	---

ARTÍCULOS ORIGINALES

- 3-8 **Fredy J. Gómez Grance & Analiz López Espinoza.** Estimación de dosis glandular promedio de pacientes expuestos a exámenes mamográficos convencionales.
- 9-23 **Teófilo Díaz, Pedro Puig, Gabriela Damilano & Juan Mereles.** Aplicación de modelos de series de tiempo a un componente iónico (alcalinidad total) indicativo de la calidad del agua en el embalse de Yacyreta.
- 24-30 **Fredy J. Gómez Grance & Yamila L. Rodríguez Zárate.** Importancia del índice de dosis en tomografía computarizada (CTDI) para la protección radiológica de los pacientes sometidos a estudios tomográficos.
- 31-41 **Aurora Ortega & Andrea Weiler.** Diversidad de vertebrados muertos por atropellamiento vehicular y zonas de mayor impacto en la Ruta III General Elizardo Aquino, Paraguay.
- 42-50 **Ignacio Avila Torres, Guillermo D'Elía, Christian Vogt Penzkofer & Bolívar Garcete-Barrett.** Análisis crítico de la biogeografía del Paraguay.

