

# AVANCES

EN CIENCIAS E INGENIERÍAS

**Avances en Ciencias e Ingenierías** es una publicación científica y multidisciplinaria que publica contribuciones originales en todos los campos de las ciencias exactas, físicas y biológicas, y sus aplicaciones ingenieriles, así como investigaciones en el interfaz de estas disciplinas.

## Editor General

Cesar Zambrano, Ph.D.

*Decano del Colegio de Ciencias e Ingeniería USFQ*

## Co-Editor

Diego F. Cisneros-Heredia, Ph.D.(c)

*Coordinador de Biología / Producción Académica USFQ*

## Editores Asociados

Nikolay Aguirre, PhD	Universidad Nacional de Loja, Ecuador
Ruth Álvarez, PhD	Universidad de Carabobo, Venezuela
Andrea Arias, PhD	DuPont Pioneer, EEUU
John G. Blake, PhD	University of Florida, EEUU
Robert Cazar, MSc	Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, Ecuador
Cesar Costa, PhD	Escuela Politécnica Nacional, Ecuador
Eric E. Dueno, PhD	Bainbridge College, EEUU
Salvador Godoy, PhD	Instituto Politécnico Nacional, México
Bette A. Loiselle, PhD	University of Florida, EEUU
Luis Rincón, PhD	Universidad de los Andes - Mérida, Venezuela
Santiago Ron, PhD	Pontificia Universidad Católica del Ecuador
Carlos Ventura, PhD, PE, PEng	The University of British Columbia

## Producción y Distribución

Víctor Posligua

*Director de Producción*

Fabián Luzuriaga

*Distribución*

## Revisión de Textos

Lucas Mendieta-Córdova

## Diseño e Impresión

Editorial USFQ

Universidad San Francisco de Quito

## Webmaster

Jaime Páez

## Guía para autores

A continuación presentamos los lineamientos generales para autores. Recomendamos que lea completamente las instrucciones disponibles en la página web de la revista: <http://avances.usfq.edu.ec>. Todos los manuscritos deben cumplir los lineamientos de la guía para autores, caso contrario serán devueltos a los autores para su corrección.

**Avances en Ciencias e Ingenierías** publica contribuciones en Inglés y Castellano (Español) que reportan investigaciones de alta calidad y relevancia producidas por investigadores de cualquier institución o país. La recepción de manuscritos está abierta de manera continua durante todo el año y se publica dos tipos de contribuciones: Artículos y Comunicaciones. Ver más detalles en <http://avances.usfq.edu.ec>. Todos los manuscritos enviados serán sometidos al siguiente proceso de revisión por pares (*peer-reviewed*). Los principales criterios para la aceptación son originalidad, rigor científico, contexto, relevancia y seguimiento del estilo y formato requerido para la revista. Nuestro objetivo es indicar a los autores la decisión tomada en un tiempo máximo de cinco semanas luego del envío. Cuando exista discrepancias en los dictámenes de los revisores, los Editores enviarán el manuscrito a un tercer revisor, cuya evaluación definirá la aceptación del manuscrito. Los resultados del proceso de revisión serán inapelables.

### Preparación del Manuscrito:

Se recibe manuscritos en formato de Microsoft Word (\*.doc; \*.docx). Las figuras para su publicación deben ser enviadas en alta resolución alta (mínimo 300 dpi, recomendable 600 dpi) en uno de los siguientes formatos: \*.tiff, \*.eps, \*.bm (ver más información para el envío de figuras en la página web de la revista). Se puede enviar Material Suplementario pertinente al artículo, como textos extensos sobre metodologías, bases de datos, archivos audiovisuales, entre otros, que serán colocados a disposición del público de manera gratuita a través del portal de la revista. Dependiendo del tipo de contribución sometida (Artículo o Comunicación), el manuscrito deberá dividirse en secciones específicas (ver instrucciones en <http://avances.usfq.edu.ec>). El texto y las tablas deben ser enviadas en el mismo archivo, con las tablas colocadas entre el texto en el orden respectivo y con su leyenda respectiva. Las figuras y el material suplementario no deben incluirse en el mismo archivo del texto y serán enviados en archivos separados (ver Instrucciones para Figuras en la página web de la revista). Si las figuras o tablas han sido previamente usadas, es responsabilidad del autor obtener los permisos necesarios para su publicación. El formato del texto debe limitarse a colocar palabras resaltadas (**bold**) o en cursiva (*italics*), al uso de diferentes tamaños de letra para el título del artículo, nombres de los autores y afiliación institucional, y a colocar superíndices para las direcciones de los autores. No debe darse ningún formato adicional al artículo (tabulaciones, diferentes tamaños de letra en el texto, estilos para subtítulos, etc.) pues el editor de producción de la revista se encargará de hacerlo. El manuscrito deberá ser escrito usando un tipo de letra Times New Roman con un tamaño de letra de 11 puntos y a espacio seguido. Los márgenes deben ser de 25 mm a todos los lados. La numeración de las páginas debe estar en la parte inferior derecha y ser consecutiva en todas las páginas. El título debe ser conciso y directo, indicando los elementos claves. Debe ser escrito con un tamaño de letra de 12 puntos, resaltado (**bold**), centrado y sólo la primera palabra (y los nombres propios) debe estar capitalizada.

Los nombres de los autores se ubican debajo del título del manuscrito separados por una línea. Los nombres deben ser escritos con un tamaño de letra de 11 puntos, resaltados (**bold**), centrados y separados entre sí por comas (no colocar y, and, &). La afiliación completa de cada investigador debe ir asociada con su nombre por medio de superíndices y colocarse separada por una línea debajo de los nombres con un tamaño de letra de 10 puntos. El autor para correspondencia debe ir claramente identificado por un asterisco y se debe incluir al menos un correo electrónico de contacto. Todo artículo deberá incluir como mínimo un resumen detallado en Español y un abstract detallado en Inglés (se puede incluir un tercer resumen en Portugués, Francés, Italiano, ó Alemán si amerita). Cada uno será redactado como un párrafo continuo, y debe contener información detallada de los objetivos, métodos, resultados, discusiones y conclusiones principales del manuscrito. No se debe incluir citas bibliográficas en los resúmenes. La introducción debe ser directa pero detallada, revisando literatura relevante y actual, y presentando antecedentes del estudio, datos sobre su importancia, justificación y objetivos. De ser pertinente, una descripción del sitio de estudio se incluirá en la sección de Materiales y métodos. Cuando los manuscritos traten sobre especies biológicas, deberán seguir los estándares nomenclaturales especificados en las instrucciones disponibles en la página web de la revista. Se debe utilizar el Sistema Internacional de Unidades y el ISO 4217 para los códigos monetarios.

Las referencias en el texto deben ir numeradas secuencialmente y se colocarán al final de la oración correspondiente dentro de un corchete, ejemplos: [10], [10,15,22], [12-20]. Las abreviaciones deberán usarse lo menos posible y no deberán permitir ambigüedad alguna. El significado de todas las abreviaciones deberá ser indicado la primera vez que se use la abreviación. Avances en Ciencias e Ingenierías publica sin costo figuras a color, siempre y cuando se relacionen directamente con el manuscrito, sus objetivos, resultados y discusión (ver Instrucciones para Figuras). Las tablas y figuras deberán estar citadas con numerales Árabigos en el orden que aparezcan en el texto; ejemplos: Tabla 1; Tablas 1-3; Fig. 1; Figs. 1,4; Figs. 1-3. Cada tabla o figura debe tener su propia leyenda explicativa, la cual debe ser comprensible sin hacer referencia al texto y será colocada debajo de la tabla o figura respectiva.

La lista de referencias debe titularse: Referencias Bibliográficas (no Bibliografía, o Literatura Citada). En las Referencias Bibliográficas, las publicaciones deben ordenarse de acuerdo al orden numérico que aparece en el texto del manuscrito (no en orden alfabético por autores) y su formato seguirá los siguientes ejemplos (ver más detalles en la página web de la revista):

- Kahn, F. 1991. "Palms as key swamp forest resources in Amazonia". *Forest Ecology and Management*, 38:133-142.
- Bass, M.S.; Finer, M.; Jenkins, C.N.; Kreft, H.; Cisneros-Heredia, D.F.; McCracken, S.F.; Pitman, N.C.A.; English, P.H.; Swing, K.; Villa, G.; Di Fiore, A.; Voigt, C.C.; Kunz, T.H. 2010. "Global Conservation Significance of Ecuador's Yasuní National Park". *PLoS ONE*, 5(1): e8767. doi:10.1371/journal.pone.0008767
- Tilley, R. J. D. 1987. "Defect Crystal Chemistry". Chapman and Hall: New York.
- Pires, J. M.; Prance, G. T. 1985. "The vegetation types of the Brazilian Amazon", en: "Amazonia, Key Environments", G. T. Prance, T. E. Lovejoy (Eds.), Pergamon Press: Oxford, pp. 109-145.
- Brandt, M. 2003. "Influencia del erizo lapicero (*Euclides thouarsii*) en la estructura de la comunidad submarina de la cara norte del Isote Caamaño, Galápagos", Universidad San Francisco de Quito, Tesis de Licenciatura: Quito.
- Frost, D. R. 2014. "Amphibian Species of the World: an Online Reference". Version 6.0. Enlace: <http://research.amnh.org/herpetology/amphibia/index.html>. American Museum of Natural History: New York, USA. Fecha de Consulta: 28 Junio 2014.

Las ecuaciones deben ir numeradas al lado derecho y entre paréntesis (artículos que incluyan varias ecuaciones es recomendable que sean entregados en formatos Lyx o LateX). El material suplementario también deberá llevar páginas y archivos numerados. Cuando el material corresponda a texto, debe ser presentado con el mismo formato general requerido para el manuscrito.

### Envío del Manuscrito:

Todos los manuscritos deben ser enviados a la revista Avances en Ciencias e Ingenierías a través del sistema disponible en la página web. Al someter el manuscrito, los autores deben confirmar en su mensaje de envío que el manuscrito no ha sido publicado o sometido para publicación en otro sitio y que todos los autores han participado en el desarrollo del manuscrito, lo han leído y están de acuerdo con su envío. La revista mantendrá comunicación directa con el autor para correspondencia, quien es el responsable de someter el manuscrito (con todos sus archivos de texto, figuras y material suplementario), recibir las revisiones y revisar y aprobar las pruebas de imprenta.

## Avances en Ciencias e Ingenierías

ISSN 1390-5384

Publicación semestral de la Universidad San Francisco de Quito USFQ  
Diego de Robles y Vía Interoceánica, Casilla Postal 17-1200-841, Quito 170901, Ecuador  
Tel. +593 2 297 1700, ext. 1451 o 1446; Fax +593 2 289 0070  
E-mail: [avances@usfq.edu.ec](mailto:avances@usfq.edu.ec)  
<http://avances.usfq.edu.ec>

## SECCIÓN A: CIENCIAS EXACTAS

- A1–A6 ■** Nanoestructuras inusuales de ácidos nucleicos basados en ADN G-cuádruple / Unusual Nucleic acid nanostructures based on G-quadruplex DNA  
*M. A. Méndez*  
*Avances en Ciencias e Ingenierías, 2015, Vol. 7, No. 2, Pags. A1-A6*
- 
- A7–A15 ■** Edad del universo y la densidad de energía de la radiación / Age of the universe and the energy density of radiation  
*A. Calahorrano, C. A. Marín*  
*Avances en Ciencias e Ingenierías, 2015, Vol. 7, No. 2, Pags. A7-A15*

## SECCIÓN B: CIENCIAS BIOLÓGICAS Y AMBIENTALES

- B1–B3 ■** The role of aerobic respiration in the life cycle of *Escherichia coli*: Public Health implications / El rol de la respiración aeróbica en el ciclo de *Escherichia coli*: Implicaciones para la salud pública  
*G. Vasco, T. Spindel, S. Carrera, A. Grigg, G. Trueba*  
*Avances en Ciencias e Ingenierías, 2015, Vol. 7, No. 2, Pags. B1–B3*
- 
- B4–B6 ■** Primer registro de anidación del Pelicano Peruano *Pelecanus thagus* (Pelecaniformes: Pelecanidae) en Ecuador / First nesting record of the Peruvian Pelican *Pelecanus thagus* (Pelecaniformes: Pelecanidae) in Ecuador  
*G. S. Vinuesa-Hidalgo, F. Sornoza, M. H. Yáñez-Muñoz*  
*Avances en Ciencias e Ingenierías, 2015, Vol. 7, No. 2, Pags. B4-B6*
- 
- B7–B12 ■** Herbario de Botánica Económica del Ecuador QUSF: Reseña histórica, desarrollo, representatividad y tipos / Herbarium of Economic Botany of Ecuador QUSF: Historical account, development, representativity and types  
*H. Valdebenito, V. Zak, P. Riera, D. Cisneros-Heredia*  
*Avances en Ciencias e Ingenierías, 2015, Vol. 7, No. 2, Pags. B7-B12*
- 
- B13–B16 ■** Nueva información sobre la coloración e historia natural del Cutín de Papallacta *Pristimantis acerus* (Lynch & Duellman, 1980) (Anura: Craugastoridae) / New information on the colouration and natural history of the Papallacta Robber Frog *Pristimantis acerus* (Lynch & Duellman, 1980) (Anura: Craugastoridae)  
*P. Bejarano-Muñoz, M. Pérez-Lara, J. Brito M.*  
*Avances en Ciencias e Ingenierías, 2015, Vol. 7, No. 2, Pags. B13-B16*
- 
- B17–B19 ■** Primer registro de *Epidendrum schunkei* D.E. Benn & Chistenson (Orchidaceae: Epidendroideae) para los Andes suroccidentales de Ecuador / First record of *Epidendrum schunkei* D.E. Benn & Christenson (Orchidaceae: Epidendroideae) from the southwestern Andes of Ecuador  
*F. Tobar-Suarez, M. Hinojosa, M. Galvez, M. H. Yáñez-Muñoz*  
*Avances en Ciencias e Ingenierías, 2015, Vol. 7, No. 2, Pags. B17-B19*
- 
- B20–B23 ■** *Cotylophoron fülleborni* Nasmak, 1937 (Trematoda: Paramphistomidae). Primer Reporte para Venezuela / *Cotylophoron fülleborni* Nasmak, 1937 (Trematoda: Paramphistomidae). First Report for Venezuela  
*G. Morales, L. A. Pino, L. Moreno*  
*Avances en Ciencias e Ingenierías, 2015, Vol. 7, No. 2, Pags. B20-B23*
- 
- B24–B29 ■** Evaluación del nivel de estrés en leoncillos (*Cebuella pygmaea*) mediante la medición de cortisol en heces / Evaluation of stress level in pygmy marmosets (*Cebuella pygmaea*) by measurement of fecal cortisol  
*E. Espinosa Mata, S. de la Torre, V. Arahana, M. L. Torres*  
*Avances en Ciencias e Ingenierías, 2015, Vol. 7, No. 2, Pags. B24-B29*
- 
- B30–B36 ■** Sensibilidad antimicrobiana entre los serogrupos de *Shigellae* aislados en la ciudad de Quito-Ecuador / Antimicrobial resistance within serogroups of *Shigellae* isolates in the city of Quito-Ecuador  
*I. Villacrés Granda, I. Alcocer*  
*Avances en Ciencias e Ingenierías, 2015, Vol. 7, No. 2, Pags. B30-B36*
- 
- B37–B51 ■** Reporte del 1er Censo Navideño de Aves de Quito, Ecuador / Report of the 1st. Christmas Bird Count of Quito, Ecuador  
*D. F. Cisneros-Heredia, X. Amigo, D. Arias, J. Arteaga, J. Bedoya, S. Espinosa F., E. Montenegro, G. Nazati, J. M. Carrión*  
*Avances en Ciencias e Ingenierías, 2015, Vol. 7, No. 2, Pags. B37-B51*

---

**B52–B60 ■**

Otra nueva especie de rana *Pristimantis* (Anura: Terrarana) de las estribaciones occidentales del Volcán Pichincha, Ecuador / Another new species of frog *Pristimantis* (Anura: Terrarana) in the western foothills of the Pichincha Volcano, Ecuador

*M. H. Yáñez-Muñoz, C. Reyes-Puig, P. Bejarano-Muñoz, S. R. Ron*  
*Avances en Ciencias e Ingenierías, 2015, Vol. 7, No. 2, Pags. B52-B60*

---

**B61–B74 ■**

Dos nuevas especies de ranas *Pristimantis* (Craugastoridae) de la cordillera de los Sacha Llanganatis, vertiente oriental de los Andes de Ecuador / Two new species of frogs *Pristimantis* (Craugastoridae) in the mountains of the Sacha Llanganatis, eastern slope of the Andes of Ecuador

*J. P. Reyes-Puig, C. Reyes-Puig, M. B. Pérez L., M. H. Yáñez-Muñoz*  
*Avances en Ciencias e Ingenierías, 2015, Vol. 7, No. 2, Pags. B61-B74*

---

**B75–B90 ■**

Alteraciones de coloración en el plumaje de aves silvestres del Ecuador / Alterations of coloration in the plumage of wild birds of Ecuador

*H. Cadena-Ortiz, D. Bahamonde-Vinueza, D. F. Cisneros-Heredia, G. Buitrón-Jurado*  
*Avances en Ciencias e Ingenierías, 2015, Vol. 7, No. 2, Pags. B75-B90*

---

## SECCIÓN C: INGENIERÍAS

**C1–C4 ■**

Transition between the dry and rainy season in Cumbayá (Ecuador): 2014 to 2015 comparison from observations at USFQ's Atmospheric Measurement Station (EMA) / Transición entre la estación seca y lluviosa en Cumbayá (Ecuador): comparación entre los años 2014 y 2015 a partir de las observaciones de la Estación de Mediciones Atmosféricas (EMA) de la USFQ

*M. Cazorla, J. Juncosa*  
*Avances en Ciencias e Ingenierías, 2015, Vol. 7, No. 2, Pags. C1-C4*

---

**C5–C11 ■**

Using a Multivariate Accommodation Model to Study Anthropometric Differences between Ethnic Groups in Ecuador / Uso de un Modelo de Alojamiento Multivariado para estudiar las Diferencias Antropométricas entre Grupos Étnicos en Ecuador

*J. J. Arichabala, X. M. Córdova, G. R. Mendieta*  
*Avances en Ciencias e Ingenierías, 2015, Vol. 7, No. 2, Pags. C5-C11*

---

**C12–C22 ■**

Spatial Variability of Water Retention Curve Fractal Dimension / Variabilidad Espacial de Dimensiones Fractales en Curvas de Retención de Agua

*S. De Bartolo, C. Fallico, M. F. Rivera-Velasquez, M. Veltri*  
*Avances en Ciencias e Ingenierías, 2015, Vol. 7, No. 2, Pags. C12-C22*

---

**C23–C28 ■**

Análisis y estudio de los efectos de la interferencia de co-canal sobre la tasa de error de bit media para sistemas con multiplexación espacial / Co-Channel Interference Effects on the Bit Error Rate of Spatial Multiplexing Systems

*J. Minango, C. de Almeida*  
*Avances en Ciencias e Ingenierías, 2015, Vol. 7, No. 2, Pags. C23-C28*

---

**C29–C43 ■**

Beyond main effects assumption in Conjoint Analysis: Comparison of Conjoint Value Analysis vs. Choice-based Conjoint. Statistical approach and construction of designs applied to New Product Development / Más allá de la Suposición de Efectos Principales en Análisis Conjunto: Comparación entre Análisis Conjunto Tradicional Vs. Análisis Conjunto Basado en Elección. Enfoque Estadístico y Construcción de Diseños Aplicado al Desarrollo de Nuevos Productos.

*A. Paredes, A. Enríquez, D. Navarrete*  
*Avances en Ciencias e Ingenierías, 2015, Vol. 7, No. 2, Pags. C29-C43*

---

**C44–C52 ■**

Métodos para homogenizar y rellenar datos de viento de la torre meteorológica del Parque Eólico Villonaco en Loja-Ecuador / Methods to homogenize and fill the wind data from the meteorological tower of Villonaco Wind Farm in Loja-Ecuador

*D. Jijón, J. Constante, M. Moya, G. Guerrón*  
*Avances en Ciencias e Ingenierías, 2015, Vol. 7, No. 2, Pags. C44-C52*

---

**C53–C60 ■**

Modelado matemático del equilibrio líquido vapor de mostos de *Agave cocui* / Mathematical modeling of vapor liquid equilibrium for must of *Agave cocui*

*M. C. Leal de Pérez, E. E. Pérez Camacho, H. A. Morán Guillén, W. J. Barrera Petit, O. Pérez Ones, A. García López*  
*Avances en Ciencias e Ingenierías, 2015, Vol. 7, No. 2, Pags. C53-C60*

---



- 
- C61–C68 ■** **NLOS Mitigation for Mobile Subscriber Positioning Systems By Weighting measures and Geometrical Restrictions / Mitigación de la Condición NLOS para Sistemas de Posicionamiento de Suscriptor Móvil usando Ponderación de Medidas y Restricciones geométricas**  
*R. Játiva E., D. Sánchez, J. Vidal*  
*Avances en Ciencias e Ingenierías, 2015, Vol. 7, No. 2, Pags. C61-C68*
- 
- C69–C79 ■** **Relaciones Proceso, Microestructura, Propiedades del Cromado Duro a Escala de Laboratorio / Relationships Process, Microstructure, Properties of Hard Chromium Plating in Laboratory**  
*J. D. Ordóñez, A. Valarezo*  
*Avances en Ciencias e Ingenierías, 2015, Vol. 7, No. 2, Pags. C69-C79*
- 
- C80–C85 ■** **Factor de emisión de CO<sub>2</sub> debido a la generación de electricidad en el Ecuador durante el periodo 2001 - 2004 / CO<sub>2</sub> emission factor for electricity generation in Ecuador during the period 2001 - 2014**  
*R. Parra*  
*Avances en Ciencias e Ingenierías, 2015, Vol. 7, No. 2, Pags. C80-C85*
- 
- C86–C94 ■** **Inventario de emisiones atmosféricas del tráfico vehicular en el Distrito Metropolitano de Quito. Año base 2012 / On-road traffic air pollutant emission inventory in the Distrito Metropolitano de Quito. Base year 2012**  
*D. Vega, L. Ocaña, R. Parra*  
*Avances en Ciencias e Ingenierías, 2015, Vol. 7, No. 2, Pags. C86-C94*
- 
- C95–C115 ■** **Determinación de elementos mayores en sedimentos provenientes de zonas afectadas por actividades petroleras en Ecuador / Analisis of major cations in bottom sediments from oil impacted Rivers, in the Ecuadorian Amazon**  
*C. G. Pérez Naranjo, L. Maurice, V. Ochoa-Herrera, F. López, D. A. Egas, C. Lagane, P. Besson*  
*Avances en Ciencias e Ingenierías, 2015, Vol. 7, No. 2, Pags. C95-C115*
- 
- C116–C123 ■** **Electronic Waste Recycling Campaign at Universidad San Francisco de Quito / Campaña de Reciclaje de Residuos Electrónicos en la Universidad San Francisco de Quito**  
*D. Dalgo, V. Ochoa-Herrera, G. Pérez, R. Parra, R. Peñafiel, M. Sáenz, A. Velasco*  
*Avances en Ciencias e Ingenierías, 2015, Vol. 7, No. 2, Pags. C116-C123*
- 
- C124–C129 ■** **A Simplified Analytical Method to Calculate the Lifting Condensation Level from a Skew-T Log-P Chart / Un Método Analítico para Calcular el Nivel de Condensación por Ascenso a partir de un Diagrama oblicuo-T log-P**  
*E. Muñoz, R. Mundaray, N. Falcón*  
*Avances en Ciencias e Ingenierías, 2015, Vol. 7, No. 2, Pags. C124-C129*
- 
- C130–C137 ■** **Estudio de la generación de gas metano a partir del agua residual del proceso de extracción de aceite crudo de palma en biodigestores experimentales / Methane gas generation from palm oil mill effluent in experimental biodigesters**  
*P. Garzón, V. Ochoa-Herrera, R. Peñafiel*  
*Avances en Ciencias e Ingenierías, 2015, Vol. 7, No. 2, Pags. C130-C137*
- 
- C138–C144 ■** **Brazo inalámbrico para procesos industriales de alto riesgo / Wireless arm to high risk industrial processes**  
*J. M. Orozco Ramos, C. J. Santillán Mariño*  
*Avances en Ciencias e Ingenierías, 2015, Vol. 7, No. 2, Pags. C138-C144*
-



## Nanoestructuras inusuales de ácidos nucleicos basados en ADN G-cuádruple

Miguel Angel Méndez<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Universidad San Francisco de Quito, Escuela de Medicina, Diego de Robles y Via Interoceánica, 17-1200- 841, Quito, Ecuador.

<sup>2</sup>Universidad San Francisco de Quito, Grupo de Química Computacional y Teórica (QCT-USFQ), Depto. Ing. Química, Diego de Robles y Via Interoceánica, 17-1200-841, Quito, Ecuador.

<sup>3</sup>Universidad San Francisco de Quito, Instituto de Simulación Computacional (ISC-USFQ), Diego de Robles, y Via Interoceánica, 17-1200-841, Quito, Ecuador.

\*Autor principal/Corresponding author, e-mail: mmendez@usfq.edu.ec

Editado por/Edited by: Cesar Zambrano, Ph.D.

Recibido/Received: 2015/06/10. Aceptado/Accepted: 2015/10/03.

Publicado en línea/Published on Web: 2015/12/30. Impreso/Printed: 2015/12/30.

### Unusual Nucleic acid nanostructures based on G-quadruplex DNA

#### Abstract

A nano-assembly based on non-canonical DNA structures is reported. For the nanofabrication of a DNA-based structure the self-assembly of guanine quadruplex (Hoogsteen base pairing) and double-stranded DNA (Watson-Crick base pairing) was exploited. In general, an important number of nanostructures have been built exploiting the base pairing capability of canonical double stranded DNA. There are alternative approaches for construction using other DNA elements such as G-quadruplex, I-motifs, or triplexes. As a proof of principle, we have previously reported the use of duplex DNA (short synthetic DNA oligonucleotides) with sections of miss paired sites able to mediate formation of tetramolecular sections (G-quadruplex DNA prove) in order to ensemble the components into high molecular weight structures. Gel electrophoresis as well as atomic force microscopy show the formation of nanofibers. Gel electrophoresis as well as circular dichroism gave evidence of the presence of G-quadruplex sections. From AFM we estimated that the structures lengths expand from 250 to 2,000 nm with heights from 0.45 to 4.0 nm. Here we present another example of such nanofibers. We suggest that similar methodologies can be used to build more complex nano-structures that will exploit the properties of different DNA nano-oddities into functional applications.

**Keywords.** Unusual nucleic acid assembly, nanofibers, G-quadruplexes, nano-oddity.

#### Resumen

Se reporta la preparación de un nano-ensamble basado en estructuras de ADN no canónico. Para la nanofabricación de una estructura basada en ADN el auto ensamblaje de ADN G-cuádruple (apareamiento de bases tipo Hoogsteen) y ADN de doble cadena (apareamiento de bases tipo Watson-Crick) fueron utilizados. En general, un número importante de nanoestructuras se han construido explotando la capacidad de apareamiento de bases del ADN canónico de doble cadena. Hay formas alternativas para construcción utilizando otros elementos de ADN tales como G-cuádruple, motivos I, o ADN de triple cadena. Como prueba de principio, previamente hemos reportado el uso de ADN de doble cadena (oligonucleótidos de ADN sintéticos cortos) con secciones de sitios no apareados capaz de mediar la formación de secciones tetramoleculares (pruebas G-cuádruple) con la finalidad de ensamblar los componentes en estructuras de alto peso molecular. Gel electroforesis como también microscopía de fuerza atómica muestran la formación de nanofibras. La electroforesis de Gel como el dicroísmo circular dan evidencia de la presencia de secciones G-cuádruple. De las imágenes de microscopía de fuerza atómica se estimó que el largo de las estructuras va de 250 a 2000 nm con altitud de 0.45 a 4.0 nm. Aquí presentamos otro ejemplo de tales nanofibras. Sugerimos que metodologías similares pueden ser usadas para construir nanoestructuras más complejas que saquen provecho de las propiedades de distintos nano-rarezas de ADN para aplicaciones capaces de realizar tareas útiles.

**Palabras Clave.** Ensamblajes inusuales de ácidos nucleicos, nanofibras, G-cuádruple, nanoestructuras inusuales.

#### Introducción

La Nanotecnología está rápidamente cambiando el paradigma de los sistemas de fabricación de una estrategia “top - down” a una estrategia “bottom-up” [1]. Estos

procesos que siguen la estrategia “bottom-up” explotan el “autoensamblaje” del material involucrado. Uno de tales materiales con la habilidad de auto ensamblarse es el ADN [2, 3]. La creación de sistemas molecu-

Abreviación Amortiguador	Composición	Uso
0.01-KMgTB	10 mM HCl, 1.0 mM MgCl <sub>2</sub> , 50mM Tris-borato, pH 8.0	Gel electroforesis nativa
0.01-TMgTB	10 mM CITMA, 1.0 mM MgCl <sub>2</sub> , 50 mM Tris-borato, pH 8.0	Preparación ADN doble cadena precursor; gel electroforesis nativa
1-KMgTB	1M KCl, 1.0 mM MgCl <sub>2</sub> , 50 mM Tris-borato, pH 8.0	Preparación de ADN cuádruple sinapsable

Tabla 1: Lista de Amortiguadores [13].

lares/nanosistemas capaces de realizar funciones complejas integrando múltiples componentes como es en el caso de toda nuestra tecnología basada en la estrategia tradicional top-down es aún un desafío tecnológico muy importante [1, 4]. Las principales limitaciones son la capacidad de diseñar sistemas que sin una inversión importante de energía o de manipulación excesiva puedan ensamblarse por sí mismos en un sistema capaz de realizar una función compleja. Por el momento aun estamos principalmente en la etapa de encontrar materiales que se auto ensamblan en estructuras dentro de la escala nanométrica que por sí mismos posean ya una aplicación tecnológica directa. Aquí presentamos un sistema multicomponente del mismo material (ADN) en lo que podría constituir los bloques de construcción de sistemas nanoscópicos funcionales basados en ADN en la frontera entre un sistema molecular y un nanosistema multi componente. Nuestro bloque de construcción básico consiste en ADN con un elemento de cadena doble con un segmento interno de varias guaninas contiguas en ambas cadenas y un segundo elemento constituido por extremos de cadena simple. Estos nucleótidos (en doble cadena) fueron incubados en solución amortiguadora con potasio y el biomaterial formó especies de alto peso molecular (nanofibras) que contienen segmentos de ADN G-cuádruple sin necesidad de ninguna otra manipulación adicional al control de la temperatura del medio usando un termociclador básico.

El ADN G-cuádruple es una molécula de ADN donde participan guaninas (G), que pueden estar en la misma cadena o en distintas cadenas, para formar una estructura estabilizada por enlaces de hidrógeno con cuatro Gs en un mismo plano, una tétrada (Ver Figura 1) [5]. Una molécula de ADN G-cuádruple tiene al menos dos de estos planos o tétradas apilados consecutivamente uno sobre el otro. La estructura además de ser estabilizada por los puentes de hidrógeno es estabilizada por cationes como sodio, o potasio que se encuentran alineados con el espacio en el centro de las cuatro guaninas (una especie de canal rodeado de cuatro átomos de oxígeno, uno por cada guanina) y aproximadamente centrado con respecto al eje longitudinal de la molécula entre dos tétradas consecutivas de ADN G-cuádruple [6]. En la literatura se ha reportado la fabricación de varias nanoestructuras basadas en ADN G-cuádruple [7, 8]. Uno de los posibles mecanismos de construcción es el auto apilamiento de unidades de G-cuádruple para formar estructuras aproximadamente cilíndricas y helicoidales. Se ha observado que oligonucleótidos (especialmente a

altas concentraciones) con varias guaninas consecutivas en su secuencia forman superestructuras donde múltiples bloques de G-cuádruple se auto apilan, ya sea de forma que un bloque se apila sobre el otro, o donde una de las cadenas del G-cuádruple se desalinea o desplaza un “peldaño” dejando una o más guaninas expuestas, permitiéndole ahora a esta subunidad interactuar con la subsiguiente unidad de G-cuádruple [9–11]. Recientemente, también se han caracterizados sistemas sencillos en los que se observa una región G-quadruplex y una región de ADN de doble cadena [12]. Sin embargo en todos estos sistemas el tipo de secuencias de ADN involucradas en el ensamblaje es limitado (en cuanto a posibilidad de combinación y uso de múltiples secuencias y complejidad de las secuencias). En el sistema propuesto en este artículo demostramos una metodología que no se restringe a una única secuencia de ADN pero que puede utilizar cualquier secuencia de ADN en tanto contenga una pequeña sección de bases guaninas consecutivas no apareadas en alguna región interna de la molécula. La exploración de sistemas cuyo ensamblaje se pueda guiar por un delicado control de la temperatura permitirá generalizar y ampliar el uso del ADN como material base para nanoestructuras parte de biosensores, nano máquinas y otras aplicaciones [2, 6].

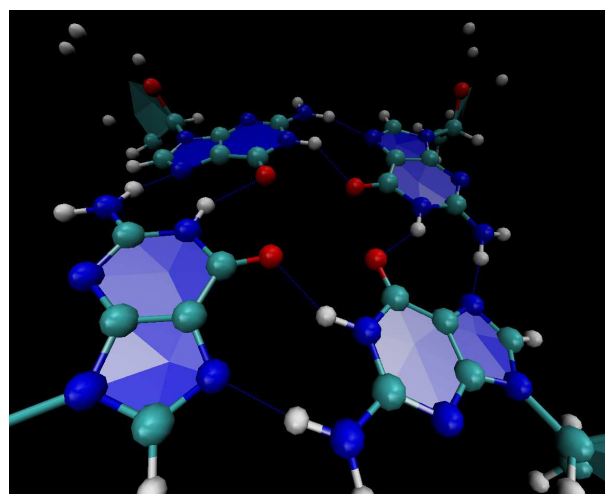


Figura 1: ADN G-cuádruple. Está formado por cuatro Guaninas en el mismo plano. La línea entrecortada azul muestra los puentes de hidrógeno tipo Hoogsteen (total ocho por plano). El ión central no se muestra. Se utilizó el programa VMD para preparar el gráfico.

Nombre	Largo	Secuencia 5' a 3'
C1A	39	ACAGTAGAGATGCTGCTGATTTCGTTTCATGTGCTTCAAGC
C1B		TGTCATCTCTACGACGACTAAGCAAGTACACGAAGTTTCG
SQ1A	39	CAGTAGAGATGCTGCTGAGGGGGGGTGTGCTTCAAGCG
SQ1B		CTCTACGACGACTGGGGGGGGACACGAAGTTTCGCTACTG
C2	29	TCTACGACGACTGGGGGGGGACACGAAGT

Tabla 2: Lista de secuencias utilizadas [6].

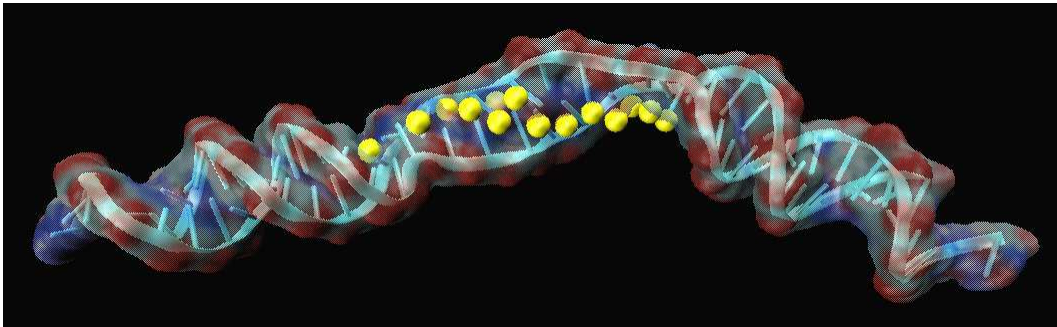


Figura 2: Visualización en New Cartoon y QuickSurf en VMD de un posible modelo tridimensional para el duplex formado por las secuencias SQ1A/SQ1B. Esferas amarillas corresponden a iones monovalentes en la región correspondiente a la región rica en Guaninas.

### Materiales y métodos

Todo los oligonucleótidos de ADN se adquirieron de Midlan Oligos (Midland, TX, USA) y fueron resuspendidos en agua purificada con un contenido de orgánicos totales menor a 34  $\mu\text{g/L}$  y resistividad de 18.2  $\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$ . Se utilizó cloruro de tetrametil amonio (CITMA), persulfato de amonio, mercaptoetanol,  $\text{MgCl}_2$ , KCl, tris (hidrometil) aminometano (TRIS), ácido bórico de grado bioquímico o equivalente. Los experimentos de gel electroforesis y microscopía de fuerza atómica se realizaron como fue previamente reportado por nosotros [13]. Las soluciones amortiguadoras que se utilizaron se reportan en la Tabla 1.

### Manejo del ADN

Las secuencias de ADN utilizado se muestran en la . Este ADN es sintético y viene en forma liofilizada por tanto fue necesario resuspenderlo en agua desionizada. Debido a la alta dependencia de la estructura de los G-cuádruple en la concentración e identidad de los cationes presentes se utilizó durante todo el trabajo agua o amortiguadores preparados en agua con un contenido de orgánicos totales menor a 34  $\mu\text{g/L}$  y resistividad de 18.2  $\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$  como se indicó anteriormente. El procedimiento para realizar precipitación con etanol de ADN es ligeramente distinto al usual utilizado en biología molecular porque para la preparación de el ADN de doble cadena precursor (“DNA sinapsable” [14, 15]) se necesita utilizar una sal que no promueve la formación de DNA G-cuádruple [6]. Para esto se utilizó una sal de aminas cuaternarias (2.5 M CITMA) [9]. Para los tratamientos térmicos se utilizó un termociclador básico que permite programar la velocidad de aumento/disminución de la temperatura. El DNA se diluyó en el amortiguador apropiado para la aplicación a realizar (Tabla 1). En general se utilizó un ADN de doble cadena con una sección de bases no apareadas constituidas por Guaninas

con la finalidad de estimular, en la presencia de iones de potasio, la formación de una estructura tetramolecular (DNA G-cuádruple). Un modelo aproximado del ADN precursor antes de ser sometido a la presencia de un amortiguador con potasio se muestra en la Figura 2. La lista completa de secuencias utilizadas incluyendo las secuencias control se encuentra en la Tabla 2.

### Gel electroforesis no desnaturalizante

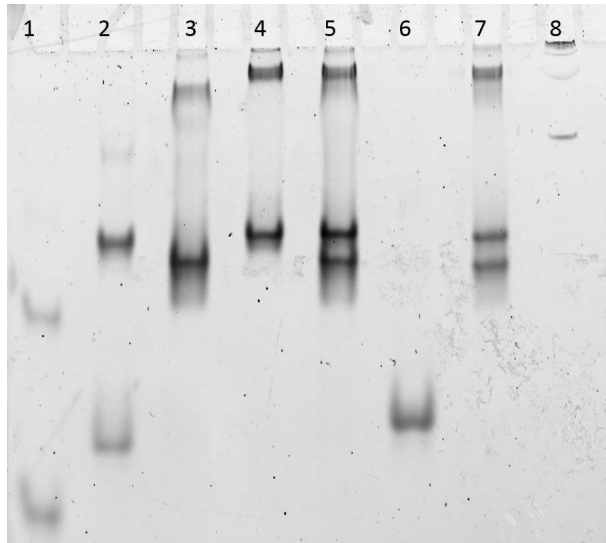
La electroforesis se realizó de acuerdo a procedimientos estándar [13]. En el caso de las muestras a analizar con ADN de doble cadena (Ej. SQ1A con su secuencia complementaria SQ1B) se incubaron en presencia de potasio. El potasio se conoce es un excelente estabilizador de secuencias G-cuádruple. En caso de formarse esta clase de estructuras la movilidad de las bandas se reducirá considerablemente cuando se compare con el ADN doble cadena original o con la movilidad de oligonucleótidos de cadena simple incapaces de formar secuencias G-cuádruple como la secuencia control C1A y C1B.

### Microscopía de Fuerza Atómica

El instrumento utilizado para obtener las imágenes fue un Veeco AFM Nanoscope V. Todas las imágenes fueron adquiridas en “Tapping mode”. A partir de las muestras utilizadas para la electroforesis de Gel nativa se prepararon las muestras para los análisis de AFM. Debido a que se necesitan altas concentraciones para la gel electroforesis se necesitó diluir con agua desionizada las muestras hasta concentraciones apropiadas para AFM (0.16  $\text{ng}/\mu\text{L}$ ). Como sustrato se utilizó un wafer de silicio (Silicon Valley Microelectronics, Inc. (Santa Clara, CA, USA).

### Construcción del modelo 3D de ADN

Se utilizó como punto de partida una estructura tipo cierre en base a la estructura depositada en el Protein Data



**Figura 3:** AGE gel (15 %) que muestra evidencia de formación de especies de alto peso molecular y de la formación de especies oligoméricas probablemente constituidas de G-cuádruple a partir de ADN de doble cadena preformado antes de exponer las muestras a 1 h de incubación en presencia de potasio (1- KMgTb).

Bank de código 376D [16]. Para la creación de la región de doble cadena se utilizó la herramienta en línea 3D-DART [17]. El ensamble de la estructura se usó utilizando herramientas del software VMD para la preparación del sistema, incluyendo adición de solvente, de contraiones, y condiciones de borde. Las figuras mostradas corresponden a los resultados de un proceso de optimización de geometría en presencia de solvente y iones.

### Resultados y Discusión

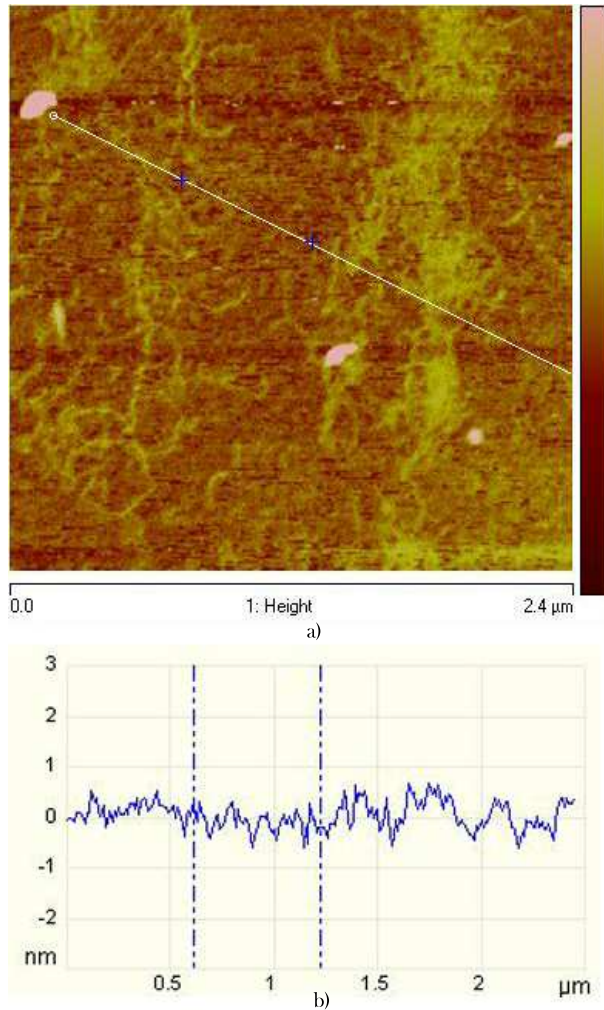
En resumen, se logró ensamblar nanofibras de ADN a partir de elementos de ADN que consistían de una hebra de doble cadena, con una sección desapareada rica en Guaninas en el centro de la estructura y dos terminales de cadena simple a cada lado de la estructura. Las distintas pruebas sugieren que el mecanismo de ensamblaje incluye intermediarios de estructura G-cuádruple. Para llegar a estas nanofibras, se siguió una secuencia cuidadosa de caracterización de cada elemento. Como primer control para explorar la formación de especies G-cuádruple se utilizó la secuencia C2 (ver Tabla 2) que se diseñó para ser complementaria a nuestra secuencia de prueba SQ1A (una de las dos secuencias que constituirá al final las nanofibras). C2 es un oligonucleotido que tiene 10 bases menos que la secuencia de prueba SQ1A. Por tanto la formación de especies G-cuádruple a partir de solo secuencias C2 y solo secuencias SQ1A se podrán fácilmente distinguir entre sí y de las formadas a partir de un intermediario de doble cadena SQ1A con C2. Por ejemplo la secuencia  $(C2)_4$  tendrá una movilidad en el gel distinta que la especie  $(C2)_3SQ1A$ . Esto nos permitió distinguir si las especies obtenidas se forman a través de lo que denominaremos la vía del ADN-sinapsable como intermediario versus la vía en la que

simplemente las cadenas se juntan al azar en la solución. La vía a través del ADN sinapsable es la ruta en que primero se forma un DNA de doble cadena entre dos cadenas complementarias (Ej SQ1A con SQ1B) y a continuación dos moléculas de ADN de doble cadena interactúan entre sí para formar una nueva especie tetramolecular. El nombre “DNA-sinapsable” se originó debido a que esta vía nos recuerda el proceso en biología denominado sinápsis durante la primera fase de la meiosis donde tenemos cuatro hebras de ADN interactuando [14, 15]. Si este proceso de formación vía intermediario de “ADN sinapsable” es el que se siguió durante la formación de nuestras nanofibras, no se pueden formar las especies tipo  $(C2)_3SQ1A$  como intermediarios pues esta combinación indicaría una unión al azar de las cadenas de ADN en la solución. Como se puede ver en la Figura 3 efectivamente no se observan bandas con movilidades que correspondan a especies tipo  $(C2)_3SQ1A$ . En la línea 2 se observan claramente dos bandas de mayor movilidad, la más rápida correspondería a la cadena simple y la siguiente muy posiblemente a una especie G-cuádruple del tipo  $(SQ1B)_4$ . Esta línea 2 nos puede servir de guía para interpretar las otras bandas. Adicionalmente vale señalar la presencia de bandas de movilidad menor en varias de las líneas del gel e incluso un poco de retención de ADN en los posillos lo que debería corresponder a las nanofibras o sus precursores oligoméricos de mayor tamaño/peso molecular que las cadenas simples de ADN o los correspondientes G-cuádruples. Finalmente es necesario señalar que las secciones de cadena simple en los extremos de los ADN precursores de doble cadena no son complementarios con ninguna secuencia de cadena simple libre en el ADN precursor. Sin embargo, se diseñó la secuencia de esta forma con la finalidad de en un futuro utilizar estos segmentos como puntos de anclaje o de unión a otros tipos de nanoestructuras en base a ADN.

El ADN fue teñido utilizando SByr Green I. Las muestras en el gel (Figura 3) en orden de izquierda a derecha incluyen línea 1.  $2.0 \mu\text{M}$  C2, línea 2.  $2.0 \mu\text{M}$  SQ1B, línea 3.  $1.0 \mu\text{M}$  duplex C2 + SQ1A, línea 4.  $1.0 \mu\text{M}$  de ADN de doble cadena SQ1, línea 5.  $1.0 \mu\text{M}$  C2 + SQ1A y  $1.0 \mu\text{M}$  SQ1, línea 6.  $2.0 \mu\text{M}$  C1 A. línea 7.  $2.40 \mu\text{M}$  C2 + SQ1A a y  $2.4 \mu\text{M}$  SQ1. Línea 8. 100 bp DNA ladder. El gel se corrió en  $0.10 \text{ KMgTb}$ , pH 7.8.

Una vez que se caracterizó los precursores de las nanofibras y dada la presencia de especies de alto peso molecular, posiblemente fibras o sus precursores, se procedió a adquirir imágenes de AFM para identificar la presencia de estas nanoestructuras así como caracterizar su morfología. Como se observa en la , una muestra en base a SQ1A y SQ1B a una concentración de  $0.0067 \mu\text{M}$  por cuádruple cadena, calentada a  $90^\circ\text{C}$  por 5 minutos y mantenida a  $50^\circ\text{C}$  por 72 h muestra la presencia de especies fibrilares. Bajo otras condiciones también hemos observado la formación de nanofibras [13]. Considerando que las unidades fundamentales solo tienen 39 nucleótidos, el tamaño de estas fibras indica el ensam-





**Figura 4:** Imagen de microscopía de fuerza atómica en modo “tapping” (a). Sección de la variación en altitud en la imagen a lo largo de la línea blanca (b). La muestra consiste en fibras basadas en G-cuádruple y dúplex, muestras incubadas por 72 h a 50 °C. La barra de escala corresponde a una distancia de 250 nm.

ble de varias decenas de unidades como constituyentes de estas nanofibras. No se escapa a nuestro diseño del esquema original que este material deja puertas abiertas y accesos para combinar las nanofibras con otros segmentos nanométricos en base a ADN u otros materiales como nanopartículas metálicas.

A futuro, se puede conseguir un control de la morfología final de las fibras a través de un control de la temperatura, identidad y concentración de iones en las soluciones amortiguadoras a usar potencialmente pueden controlar la longitud y número de fibras a formarse. Comparando los resultados que hemos reportado previamente [13], y las condiciones aquí descritas observamos que efectivamente un cambio en condiciones experimentales afecta profundamente la morfología (tamaño, distribución, longitud) de las nanofibras. Finalmente, considerando la potencial importancia de estructuras de autoensamblaje de ADN en nanotecnología [2, 18], los resultados reportados en el presente trabajo muestran una vía sencilla para combinar dos tipos muy distintos de estructuras en

base a ADN (con sus propias características y propiedades como biomateriales) en una misma nanoestructura. El método tiene potencial impacto para la nanofabricación de andamiaje para la creación de nanoestructuras funcionales más complejas.

### Agradecimientos

El autor agradece a Veronika Szalai en cuyo laboratorio (en UMBC) se realizaron los experimentos y a la facilidad de microscopía Keith R. Porter de University of Maryland, Baltimore County donde se analizaron las muestras por microscopía de fuerza atómica.

También se agradece a Dennisse Vallejo por la construcción del posible modelo 3D correspondiente a un DNA zipper con las secuencias SQ1A/SQ1B.

### Referencias

- [1] Ariga, K. 2015. “Nanoarchitectonics: a new materials horizon for nanotechnology”. *Materials Horizon*, 2(10): 406-413.
- [2] Chen, Y.; Groves, B.; Muscat, R.A.; Seeling, G. 2015. “DNA nanotechnology from test tube to cell”. *Nature Nanotechnology*, 10(9): 748-760.
- [3] Yang, D.; Hartman, M. R.; Derrien, T. L.; An, D.; Yancey, K. G.; Cheng, R.; Ma, M.; Luo, D. 2014. “DNA Materials: Bridging Nanotechnology and Biotechnology”. *Acc. Chem. Res.*, 47(6): 1902-1911.
- [4] Ouldrige, T. E. 2015. “DNA nanotechnology: understanding and optimisation through simulation”. *Molecular Physics*, 113(1): 1-15.
- [5] Neidel, S. 2009. “The structures of quadruplex nucleic acids and their drug complexes”. *Curr. Opin. Struct. Biol.*, 19(3): 239-250.
- [6] Bates, P.; Mergny, J. L.; Yang D. 2007. “Quartets in G-major. The First International Meeting on Quadruplex DNA”. *EMBO Rep, England*, 8: 1003-10.
- [7] Dutta, K.; Fujimoto, T.; Inoue, M.; Miyoshi, D.; Sugimoto, N. 2010. “Development of new functional nanostructures consisting of both DNA duplex and quadruplex”. *Chem. Commun.*, 46(41): 7772-7774.
- [8] Nakatsuka, K.; Shigeto, H.; Kuroda, A.; Funabashi, H. 2015 “A split G-quadruplex-based DNA nano-tweezers structure as a signal-transducing molecule for the homogeneous detection of specific nucleic acids”. *Biosens. Bioelectron.*, 15(74): 222-226.
- [9] Mendez, M. A.; Szalai, V. A. 2009. “Fluorescence of unmodified oligonucleotides: A tool to probe G-quadruplex DNA structure”. *Biopolymers*, 91(10): 841-850.
- [10] Miyoshi, D.; Karimata, H.; Wang, Z. M.; Koumoto K.; and Sugimoto N. 2007. “Artificial G-Wire Switches with 2,2'-Bipyridine Units Responsive to Divalent Metal Ions”. *J. Am. Chem. Soc.*, 129: 919-925.



- [11] Alberti, P.; Bourdoncle, A.; Sacca, B.; Lacroix, L. and Mergny, J. L. 2006. "DNA nanomachines and nanostructures involving quadruplexes". *Org. Biomol. Chem.*, 4: 3383-3391.
- [12] Fottichia, I.; Amato, J.; Pagano, B.; Novellino, E.; Petraccone, L.; Giancola, C. 2015. "How are thermodynamically stable G-quadruplex-duplex hybrids?". *J. Therm. Anal. Calorim.*, 121: 1121-1127.
- [13] Mendez, M. A and Szalai, V. A. 2013. "Synapsable quadruplex mediated fibers". *Nanoscale Research Letters*, 8: 210.
- [14] Fahlman, R. P.; Dipankar, Sen. 1999. "Synapsable DNA Double Helices: Self-Selective Modules for Assembling DNA Superstructures". *J. Am. Chem. Soc.*, 121(48): 11079-11085.
- [15] Fahlman, R. P.; Sen, D. 2010. "Cation-regulated self-association of "synapsable" DNA duplexes". *J. Mol. Biol.*, 280(2): 237-244.
- [16] Shepard, W.; Cruse, W. B.; Fourme, R.; de la Fortelle, E. and Prange, T. 1998. "A zipper-like duplex in DNA: the crystal structure of d(GCGAAAGCT) at 2.1 Å resolution". *Structure*, 6: 849-861.
- [17] van Dijk, M.; Bonvin, A. 2009. "3D-DART: a DNA structure modelling server". *Nucl. Acids Res.*, 37: W235-W239.
- [18] Sadhasivam, S. and Yun, K. 2010. "DNA self-assembly: prospectus and its future application". *Journal of Materials Science*, 45(10): 2543-2552.

## Edad del universo y la densidad de energía de la radiación

Antonina Calahorrano<sup>1</sup>, Carlos A. Marín<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Física, Colegio de Ciencias e Ingeniería, Universidad San Francisco de Quito

\*Autor principal/Corresponding author, e-mail: cmarin@usfq.edu.ec

Editado por/Edited by: Cesar Zambrano, PhD.

Recibido/Received: 2015/10/22. Aceptado/Accepted: 2015/11/01.

Publicado en línea/Published on Web: 2015/12/30. Impreso/Printed: 2015/12/30

### Age of the universe and the energy density of radiation

#### Abstract

From the mathematical expression relating the redshift parameter with time and the cosmological densities of matter, radiation and vacuum in the Lemaitre model, we have derived an equation for the age of the universe at present time taking into account the contribution of the radiation energy density (that generally is neglected in the calculations). Additionally we calculate the value of the redshift parameter in the transition age when matter and radiation decouple.

**Keywords.** general relativity, cosmology, Einstein, Friedmann, Lemaitre, redshift.

#### Resumen

Partiendo de la ecuación que relaciona el parámetro de corrimiento hacia el rojo con el tiempo y las densidades cosmológicas de materia, radiación y vacío en el modelo de Lemaitre, calculamos la edad del universo en el momento actual tomando en cuenta la contribución de la densidad de energía de la radiación (contribución que generalmente se desprecia en los cálculos). Adicionalmente calculamos el valor del parámetro de corrimiento hacia el rojo en la época de transición cuando materia y radiación se desacoplan.

**Palabras Clave.** relatividad general, cosmología, Einstein, Friedmann, Lemaitre, corrimiento hacia el rojo

### Introducción

En el año 1922, el físico y matemático ruso Alexander Friedmann, usando las ecuaciones de campo de Einstein, probó que el universo debería estar expandiéndose a cambio de que dos suposiciones básicas fueran ciertas: “El universo es isótropo y homogéneo” [1, 2, 3]. La primera suposición (isotropía) nos dice que a gran escala (a nivel de galaxias, cúmulos y supercúmulos de galaxias en el espacio profundo) el universo parece el mismo en cualquier dirección que se observe. La segunda hipótesis (homogeneidad) dice que lo mismo sería cierto para un observador ubicado en otra galaxia. El descubrimiento de Hubble en 1929 de que el universo se estaba expandiendo, fue de allí, un gran triunfo para la Teoría General de la Relatividad (T.G.R.).

La evidencia de la isotropía del universo a gran escala se dio en 1965 cuando dos científicos americanos que trabajaban para los laboratorios de la Bell Telephone en Nueva Jersey, Arno Penzias y Robert Wilson, descubrieron un ruido de fondo (en forma de radiación de microondas) que parecía venir de los confines del universo. Esta radiación tiene un espectro térmico con una tempe-

ratura del orden de 2,726 grados Kelvin. El ruido de fondo cósmico es prácticamente igual en todas direcciones. La existencia del ruido o radiación de fondo cósmico de microondas (cosmic microwave background radiation), es entonces, una confirmación extremadamente precisa de la primera hipótesis de Friedmann sobre la isotropía del universo a gran escala. Por su descubrimiento, Penzias y Wilson, recibieron el premio Nobel de Física en el año 1978.

No hay evidencia científica a favor de la segunda hipótesis (la homogeneidad del universo a gran escala). En palabras de Stephen Hawking: “confiamos en ella sólo por razones de modestia” [3].

Vemos entonces que nuestro lugar en el universo no es especial. Un observador en una estrella de una galaxia distante vería un universo muy similar al que observamos. A esta aseeración se la conoce como “principio cosmológico”. En otras palabras, en cualquier instante, el universo aparecería el mismo para todo observador, sin importar el lugar en que se encuentre.

En enero de 1998, el grupo que conforma el proyecto Supernova Cosmology Project, dirigido por Saul Perl-

ISSN 1390-5384



mutter [4, 5, 6, 2], dió a conocer los resultados de su análisis de la variación del parámetro de corrimiento hacia el rojo con respecto a la magnitud efectiva (brillo) de 42 supernovas distantes del tipo Ia (las supernovas más brillantes) recientemente descubiertas. Para sorpresa de todos, estas supernovas lucían más tenues de lo que se esperaba, de acuerdo con el modelo standard del universo, en el que la expansión es desacelerada. Sus observaciones parecen indicar que el ritmo de expansión del universo se está incrementando, es decir que el universo se está acelerando. Dichos resultados fueron confirmados por un grupo de investigación independientemente dirigido por Brian Schmidt (High-Z Supernova) [7]. Estas medidas son compatibles con un universo plano, en el que la constante cosmológica es diferente de cero. También dan soporte a la teoría de que el universo atravesó un periodo de violenta inflación, cuando la constante cosmológica dominó sobre los efectos gravitatorios dando paso a una fase de de Sitter de brevísima duración.

La métrica del espacio-tiempo que mejor describe la evolución del universo y está de acuerdo con el principio cosmológico es la de Friedmann-Lemaitre-Robertson-Walker FLRW [2, 8, 9, 10, 11, 1, 12]. En coordenadas esféricas  $r, \theta, \phi$  se escribe:

$$(ds)^2 = c^2 (dt)^2 - R^2(t) \left( \frac{(d\sigma)^2}{1 - K\sigma^2} + \sigma^2 (d\Omega)^2 \right) \quad (1)$$

donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío,  $R(t)$  es el factor de escala del universo que depende del tiempo cósmico  $t$  y es proporcional al tamaño del universo,  $\sigma = \frac{r}{R}$ .  $K$  es un parámetro independiente del tiempo que especifica la curvatura del universo y que puede ser  $K = 1$  para un universo curvado en forma parecida a la superficie de una esfera (universo cerrado),  $K = -1$  para un universo curvado en sentido contrario como la superficie de una silla de montar (universo abierto) y  $K = 0$  para un universo plano. Finalmente  $(d\Omega)^2 = (d\theta)^2 + \sin^2\theta (d\phi)^2$ .

En este modelo el universo es como un fluido perfecto en el que las galaxias serían algo así como las partículas de dicho fluido siguiendo el movimiento del mismo [8]. El tiempo cósmico está dado por relojes en reposo con respecto al fluido cósmico, sincronizados con el instante en el que la densidad y la temperatura del fluido alcanzan un cierto valor esperado. Entonces, usando dichos relojes sincronizados, el estado físico del universo dependerá del tiempo en la misma manera en cualquier lugar.

El cuadrado del elemento de arco  $(ds)^2$  se puede escribir:

$$(ds)^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu \quad (2)$$

donde el tensor métrico covariante está dado por la ma-

triz:

$$(g_{\mu\nu}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R^2}{1-K\sigma^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -R^2\sigma^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -R^2\sigma^2 \sin^2 \theta \end{pmatrix} \quad (3)$$

El tensor contravariante correspondiente es:

$$(g^{\mu\nu}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1-K\sigma^2}{R^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{R^2\sigma^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R^2\sigma^2 \sin^2 \theta} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Las ecuaciones de campo de Einstein son [7, 12, 17]:

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} + \lambda g_{\mu\nu} \quad (5)$$

con

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R^* g_{\mu\nu}.$$

$G$  es la constante de gravitación universal. En la anterior ecuación  $R^* = g^{\alpha\beta} R_{\alpha\beta}$ . A  $R_{\mu\nu}$  se le denomina tensor de Ricci, el cual se define a partir del Tensor de Riemann-Chirstoffel  $R^\mu_{\nu\rho\sigma}$  que determina la curvatura del espacio-tiempo.  $R_{\mu\nu} = R^\alpha_{\mu\alpha\nu}$  donde

$$R^\mu_{\nu\rho\sigma} = \frac{\partial}{\partial x^\rho} (\Gamma^\mu_{\nu\sigma}) - \frac{\partial}{\partial x^\sigma} (\Gamma^\mu_{\nu\rho}) + \Gamma^\mu_{\alpha\rho} \Gamma^\alpha_{\nu\sigma} - \Gamma^\mu_{\nu\rho} \Gamma^\alpha_{\alpha\sigma} \quad (6)$$

$\Gamma^\mu_{\rho\sigma}$  son los símbolos de Christoffel de segunda especie

$$\Gamma^\mu_{\rho\sigma} = \frac{1}{2} g^{\mu\alpha} \left( \frac{\partial g_{\rho\alpha}}{\partial x^\sigma} + \frac{\partial g_{\sigma\alpha}}{\partial x^\rho} - \frac{\partial g_{\rho\sigma}}{\partial x^\alpha} \right) \quad (7)$$

$\lambda$  es la constante cosmológica introducida por Einstein en 1917 y es una medida de la contribución a la densidad de energía del universo debido a fluctuaciones del vacío. El valor de dicha constante es  $|\lambda| < 3 \times 10^{-52}$  metros<sup>-2</sup> [2, 13, 14]. El término proporcional a  $\lambda$  en las ecuaciones de campo de Einstein ( ecuación 5) puede ser interpretado como un tensor efectivo de energía-momentum dado por [15, 16] (ver particle properties databooklet)

$$Tef_{\mu\nu} = \frac{c^4}{8\pi G} \lambda g_{\mu\nu} \quad (8)$$

Finalmente  $T_{\mu\nu}$  es el tensor energía momentum que para un fluido perfecto (como el fluido cosmológico) es

$$T_{\mu\nu} = \frac{(\rho + P)}{c^2} u_\mu u_\nu - P g_{\mu\nu} \quad (9)$$

donde  $\rho$  es la densidad de energía del universo y  $P$  es la presión del fluido cósmico.  $u_\mu$  es el cuadrivector velocidad que en un marco de referencia comovil es  $u_\mu = (c, 0, 0, 0)$ .

Los elementos no nulos del tensor energía momentum son:

$$T_{00} = \rho \quad (10)$$

$$T_{11} = \frac{PR^2}{1 - K\sigma^2} \quad (11)$$

$$T_{22} = PR^2\sigma^2 \quad (12)$$

$$T_{33} = PR^2\sigma^2 \sin^2 \theta. \quad (13)$$

Ya que la métrica es diagonal y el espacio es de máxima simetría [17],  $R_{\mu\nu} = 0$  si  $\mu \neq \nu$  [17]:

$$R_{\mu\nu} = R_{\mu\alpha\nu}^\alpha = -3Kg_{\mu\nu} = 0 \quad (\mu \neq \nu) \quad (14)$$

Las componentes diagonales del tensor de Ricci son:

$$R_{00} = -\frac{3\ddot{R}}{c^2 R} \quad (15)$$

$$R_{11} = \frac{R\ddot{R} + 2\left(\dot{R}\right)^2 + 2Kc^2}{c^2(1 - K\sigma^2)} \quad (16)$$

$$R_{22} = \frac{\sigma^2}{c^2} \left( R\ddot{R} + 2\left(\dot{R}\right)^2 + 2Kc^2 \right) \quad (17)$$

$$R_{33} = \frac{\sigma^2 \sin^2 \theta}{c^2} \left( R\ddot{R} + 2\left(\dot{R}\right)^2 + 2Kc^2 \right) \quad (18)$$

A partir de estas expresiones, podemos calcular fácilmente el escalar de Ricci  $R^*$ :

$$R^* = -\frac{6}{R^2 c^2} \left( R\ddot{R} + \left(\dot{R}\right)^2 + Kc^2 \right) \quad (19)$$

y las componentes 00 y 11 del tensor de Einstein:

$$G_{00} = \frac{3}{R^2 c^2} \left( \left(\dot{R}\right)^2 + Kc^2 \right) \quad (20)$$

$$G_{11} = -\frac{\left( 2R\ddot{R} + \left(\dot{R}\right)^2 + Kc^2 \right)}{c^2(1 - K\sigma^2)} \quad (21)$$

Introduciendo las componentes 00 y 11 del tensor de Einstein y del tensor energía cantidad de movimiento en las ecuaciones de campo de Einstein obtenemos las ecuaciones de Friedmann

$$H^2 = \left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 = \frac{8}{3}\pi\frac{G\rho}{c^2} - \frac{Kc^2}{R^2} + \frac{\lambda c^2}{3} \quad (22)$$

$$\frac{\ddot{R}}{R} = -\frac{4\pi G}{3c^2}(\rho + 3P) + \frac{\lambda c^2}{3} \quad (23)$$

donde  $H$  es el parámetro de Hubble que es una medida del ritmo de expansión del universo. Finalmente, ya que la derivada covariante del tensor energía-momentum es cero:

$$T^{\mu\nu}{}_{;\nu} = \frac{\partial T^{\mu\nu}}{\partial x^\nu} + \Gamma_{\alpha\nu}^\mu T^{\alpha\nu} + \Gamma_{\alpha\nu}^\nu T^{\mu\alpha} = 0 \quad (24)$$

tenemos, evaluando para  $\mu = 0$ , que

$$\dot{\rho} + 3\frac{\dot{R}}{R}(\rho + P) = 0 \quad (25)$$

Esta última relación también puede ser derivada a partir del primer principio de la termodinámica.

En la literatura [2, 14, 12, 18] se puede encontrar la expresión de la edad del universo en el modelo de Lemaitre (para un universo plano) calculada sin tomar en cuenta la contribución de la densidad de energía de la radiación. En el presente artículo calcularemos la edad del universo en un instante cualquiera y en particular en el momento actual teniendo en cuenta dicha contribución. Adicionalmente deduciremos una expresión para el valor del parámetro de corrimiento hacia el rojo en la época de transición cuando materia y radiación se desacoplaron aproximadamente 380000 años después de la Gran Explosión.

## 1 Ecuaciones de Friedmann y los parámetros cosmológicos

La ecuación de Friedmann (22) se puede escribir

$$H^2 = \left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 = \frac{8}{3}\pi\frac{G}{c^2}(\rho_m + \rho_r) - \frac{Kc^2}{R^2} + \frac{\lambda c^2}{3} \quad (26)$$

donde  $\rho_m$  y  $\rho_r$  representan la densidad de energía de la materia y la radiación, respectivamente.

En términos de los parámetros cosmológicos de densidad de materia, radiación y del vacío

$$\begin{aligned} \Omega_m &\equiv \frac{\rho_m}{\rho_c} = \frac{8\pi G\rho_m}{3H^2 c^2} \\ \Omega_r &\equiv \frac{\rho_r}{\rho_c} = \frac{8\pi G\rho_r}{3H^2 c^2} \\ \Omega_v &\equiv \frac{\rho_v}{\rho_c} = \frac{8\pi G\rho_v}{3H^2 c^2} = \frac{\lambda c^2}{3H^2} \end{aligned} \quad (27)$$

donde  $\rho_v$  es la densidad de energía del vacío [2, 18, 14], la ecuación (26) se puede escribir

$$\left(\dot{R}\right)^2 = \Omega_{mr} H^2 R^2 - Kc^2 + \Omega_v H^2 R^2 \quad (28)$$

donde  $\Omega_{mr} \equiv \Omega_m + \Omega_r$ . Recordando que  $\left(\dot{R}\right)^2 = H^2 R^2$ , a partir de (28) obtenemos:

$$Kc^2 = R^2 H^2 (\Omega_{mr} + \Omega_v - 1) \quad (29)$$

La ecuación (29) nos da el parámetro de curvatura del universo en función de las contribuciones al parámetro de densidad cosmológica, el factor de escala y el parámetro de Hubble. Observaciones del proyecto WMAP-9 y de Planck (2013) indican que el valor de la edad

del universo es de  $13.800 \pm 0.038$  Gyr, con un intervalo de confianza del 68 % y considerando el efecto BAO (Baryon Acoustic Oscillations)[19]. El modelo que es consistente con esta edad es el que propone  $K = 0$ , es decir, un universo plano. Reemplazando en (29), se ve claramente que:

$$\Omega_T \equiv \Omega_{mr} + \Omega_v = 1 \quad (30)$$

Siendo  $\Omega_T$  la densidad cosmológica total. Es evidente que (30) es válida también en el momento actual. Igualmente (29) en el momento actual se se puede escribir  $Kc^2 = H_0^2 R_0^2 (\Omega_{T0} - 1)$ .

Consideremos nuevamente la ecuación (25). Dicha expresión es válida para cualquiera de las densidades de energía (de materia, radiación o vacío). Asumamos una ecuación de estado de la forma  $P = \omega\rho$  donde  $\omega$  es una constante. Entonces, la ecuación (25) se puede escribir

$$\dot{\rho} + 3\frac{\dot{R}}{R}\rho(1 + \omega) = 0$$

Integrando esta ecuación obtenemos

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{R}{R_0}\right)^{-3(1+\omega)} \quad (31)$$

donde  $\rho_0$  y  $R_0$  representan la densidad y el factor de escala del universo en el momento actual, respectivamente.

Entonces para cada uno de los tipos de densidades:

$$\rho_m = \rho_{m0} \left(\frac{R}{R_0}\right)^{-3(1+\omega_m)} \quad (32)$$

$$\rho_r = \rho_{r0} \left(\frac{R}{R_0}\right)^{-3(1+\omega_r)} \quad (33)$$

$$\rho_v = \rho_{v0} \left(\frac{R}{R_0}\right)^{-3(1+\omega)} \quad (34)$$

donde  $\omega_m = 0$ ,  $\omega_r = \frac{1}{3}$  y  $\omega = -1,00 \pm 0,06$  [18]

Si  $K = 0$  y despreciamos la contribución de la densidad de energía de la radiación, la ecuación (28) se reduce a

$$(\dot{R})^2 = H^2 R^2 (\Omega_m + \Omega_v) \quad (35)$$

que se puede también escribir:

$$\begin{aligned} (\dot{R})^2 &= H_0^2 \left(\frac{R}{R_0}\right)^2 \left(\Omega_{m0} \frac{\rho_m}{\rho_{m0}} + \Omega_{v0}\right) \\ &= H_0^2 \left(\Omega_{m0} \frac{R_0}{R} + \left(\frac{R}{R_0}\right)^2 \Omega_{v0}\right) \end{aligned} \quad (36)$$

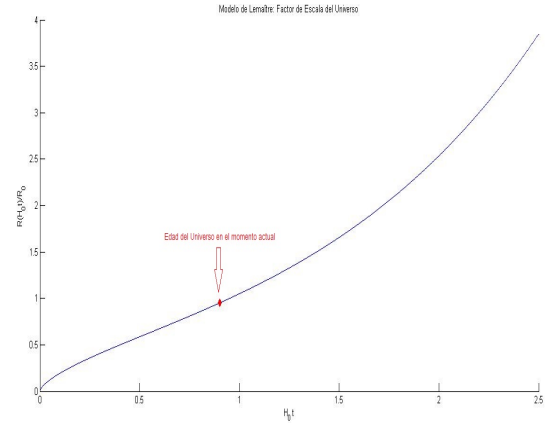


Figura 1: Factor de escala del universo como función del tiempo en el modelo de Lemaitre. En la figura se muestra la edad del universo en el momento actual

donde hemos usado la ecuación (32) con  $\omega_m = 0$ . La ecuación (36) se puede escribir utilizando separación de variables

$$\frac{R^{\frac{1}{2}} dR}{\left(R^3 + \frac{\Omega_{m0}}{\Omega_{v0}}\right)^{\frac{1}{2}}} = H_0 \Omega_{v0}^{\frac{1}{2}} dt \quad (37)$$

Esta expresión se puede integrar fácilmente haciendo el cambio de variable

$$R = \left(\frac{\Omega_{m0}}{\Omega_{v0}}\right)^{\frac{1}{3}} \sinh^{\frac{2}{3}} \theta, \quad (38)$$

el resultado es:

$$R(t) = R_0 \left(\frac{\Omega_{m0}}{\Omega_{v0}}\right)^{\frac{1}{3}} \sinh^{\frac{2}{3}} \left(\frac{3}{2} \Omega_{v0}^{\frac{1}{2}} H_0 t\right) \quad (39)$$

A partir de (39) podemos calcular la edad del universo en el momento actual  $t_{mv0}$  recordando que  $R(t_0) = R_0$ . El resultado es la conocida expresión [2, 12, 14, 18]

$$t_{mv0} = \frac{2}{3H_0 \Omega_{v0}^{\frac{1}{2}}} \ln \left(\frac{1 + \Omega_{v0}^{\frac{1}{2}}}{(1 - \Omega_{v0})^{\frac{1}{2}}}\right) \quad (40)$$

donde hemos usado  $\Omega_{m0} + \Omega_{v0} = 1$ . En la figura (1) se representa el factor de escala del universo en función del tiempo.

## 2 Parámetro de corrimiento hacia el rojo y la edad del universo

El parámetro de corrimiento hacia el rojo se define a través de la ecuación

$$z = \frac{\lambda' - \lambda}{\lambda} \quad (41)$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda de una línea espectral emitida por la fuente distante (dicha fuente es conocida en la Tierra), y  $\lambda'$  es la longitud de onda observada en

el espectro de la fuente de luz distante [2, 18, 20, 21]. Ahora, ya que:  $\lambda \propto R(t)$  y  $\lambda' \propto R(t_0)$  tenemos:

$$1 + z = \frac{R(t_0)}{R(t)} \quad (42)$$

Esto es equivalente a considerar que los eventos en galaxias cercanas se dilatan temporalmente acorde a cuánto el universo se ha expandido desde que el fotón que se observa fue emitido [21]. Esto es una consecuencia directa de la isotropía de la radiación de fondo cósmico.

Consideremos la expresión

$$\frac{8}{3}\pi G\rho = \frac{8}{3}\pi G(\rho_m + \rho_r + \rho_v)$$

que se puede escribir:

$$\frac{8}{3}\pi G\rho = \frac{8}{3}\pi G\left(\rho_{m0}\left(\frac{R_0}{R}\right)^3 + \rho_{r0}\left(\frac{R_0}{R}\right)^4 + \rho_{v0}\left(\frac{R_0}{R}\right)^{3(1+\omega)}\right) \quad (43)$$

donde  $R_0 = R(t_0)$ . En términos de los parámetros cosmológicos de densidad tenemos:

$$\frac{8}{3}\pi G\rho = H_0^2 c^2 \left(\Omega_{m0}\left(\frac{R_0}{R}\right)^3 + \Omega_{r0}\left(\frac{R_0}{R}\right)^4 + \Omega_{v0}\left(\frac{R_0}{R}\right)^{3(1+\omega)}\right) \quad (44)$$

Volviendo a la primera ecuación de Friedmann (22) y usando  $\lambda = \frac{8\pi G\rho_v}{c^4}$  tenemos que

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3c^2}(\rho_m + \rho_r + \rho_v) - \frac{Kc^2}{R^2} \quad (45)$$

Utilizando la ecuación (44) en la anterior ecuación tenemos que

$$H^2 = H_0^2 \left(\Omega_{m0}\left(\frac{R_0}{R}\right)^3 + \Omega_{r0}\left(\frac{R_0}{R}\right)^4 + \Omega_{v0}\left(\frac{R_0}{R}\right)^{3(1+\omega)}\right) - \frac{Kc^2}{R^2} \quad (46)$$

Introduciendo el valor de  $Kc^2$  dado en la expresión (29) (evaluado en el momento actual), (46) se escribe

$$H^2 = H_0^2 \left(\Omega_{m0}\left(\frac{R_0}{R}\right)^3 + \Omega_{r0}\left(\frac{R_0}{R}\right)^4 + \Omega_{v0}\left(\frac{R_0}{R}\right)^{3(1+\omega)} - (\Omega_{T0} - 1)\left(\frac{R_0}{R}\right)^2\right) \quad (47)$$

donde  $\Omega_{T0} = \Omega_{m0} + \Omega_{r0} + \Omega_{v0}$ . En términos del parámetro de corrimiento hacia el rojo (ver (42)) la ecuación (47) se transforma en:

$$H^2 = H_0^2 \left(\Omega_{m0}(1+z)^3 + \Omega_{r0}(1+z)^4 + \Omega_{v0}(1+z)^{3(1+\omega)} - (\Omega_{T0} - 1)(1+z)^2\right) \quad (48)$$

Derivando (42) con respecto al tiempo se obtiene:  $\dot{R} = -R_0 \frac{\dot{z}}{(1+z)^2}$ , por lo que  $H = \frac{\dot{R}}{R} = -\frac{\dot{z}}{1+z}$ . Usando estos valores:

$$\frac{dz}{dt} = -H_0(1+z) \left\{\Omega_{m0}(1+z)^3 + \Omega_{r0}(1+z)^4 + \Omega_{v0}(1+z)^{3(1+\omega)} - (\Omega_{T0} - 1)(1+z)^2\right\}^{\frac{1}{2}} \quad (49)$$

A partir de esta relación haciendo separación de variables podemos calcular la edad del universo en un instante  $t$  cualquiera:

$$t = -H_0^{-1} \int_{\infty}^z \frac{dz}{(1+z)} \times \frac{1}{\left\{\Omega_{mrv0}(z) - (\Omega_{T0} - 1)(1+z)^2\right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (50)$$

donde

$$\Omega_{mrv0}(z) = \Omega_{m0}(1+z)^3 + \Omega_{r0}(1+z)^4 + \Omega_{v0}(1+z)^{3(1+\omega)} \quad (51)$$

Para un universo plano ( $K = 0, \Omega_{T0} = 1$ ) tomando  $\omega = -1$ , la edad del universo en el momento actual se puede calcular a partir de la integral:

$$t_{mrv0} = -H_0^{-1} \int_{\infty}^0 dz \left(\frac{1}{(1+z)} \times \frac{1}{\left\{\Omega_{m0}(1+z)^3 + \Omega_{r0}(1+z)^4 + \Omega_{v0}\right\}^{\frac{1}{2}}}\right) \quad (52)$$

Si no tomamos en cuenta la contribución de la densidad de energía de la radiación la integral se reduce a

$$t_{mv0} = -\left(\frac{H_0^{-1}}{\Omega_{v0}^{\frac{1}{2}}}\right) \int_{\infty}^0 dz \left(\frac{1}{(1+z)} \times \frac{1}{\left(1 + \frac{\Omega_{m0}}{\Omega_{v0}}(1+z)^3\right)^{\frac{1}{2}}}\right), \quad (53)$$

y con el cambio de variable

$$1 + z = \left(\frac{\Omega_{v0}}{\Omega_{m0}}\right)^{\frac{1}{3}} \sinh^{\frac{2}{3}} \theta \quad (54)$$

la integral indefinida se transforma en

$$\int \frac{dz}{(1+z) \left\{ 1 + \frac{\Omega_{m0}}{\Omega_{v0}} (1+z)^3 \right\}^{\frac{1}{2}}} = \frac{2}{3} \ln \left( \frac{\sinh \theta}{1 + \cosh \theta} \right). \quad (55)$$

Introduciendo la última integral en (53) junto con la expresión (54) y recordando que  $\cosh \theta = (1 + \sinh^2 \theta)^{\frac{1}{2}}$  tenemos:

$$t_{mv0} = - \left( \frac{2H_0^{-1}}{3\Omega_{v0}^{\frac{1}{2}}} \right) \times \left( \ln \left( \frac{(1+z)^{\frac{3}{2}} \left( \frac{\Omega_{m0}}{\Omega_{v0}} \right)^{\frac{1}{2}}}{1 + \left( 1 + (1+z)^3 \left( \frac{\Omega_{m0}}{\Omega_{v0}} \right) \right)^{\frac{1}{2}}} \right) \right)_{\infty} \quad (56)$$

Recordando nuevamente que  $\Omega_{m0} + \Omega_{v0} = 1$ , obtenemos nuevamente la expresión (40).

### 3 Edad del universo considerando la contribución de la densidad de energía de la radiación

Considerando un universo plano ( $\Omega_{T0} = 1$ ) y tomando  $\omega = -1$ , la ecuación (50) se escribe:

$$t = -\frac{1}{H_0} \int_{\infty}^z \frac{dz}{(1+z)} \{ \Omega_{rm0}(z) + \Omega_{v0} \}^{-\left(\frac{1}{2}\right)} \quad (57)$$

donde

$$\Omega_{rm0}(z) = \Omega_{m0}(1+z)^3 + \Omega_{r0}(1+z)^4. \quad (58)$$

(57) también se puede escribir

$$t = -\frac{1}{H_0} \int_{\infty}^z dz \left( \frac{1}{(1+z) (\Omega_{m0}(1+z)^3 + \Omega_{v0})^{\frac{1}{2}}} \times \frac{1}{\left\{ 1 + \frac{\Omega_{r0}(1+z)^4}{\Omega_{m0}(1+z)^3 + \Omega_{v0}} \right\}^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (59)$$

Sin embargo, como  $\Omega_{r0}$  sigue siendo mucho menor que las otras dos densidades cosmológicas, se puede utilizar la aproximación a primer orden en serie de Taylor  $(1 + \varepsilon)^\alpha \approx 1 + \alpha\varepsilon$  por lo que

$$t \approx -\frac{1}{H_0} \int_{\infty}^z \frac{\left\{ 1 - \frac{1}{2} \frac{\Omega_{r0}(1+z)^4}{\Omega_{m0}(1+z)^3 + \Omega_{v0}} \right\} dz}{(1+z) (\Omega_{m0}(1+z)^3 + \Omega_{v0})^{\frac{1}{2}}} \quad (60)$$

Esta expresión puede ser separada en dos términos:

$$t \approx t_{mv} + \frac{1}{2H_0} \int_{\infty}^z dz \left( \frac{\Omega_{r0}(1+z)^3}{(\Omega_{m0}(1+z)^3 + \Omega_{v0})^{\frac{3}{2}}} \right) \quad (61)$$

donde

$$t_{mv} = -\frac{1}{H_0} \int_{\infty}^z dz \frac{1}{(1+z) (\Omega_{m0}(1+z)^3 + \Omega_{v0})^{\frac{1}{2}}} \quad (62)$$

que también se puede escribir

$$t \approx t_{mv} + \frac{\Omega_{r0}}{2H_0\Omega_{v0}^{\frac{3}{2}}} \int_{\infty}^z \frac{(1+z)^3 dz}{\left( \frac{\Omega_{m0}}{\Omega_{v0}} (1+z)^3 + 1 \right)^{\frac{3}{2}}} \quad (63)$$

Realizando el cambio de variable  $v = \left( \frac{\Omega_{m0}}{\Omega_{v0}} \right)^{\frac{1}{3}} (1+z)$ ,

el diferencial de  $v$  es  $dv = \left( \frac{\Omega_{m0}}{\Omega_{v0}} \right)^{\frac{1}{3}} dz$ . Se ve claramente que cuando  $z \rightarrow \infty$  entonces  $v \rightarrow \infty$ . Si queremos calcular la edad del universo en el momento actual, entonces debemos hacer el parámetro de corrimiento hacia el rojo igual a cero. Se tiene entonces:  $v_0 = \left( \frac{\Omega_{m0}}{\Omega_{v0}} \right)^{\frac{1}{3}}$ :

$$t_0 \approx t_{mv0} + \frac{\Omega_{r0}}{2H_0\Omega_{v0}^{\frac{3}{2}}} \left( \frac{\Omega_{v0}}{\Omega_{m0}} \right)^{\frac{4}{3}} \times \left( \frac{\Omega_{m0}}{\Omega_{v0}} \right)^{\frac{1}{3}} \int_{\infty}^{\frac{v_0}{(v^3+1)^{\frac{3}{2}}}} \frac{v^3 dv}{(v^3+1)^{\frac{3}{2}}} \quad (64)$$

donde  $t_{mv0}$  está dado por la ecuación (40). La última integral se puede dividir en dos integrales que se pueden resolver sólo de manera numérica:

$$t_0 \approx t_{mv0} + \frac{\Omega_{r0}}{2H_0\Omega_{v0}^{\frac{3}{2}}} \left( \frac{\Omega_{v0}}{\Omega_{m0}} \right)^{\frac{4}{3}} \times \left[ \int_{\infty}^{\left( \frac{\Omega_{m0}}{\Omega_{v0}} \right)^{\frac{1}{3}}} \frac{dv}{(v^3+1)^{\frac{1}{2}}} - \int_{\infty}^{\left( \frac{\Omega_{m0}}{\Omega_{v0}} \right)^{\frac{1}{3}}} \frac{dv}{(v^3+1)^{\frac{3}{2}}} \right] \quad (65)$$

Reemplazando el valor de  $t_{mv0}$ , se encuentra el valor analítico de la edad del universo en el momento actual considerando la contribución de todas las densidades cosmológicas:

$$t_0 \approx \frac{2}{3} \frac{1}{H_0\Omega_{v0}^{\frac{1}{2}}} \ln \left( \frac{(\Omega_{v0} + \Omega_{m0})^{\frac{1}{2}} + \Omega_{v0}^{\frac{1}{2}}}{\Omega_{m0}^{\frac{1}{2}}} \right) + \frac{\Omega_{r0}}{2H_0\Omega_{v0}^{\frac{3}{2}}} \left( \frac{\Omega_{v0}}{\Omega_{m0}} \right)^{\frac{4}{3}} \left[ \int_{\infty}^{\left( \frac{\Omega_{m0}}{\Omega_{v0}} \right)^{\frac{1}{3}}} \frac{dv}{(v^3+1)^{\frac{1}{2}}} - \int_{\infty}^{\left( \frac{\Omega_{m0}}{\Omega_{v0}} \right)^{\frac{1}{3}}} \frac{dv}{(v^3+1)^{\frac{3}{2}}} \right] \quad (66)$$



Considerando que  $\Omega_{m0} + \Omega_{v0} \approx 1$  y tomando el valor principal de  $\Omega_{v0} = 0,685$  [14, 19] el valor de las integrales es, calculado con la ayuda de Wolfram Alpha:

$$t_0 \approx \frac{2}{3} \frac{1}{H_0 \Omega_{v0}^{\frac{1}{2}}} \ln \left( \frac{1 + \Omega_{v0}^{\frac{1}{2}}}{\Omega_{m0}^{\frac{1}{2}}} \right) - \frac{\Omega_{r0}}{2H_0 \Omega_{v0}^{\frac{3}{2}}} \left( \frac{\Omega_{v0}}{\Omega_{m0}} \right)^{\frac{4}{3}} [1,805841]. \quad (67)$$

En la tabla (1) se muestran valores numéricos de algunas edades del universo variando el parámetro  $H_0$ , y consecuentemente también  $\Omega_{r0}$ , con  $\Omega_{v0} = 0,685$  y  $\Omega_{m0} = 0,315$  [22]. Nótese que la corrección es relevante ya en el tercer decimal... ¡La corrección es del orden de los millones de años!

#### 4 Cálculo del parámetro de corrimiento hacia el rojo en la época de transición

En un momento en la vida del universo temprano ocurrió una transición en donde el dominio de la densidad cosmológica de la materia siguió al dominio de la densidad correspondiente a la radiación. Durante la transición, sin embargo, existió un momento en el cual la densidad de energía de materia fue igual a la densidad de energía de la radiación, mientras que en comparación la densidad de energía del vacío era completamente despreciable. Al parámetro de corrimiento hacia el rojo evaluado en ese momento lo llamaremos  $z_{eq}$ , y ocurrió aproximadamente 380000 años después de la Gran Explosión [23, 2]. Usaremos de nuevo la ecuación (50) con el límite superior de la integral igual a  $z_{eq}$ ,  $\Omega_{v0} = 0$ ,  $\Omega_{T0} = 1$  y definiendo el parámetro  $b = \frac{\Omega_{r0}}{\Omega_{m0}}$ :

$$t_{eq} = - \int_{\infty}^{z_{eq}} \frac{dz}{H_0 \Omega_{m0}^{\frac{1}{2}} (1+z)^{\frac{5}{2}} \{1+b(1+z)\}^{\frac{1}{2}}}. \quad (68)$$

Se usa el cambio de variable  $u = 1+z$ , con lo cual  $u_{eq} = 1+z_{eq}$  y por lo tanto

$$t_{eq} = - \frac{1}{H_0} \int_{\infty}^{u_{eq}-1} \frac{1}{\Omega_{m0}^{\frac{1}{2}}(u)^{\frac{5}{2}} \{1+bu\}^{\frac{1}{2}}} du$$

Esta integral tiene solución analítica, la cual es, en términos de  $z$ :

$$t_{eq} = - \frac{1}{H_0 \Omega_{m0}^{\frac{1}{2}}} \frac{2\sqrt{1+b(1+z)} (2b(1+z) - 1)}{3(1+z)^{\frac{3}{2}}} \Big|_{\infty}^{z_{eq}}$$

Evaluando en los límites:

$\Omega_{m0}$	$t_{eq}$ [yr]	$H_0$ [Km/ (s Mpc)]	$z_{eq}$
0.315	380000	65.3	908.77534
0.315	380000	66.3	899.60412
0.315	380000	67.3	890.66059
0.315	380000	68.3	881.93584
0.315	380000	69.3	873.42142

Tabla 2: Valores numéricos de  $z_{eq}$  para diversos  $H_0$  y  $\Omega_{m0}$  experimentales[14, 19].

$$t_{eq} = - \frac{1}{H_0 \Omega_{m0}^{\frac{1}{2}}} \left[ \frac{2\sqrt{1+b(1+z_{eq})}(2b(1+z_{eq}))}{3(1+z_{eq})^{\frac{3}{2}}} - \frac{4b^{\frac{3}{2}}}{3} - \frac{2\sqrt{1+b(1+z_{eq})}}{3(1+z_{eq})^{\frac{3}{2}}} \right] \quad (69)$$

Sin embargo, Lo que se quiere es encontrar  $z_{eq}$  en función del tiempo de equilibrio. La última relación se puede escribir:

$$\frac{3}{2} H_0 \Omega_{m0}^{\frac{1}{2}} \left[ \frac{1}{H_0 \Omega_{m0}^{\frac{1}{2}}} \frac{4b^{\frac{3}{2}}}{3} - t_{eq} \right] = [2b(1+z_{eq}) - 1] \left[ \sqrt{\frac{1+b(1+z_{eq})}{(1+z_{eq})^3}} \right]. \quad (70)$$

Ya que  $b = \frac{\Omega_{r0}}{\Omega_{m0}} = \frac{\rho_{r0}}{\rho_{m0}}$ , y  $\rho_r = \rho_r \left(\frac{R_0}{R}\right)^4$ ,  $\rho_m = \rho_{m0} \left(\frac{R_0}{R}\right)^3$  entonces  $b = \frac{R}{R_0} \frac{\rho_r}{\rho_m}$ . Por otro lado, recordando que  $R = \frac{R_0}{1+z}$ , tenemos que  $b = \frac{1}{1+z} \frac{\rho_r}{\rho_m}$ . En el momento en que las densidades de energía de materia y radiación son iguales podemos escribir  $b_{eq} = \frac{1}{1+z_{eq}}$ . Reemplazando esto en la ecuación (70):

$$\frac{3}{2} H_0 \Omega_{m0}^{\frac{1}{2}} \left[ \frac{1}{H_0 \Omega_{m0}^{\frac{1}{2}}} \frac{4}{3(1+z_{eq})^{\frac{3}{2}}} - t_{eq} \right] = \left[ \sqrt{\frac{2}{(1+z_{eq})^3}} \right]. \quad (71)$$

De la última ecuación obtenemos:

$$z_{eq} = \left[ \frac{2(2-\sqrt{2}) H_0^{-1} (\Omega_{m0})^{-\frac{1}{2}}}{3t_{eq}} \right]^{\frac{2}{3}} - 1 \quad (72)$$

En la tabla (2) se encuentran valores del parámetro de corrimiento hacia el rojo en el momento en que las densidades de energía de la materia y de la radiación eran iguales para diversos  $H_0$ .

## 5 Conclusiones

La Teoría General de la Relatividad (TGR) se resume en 14 ecuaciones: Las ecuaciones de campo de Einstein (10

$\Omega_{r0}$	$H_0[\text{Km}/(\text{s Mpc})]$	$t_0[\text{Gyr}]$	Corr.[Gyr]	$t_{mv0}[\text{Gyr}]$
$5.792 \times 10^{-5}$	65.3	14.24778	0.00389	14.25167
$5.619 \times 10^{-5}$	66.3	14.03299	0.00372	14.03671
$5.453 \times 10^{-5}$	67.3	13.82459	0.00355	13.82814
$5.294 \times 10^{-5}$	68.3	13.62228	0.00340	13.62568
$5.143 \times 10^{-5}$	69.3	13.42580	0.00325	13.42906

**Tabla 1:** Valores de la edad del universo tanto para un universo en donde se considera la contribución de la densidad cosmológica de radiación ( $t_0$ ) como para uno en el que no ( $t_{mv0}$ ) para diversos valores de la constante de Hubble. Los valores experimentales han sido tomados de [19].

ecuaciones) y las ecuaciones de las geodésicas (4 ecuaciones) [2, 8, 10]. Utilizando las ecuaciones de campo, se puede determinar la métrica del espacio-tiempo para una distribución dada de materia o energía. Por ejemplo, la geometría del espacio-tiempo de un universo isótropo y homogéneo en expansión está dada por la métrica de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker. La mencionada métrica, al ser introducida en las ecuaciones de campo de Einstein, da origen a las ecuaciones de Friedmann. En el caso del modelo de Lemaitre para un universo plano ( $K = 0$ ), a partir de dichas ecuaciones, se puede calcular como el factor de escala del universo varía en el transcurso del tiempo y deducir una expresión para la edad del universo sin tomar en cuenta la contribución de la densidad de energía de la radiación.

La densidad cosmológica debido a la radiación es cuatro órdenes de magnitud menor a las correspondientes a la materia y al vacío. No es sorprendente entonces que el término que considera la densidad de energía de radiación sea despreciado generalmente en comparación con las otras dos densidades de energía. Sin embargo, en aras de analizar el modelo de Lemaitre en forma más completa, hemos calculado la corrección a primer orden dada al considerar la contribución debido a la densidad cosmológica de la radiación.

La expresión analítica de la edad del universo en el momento actual la hemos calculado a partir de una ecuación que relaciona el tiempo con el parámetro de corrimiento hacia el rojo y las densidades cosmológicas (ver ecuación 50). En primer orden, el valor analítico de la edad del universo en el momento actual tomando en cuenta la contribución de todas las densidades de energía es: (ver ecuación 66)

$$t_0 \approx \frac{2}{3} \frac{1}{H_0 \Omega_{v0}^{\frac{1}{2}}} \ln \left( \frac{(\Omega_{v0} + \Omega_{m0})^{\frac{1}{2}} + \Omega_{v0}^{\frac{1}{2}}}{\Omega_{m0}^{\frac{1}{2}}} \right) + \frac{\Omega_{r0}}{2H_0 \Omega_{v0}^{\frac{3}{2}}} \left( \frac{\Omega_{v0}}{\Omega_{m0}} \right)^{\frac{4}{3}} \left[ \int_{\infty}^{\left( \frac{\Omega_{m0}}{\Omega_{v0}} \right)^{\frac{1}{3}}} \frac{dv}{(v^3 + 1)^{\frac{1}{2}}} - \int_{\infty}^{\left( \frac{\Omega_{m0}}{\Omega_{v0}} \right)^{\frac{1}{3}}} \frac{dv}{(v^3 + 1)^{\frac{3}{2}}} \right]$$

El primer término de la suma representa la edad del universo en el modelo donde se desprecia la contribución

de la radiación y que se puede encontrar en la literatura (ver referencia [2, 18, 14, 12]), mientras el segundo término representa la corrección debido precisamente a dicha radiación. Nótese que el segundo término es directamente proporcional a  $\Omega_{r0}$ , el cual es del orden de  $10^{-5}$ . Por lo tanto, la magnitud de la corrección es efectivamente pequeña en comparación con el término principal. En la tabla (1) se muestran algunos valores para la edad del universo en el momento actual para ciertos valores del parámetro de Hubble  $H_0$  y la densidad cosmológica de la radiación  $\Omega_{r0}$ . La corrección está entre los  $0,00325[\text{Gyr}]$  para el valor superior de  $H_0$ , y los  $0,00389[\text{Gyr}]$  para el valor inferior de  $H_0$ . La contribución de la radiación disminuye en aproximadamente tres millones de años la edad del universo en el momento actual.

Adicionalmente calculamos el valor del parámetro de corrimiento hacia el rojo ( $z_{eq}$ ) en el momento en que la densidad de energía de la materia se hizo igual a la densidad de energía de la radiación, es decir cuando materia y radiación se desacoplaron y el universo se hizo transparente a la luz. Para ello se utilizó la ecuación (50) despreciando el valor de la densidad cosmológica del vacío. Ya que se tiene una buena estimación de la edad del universo cuando existió este equilibrio entre materia y radiación ( $t_{eq} \approx 380000$  años), el valor de  $z_{eq}$  resultó ser (ver ecuación 72)

$$z_{eq} = \left[ \frac{2(2 - \sqrt{2}) H_0^{-1} (\Omega_{m0})^{-\frac{1}{2}}}{3t_{eq}} \right]^{\frac{2}{3}} - 1$$

En la tabla (2) se ilustran los valores de  $z_{eq}$  para diferentes valores del parámetro de Hubble  $H_0$ . Vemos que aproximadamente, el parámetro de corrimiento hacia el rojo para dicha época era alrededor de 900.

### Referencias

- [1] Weinberg, S. 2008. "Cosmology" Oxford University Press.
- [2] Marn, C. 2011. "La Expansión del Universo, Una Introducción a Cosmología, Relatividad General y Física de Partículas, Segunda Edición", USFQ, Quito-Ecuador.
- [3] Hawking, S. 1998. "A Brief History of Time", Bantam Books.
- [4] Perlmutter, S. et al. 1998. "Discovery of a supernova explosion at half the age of the universe", Nature 391, p. 51.

- [5] Perlmutter, S. et al. 1999. “*Measurements of  $\Omega$  and  $\Lambda$  from 42 high-redshift Supernovae*”, *Astrophys.J.* 517, p. 565-586.
- [6] Perlmutter, S. 2003. “*Supernovae, Dark Energy, and the Accelerating Universe*”, *Physics Today* 56 (4), p. 53-59.
- [7] Schmidt, B. et al. 1998. “*High-Z-Supernova Search*”, *Astrophys. J.* 507, p.46
- [8] Kenyon, I. R. 1996. “*General Relativity*”. Oxford University Press, Oxford , UK.
- [9] Ohanian, H. C. 1976. “*Gravitation and Spacetime*”. W. W. Norton Company, Inc.
- [10] Misner, C. W.; Thorne, K.S. and Wheeler, J. A. 1973. “*Gravitation*”, W. H. Freeman & Company, NY, NY.
- [11] Cheng, T. P. 2005. “*Relativity, Gravitation and Cosmology. A Basic Introduction*”, Oxford University Press.
- [12] Kolb, E. W., Turner, M. S. 1994. “*The Early Universe*”, Addison Wesley.
- [13] Marín, C. 2001. “*El Origen del Universo*”, Producciones Digitales Abya-Yala.
- [14] Olive, K. A. et al. (Particle Data Group) 2014. “*Review of Particle Physics*”, *Chinese Physics C.* 38, No.9.
- [15] Gliner, E. B. 1966. *Sov. Phys. JETP.* 22.
- [16] Zeldovich, Y. B. 1968. *Sov. Phys. USP.* 11.
- [17] Weinberg, S. 1972. “*Gravitation and Cosmology*”, John Wiley Sons, Inc.
- [18] Hobson, M. P. , Efstathiou, G. P. and Lasenby, A. N. 2006. “*General Relativity. An Introduction for Physicists*”, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [19] Ade, P. A. R. et al. (Planck Collaboration). 2014. “*Planck 2013 results. XVI. Cosmological Parameters*”, arXiv:1303.5076(astro-ph.CO).
- [20] Hoyng, P. 2006. “*Relativistic Astrophysics and Cosmology, A primer*”, Springer Verlag.
- [21] Peacock, J. A. 1999. “*Cosmological Physics*”, Cambridge University Press.
- [22] Lahav, O. , Liddle, A. R. 2014. “*The Cosmological Parameters*”, *Chinese Physics C.* 38, No.9, p. 345-352.
- [23] Guth, A. H. 1997. “*The Inflationary Universe*”, Addison Wesley.



## The role of aerobic respiration in the life cycle of *Escherichia coli*: Public health implications

Gabriela Vasco<sup>1</sup>, Thea Spindel<sup>1</sup>, Sara Carrera<sup>1</sup>, Anne Grigg<sup>1</sup>, Gabriel Trueba<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Microbiology Institute, Universidad San Francisco de Quito, Quito, Ecuador.

\*Autor principal/Corresponding author, e-mail: gtrueba@usfq.edu.ec

Editado por/Edited by: Diego F. Cisneros-Heredia, Ph.D.(c)

Recibido/Received: 2015/06/02. Aceptado/Accepted: 2015/10/05.

Publicado en línea/Published on Web: 2015/12/30. Impreso/Printed: 2015/12/30.

### Abstract

The anaerobic intestinal setting of warm-blooded animals is considered *E. coli*'s main habitat. However *E. coli* transmission to new hosts requires the release of bacterial cells to an aerobic environment; we postulate that *E. coli* uses aerobic respiration to multiply in fecal matter during this phase of the cycle. To test this idea, we incubated fresh chicken fecal matter in aerobic and anaerobic settings and showed that *E. coli* counts increased significantly when fecal matter was incubated in the presence of oxygen. Our results suggest that aerobic growth in fecal matter outside of the host may be a crucial phase of *E. coli*'s natural cycle. This feature may extend to pathogenic members of the Enterobacteriaceae family.

**Keywords.** *Escherichia coli*, aerobic respiration, fecal matter, environment.

## El rol de la respiración aeróbica en el ciclo de vida de *Escherichia coli*: Implicaciones para la salud pública

### Resumen

Se piensa que el hábitat principal de *E. coli*, es anaerobio (los contenidos intestinales de animales de sangre caliente). Sin embargo la transmisión de *E. coli* de un hospedador a otro requiere la eliminación de esta bacteria (por medio de las heces) a un medio rico en oxígeno. Nosotros proponemos que *E. coli* usa la respiración aerobia para multiplicarse masivamente en las heces. Para probar esta hipótesis nosotros incubamos heces fecales de aves en presencia y ausencia de oxígeno. Nuestros resultados sugieren que el crecimiento aerobio en las heces es una parte crucial en el ciclo natural de esta bacteria. Esta característica puede ser común a otros miembros de la familia Enterobacteriaceae.

**Palabras Clave.** *Escherichia coli*, respiración aeróbica, heces fecales, ambiente.

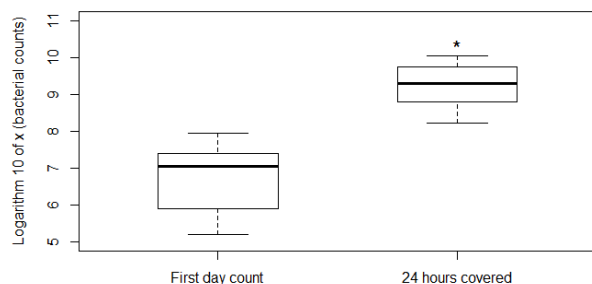
### Introduction

The anaerobic setting within the large intestine of warm-blooded animals is considered the primary habitat of *Escherichia coli*; here *E. coli* populations readily replicate. However, a crucial part of *E. coli*'s life cycle is fecal-oral transmission between animal hosts. Large numbers of *E. coli* cells are released to the environment (with fecal matter) and they reach the new host through water or food. Outside the hosts these bacteria are exposed to a largely aerobic setting.

*Escherichia coli* transmission to other hosts depends mainly on environmental conditions and its aptitude to survive in this aerobic environment [1], although some *E. coli* strains may have evolved to grow outside of the host [2]. At the same time most *E. coli* strains survive short periods of time outside the host [1], this is why *E. coli* is considered a good indicator of fecal contamination.

*Escherichia coli*, and other members of the family Enterobacteriaceae, use different metabolic pathways (anaerobic respiration, microaerobic respiration and fermentation) to obtain energy from organic compounds (in animal's guts), under either low oxygen or anaerobic conditions [4–6]; therefore it is intriguing that aerobic respiration is a universal property in *E. coli* strains.

Although aerobic respiration is the most efficient way to obtain energy from organic matter [3, 4], it is energetically demanding as it requires many genes and the synthesis of several molecules that are part of complex systems such as: signal transduction, gene transcription and electron transport [1, 4, 6]. It is paradoxical that a bacterium which replicates mainly in a microaerophilic and anaerobic habitats, conserves genes for growth under fully aerobic conditions; bacterial genes are prone to inactivation unless there is a strong selective pressure



**Figure 1:** Boxplot using log 10 scale shows counts of *Escherichia coli* colonies per gram of fresh fecal matter (First day) and in fecal matter incubated in the bench for 24 hours at room temperature. Asterisk indicates statistically significant difference as assessed by the t-test ( $t=6.19$ ,  $p\text{-value}=4.469e-05$ ).

[7].

In the other hand, a previous report has demonstrated that *E. coli* can grow in fecal matter outside of the host and the authors suggested that aerobic respiration may be important component of this growth [8]. In this study we tested the hypothesis that *E. coli* uses oxygen to quickly multiply in fecal matter. We argue that using its resources for this quick amplification may enhance its chances of finding another host.

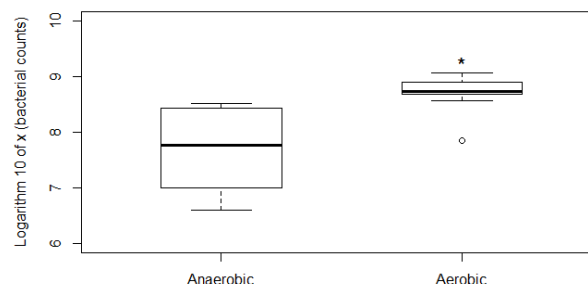
### Materials and Methods

Fresh stool samples were obtained from a chicken [ $n=8$ ]. Each sample was separated in two aliquots and weighed separately. The first aliquot was immediately plated out and cultured for 24 hours at 37 °C in Chromocult Coliforms agar (Merck®); *E. coli* was identified by  $\beta$ -glucuronidase activity. The second aliquot was placed into a Petri dish and left in a 21 °C after which this aliquot was cultured as previously.

In a subsequent experiment, fresh chicken stool samples were collected [ $n=10$ ], separated in two aliquots and weighed. One part was placed in an open pouch and the other was placed in an anaerobic pouch (BD Gas-Pak EZ Anaerobe Pouch System, 260683). The samples were left for 24 hours in a 21°C environment. *E. coli* were enumerated as in the previous experiment. Statistical analyses and figures were carried out in the RStudio software Version 0.98.1091 - © 2009-2014 RStudio, Inc.

### Results y Discussion

Colony counts in fecal samples incubated for 24 hours at room temperature were significantly higher than colony counts of fresh fecal matter (Figure 1). To determine whether oxygen was involved in the high growth rates outside the intestine, a second experiment was carried out under both an aerobic and anaerobic conditions. The samples exposed to an aerobic environment showed a significant higher growth than those cultured under anaerobic conditions (Figure 2).



**Figure 2:** Boxplot using log 10 scale shows counts of *Escherichia coli* colonies per gram of feces after 24 hours of growth in anaerobic and aerobic conditions. Asterisk indicates statistically significant difference as assessed by the t-test ( $t=4.01$ ,  $p\text{-value}=0.00154$ ).

Our experiments support the idea that the *E. coli* population multiply in fecal matter in the presence of oxygen, which may increase the chances of *E. coli* to colonize new hosts. The approximate increase in colonies (at least 10 fold) suggests that aerobic replication in fecal matter is a critical part in *E. coli*'s natural cycle (and possibly in the cycles of other members of Enterobacteriaceae including pathogens such as *Salmonella*).

*Escherichia coli* is a minor component of the animal microbiome probably because of high competition with anaerobic bacteria such as *Bacterioides* or *Clostridium*; however, once the intestinal content is exposed to oxygen, *E. coli* gains the competitive advantage and overgrows anaerobic bacteria. We propose that aerobic growth in fecal matter is a critical phase in *E. coli*'s natural life cycle. These findings underline the importance of a neglected phenomenon which has large implications in environmental sanitation and public health.

### Acknowledgments

The authors thank Joe Eisenberg for his editorial suggestions. This research was funded by Universidad San Francisco de Quito.

### References

- [1] Savageau, M. 1983. "*Escherichia coli* habitats, cell types, and molecular mechanisms of gene control". *American Naturalist*, 122: 732-744.
- [2] Ksoll, W.; Ishii, S.; Sadowsky, M.; Hicks, R. 2007. "Presence and sources of fecal coliform bacteria in epilithic periphyton communities of Lake Superior". *Applied and Environmental Microbiology*, 73: 3771-3778.
- [3] Hadjipetrou, L.; Stouthamer, A. 1965. "Energy production during nitrate respiration by *Aerobacter aerogenes*". *Journal of General Microbiology*, 38: 29-34.
- [4] Bueno, E.; Mesa, S.; Bedmar, E.; Richardson, D.; Delgado, M. 2012. "Bacterial adaptation of respiration from oxic to microoxic and anoxic conditions: redox control". *Antioxidants & Redox Signaling*, 16: 819-852.

- [5] Jones, S.; Gibson, T.; Maltby, R.; Chowdhury, F.; Stewart, V.; Cohen, P.; Conway, T. 2011. "Anaerobic respiration of *Escherichia coli* in the mouse intestine". *Infection and Immunity*, 79: 4218-4226.
- [6] Govantes, F.; Albrecht, J.; Gunsalus, R. 2000. "Oxygen regulation of the *Escherichia coli* cytochrome d oxidase (*cydAB*) operon: roles of multiple promoters and the Fnr-1 and Fnr-2 binding sites". *Molecular Microbiology*, 37: 1456-1469.
- [7] Mira, A.; Ochman, H.; Moran, N. 2001. "Deletional bias and the evolution of bacterial genomes". *Trends in Genetics*, 17: 589-596.
- [8] Russell, J.; Jarvis, G. 2001. "Practical mechanisms for interrupting the oral-fecal lifecycle of *Escherichia coli*". *Journal of Molecular Microbiology and Biotechnology*, 3: 265-272.



## Primer registro de anidación del Pelicano Peruano *Pelecanus thagus* (Pelecaniformes: Pelecanidae) en Ecuador

Gabriela S. Vinueza-Hidalgo<sup>1</sup>, Francisco Sornoza<sup>2</sup>, Mario H. Yáñez-Muñoz<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Av. Ricardo Descalzi OE6-225 y calle M, Quito, Ecuador.

<sup>2</sup>Fundación de Conservación Jocotoco, calle Lizardo García E9-104 y Andrés Xaura, edif. Chediak, 4to piso, Casilla Postal 17-16-337, Quito, Ecuador.

<sup>3</sup>Instituto Nacional de Biodiversidad, calle Rumipamba 341 y Av. de los Shyris, Casilla 17-07-8976, Quito, Ecuador.

\*Autor principal/Corresponding author; e-mail: mayamu@hotmail.com

Editado por/Edited by: Diego F. Cisneros-Heredia, Ph.D.(c)

Recibido/Received: 2015/04/13. Aceptado/Accepted: 2015/11/10.

Publicado en línea/Published on Web: 2015/12/30. Impreso/Printed: 2015/12/30.

### First nesting record of the Peruvian Pelican *Pelecanus thagus* (Pelecaniformes: Pelecanidae) in Ecuador

#### Abstract

We present the first nesting record of the Peruvian Pelican *Pelecanus thagus* in Ecuador, at Isla Santa Clara Wildlife Refuge, gulf of Guayaquil, province of El Oro. We provide descriptions of the nests and location. The Isla Santa Clara Wildlife Refuge is the first breeding colony of this species in Ecuador, highlighting the importance of the island conservation.

**Keywords.** *Pelecanus thagus*, Pelecanidae, breeding, El Oro, Gulf of Guayaquil, nesting.

#### Resumen

Presentamos el primer registro de anidación del Pelicano Peruano *Pelecanus thagus* en Ecuador, en el Refugio de Vida Silvestre Isla Santa Clara, golfo de Guayaquil, provincia de El Oro. Se provee la descripción de los nidos y su ubicación. El Refugio de Vida Silvestre Isla Santa Clara es la primera colonia reproductiva de esta especie en Ecuador, resaltando la importancia de conservar la isla.

**Palabras Clave.** *Pelecanus thagus*, Pelecanidae anidación, El Oro, golfo de Guayaquil, reproducción.

La familia Pelecanidae está representada en Ecuador por dos especies, el Pelicano Pardo *Pelecanus occidentalis* y el Pelicano Peruano *P. thagus*. La primera es una especie ampliamente distribuida a lo largo de toda la costa ecuatoriana, mientras que *P. thagus* es una especie migratoria austral considerada rara en el Ecuador [1, 2]. *Pelecanus thagus* es una ave marina asociada a la corriente de Humboldt, que anida desde el norte de Perú hasta Chile central [3]. Esta especie en Ecuador ha sido observada principalmente en la provincia de Santa Elena e inclusive con frecuencia en el Parque Nacional Machalilla en la provincia de Manabí [2] y durante faenas de pesca y cruceros oceanográficos [3–8].

El 12 de noviembre de 2013, en una visita a la isla Santa Clara (03°10' S, 80°26' W, 13 m, Fig. 1), en el golfo de Guayaquil, provincia de El Oro, se realizó el primer registro de anidación de *Pelecanus thagus* en Ecuador. Una colonia compuesta por 24 nidos activos fue obser-

vada en el suelo, casi al filo de un acantilado en la parte suroccidental de la isla (Fig. 2). El área ocupada para la anidación no superaba los 12 m<sup>2</sup>. Los 24 nidos se encontraban unidos uno al otro, y cada nido tenía entre uno y dos huevos de color blanco hueso. Los nidos eran una leve concavidad en el suelo, acompañada de muy poco material recolectado, como plumas y material vegetal seco. En reportes de anidación en Perú se documenta que esta especie tiende a anidar en superficies de topografía plana, las cuales son raspadas y modificadas hasta obtener una leve concavidad, usualmente rodeadas de guano, ramas secas y plumas recolectadas [9].

En una segunda visita realizada el 19 de diciembre de 2013 (38 días después del primer registro de incubación), se confirmó la continuidad de la anidación de la especie al observar pichones desarrollados pero aún implumes (Fig. 2). Para entonces, el número de nidos activos se había reducido de 24 a 18, los mismos que se

ISSN 1390-5384



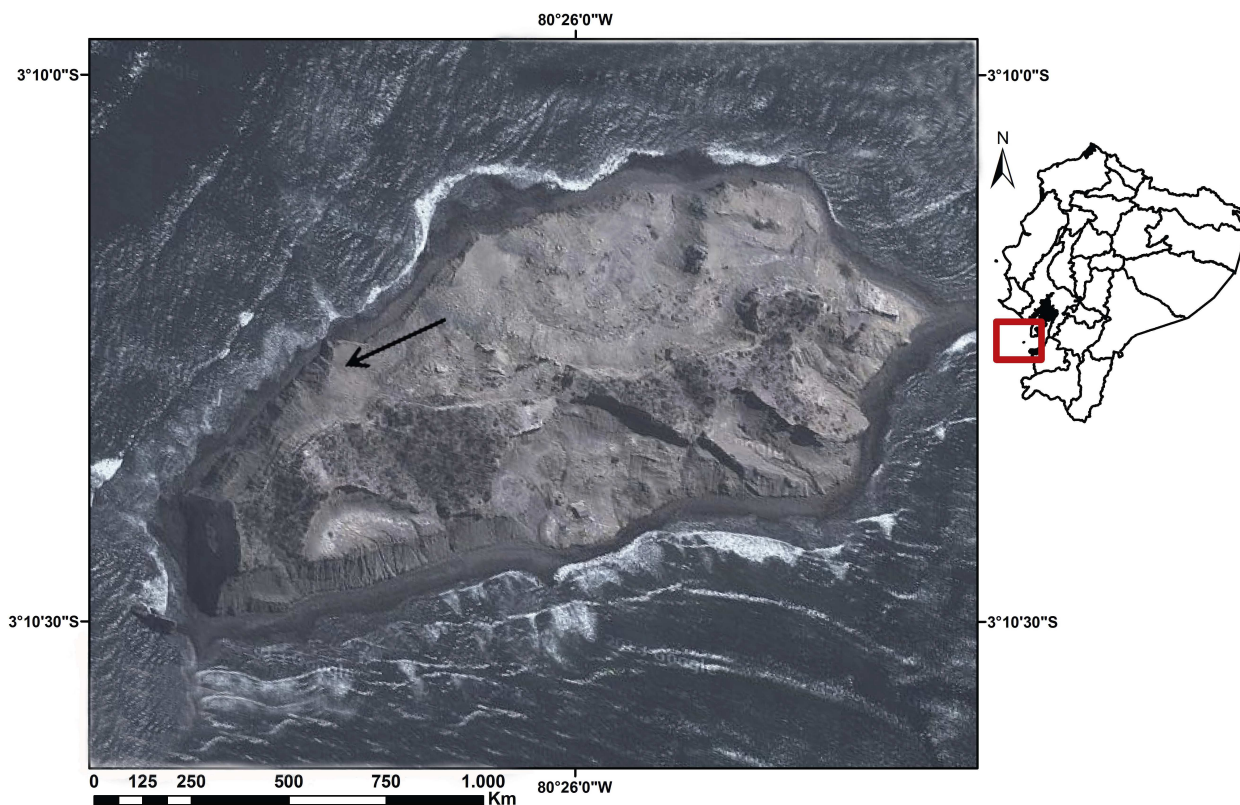


Figura 1: Ubicación de la isla Santa Clara, en el golfo de Guayaquil, provincia de El Oro, Ecuador. La flecha indica la zona de registro de anidación de *Pelecanus thagus*.

guían protegidos por individuos adultos agrupados en colonia. Se ha reportado que la especie es propensa a intimidarse ante la presencia humana, llegando a abandonar fácilmente sus huevos y pichones recién nacidos [10]. Al acercarse a solo 30 m del lugar de anidación en isla Santa Clara, nueve individuos adultos permanecieron protegiendo a 18 pichones, sugiriendo que existe un comportamiento de anidación colonial cooperativo. Aunque, esta colonia de anidación es aún pequeña, podría incrementarse con el tiempo.

Este reporte constituye el primer registro de anidación de *P. thagus* en el país. Esto hace del Refugio de Vida Silvestre Isla Santa Clara el único sitio de reproducción de esta especie en territorio ecuatoriano y resalta la importancia de protección de la isla. El Refugio de Vida Silvestre Isla Santa Clara fue declarado como sitio Ramsar en el año 2002 y desde la década de 1990 fue el único sitio de anidación de Pelicano Pardo *Pelecanus occidentalis* reportado en el país [1]. Nuestras observaciones registraron la anidación de *P. thagus* en simpatría de otras aves marinas como *P. occidentalis*, *Fregata Magnífica* *Fregata magnificens* y Piquero de Patas Azules *Sula neboxii*. Dentro de estas especies, la distancia más cercana con la colonia de *P. thagus* era de *P. occidentalis* a 300 m, seguido de *S. neboxii* y *F. magnificens* a aproximadamente 500 m. No se observó ninguna interacción entre *P. thagus* y las otras especies. Isla Santa Clara es un área de pernoctación de otras especies de

aves marinas, como los Piqueros Peruanos *Sula variegata*.

Nosotros consideramos la posibilidad de que *P. thagus* haya anidado en la isla anteriormente sin haber sido registrado, debido a los pocos muestreos intensivos en la isla, la dificultad de acceder al área de anidación y la complejidad de registrar los nidos al encontrarse a nivel del suelo. Sin embargo, los registros de anidación presentados en este manuscrito podrían ser producto de movimientos territoriales o expansiones temporales de la población de la especie desde el norte de Perú que obligan a ciertos individuos a buscar nuevos sitios de anidación. Tampoco, descartaríamos que estos registros sean consecuencia de cambios de temperatura en la corriente marina de Humboldt que incidan en la disponibilidad de alimento.

### Agradecimientos

Especial agradecimiento a María Eugenia Puente por haber financiado los costos logísticos de la visita a la isla; a Mario Rambay, capitán de la embarcación; a Ritter Guamán por todo su apoyo y coordinación antes y durante las respectivas visitas; y a todos los guardaparques del Ministerio del Ambiente de la provincia del El Oro, por autorizarnos la entrada a la isla. Carolina Reyes-Puig colaboró con la elaboración del mapa de registro de la especie.



**Figura 2:** *Pelecanus thagus* anidando en el Refugio de Vida Silvestre Isla Santa Clara, provincia de El Oro, Ecuador. Arriba: Colonia en anidación. Abajo: Pichones desarrollados implumes. (Fotografías: G. Vinueza-Hidalgo y F. Sornoza-Molina).

### Referencias

- [1] Ridgely, R.; Greenfield, P. 2006. "Aves del Ecuador". Academia de Ciencias de Philadelphia and Foundation Jocotoco: Quito.
- [2] Ágreda, A.; Torres, S.; Haase, B.; Samaniego, J. 2011. "Investigaciones de la avifauna marina en aguas continentales ecuatorianas con énfasis en su distribución, diversidad, abundancia y estado de conservación". Acta Oceanográfica del Pacífico, 16(1): 95-107.
- [3] Haase, B. 2011. "Aves marinas de Ecuador occidental y acuáticas de las piscinas artificiales de Ecuasal". Aves & Conservación, Birdlife en Ecuador y Ecuasal C.A.: Guayaquil.
- [4] Guillén, V. 1990. "Alimentación del pelicano o alcatraz (*Pelecanus thagus*) en la isla Macabí". Boletín de Lima, 67: 85-88.
- [5] López-Lanús, B.; Blanco, D. 2005. "El Censo Neotropical de Aves Acuáticas 2004". Global Series No. 17. Wetlands International. Buenos Aires, Argentina.
- [6] Simeone, A.; Luna-Jorquera, G.; Bernal, M.; Garthe, S.; Sepúlveda, F.; Villablanca, R.; Ellenberg, U.; Contreras, M.; Muñoz, J.; Pince, T. 2003. "Breeding distribution and abundance of seabirds on islands off north-central Chile". *Revista Chilena de Historia Natural*, 76(2): 323-333.
- [7] Galarza, N. 1968. "Informe sobre estudios ornitológicos realizados en el laboratorio de la Puntilla (Pisco) en Septiembre de 1965/66". *Informe Especial del Instituto del Mar del Perú*, 31: 1-20.
- [8] Jordán, R. 1967. "The predation of guano birds on the Peruvian anchovy (*Engraulis ringens* JENYNS)". *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Report*, 1: 105-109.
- [9] Zavalaga C.B.; Dell'Omo G.; Becciu P.; Yoda K. 2011. "Patterns of GPS Tracks Suggest Nocturnal Foraging by Incubating Peruvian Pelicans (*Pelecanus thagus*)". *PLoS ONE*, 6(5): e19966. doi:10.1371/journal.pone.0019966.
- [10] Valverde, M.; García, M. 2009. "Aberraciones en la pigmentación del plumaje de Aves Marinas de la costa Peruana". *Biologist*, 7: 99-104.



## Herbario de Botánica Económica del Ecuador QUSF: Reseña histórica, desarrollo, representatividad y tipos

Hugo Valdebenito<sup>1\*</sup>, Vlastimil Zak<sup>1</sup>, Pablo Riera<sup>1</sup> y Diego Cisneros-Heredia<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad San Francisco de Quito USFQ, Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales, Herbario de Botánica Económica QUSF, calle Diego de Robles y Vía Interoceánica, campus Cumbayá, edif. Darwin. Casilla Postal 17-1200-841, Quito, Ecuador

<sup>2</sup> Universidad San Francisco de Quito USFQ, Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales, Laboratorio de Zoología Terrestre, calle Diego de Robles y Vía Interoceánica, campus Cumbayá, edif. Darwin. Casilla Postal 17-1200-841, Quito, Ecuador

\* Autor para correspondencia, correo electrónico: hvaldebenito@usfq.edu.ec

Editado por/Edited by: César Zambrano, PhD.

Rcibido/Received: 2014/10/17. Aceptado/Accepted: 2015/05/10

Publicado en línea/Published online: 2015/12/30. Impreso/Printed: 2015/12/30

### Herbarium of Economic Botany of Ecuador QUSF: Historical account, development, representativity, and types

#### Abstract

The Herbarium of Economic Botany of Ecuador QUSF of Universidad San Francisco de Quito (Ecuador), registered in the Index Herbariorum since 2001, holds over twenty thousand catalogued specimens of 2131 species of Magnoliophyta and Pteridophyta. One third of these specimens keep information on uses and applications of economic value. Asteraceae and Solanaceae are the most represented families in the collection. Almost half of the specimens come from highly diverse Andean cloud forests. The collection has specimens of 23, out of 24, provinces of Ecuador, Pichincha being the most represented province. Seven type specimens of six species are deposited at the QUSF, including the holotypes of *Larnax macasiana* S. Deanna, Leiva & Barboza, and *Tiputinia foetida* P.E. Berry & C. Woodw. In this article, we present a historic overview of the herbarium, analyse the collection representativity, and describe future development plans.

**Keywords.** Economic botany, Ecuador, herbarium, holotypes, isotypes, QUSF.

#### Resumen

El Herbario de Botánica Económica QUSF de la Universidad San Francisco de Quito (Ecuador), registrado en el Index Herbariorum desde el 2001, alberga más de veinte mil especímenes catalogados de 2131 especies de Magnoliophyta y Pteridophyta. Un tercio de estos especímenes tiene información sobre sus usos y aplicaciones de valor económico. Asteraceae y Solanaceae son las familias mejor representadas en la colección. Casi la mitad de los especímenes proviene de bosques nublados andinos altamente diversos. La colección tiene especímenes de 23 de las 24 provincias del Ecuador, siendo Pichincha la provincia mejor representada. Siete especímenes tipo de seis especies están depositados en el QUSF, incluyendo los holotipos de *Larnax macasiana* S. Deanna, Leiva & Barboza, y *Tiputinia foetida* P.E. Berry & C. Woodw. En esta artículo presentamos una reseña histórica del herbario, analizamos la representatividad de la colección y describimos los planes futuros de desarrollo.

**Palabras clave.** Botánica económica, Ecuador, herbario, holotipos, isotipos, QUSF.

Los herbarios son centros de investigación con información importante e irremplazable sobre las plantas y los ecosistemas donde habitan, catalogando especímenes de plantas, evidencia adicional (e.g., fotografías), datos asociados y material bibliográfico [1]. Los herbarios son una herramienta fundamental para documentar la diversidad, filogénia, ecología y biogeografía vegetal [2,3], son repositorios de información genética histórica, incrementan nuestro conocimiento sobre los usos de las plantas para beneficio de la sociedad humana, soportan decisiones de conservación y manejo de recursos vegetales [4,5], y son un importante recurso educativo para la enseñanza de las ciencias biológicas y ambientales [6]. Funk [1] identificó decenas de usos que puede tener un herbario. Los especímenes guardados en herbarios no

sólo constituyen material para catalogar, sino también son una fuente de material para ser investigado por taxónomos, anatomistas vegetales, citólogos y genetistas moleculares, y en especial, son la base de la reproducibilidad, uno de los principios esenciales del método científico, pues permiten que los especímenes que constituyen evidencia de los estudios sean examinados y los análisis repetidos de manera independiente [1,7]. Hoy en día, la preservación y documentación de especímenes no se limita a la clásica técnica de herborizar material (material seco o muestras líquidas) y su posterior almacenamiento en gabinetes; sino también se utiliza sistemas de digitalización de especímenes a través de medios audiovisuales y el almacenamiento de los datos en bases de datos vinculadas. Estos nuevos sistemas han permi-

tido maximizar el acceso a colecciones para un público más amplio [8], especialmente si estas digitalizaciones son incorporadas a una página web [9-12].

En Ecuador, el herbario más antiguo fue creado en 1860 (Herbario del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Central del Ecuador). De acuerdo a *Index Herbariorum* [13], el directorio global de herbarios públicos, hoy en día 16 herbarios activos funcionan en Ecuador. A pesar de que los herbarios ecuatorianos están ubicados principalmente en la Sierra y en la ciudad de Quito, el campo de acción de los herbarios ecuatorianos cubre todas las regiones geográficas del país y desarrollan una amplia diversidad de programas, incluyendo estudios taxonómicos, fitogeográficos y etnobotánicos. En este artículo presentamos una reseña de la historia y desarrollo del Herbario de Botánica Económica del Ecuador QUSF de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador. Se analiza la riqueza de su colección botánica, la representatividad para la flora ecuatoriana y se provee información e imágenes de los especímenes tipo presentes.

### Reseña histórica y desarrollo

El Herbario de Botánica Económica del Ecuador fue fundado en 1995 por profesores e investigadores del Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ. La iniciativa de creación del herbario fue liderada por Vlastimil Zak y Nelson Zabala, quienes fungieron las labores de curador y director del herbario, respectivamente. El herbario empezó a funcionar en el campus de Monteserrín que la USFQ mantuvo dentro de la ciudad de Quito, Ecuador. En el año de 1997, el herbario (y la universidad) se trasladó al actual campus de Cumbayá en la parroquia rural quiteña del mismo nombre. Gracias al valioso aporte de investigadores —como Montserrat Ríos, Alina Freire, Hugo Valdebenito y Francis Kahn, junto a estudiantes de diferentes carreras de pregrado de la USFQ (incl. Ecología Aplicada, Biología, Agroempresas, Biotecnología) y organizaciones (como Ecuambiente), el herbario creció a pasos acelerados y para el año 2000 contaba con más de 13.000 especímenes botánicos en su colección.

En 1999, el crecimiento de la colección motivó la implementación de una base de datos digital para almacenar y manejar toda información de la colección botánica y datos adjuntos. En ese año, Katuska Valarezo y Tomi Sugahara, asistentes curatoriales del herbario, programaron la primera versión de la base de datos en la plataforma de Microsoft Access. La implementación de esta base de datos permitió un eficiente registro digital de los datos de cada espécimen, con campos que incluyen información taxonómica, datos de las localidades de colección, uso(s) económicos, fenología, entre otros. En años posteriores, gracias a la colaboración del departamento de Sistemas de la Universidad San Francisco de Quito USFQ se actualizó y mejoró la base de datos, ahora manejada en Microsoft Access XP. Actualmente, el 80,7% de los especímenes del herbario se encuentran con sus datos digitalizados.

En octubre de 2000, la Universidad San Francisco de Quito fue una de las instituciones auspiciantes del III Congreso Ecuatoriano de Botánica. Como parte de ese evento, el 26 de octubre, el Herbario de Botánica Económica QUSF se inauguró formalmente y presentó sus primeros trabajos científicos [14, 15]. Desde entonces,

el herbario QUSF ha desarrollado un fuerte programa de apoyo para la formación de estudiantes en el campo de la botánica y para el desarrollo de varias investigaciones nacionales e internacionales [16-29]. El herbario es actualmente depositario de 25.630 muestras obtenidas en la mayor parte de provincias del Ecuador, y ha participado en proyectos con el *Institut de Recherche pour le Développement* (IRD), Ecuambiente y la Sociedad Entomológica Ecuatoriana.

En el año 2001 se publicó oficialmente la inscripción del herbario en el *Index Herbariorum* bajo el acrónimo QUSF [30]. En esa misma época, la USFQ desarrolló un proyecto de expansión y fortalecimiento del área de biología, que incluyó la construcción del edificio de investigaciones biológico-evolutivas Charles Darwin, donde se edificó un área específicamente diseñada para alojar las colecciones del herbario. En esa nueva área se reubicó el herbario QUSF en el laboratorio DW-006, donde se mantiene hasta la actualidad, siendo un laboratorio que cumple con todos los requerimientos necesarios tanto curatoriales como de accesibilidad y bioseguridad para garantizar la preservación y adecuado uso del herbario.

En el año 2012, se dividió una sección del herbario para crear una colección didáctica con especímenes botánicos que puedan ser manipulados por los estudiantes en el ejercicio de sus cursos académicos, fortaleciendo así el uso del herbario como un centro de educación y formación. La colección didáctica se almacena por separado de la colección científica en el laboratorio de docencia de botánica (laboratorio DW-012).

Desde el 2012, el herbario QUSF participa en el proyecto LAPI (*Latin American Plant Initiative*) liderado por el Smithsonian Institution, cuyo objetivo es digitalizar muestras de interés especial, como especímenes tipo o históricos, presentes en herbarios latinoamericanos, y que está vinculado con el GPI *Global Plants Initiative*. El acceso a más de 1,8 millones de especímenes tipo digitalizados se puede realizar a través de JSTOR [10], en donde se pueden ver las especies tipo presentes en el herbario QUSF.

En la actualidad, el QUSF alberga una rica colección de especímenes botánicos, con particular énfasis en: (1) plantas de utilidad económica colectadas en la mayoría de las provincias del Ecuador (Tabla 1); (2) plantas de la región norte del Ecuador (Costa, Sierra y Amazonía). La colección se incrementa permanentemente con especímenes colectados durante investigaciones de los científicos del QUSF (e.j., Ruales y Guevara [31]) y otros investigadores nacionales e internacionales, así como por estudiantes del Colegio de Ciencias Biológicas COCIBA de la Universidad San Francisco de Quito USFQ. Desde sus comienzos, la misión del QUSF ha sido conservar y documentar especímenes de la flora ecuatoriana, con énfasis en aquellas especies que tienen principalmente utilidad económica, y servir como un recurso para la investigación, educación y promoción de la diversidad vegetal encontrada en el país.

### Representatividad de la colección

La colección del herbario QUSF cuenta hasta diciembre 2013 con 20.758 especímenes correspondientes a más de 2131 especies. El 38% de los especímenes del QUSF cuentan con información sobre uso económico.

Las familias mejor representadas en la colección son: Asteraceae (con 2056 especímenes, 9,9% de la colección), Solanaceae (1347, 6,5%), Rubiaceae (874; 4,2%), Melastomataceae (854, 4,1%), Piperaceae (748; 3,6%) y Ericaceae (734, 3,54%). Los géneros con mayor número de especímenes corresponden al género *Solanum* (689 especímenes), *Piper* (566), *Cavendishia* (241), *Baccharis* (230), *Rubus* (209) y *Palicourea* (165). La especie con el mayor número de colectas corresponde a *Baccharis latifolia* (Ruiz y Pavón), con 108 especímenes. El QUSF cuenta con colecciones básicamente de Ecuador, estando representadas todas las provincias con excepción de Galápagos y Zamora-Chinchipe. Las provincias con mayor representatividad son Pichincha (14148 especímenes), Napo (3231) y Orellana (1491).

El 43,9% de los especímenes del QUSF provienen del ecosistema de bosque nublado (entre 1400 y 2800 m de elevación), seguido por el bosque tropical (0–1400 m) y páramo (> 2800 m) con el 37,7% y 18,5%, respectivamente.

La mayoría de especímenes preservados en el QUSF corresponden a colecciones desarrolladas como parte de cursos académicos de la Universidad San Francisco de Quito, en especial aquellos enfocados en botánica y sistemática. Sin embargo, existen colecciones representativas derivadas de investigaciones, proyectos de tesis y proyectos de asesoría y consultoría.

Vlastimil Zak, curador del herbario, es uno de los principales colectores de muestras del herbario. Carlos Ruales, curador adjunto, ha iniciado una colección de especies patrimoniales e históricas para la ciudad de Quito.

### El futuro del herbario

En el futuro inmediato, el herbario QUSF empezará una fase de mejoramiento de los procesos curatoriales de las muestras, incluyendo la adaptación para el ordenamiento de la colección del Sistema APGIII [32] y la instalación de una base de datos que permita compartir los datos a través de sistemas en línea con metadatos estandarizados. Además, se continuará con los procesos de montaje e ingreso de más de 10000 especímenes que aún deben entrar a la colección. Se planea mejorar y fortalecer la colección, incrementando los esfuerzos de colección en regiones geográficas con baja representatividad. La co-

lección desarrollará una sección especial para incrementar el conocimiento sobre las Plantas Patrimoniales de Quito, proyecto liderado por Carlos Ruales [33].

### Especímenes tipo de la colección

*Adenostemma zakii* R.M. King & H. Rob., Phytologia 76(1): 15–16, 1994. ECUADOR, Bolívar: Carretera Chillanes-Bucay, en la hacienda “Tiquibuso” del Sr. Gonzalo Gomez, 0.1°55' S, 79°0.5' W, 2100 m, 1 Sept. 1987. Zak & Jaramillo 2571. **Isotipo:** QUSF 15799 (Fig. 1).

*Anthurium whitmorei* Croat & Lingán, Rodriguésia 56(88): 15–30, 2005. ECUADOR, Orellana, Tiputini Biodiversity Station, 0°38'S, 76°09'W, 200m, 21 Feb. 2002. N. Köster et al. 1018. **Isotipo:** QUSF 9206 (Fig. 2).

*Ardisia zakii* Pipoly, SIDA 17(1): 449–451, 1996. ECUADOR, Pichincha: Carretera Quito-San Juan Chiriboga-Empalme, Km 59, 16 km NW of road, 1700-2000 m, 23 Sep 1986 (fl, fr). V. Zak 1298. **Isotipo:** QUSF 1509 (Fig. 3).

*Clibadium zakii* H. Rob., Fl. Ecuador, 77(1): 112–113, 2006. ECUADOR, Bolívar: Carretera Chillanes - Bucay, en la hacienda “Tiquibuso” del Sr. Gonzalo Gomez, alt. 2100 m, 10 Sept. 1987. Zak & Jaramillo 2881. **Isotipo:** QUSF 27443 (no designado en la descripción original, pero número de colección Zak & Jaramillo 2881 presente en F, MO, US, QUSF). Nombre aceptado: *Clibadium arriagadae* Pruski (Fig. 4).

*Larnax macasiana* S. Deanna, Leiva & Barboza, Phytotaxa 167(1): 1-34, 2014. ECUADOR, Morona-Santiago: Macas, Cerro San José del Quilamo, 500 m antes de la Virgen Purísima de Macas en el Quilamo, 1369 m, 78°08'19.3"W, 02°017'45.4"S, 23 January 2013 (fl, fr). R. Deanna & S. Leiva 111. **Holotipo:** QUSF 29472, **isotipo:** QUSF 29480 (Fig. 5).

*Tiputinia foetida* P.E. Berry & C. Woodw., Taxon 56(1): 158–161, 2007. ECUADOR, Orellana, Tiputini Biological Station, shaded forest understory off trail between laboratory and dining hall, 210 m, 0°38'18"S, 76°09'02"W (with GPS unit), 14 April 2005. Woodward & Swing 2005-5. **Holotipo:** QUSF (en alcohol-glicerina; Fig. 6).



Fig. 1

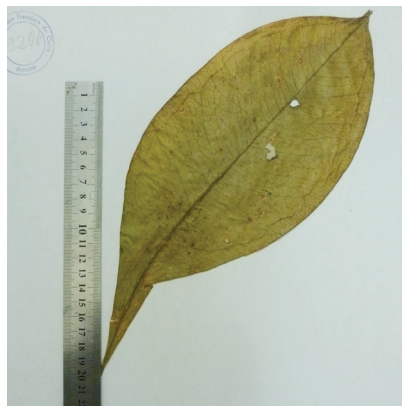


Fig. 2



Fig. 3





Fig. 4



Fig. 5

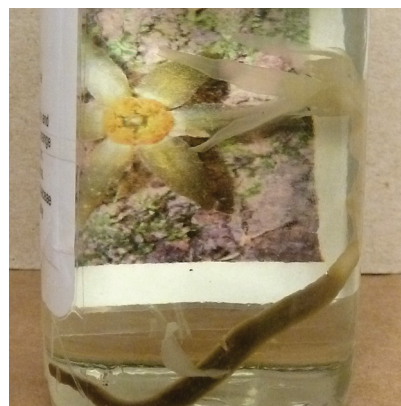


Fig. 6

**Tabla 1. Representatividad de especímenes del Herbario de Botánica Económica QUSF a diciembre 2014 por provincias del Ecuador**

PROVINCIA	No. especímenes	Porcentaje
Pichincha	14.148	68.16
Napo	3.231	15.57
Orellana	1.491	7.18
Bolívar	305	1.47
Imbabura	266	1.28
Santo Dgo. De los Tsáchilas	264	1.27
Sucumbios	258	1.24
Esmeraldas	221	1.06
Chimborazo	156	0.75
Cañar	156	0.75
Pastaza	93	0.45
Carchi	55	0.26
Tungurahua	46	0.22
Cotopaxi	19	0.09
Morona Santiago	12	0.06
Loja	10	0.05
Los Rios	9	0.04
El Oro	7	0.03
Guayas	6	0.03
Manabí	2	0.01
Zamora Chinchipe	1	0
Santa Elena	1	0
Azuay	1	0
Galápagos	0	0
<b>TOTAL</b>	<b>20.758</b>	<b>100.00</b>



## Referencias

- [1] Funk, V. A. 2003. "The Importance of Herbaria". *Plant Science Bulletin*, 49: 94–95.
- [2] Milne, J.; Jolley, H. 2010. "The Importance of Herbarium Records in Documenting the Occurrence and Changing Distribution of the Adventive Moss Species '*Pseudoscleropodium purum*' in Victoria". *The Victorian Naturalist*, 127(4): 146–210.
- [3] Applequist, W. L.; McGlenn, D. J.; Miller, M.; Long, Q. G.; Miller, J. S. 2007. "How well do herbarium data predict the location of present populations? A test using *Echinacea* species in Missouri". *Biodiversity and Conservation*, 2007(16): 1397–1407. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10531-006-6737-x>
- [4] Ponder, W. F.; Carter, G. A.; Flemons, P.; Chapman, R. R. 2001. "Evaluation of Museum Collection Data for Use in Biodiversity Assessment". *Conservation Biology*, 15(3): 648–657. DOI: <http://dx.doi.org/10.1046/j.1523-1739.2001.015003648.x>
- [5] Rivers, M. C.; Taylor, L.; Brummitt, N. A.; Meagher, T. R.; Roberts, D. L.; Lughadha, E. N. 2011. "How many herbarium specimens are needed to detect threatened species?" *Biological Conservation*, 144(10): 2541–2547. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biocon.2011.07.014>
- [6] Rollins, R. C. 1965. "The Role of the University Herbarium in Research and Teaching". *Taxon*, 14(4): 115–120.
- [7] Funk, V. A.; Hoch, P. C.; Prather, L. A.; Wagner, W. L. 2005. "The Importance of Vouchers". *Taxon*, 54(1): 127–129.
- [8] Kramer, D. W. 1996. "The use of new technologies to create a visual archive of plant diversity", en: "*Sampling the Green World*", T. F. Stuessy; S. H. Sohmer (Eds.), Columbia University Press: New York, pp. 99–111.
- [9] Missouri Botanical Garden. 2015. "Tropicos". Enlace: <http://www.tropicos.org>. Missouri Botanical Garden: Missouri, EE.UU. Fecha de consulta: 10 abril 2015
- [10] JSTOR. 2015. "*JSTOR Global Plants*". Enlace: <https://plants.jstor.org>. JSTOR: EE.UU. Fecha de consulta: 10 abril 2015.
- [11] The New York Botanical Garden. 2013. "*The C.V. Starr Virtual Herbarium*". Enlace: <http://sciweb.nybg.org/science2/VirtualHerbarium.asp>. The New York Botanical Garden: New York, EE.UU. Fecha de consulta: 10 abril 2015
- [12] Royal Botanic Gardens. 2013. "*Kew Herbarium*". Enlace: <http://www.kew.org/science-conservation/collections/herbarium>. Royal Botanic Gardens, Kew: Londres, Reino Unido. Fecha de consulta: 10 abril 2015.
- [13] Thiers, B. 2013. "*Index Herbariorum: A global directory of public herbaria and associated staff*". Enlace: <http://sciweb.nybg.org/science2/IndexHerbariorum.asp>. The New York Botanical Garden: New York, EE.UU. Fecha de consulta: 10 abril 2015
- [14] Armijos, M.V.; Zabala, N. A. 2003. "*Plantas medicinales promisorias de la Estación de Biodiversidad de Tiputini-USFQ*". Memorias del III Congreso Ecuatoriano de Botánica, Funbotánica: Quito.
- [15] Ayats, M.; Zabala, N. A. 2003. "*Plantas con propiedades plaguicidas en el sur de Imbabura*". Memorias del III Congreso Ecuatoriano de Botánica, Funbotánica: Quito.
- [16] Weiss-Schneeweiss, H.; Stuessy, T. F.; Tremetsberger, K.; Urtubey, E.; Valdebenito, H. A.; Beck, S.G.; Baeza, C.M. 2007. "Chromosome numbers and karyotypes of South American species and populations of *Hypochoeris* (Asteraceae)". *Botanical Journal of the Linnean Society*, 153: 49–60. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1095-8339.2007.00577.x>
- [17] Woodward, C.L.; Berry, P.E.; Maas-van de Kamer, H.; Swing, K. 2007. "*Tiputinia foetida*, a new mycoheterotrophic genus of Thismiaceae from Amazonian Ecuador, and a likely case of deceit pollination". *Taxon*, 56(1): 157–162.
- [18] Grant, J.R. 2008. "De Macrocarpaeae Grisebach (Ex Gentianaceis) Speciebus Novis VIII: Two New Species from Ecuador". *Harvard Papers in Botany*, 13(2): 253–259. DOI: <http://dx.doi.org/10.3100/1043-4534-13.2.253>
- [19] Salvador-Van Eysenrode, D.; Bogaert, J.; Zak-Mnacek, V.; Ceulemans, R. 2003. "Sampling Diversity in Canopy Gaps in an Ecuadorian Rain Forest". *Forest Science*, 49(6): 909–917.
- [20] Grant, J.R. 2007. "De Macrocarpaeae Grisebach (Ex Gentianaceis) Speciebus Novis VII: Four New Species and Two Natural Hybrids". *Harvard Papers in Botany*, 11(2): 129–139. DOI: [http://dx.doi.org/10.3100/1043-4534\(2007\)11\[129:DMGEGS\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.3100/1043-4534(2007)11[129:DMGEGS]2.0.CO;2)

- [21] Grant, J.R. 2011. De Macrocarpaeae Grisebach (Ex Gentianaceis) Speciebus Novis IX: A Synopsis of the Genus in Bolivia. *Harvard Papers in Botany* 16(2): 389-397.
- [22] K. Tremetsberger, T.F. Stuessy, G. Kadlec, E. Urbey, C.M. Baeza, S.G. Beck, H.A. Valdebenito, C. De Fátima Ruas, N.I. Matzenbacher. 2006. AFLP Phylogeny of South American Species of *Hypochaeris* (Asteraceae, Lactuceae). *Systematic Botany* 31(3): 610-626.
- [23] Struwe, L., S. Haag, E. Heiberg, J.R. Grant. 2009. Andean Speciation and Vicariance in Neotropical *Macrocarpaea* (Gentianaceae-Heleae). *Annals of the Missouri Botanical Garden* 96(3): 450-469.
- [24] Croat, T.B., J. Lingán, D. Hayworth. 2005. A new section of *Anthurium*, sect. *Decurrentia* – Revision of the *Anthurium decurrens* Poeppig complex in Amazonia. *Rodriguésia* 56(88): 15-30.
- [25] Grant JR, Struwe L. 2003 De Macrocarpaeae Grisebach (ex Gentianaceis) speciebus novis 3: six new species of moon-gentians (*Macrocarpaea*, Gentianaceae: Heleae) from Parque Nacional Podocarpus, Ecuador. *Harvard Papers in Botany* 8. (1): 61-81
- [26] Grant, J.R. 2007. De Macrocarpaeae Grisebach (Ex Gentianaceis) Speciebus Novis V: Twenty-three new species largely from Peru, and typification of all species in the genus. *Harvard Papers in Botany* 9(1): 11-49.
- [27] Grant, J.R., V. Trunz. 2011. De Macrocarpaeae Grisebach (Ex Gentianaceis) Speciebus Novis X: A synopsis of the Genus in Montane Atlantic Forests of Brazil. *Harvard Papers in Botany* 16(2): 399-420.
- [28] Struwe, L., V.A. Albert, M.F. Calió, C. Frasier, K.B. Lepis, K.G. Mathews, J.R. Grant. 2009. Evolutionary patterns in neotropical Heleae (Gentianaceae): evidencia from morphology, chloroplast and nuclear DNA sequences. *Taxon* 58(2): 479-499.
- [29] Kreft, H., N. Köster, W. Küper, J. Nieder, W. Barthlott. 2004. Diversity and biogeography of vascular epiphytes in Western Amazonia, Yasuní, Ecuador. *Journal of Biogeography* 31: 1463-1476.
- [30] Holmgren, P.K. & N.H. Holmgren. Additions to *Index Herbariorum* (Herbaria), Edition 8 – Eleventh Series. *Taxon* 50(2): 603-620.
- [31] Ruales, C., J.E. Guevara. 2010. La flora patrimonial de Quito descubierta por la expedición de Humboldt y Bonpland en el año 1802. *Avances en Ciencias e Ingenierías* 3: B54-B63.
- [32] Sudd, W.S., C.S. Campbell, E.A. Kellogg, P.F. Stevens, and M.J. Donoghue. 2007. *Plant Systematics: A phylogenetic Approach*, 3rd edition. Sinauer Associates, Sunderland Mass.
- [33] Ruales, C. 2013. Las colecciones botánicas de Joseph de Jussieu (1736 – 1747)”. Quito, Ecuador: Universidad San Francisco de Quito, serie Monográfica Plantas de Quito – La vegetación original de una ciudad siempre verde, vol. I.

## Nueva información sobre la coloración e historia natural del Cutín de Papallacta *Pristimantis acerus* (Lynch & Duellman, 1980) (Anura: Craugastoridae)

Patricia Bejarano-Muñoz<sup>1,2\*</sup>, María Pérez-Lara<sup>1,2</sup>, Jorge Brito M.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Biodiversidad, División de Herpetología, calle Rumipamba N° 341 y Av. de los Shyris, Casilla 17-07-8976, Quito, Ecuador.

<sup>2</sup>Ecociencia - Ecofondo, Programa de Becas de Investigación para la Conservación de la Biodiversidad, Quito, Ecuador.  
\*Autor principal/Corresponding author, e-mail: coorozzo@hotmail.com

Editado por/Edited by: Diego F. Cisneros-Heredia, Ph.D.(c)

Recibido/Received: 2015/10/18. Aceptado/Accepted: 2015/12/01.

Publicado en línea/Published on Web: 2015/12/30. Impreso/Printed: 2015/12/30.

### New information on the colouration and natural history of the Papallacta Robber Frog *Pristimantis acerus* (Lynch & Duellman, 1980) (Anura: Craugastoridae)

#### Abstract

The Papallacta Robber Frog *Pristimantis acerus* (Lynch & Duellman) was described in 1980 and remains restricted to the Upper Napo River, Ecuador, lacking subsequent records after its original description. During herpetological surveys at Guango Lodge, several individuals of *P. acerus* were collected. We present herein new information on the individual and ontogenic colour variation and natural history of *P. acerus*.

**Keywords.** Amphibia, Anura, Craugastoridae, *Pristimantis acerus*, colouration, montane forests, Napo, natural history, variation.

#### Resumen

El Cutín de Papallacta *Pristimantis acerus* (Lynch & Duellman) fue descrito en 1980 y está restringido a la cuenca alta del río Napo, Ecuador, careciendo de registros posteriores a su descripción original. Durante evaluaciones herpetológicas en Guango Lodge, varios individuos de *P. acerus* fueron colectados. Presentamos aquí nueva información sobre la variación de color individual y ontogénica y la historia natural de *P. acerus*.

**Palabras Clave.** Amphibia, Anura, Craugastoridae, *Pristimantis acerus*, bosques montanos, coloración, historia natural, Napo, variación.

Las ranas neotropicales del género *Pristimantis* se encuentran entre los géneros de anfibios más diversos del planeta [1]. Sin embargo, el conocimiento sobre estos anfibios es aún básico, con pobre documentación sobre el rango de distribución e historia natural de varias especies. *Pristimantis acerus* (Lynch & Duellman, 1980) es una rana terrestre que se conoce de solo cuatro localidades en los bosques montanos altos entre Papallacta y Cuyuja, nororiente de Ecuador, 2660-2750 m de altitud (Fig. 1) [1, 2]. Desde su descripción original no se han reportado nuevos registros, en un lapso de casi 34 años. En este artículo reportamos nueva información sobre los patrones de coloración e historia natural de *P. acerus*.

Dos machos adultos (DHMECN 12057-58) y dos juveniles (DHMECN 12059-60) de *Pristimantis acerus* fueron colectados en Guango Lodge (00°22'53,24" S, 078°04'7,40" O, 2681 m de altitud, Fig. 1), parroquia

Cuyuja, cantón Quijos, provincia de Napo, Ecuador, entre el 9 y 10 de octubre de 2014. Los especímenes se encuentran depositados en la División de Herpetología, Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales del Instituto Nacional de Biodiversidad.

Los cuatro especímenes presentan las características diagnósticas descritas por Lynch y Duellman [2]. No obstante, observamos una singular variación de la coloración en vida del individuo. El espécimen DHMECN 12058 presentó un cambio contrastante en su coloración dorsal en vida. Al ser capturado a las 22h43, exhibía una coloración homogéneamente crema rosácea con distintivas sombras azuladas en la región fronto-parietal y sobre los párpados, luego la coloración fue tornándose café rosáceo y se pudo observar dos lunares negros en el brazo derecho (Fig. 2a derecha). Cerca de 30 minutos después se tornó café oscuro, exceptuando por el vientre, gar-

ISSN 1390-5384



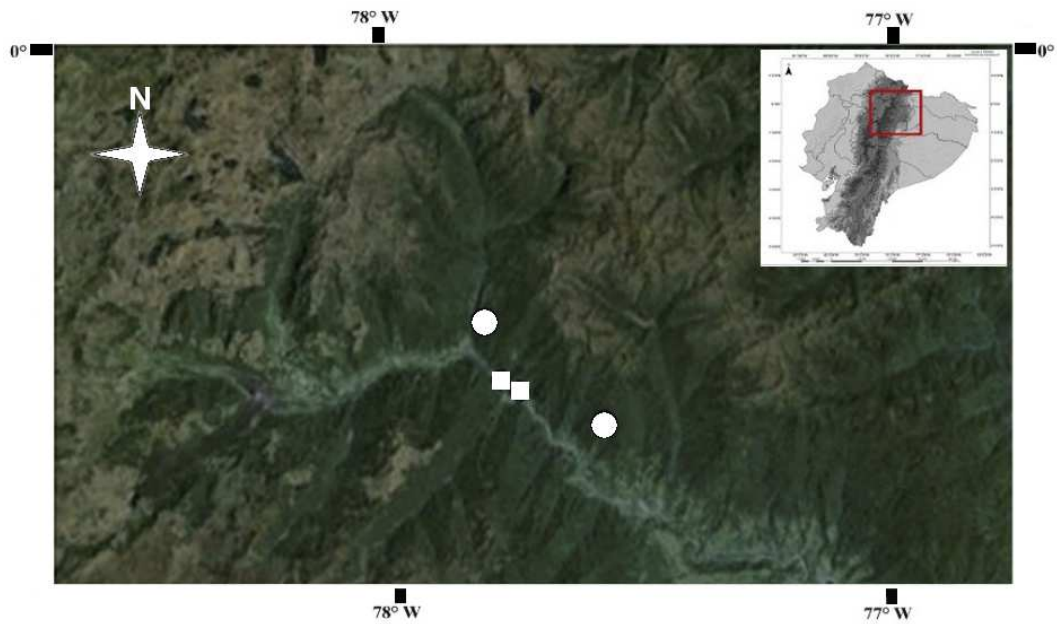


Figura 1: Distribución de *Pristimantis acerus*, especie endémica de los bosques montanos altos entre Papallacta y Cuyuja, provincia de Napo, nororiente de Ecuador. Localidades marcadas con un cuadrado son reportadas por primera vez en este artículo (Guango Lodge), aquellas marcadas con un círculo fueron reportadas por Lynch y Duellman [2].



Figura 2: Cambios de coloración en vida de un individuo de *Pristimantis acerus* (DHMECN 12058, macho adulto, longitud rostro-cloacal = 32,5 mm) encontrado en Guango Lodge, Napo, Ecuador. a) Individuo exhibiendo cambios en el patrón de coloración al momento de su captura; b) coloración oscura dorsal pero ventral clara después de 30 minutos luego de su captura. c) coloración oscura dorso-ventral al día siguiente de su captura, durante la mañana.



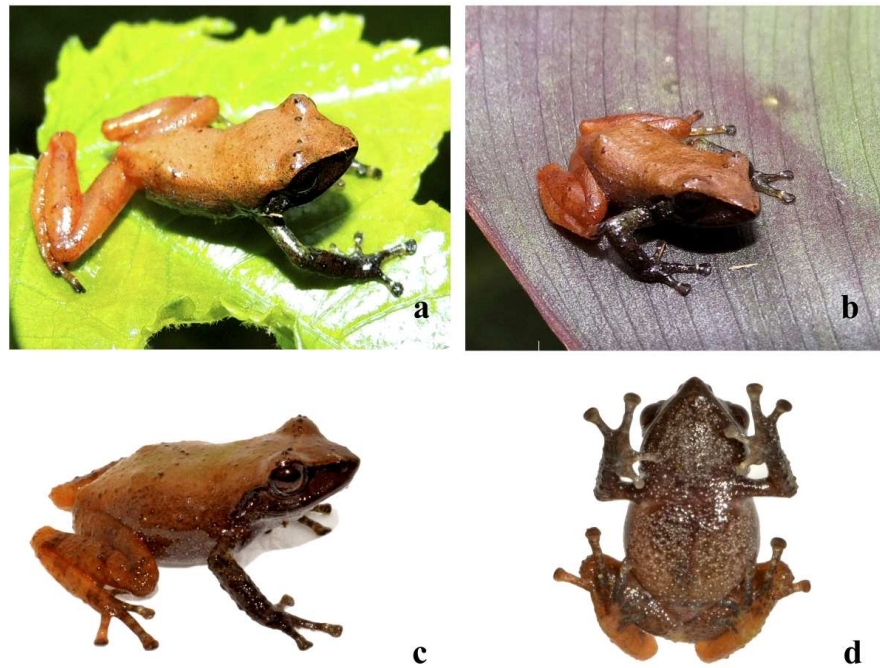


Figura 3: Coloración en vida de individuos juveniles de *Pristimantis acerus* encontrados en Guango Lodge, Napo, Ecuador. a y b) DHMECN 12059 (longitud rostro-cloacal = 14,3 mm), nótese la hilera de tubérculos sobre los párpados e interorbital; c) DHMECN 12060 (longitud rostro-cloacal = 17,1 mm), nótese los tubérculos en forma de “V” invertida en la región pélvica; d) coloración ventral del individuo DHMECN 12060.



Figura 4: Bromelia desprendida de un árbol de ca. 10 m de alto donde se encontraron dos individuos de *Pristimantis acerus* (la flecha indica el lugar donde estaban los cutines).

ganta, labios y los dedos de manos y pies que tenían una coloración café crema (Fig. 2b). Al día siguiente, el individuo se tornó completamente café oscuro negruzco (Fig. 2c). Previamente no se había reportado cambios abruptos de la coloración de un mismo individuo adulto.

Los especímenes DHMECN 12059-60 son los primeros juveniles conocidos de la especie. Estos juveniles exhibieron en vida, una máscara café oscura desde la nariz hasta la región supratimpánica, las superficies dorsales de la cabeza y cuerpo de color café anaranjado, las extremidades anteriores, el vientre y la garganta entre café oscuras y negras con pequeñas marcas blancas, las extremidades posteriores café anaranjadas con tenues bandas café y las puntas de los dedos negras (Fig. 3). Los especímenes juveniles exhibían hileras de tubérculos interorbitales sobre los párpados (Fig. 3a-c) y el individuo DHMECN 12060 presentó tubérculos alineados en forma de “V” invertida en la región pélvica (Fig. 3c). En preservado, los dos juveniles tienen el dorso homogéneamente gris en las tres cuartas partes anteriores del dorso, la porción restante del dorso y las extremidades inferiores son crema y las extremidades anteriores son café oscuras. Se presume que estos cambios de coloración son ontogénicos.

Lynch & Duellman [2] reportaron que un individuo de *P. acerus* fue capturado durante el día bajo un tronco en un pastizal y tres individuos se encontraban perchando sobre arbustos durante la noche. Nuestros registros fueron obtenidos en el interior de un bosque montano en regeneración, dos de ellos (DHMECN12057 y 12059) fueron capturados en el interior de una bromelia durante un muestreo vespertino. La bromelia se había desprendido de la rama de un árbol de ca. 10 m de alto (Fig. 4). Los especímenes DHMECN 12058 y 12060 fueron registrados perchando sobre ramas caídas a una altura no mayor de 0,5 m en el interior de un bosque en sucesión.

No existe información sobre el estado poblacional de *Pristimantis acerus* [3]. Nuestros datos obtenidos en Guango Lodge muestran que esta especie forma parte de un ensamble junto con *P. devillei*, *P. glandulosus*, *P. gladiator* y *P. lividus*. De un total de 85 individuos de las cinco especies, solo cuatro correspondieron a *P. acerus* y su dominancia fue 0.023 individuos/especie, por lo que parece que sus poblaciones son pequeñas. Sin embargo, esto podría ser un sesgo de muestreo. Los datos disponibles de la historia natural de *P. acerus* sugieren que es una rana de hábitos arborícolas, por lo que las metodologías tradicionales de muestreo herpetológico podrían no ser adecuadas para registrar adecuadamente sus poblaciones.

La distribución de *Pristimantis acerus* estimada sobre la base de sus localidades conocidas [2] se enmarca en un polígono mínimo convexo de 3,9 km<sup>2</sup>, restringida a la cuenca alta del río Napo y a la microcuenca del río Papallacta. *Pristimantis acerus* se encuentra categorizada al momento en la categoría UICN de En Peligro

(EN) [3], y nuestros datos apoyan esta categorización. La cuenca alta del río Napo tiene importantes remanentes de ecosistemas montanos que resguardan especies endémicas y en riesgo de extinción, muchas de las cuales (en especial, *Pristimantis*) se encuentran en Guango Lodge. Esto evidencia la importancia de las áreas protegidas privadas para mantener la conectividad entre los bosques montanos y resguardar la diversidad de especies.

### Agradecimientos

Agradecemos a la Fundación EcoCiencia, que con el financiamiento del EcoFondo, nos otorgó la beca de investigación para el proyecto “Priorización de áreas de conservación en el corredor Tropi-Andino OCP, a través del enfoque macroecológico de ranas endémicas *Pristimantis* (Anura: Craugastoridae)” en el cual se obtuvo la información aquí presentada. Nuestro reconocimiento a Irene Bustamante y Esteban Bucheli de Guango Lodge por su hospitalidad; al Ministerio del Ambiente por el permiso de investigación N° 010-14 IC-FAU\_DNB/MA; a Hernando Román por su colaboración en el traslado del equipo al área de estudio; a Mario H. Yáñez-Muñoz por sus valiosas fotografías y observaciones al manuscrito; y a nuestras familias por su apoyo y paciencia a lo largo del proyecto.

### Referencias

- [1] Frost, D. R. 2015. “Amphibian Species of the World: an Online Reference”. Version 6.0. American Museum of Natural History, New York. <http://research.amnh.org/herpetology/amphibia>.
- [2] Lynch, J.; Duellman, W. 1980. “The Eleutherodactylus of the Amazonian Slopes of the Ecuadorian Andes (Anura: Leptodactylidae)”. *University of Kansas, Museum of Natural History, Miscellaneous Publication*, 69: 1-86.
- [3] Lynch, J.; Coloma, L. A.; Ron, S. 2004. “*Pristimantis acerus*”. The IUCN Red List of Threatened Species 2014: e.T56389A11459660. IUCN: Cambridge, Reino Unido. doi: 10.2305/IUCN.UK.2004.RLTS.T56389A11459660.en. <http://www.iucnredlist.org/details/56389/0>.

## Primer registro de *Epidendrum schunkei* D.E. Benn & Christenson (Orchidaceae: Epidendroideae) para los Andes suroccidentales de Ecuador

Francisco Tobar-Suarez<sup>1,2\*</sup>, Michaela Hinojosa<sup>2</sup>, Mario Galvez<sup>3</sup>, Mario H. Yáñez- Muñoz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Biodiversidad, calle Rumipamba 341 y Av. de los Shyris, Casilla Postal: 17-07-8976, Quito, Ecuador.

<sup>2</sup>Verde.ec Servicios Ambientales, Quito, Ecuador.

<sup>3</sup>Fundación Jocotoco, calle Lizardo García E9-104 y Andrés Xaura, Quito, Ecuador.

\*Autor principal/Corresponding author, e-mail: pacotobar76@hotmail.com

Editado por/Edited by: Diego F. Cisneros-Heredia, Ph.D.(c)

Recibido/Received: 2015/10/13. Aceptado/Accepted: 2015/11/30.

Publicado en línea/Published on Web: 2015/12/30. Impreso/Printed: 2015/12/30.

### First record of *Epidendrum schunkei* D.E. Benn & Christenson (Orchidaceae: Epidendroideae) from the southwestern Andes of Ecuador

#### Abstract

*Epidendrum schunkei* D.E. Benn & Christenson was collected at foothill semideciduous and evergreen forests in the province of El Oro, Ecuador. This species was previously known from the extreme northwestern Andes of Peru, and the Ecuadorian localities increase the species' distribution by 110 km N from the type locality and its altitudinal range by ca. 1000 m. The new records of *E. schunkei* suggest that orchid diversity of southwestern Ecuador might include additional species currently known only from Peru.

**Keywords.** Orchidaceae, *Epidendrum schunkei*, distribution, elevation, El Oro, foothill forests, semideciduous forests, Tumbes.

#### Resumen

Se colectó a *Epidendrum schunkei* D.E. Benn & Christenson en bosques siempreverdes y semideciduos piemontanos en la provincia del El Oro, Ecuador. Esta especie era previamente conocida del extremo noroccidental de los Andes de Perú, y las localidades ecuatorianas incrementan la distribución de la especie en 110 km al N de la localidad tipo y su rango altitudinal por ca 1000 m. Los nuevos registros de *E. schunkei* sugieren que la diversidad de orquídeas en el sureste de Ecuador puede incluir especies adicionales actualmente conocidas solo en Perú.

**Palabras Clave.** Orchidaceae, *Epidendrum schunkei*, distribución, altitud, El Oro, bosques piemontanos, bosques semideciduos, Tumbes.

Los relictos de bosque en las vertientes occidentales de los Andes en el sur de Ecuador y norte del Perú son áreas de alto endemismo, que biogeográficamente forman parte de la Provincia Ecuatorial, en el Domino Pacífico de la Región Neotropical [1, 2]. Desafortunadamente existe poca información de la biodiversidad de estas regiones, lo que implica que muchas especies pueden presentar rangos más amplios de distribución geográfica de lo originalmente reportado y requieren de documentación apropiada. Este es el caso de *Epidendrum schunkei* D.E. Benn & Christenson, orquídea reportada únicamente de la colección tipo en los bosques secos de El Caucho en el Departamento de Tumbes, Perú [3–5], y que es reportada en esta publicación por primera vez para Ecuador.

Se examinaron tres especímenes de *Epidendrum schunkei* depositados en la colección del Herbario Nacional del Instituto Nacional de Biodiversidad (QCNE) provenientes de tres localidades de la provincia de El Oro que corresponden a los primeros registros de la especie reportados para Ecuador:

1. QCNE 239275, San Roque, Piñas (03° 29' 36" S, 080° 00' 07" O, 850 m), extraído de los alrededores de San Roque y cultivado en el jardín particular de Phillip Hinstrang, 23 de agosto de 2015, F. Tobar, M. Gálvez y B. Obando;
2. QCNE 239276, El Playón, Piñas (03° 25' 15" S, 080° 22' 12" O, 650 m), epífita en árbol de *Inga*

ISSN 1390-5384





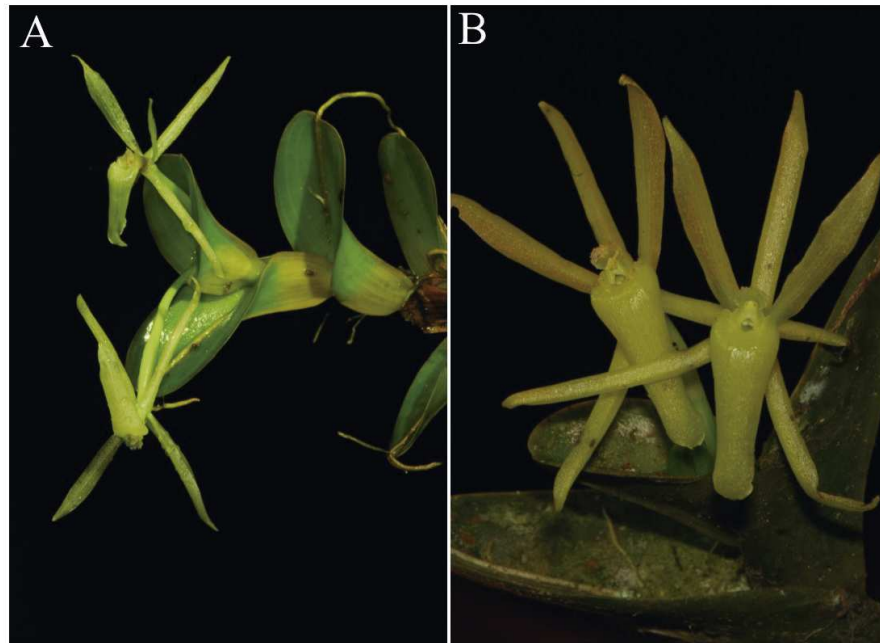


Figura 1: Especímenes de *Epidendrum schunkei* D.E. Benn & Christenson de la provincia de El Oro, Ecuador: (A) QCNE 239276, Piñas, El Playón; (B) QCNE 239277, Zaruma. (Fotografías: Francisco Tobar-Suárez).

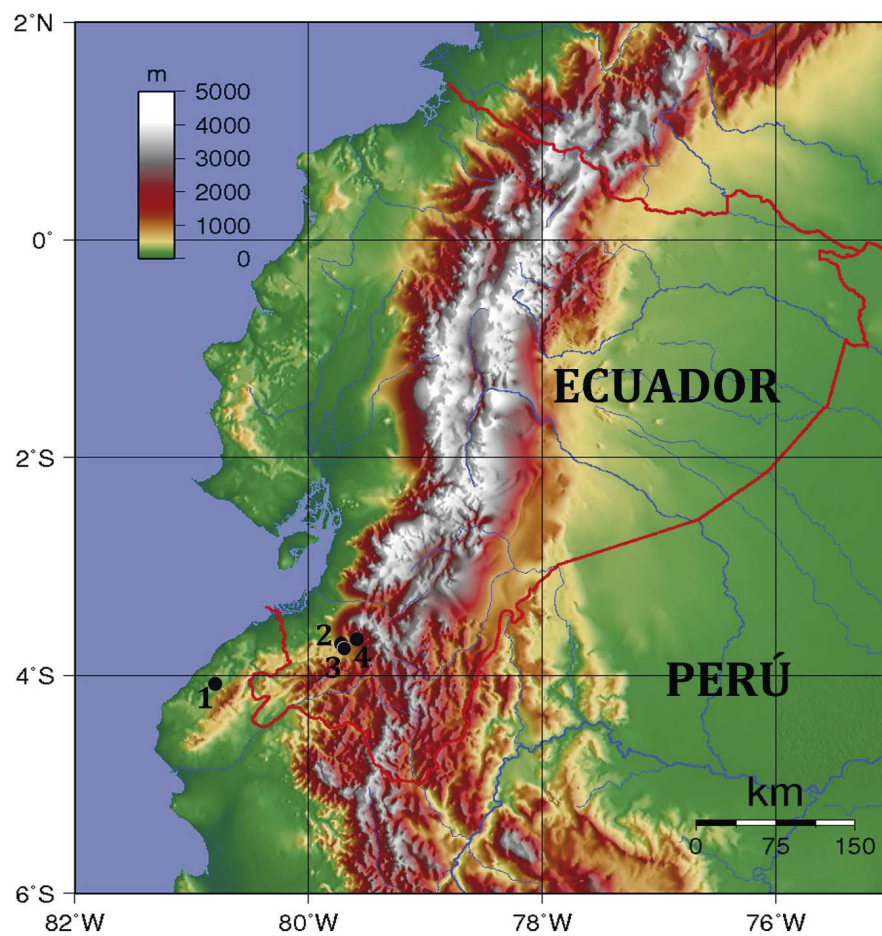


Figura 2: Mapa de distribución de *Epidendrum schunkei* D.E. Benn & Christenson. Localidad tipo: (1) El Caucho, Tumbes, Perú. Nuevos registros de Ecuador: (2) El Playón, (3) San Roque, y (4) carretera Salvias y Tambillo, provincia de El Oro.



sp., 24 de agosto de 2015, F. Tobar y M. Galvez (Fig. 1A);

3. QCNE 239277, carretera entre Salvias y Tambillo, Zaruma (03° 37' 04" S, 079° 30' 02" W, 1300 m), epífita en arboles de aguacate *Persea americana*, 28 de agosto de 2015, F. Tobar, M. Galvez y B. Obando (Fig. 1B).

Las localidades de San Roque y El Playón se ubican en la formación vegetal de los bosques siempreverdes piemontanos de Catamayo-Alamor, mientras que la localidad en la carretera Salvias-Tambillo se encuentra en los bosques semidecíduos piemontanos de Catamayo-Alamor [6]. Estas localidades amplían la distribución de la especie en 110 km al N de su localidad tipo e incrementan su rango altitudinal desde 261 m en Perú hasta 1300 m en Ecuador (Fig. 2).

Los especímenes examinados corresponden al grupo de especies relacionadas con *Epidendrum difforme* y se caracterizan por ser plantas carnosas, cespitosas, y de hábito simpodial; con hojas verde claro a verde azulado; inflorescencia apical generalmente sésil, raramente presente un pedúnculo, pudiendo ser uniflora o corimbosa; flores generalmente verdes, carnosas, ocasionalmente amarillas y muy rara vez de color blanco [4]. Coincidimos que *Epidendrum schunkei* D.E. Benn & Christenson [3] se diferencia de otras especies del grupo por su inflorescencia con múltiples flores, el labelo oblongo-elíptico y los sépalos y pétalos más o menos similares con los ápices acuminados [3].

Este registro permite proyectar una mayor diversidad de especies de orquídeas con patrones similares de distribución a *Epidendrum schunkei* D.E. Benn & Christenson, que podrían alcanzar su límite de distribución septentrional en los bosques de la provincia de El Oro; por ejemplo, *Cattelya mooreana* Withner, Allison & Guenard, y especies de los géneros *Odontoglossum*, *Sobralia*, *Catasetum* y *Maxillaria*. Es importante enfatizar la necesidad de incrementar muestreos en la región y realizar revisiones de colecciones de orquídeas.

### Agradecimientos

Esta publicación es producto del proyecto "Orquídeas de la Provincia de El Oro" financiado por el Gobierno Autónomo Descentralizado de El Oro (GADPEO) y ejecutado por el Instituto Nacional de Biodiversidad (INB). El trabajo de campo contó con la colaboración y respaldo institucional de Cesar Garzón y Betsabeth Obando del INB y de Darwin Gonzales y Eder Armijos de la Secretaría de Gestión Ambiental del GADPEO. Agradecemos a Phillip Hinstrang por permitir el acceso a su colección; a Erick Hágsater del Herbario de la Asociación Mexicana de Orquideología (AMO) de México por verificar las identificaciones taxonómicas; a Roberto Marcos y el equipo técnico del Ministerio del Ambiente

de Ecuador, Regional El Oro, por las facilidades prestadas para la obtención del permiso de investigación y movilización N° 005-IC-FLO-FAU-DPAEO-MAE.

### Referencias

- [1] Morrone, J. J. 2014. "Biogeographical regionalisation of the Neotropical region". *Zootaxa*, 3782(1): 1-110.
- [2] Flanagan, N. M.; Franke, I.; Salinas, L. 2005. "Aves y endemismo en los bosques relictos de la vertiente occidental andina del norte del Perú y sur del Ecuador". *Revista Peruana de Biología*, (12)2: 239-248.
- [3] Bennet, N.E.; Christenson, E. 1998. "New Peruvian Species". *Lindleyana*, (13)1: 48-49.
- [4] Hagsater, E. 2015. "The genus *Epidendrum*. Part 15. Species new and old in *Epidendrum*". *Icones Orchidacearum*. 15: 1533.
- [5] MOBOT. 2015. "Tropicos, botanical information system at the Missouri Botanical Garden". Versión 2015. Missouri Botanical Garden: Saint Louis Missouri, USA. <http://www.tropicos.org>.
- [6] MAE. 2013. "Sistema de clasificación de los Ecosistemas del Ecuador Continental". Ministerio del Ambiente del Ecuador: Quito.

## *Cotylophoron fülleborni* Nasmark, 1937 (Trematoda: Paramphistomidae). Primer Reporte Para Venezuela

Gustavo Morales<sup>1\*</sup>, Luz A. Pino<sup>1</sup>, Libia Moreno<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (Maracay, Venezuela).

\* Autor principal/Corresponding author; e-mail: gustavomoralesc@gmail.com

Editado por/Edited by: Diego F. Cisneros-Heredia, Ph.D.(c)

Recibido/Received: 2015/07/16. Aceptado/Accepted: 2015/10/09.

Publicado en línea/Published on Web: 2015/12/30. Impreso/Printed: 2015/12/30.

### *Cotylophoron fülleborni* Nasmark 1937 (Trematoda: Paramphistomidae). First report for Venezuela

#### Abstract

Paramphistomosis is a parasitic disease caused by trematodes belonging to the family Paramphistomidae. These parasites are found particularly in the rumen and reticulum, but may also be found in the small intestine when immature. *Cotylophoron* genus affects bovine, ovine, caprine, buffalo, and wild ruminants. It is widespread in tropical and subtropical regions where environmental conditions such as high humidity, as well as the presence of the suitable intermediate host allow a successful development of its life cycle. In order to identify the species of Paramphistomidae, the parasites were collected directly from the rumen of 38 bovine that resulted positive in postmortem examination of 150 slaughtered. Parasites underwent histologic mid-sagittal sections, and then stained with hematoxylin and eosin; after which they were identified as *Cotylophoron fülleborni*. This is a first report in registering the *Cotylophoron fülleborni* presence in Venezuela.

**Keywords.** *Cotylophoron fülleborni*, Paramphistomidae, Cattle, Venezuela.

#### Resumen

La paramphistomosis es una parasitosis ocasionada por trematodos pertenecientes a la familia Paramphistomidae, localizados principalmente en el rumen y retículo de rumiantes. El género *Cotylophoron* afecta bovinos, ovinos, caprinos, búfalos y rumiantes silvestres y está ampliamente distribuido en regiones tropicales y subtropicales en donde las condiciones de humedad y la presencia del hospedador intermediario adecuado permiten que su ciclo evolutivo se desarrolle completamente. Para la identificación de la especie se realizó la colecta de los parásitos directamente del rumen de 38 bovinos que resultaron positivos de 150 examinados y sacrificados a nivel de matadero. Los parásitos fueron sometidos a cortes histológicos sagitales a nivel medio y coloreados con hematoxilina-eosina e identificados como *Cotylophoron fülleborni*, constituyendo este el primer reporte de su presencia en Venezuela.

**Palabras Clave.** *Cotylophoron fülleborni*, Paramphistomidae, Bovinos, Venezuela.

#### Introducción

El género *Cotylophoron* ha sido señalado en Venezuela en bovinos de los estados Aragua, Zulia y Bolívar [1], señalando a *C.cotylophorum* como la especie identificada, posteriormente y en base a la observación de la morfología externa otros autores reportan nuevamente al género *Cotylophoron*, pero sin llegar a la identificación específica en bovinos de diversos estados del país, así tenemos: Apure, Zulia, Guárico y Barinas [2] y posteriormente, fue determinada la prevalencia y la incidencia de dicho género mediante exámenes coprológicos y el aislamiento de parásitos adultos del rumen de bovinos sacrificados en Portuguesa [3] lo cual eviden-

cia su amplia distribución en las más importantes zonas ganaderas venezolanas. Sin embargo, hasta el presente no existe certeza de que la especie de *Cotylophoron* presente en el país sea *C.cotylophorum* u otra especie congénica, lo cual constituye el objetivo de la presente investigación.

#### Materiales y Métodos

Los bovinos de los cuales fueron obtenidos los parásitos, eran adultos y criados a pastoreo. El número total de animales cuya mucosa ruminal fue examinada fue de 150, pero de los cuales resultaron positivos a paramfis-

tomidos solo 38, correspondiéndole 12 a Guárico, 7 al Zulia; 16 a Barinas y 3 a Apure.

### Colecta de los parásitos

La mucosa del rumen de cada animal fue examinada cuidadosamente en el matadero para verificar la presencia de paramfistomidos adultos y de cada rumen en el que se observaron trematodos, se procedió a separar las áreas de mucosa con parásitos adheridos, trasladándose al laboratorio en bolsas plásticas numeradas que contenían agua e introducidas en cavas portátiles con hielo, para lograr de esta manera el relajamiento muscular, la muerte y la conservación de los parásitos siguiendo el procedimiento preconizado por González [4]. En el laboratorio se procedió a seleccionar de 3 a 5 parásitos por bovino examinado, los que fueron observados con la ayuda de una lupa estereoscópica y se seleccionaron para el estudio, solo aquellos que estaban en perfectas condiciones.

### Criterio básico diferencial entre los géneros *Paramphistomum* y *Cotylophoron*

La creación del género *Cotylophoron* Stiles y Coldberger, 1910 en base a la presencia de una ventosa genital fuertemente desarrollada, está plenamente justificada [5] y es el criterio morfológico básico que permite su diferenciación del género *Paramphistomum* Fiscoeder 1901, ubicándose a los especímenes en el género *Cotylophoron* cuando dicha ventosa genital está presente y en el género *Paramphistomum* cuando la misma está ausente [6]. La presencia de dicha ventosa fue constatada con la ayuda de un estereomicroscopio.

### Conservación y preparación para su identificación específica

Los parásitos colectados y en buenas condiciones para el estudio morfológico general e histológico, fueron transferidos a frascos etiquetados y conservados en formol al 10 %, hasta su procesamiento y preparación para realizar los cortes histológicos de acuerdo al procedimiento siguiente [4]:

Deshidratación en batería de alcoholes, diafanización con xilol e inclusión en bloques de parafina líquida. Se realizaron cortes histológicos sagitales a nivel medio, de aproximadamente 9 micras de espesor, dichos cortes fueron fijados en laminas con gelatina, llevados a estufa para el secado por un tiempo que oscilo entre 60 a 90 minutos y a una temperatura de 60 °C y finalmente coloreados con hematoxilina (3 a 5 minutos) y eosina (2 a 4 minutos). Como lo mencionamos anteriormente, la identificación de géneros y especies de la familia Paramphistomidae, requiere según diversos autores [5, 7, 8] del estudio morfológico detallado que presentan los especímenes en cortes sagitales medianos, confiriéndole especial importancia a la observación de la faringe, el atrio genital y la ventosa del acetábulo. Las características antes mencionadas, fueron estudiadas en series completas de dichos cortes.

Para la determinación específica se utilizó la información aportada por [5] y que presentamos a continuación:

*Cotylophoron* Stiles y Goldberger, 1910

Paramphistomidae, Paramphistominae. Cuerpo cónico a aplanado. Faringe sin divertículo y del tipo *Cotylophoron*. Esófago con o sin espesamiento muscular, ciegos largos, ondulados. Abertura genital bien desarrollada del tipo *Cotylophoron* o *Schistocotyle*. Testículos lobulados, Ovario antero lateral al acetábulo. Canal de Laurer cruzando la vesícula excretora. Acetábulo ventro terminal del tipo *Cotylophoron*. Vitelarias extendidas por campos laterales, cubriendo lateralmente al acetábulo.

Especie tipo: *Cotylophoron cotylophorum* (Fischoeder, 1901)

### Claves para diferenciar especies del género *Cotylophoron*

1. Espesamiento muscular presente a lo largo del esófago
  - Esfínter genital presente. . . . . *C. macrosphinctris* Say y Graber, 1979
  - Esfínter genital ausente . . . . . *C. cotylophorum* (Fischoeder, 1901)
2. Espesamiento muscular ausente a lo largo del esófago
  - Abertura genital tipo *Cotylophoron*. . . . . *C. fullerborni* Nasmark, 1937
  - Abertura genital tipo *Schistocotyle*. . . . . *C. congolense* Baer, 1936

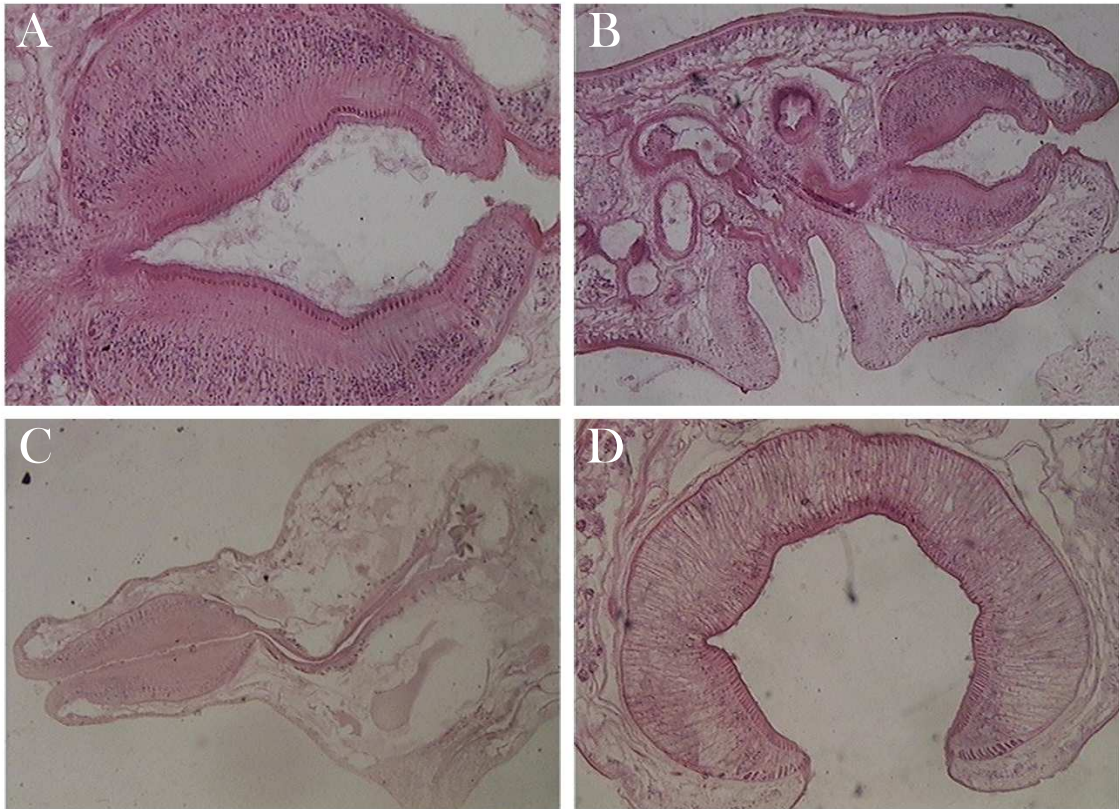
### Resultados

En la Figura 1 (A, B, C) se muestra la faringe tipo *Callicophoron*, en la Figura 1B el atrio genital tipo *Cotylophoron*, en la figura 1C, el esófago sin espesamiento muscular y en la figura 1D, el acetábulo tipo *Cotylophoron*, características estas que de acuerdo a las claves suministradas por Sey [8], nos permiten concluir que se trata de *Cotylophoron fullerborni* Nasmark, 1937.

Se reporta por primera vez para Venezuela a la especie *Cotylophoron fullerborni* Nasmark, 1937 en Bovinos (*Bos taurus* y *Bos indicus*) de Venezuela.

### Discusión

Los paramfistomidos son trematodos difíciles para su estudio y los especímenes aplanados no tienen valor taxonómico debido a la forma cónica y al grosor del cuerpo, ya que el aplastamiento causa distorsión de la misma y de la disposición de varios órganos, además la identificación específica requiere del estudio de las características distintivas evidenciadas solo mediante estudios histológicos, que permitan una detallada observación



**Figura 1:** *Cotylophoron fulleborni* Nasmark, 1937. (A): Faringe tipo *Calicophoron*; (B): Faringe(tipo *Calicophoron*) y Atrio Genital tipo *Cotylophoron*; (C): Faringe tipo *Calicophoron* y Esófago sin espesamiento muscular; (D): Acetábulo tipo *Cotylophoron*.

de la morfología de la faringe, el acetábulo y del atrio genital que requieren de cortes seriados con micrótopo o empleando hojillas de afeitar [5, 7–10]. La observación de los cortes histológicos es consistente con la información aportada por [5, 8, 11], para la identificación de la especie *C. fulleborni*, lo que constituye su primer reporte para Venezuela.

Entre las numerosas especies del género *Cotylophoron* descritas hasta el año 1985, únicamente 7 fueron consideradas válidas y son las siguientes: *C. cotylophorum* (Fischöeder, 1901) Stiles y Goldberger, 1910 (especie tipo), *C. jacksoni* Nasmark, 1937; *C. fulleborni* Nasmark, 1937; *C. panamensis* Price y McIntosh, 1953; *C. bareillensis* Mukherjee y Chauhan, 1965; *C. macrosp-hinctris* Sey y Graber, 1979 y *C. xiangjiangense* Wang, 1979 [11], este autor colocó en sinonimia a *C. gang-dongense* Wang, 1979 con *C. cotylophorum* y a *C. indicus* Nasmark, 1937 y *C. noveboracensis* Price y McIntosh, 1953 con *C. fulleborni* Nasmark, 1937.

La presencia de tremátodos paramfistomidos en países latinoamericanos ha sido señalada en Colombia, donde la especie involucrada fue *Cotylophoron cotylophorum* [12] al igual que en el Perú [13]. En el Brasil las especies de *Cotylophoron* identificadas son: *C. panamensis*, *C. jacksoni*, *C. bareillensis*, *C. fulleborni* y *C. travassosi* [9], además de varias especies del género *Paramphistomum*: *P. hibernae*, *P. gracile*; *P. leydeni*, *P. liorchis* y *P. merlii* [4], mientras que en Ecuador, se reportó al

género *Paramphistomum spp* [14], pero sobre la base de la observación de huevos y sin realizar estudios morfológicos ni histológicos de los parásitos adultos. A este respecto es conveniente señalar que si bien los huevos de *Cotylophoron* y de *Paramphistomum* son similares en cuanto a forma y color, no lo son en cuanto a tamaño, ya que los de *Paramphistomum spp* miden entre 150-180  $\mu\text{m}$  x 75- 100  $\mu\text{m}$ , mientras que los de *Cotylophoron* oscilan entre 120 - 135  $\mu\text{m}$  y tienen por lo tanto un tamaño próximo al de los huevos de *Fasciola hepática* (130 - 150  $\mu\text{m}$  x 75 - 90  $\mu\text{m}$  [15], lo que nos induce a pensar que los huevos observados y mostrados por Velástegui y Guerra [14], son de *Cotylophoron spp.*, pero solo un adecuado estudio de las formas adultas permitiría confirmar la presencia de este género en Ecuador, ya reportado en otros países latinoamericanos.

En cuanto al hospedador intermediario para el género *Cotylophoron* en Venezuela fue reportado *Lymnaea cubensis* [16] y en Colombia *Lymnaea truncatula* [12].

#### Agradecimientos

Al Dr. O Sey, del Department of Zoology, College of Education, Pecs, Hungría, por el procesamiento de los parásitos y su invaluable ayuda para la identificación específica.

Al Sr. Jaime Pilco del Laboratorio de Protección Vegetal (INIA, Maracay, Venezuela), por su colaboración en la preparación del material fotográfico.

### Referencias

- [1] Díaz Ungria, C. 1973. "Helminthos endoparásitos de Venezuela". *Ciencias Veterinarias*, 3(1-2): 37-243.
- [2] Moreno, L.; Domínguez, J.; Parra, M.; Gómez, R. 1980. "Helminthos gastrointestinales de bovinos de los estados Guarico, Zulia, Barinas y Apure". *Veterinaria Tropical*, 5(1): 35-42.
- [3] Forlano, M.; Henriquez, E.; Melendez, R. 2001. "Incidencia y prevalencia de *Cotylophoron* spp. (Tremátoda: Digenea) en bovinos del Asentamiento Campesino Las Majaguas". *Gaceta de Ciencias Veterinarias*, 7(1): 15-23.
- [4] González, L. 1975. "Paramphistomideos (Trematodo) em Ovinos (*Ovis aries*, L.1785) do Rio Grande do Sul". Tesis Maestría. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil: 53.
- [5] Nasmark, K. E. 1937. "A revision of the trematode family Paramphistomidae". *Zoologiska Bidrag fran Uppsala*, 6: 301-666.
- [6] Euzeby, J. 1982. "Diagnostic expérimetal des helminthoses animales" Tome 2. Informations Techniques des Services Vétérinaires. Ministère de l' Agriculture, Francia.
- [7] Eduardo, S. L. 1982. "The taxonomy of the family Paramphistomidae Fiscoeder, 1901 with special reference to the morphology of species occurring in ruminants. I. General considerations". *Systematic Parasitology*, 4: 7-57.
- [8] Sey, O. 1982. "Revision of the genus *Cotylophoron* Stiles et Goldberger, 1910 (Trematoda : Paramphistomata)". *Helminthologia*, 19: 11-24.
- [9] Miranda, M.; Costa, H. 1999. "Report and redescription of some species of *Cotylophoron* Trematoda: Paramphistomidae) in domestic ruminants of Brazil". *Rev. Bras. Parasitol. Vet.*, 8(1): 1-15.
- [10] Graber, M.; Perrotin, C. 1983. "Helminthes et helminthoses des ruminants domestiques d'Afrique tropicale". Editions du Point Vétérinaire, Maisons Alfort (Francia): 86-102.
- [11] Eduardo, S. L. 1985. "The taxonomy of the family Paramphistomidae Fiscoeder, 1901 with special reference to the morphology of species occurring in ruminants. V. Revision of the genus *Cotylophoron* Stiles y Goldberger, 1910". *Systematic Parasitology*, 7(1): 3-26.
- [12] Alarcón, E.; Velásquez, L. 2009. "Descripción morfológica de *Cotylophoron cotylophorum* (Digenea: Paramphistomidae) hallado en bovinos de Rio Negro, Antioquia, Colombia" *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 22(2): 168-177.
- [13] Sánchez, N.; Tentalean, M.; Chávez, A.; Soto, A. 2009. "Presencia de *Cotylophoron cotylophorum* (Trematoda, Paramphistomidae) en bovinos de Loreto", *Perú. Rev. Perú. Biol.*, 16(1): 141-142.
- [14] Velástegui, F.; Guerra, J. 2012. "Prevalencia de parasitosis por *Paramphistomum* spp. en ganado bovino del cantón El Chaco, Provincia del Napo". Universidad Central del Ecuador, Tesis de Grado para obtener el Título de Médico Veterinario, Quito.
- [15] Euzeby, J. "Diagnostic expérimetal des helminthoses animales". Tome 1. Informations Techniques des Services Vétérinaires. Ministère de l' Agriculture, Francia.
- [16] Pino, L.; Morales, G. 1982. "*Lymnaea cubensis* Pfeiffer, 1839, hospedador intermediario de *Cotylophoron cotylophorum* (Fiscoeder,1901) Stiles y Goldberger, 1910 en condiciones naturales". *Acta Científica Venezolana*, 33: 57-60.



## Evaluación del nivel de estrés en leoncillos (*Cebuella pygmaea*) mediante la medición de cortisol en heces

Estefanía Espinosa Mata<sup>1</sup>, Stella de la Torre<sup>1\*</sup>, Venancio Arahana<sup>1</sup>, María de Lourdes Torres<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad San Francisco de Quito. Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales. Diego de Robles s/n y Vía Interoceánica, Quito - Ecuador.

\*Autor principal/Corresponding author, e-mail: [sdelatorre@usfq.edu.ec](mailto:sdelatorre@usfq.edu.ec)

Editado por/Edited by: Diego F. Cisneros-Heredia, Ph.D.(c)

Recibido/Received: 2015/10/05. Aceptado/Accepted: 2015/11/01.

Publicado en línea/Published on Web: 2015/12/30. Impreso/Printed: 2015/12/30.

### Evaluation of the stress level in pygmy marmosets (*Cebuella pygmaea*) by measurement of fecal cortisol

#### Abstract

The pygmy marmoset (*Cebuella pygmaea*) is the smallest platyrrhine primate. It lives in gallery forests in the Upper Amazon basin of Colombia, Ecuador, Peru, Bolivia and Brazil. Although all the Ecuadorian primate species are threatened by human activities, the pygmy marmoset is one of the most vulnerable due to its high specialization in diet and habitat. It is included in the list of vulnerable species in Ecuador. Anthropogenic alteration of the habitats is a stress factor for pygmy marmosets. In this context this study aimed to establish a protocol to measure cortisol concentration in feces (ng/g), as an indicator of the stress level of the individuals, and to make a preliminary comparison of the levels of cortisol and stress of three populations of pygmy marmosets in Amazonian Ecuador. Fifty two fecal samples from the wild populations of Tiputini and San Pablo, and one captive population from Puyo were analyzed. The samples analyzed had a dry weight between 0.05 and 0.07 g. The biological validation made with the fecal samples of an individual quarantined, showed that cortisol levels were higher in times closer to its death. The preliminary results suggest that the captive population from Puyo has higher levels of stress than the wild populations. These results have to be confirmed by analyzing a larger number of samples with information about the time of fecal deposition, the sex, age and previous activities of the individuals.

**Keywords.** *Cebuella pygmaea*, stress, cortisol in feces, primates, Ecuador.

#### Resumen

El leoncillo (*Cebuella pygmaea*), es la especie más pequeña de primate platirrino. Habita en bosques de la Amazonía alta en Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia y Brasil. Aunque todas las especies de primates en el Ecuador están amenazadas por las actividades humanas, ésta es una de las más vulnerables, debido a la especificidad de su alimentación y hábitat. *C. pygmaea* actualmente ha sido incluida en la lista de especies vulnerables en el Ecuador. La alteración antropogénica de los hábitats es un factor de estrés para los leoncillos. En este contexto, los objetivos de esta investigación fueron establecer un protocolo para medir el cortisol en heces, como un indicador del nivel de estrés de los individuos, y realizar una comparación preliminar de los niveles de cortisol y estrés de tres poblaciones de leoncillos en la Amazonía ecuatoriana. Se analizaron 52 muestras provenientes de las poblaciones silvestres de Tiputini y San Pablo y de una población en cautiverio en Puyo. Las muestras analizadas tuvieron pesos secos entre 0.05 y 0.07 g. La validación biológica realizada con muestras de heces de un individuo en cuarentena, evidenció que los niveles de cortisol fueron más elevados en los días más próximos a su muerte. Los resultados preliminares sugieren que la población en cautiverio de Puyo tiene niveles de estrés significativamente más altos que los de las poblaciones silvestres. Estos resultados deben ser confirmados analizando un mayor número de muestras de las que se tenga información completa sobre la hora de deposición y sobre los individuos de los que se tomaron las muestras.

**Palabras Clave.** *Cebuella pygmaea*, estrés, cortisol en heces, primates, Ecuador.

#### Introducción

*Cebuella pygmaea*, conocido también como leoncillo o tití pigmeo, pertenece a la familia Cebidae y a la subfa-

milia Callitrichinae [1]. Es el primate más pequeño de América del Sur [2], habita en bosques siempre verdes de tierras bajas inundables de la Amazonía alta en Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia y Brasil [3]. Los leon-

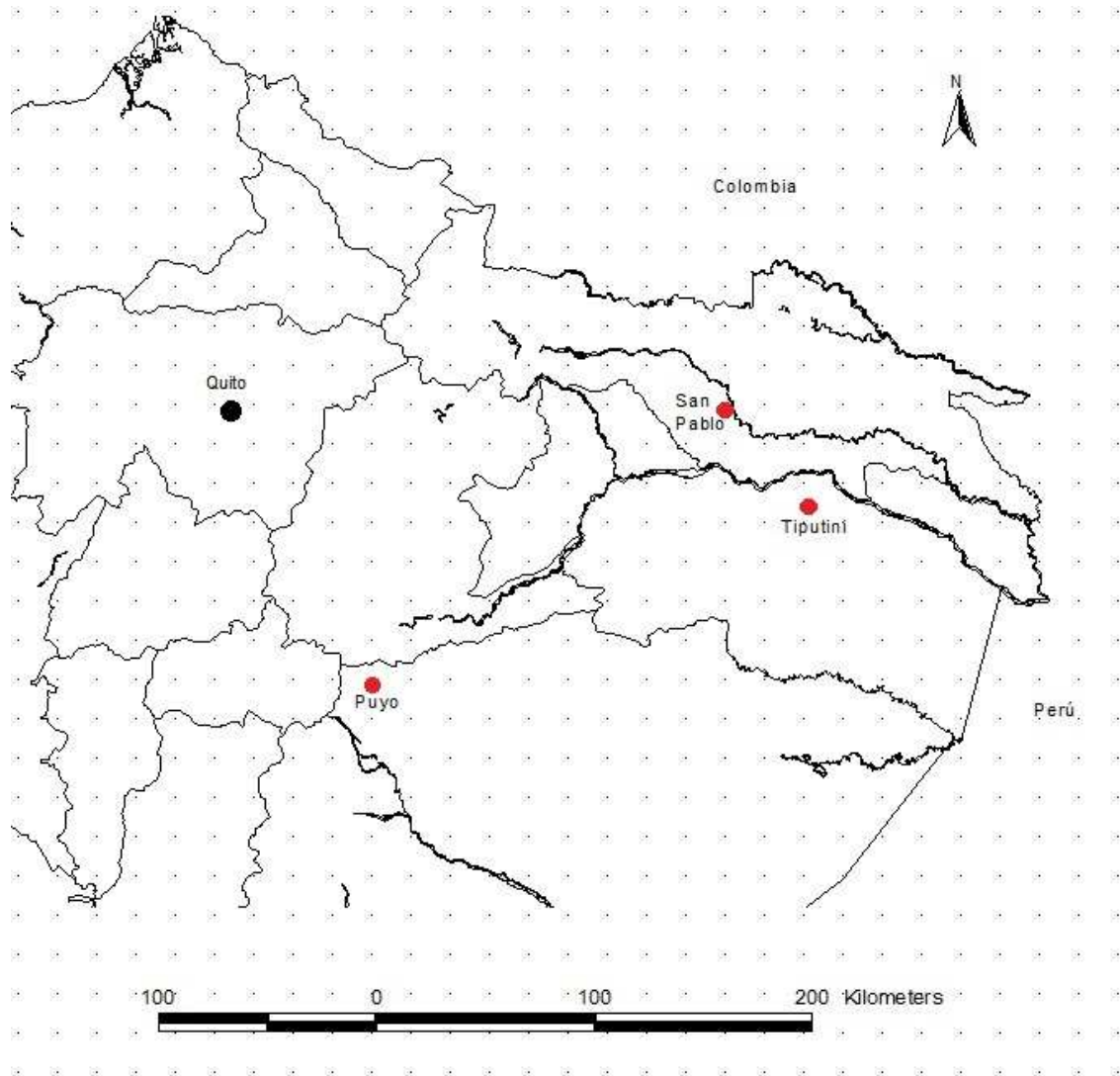


Figura 1: Ubicación de las tres poblaciones de *Cebuella pygmaea* en la Amazonía ecuatoriana (San Pablo, Puyo y Tiputini (4 grupos - T1, T2, T3 y T5).

cillos son importantes para mantener la estructura y la dinámica de los ecosistemas por su papel en las redes tróficas como presas y depredadores [3].

Aunque todas las especies de primates silvestres en el Ecuador están amenazadas por las actividades humanas, *C. pygmaea* es una de las más vulnerables, debido a la especificidad de su alimentación y hábitat [3, 4, 5]. Por esta razón en el 2011 fue incluida en la lista de especies vulnerables de mamíferos del Ecuador [6]. Esta especie se encuentra también incluida en el Apéndice II de la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas (CITES) lo que indica que su comercio internacional debe ser controlado cuidadosamente [7].

Los primates son especialmente sensibles a los efectos de la fragmentación del hábitat. El 90 % de sus poblaciones vive en bosques tropicales [7], de manera que la destrucción y fragmentación de este ecosistema ha sido una de las causas principales del declive mundial de este grupo de mamíferos [8]. La fragmentación del

bosque tiene múltiples consecuencias para los primates; además de la restricción espacial a sus actividades, la reducción de la disponibilidad de alimentos, la alteración de la demografía y la dinámica de la población, aumenta la susceptibilidad a enfermedades, desequilibrando la homeostasis y causando estrés en los individuos [9]. El estrés se define como un estado de alteración de la homeostasis de un individuo debido a factores ambientales, como las temperaturas extremas, escasez de agua y/o alimento, o factores fisiológicos como el estado reproductivo [9]. Además puede ser desencadenado por factores psico-sociales como peleas, subordinación social o carencia de control sobre una situación dada [10]. La presencia continua de los seres humanos, la provisión artificial de los alimentos y las perturbaciones ambientales también son causa de estrés [9]. La acción de estos estímulos produce cambios en la actividad del sistema nervioso autónomo y el eje hipotálamo-pituitaria-adrenocortical-HPA [11].

La respuesta al estrés es fisiológicamente costosa y pue-

	Muestras	g muestra seca	Concentración ng cortisol / g muestra
1	PY1.3	0,05	799,44
2	PY1.2	0,05	738,61
3	PY1.1	0,1	365,64

**Tabla 1: Validación biológica del protocolo de extracción de cortisol usando un individuo (PY1) cuyas características eran conocidas. Las muestras fueron rotuladas de acuerdo a la fecha de colección de la muestra, siendo PY1.1 la muestra más lejana a la muerte del individuo y PY1.3 la más cercana ( $\rho = 1$ ).**

de tener efectos negativos sobre los procesos esenciales del organismo cuando se da durante períodos prolongados. El estrés puede afectar el éxito reproductivo de los individuos y, como consecuencia a la dinámica y viabilidad de una población [9]. Por tanto, desde el punto de vista de conservación de la vida silvestre, y en este caso de los leoncillos, es importante evaluar el nivel de estrés al que están sometidos estos animales, con el objetivo de encontrar sus causas junto con las medidas tendientes a reducirlo.

En la mayoría de los mamíferos, incluidos los primates, el principal glucocorticoide es el cortisol, el cual se incrementa en situaciones de estrés, por lo que constituye un marcador deseable cuando se busca determinar niveles de estrés [12]. Hay que tener en cuenta que existen variaciones individuales relacionadas con el sexo, condiciones reproductivas o condición social, que pueden afectar las concentraciones de cortisol [13]. El método tradicional de medición del cortisol es en el plasma sanguíneo, pero al ser éste un método invasivo, en la actualidad se prefiere determinar cortisol en otros productos corporales como saliva, orina y heces. Los métodos no invasivos son deseables ya que los animales no necesitan ser capturados y se pueden obtener varias muestras sin alterar el comportamiento o estado endócrino del individuo [14].

En este contexto, los objetivos de esta investigación fueron: 1) establecer un protocolo para medir el cortisol en heces de leoncillos, como un indicador del nivel de estrés de los individuos y; 2) realizar una comparación preliminar de los niveles de estrés de leoncillos de tres poblaciones en la Amazonía ecuatoriana. Dos de estas son poblaciones en estado silvestre que habitan en bosques con diferente grado de fragmentación; la tercera es una población en cautiverio.

## Metodología

### Áreas de Estudio

Las áreas donde se colectaron las muestras de heces de leoncillos fueron: (1) Puyo, Centro de Rescate Yanacocha, Provincia de Pastaza (coordenadas UTM, zona 18. Datum WGS 84, 9838712 N - 167707 E), (2) San Pablo, Provincia de Sucumbíos (9969781 N - 341056 E) y (3) Estación de Biodiversidad Tiputini, Provincia de Orellana (9929379 N - 371669 E) (Fig 1).

En Puyo, en el Centro de Rescate Yanacocha, estudiamos un grupo en cautiverio de 7 individuos en el 2013 y 12 individuos en el 2014. En San Pablo estudiamos un

grupo silvestre de 6 individuos en el 2011, esta área ha sufrido en los últimos años un alto grado de fragmentación de los bosques [3, 4]. Finalmente en Tiputini, estudiamos 4 grupos silvestres: T1 (con 3 individuos en el 2012 y 5 individuos en el 2013), T2 (con 6 individuos en el 2012), T3 (con 6 individuos en el 2013) y T5 (con 5 individuos en el 2014), esta población no está expuesta a los efectos de la fragmentación ni a actividades de cacería.

### Métodos

Las heces en todos los grupos fueron colectadas en mallas colocadas bajo los principales árboles de comida de los grupos. Los grupos fueron observados a lo largo de todo el día para cubrir todo el período de actividad de los leoncillos, en períodos de 3 a 6 horas de observación continua. Las heces eran recolectadas en cuanto se detectaba su presencia en la red. Se trató siempre de identificar a los individuos que las producían pero esto solo fue posible en pocas ocasiones. En todas las muestras se registró la fecha y el grupo al que pertenecían, en algunas muestras se registró la hora de deposición. Las muestras fueron guardadas en alcohol etílico al 90 % en condiciones de sombra hasta su transporte al Laboratorio de Biotecnología de la USFQ.

La extracción de cortisol a partir de heces se realizó siguiendo el protocolo propuesto por Ziegler y colaboradores [15]. Para realizar este proceso se secó la muestra a 28 °C por 6 horas, luego se la pulverizó y se añadió agua y etanol (1:1), se mezcló con el vórtex y se centrifugó por 25 minutos a 13200 rpm, colectándose el sobrenadante. Se preparó una curva estándar de 8 puntos (0-0.04-0.1-0.2-0.4-1.0-2.0-10.0 ng/ml) a partir de cortisol puro, provisto en el kit "Cortisol EIA Kit" de Oxford Biomedical. Para reducir sesgos en las mediciones de cortisol solo se analizaron las muestras con pesos secos entre 0.05 g y 0.07 g (en pruebas preliminares detectamos concentraciones consistentemente altas de cortisol en muestras menores a 0.05 g). Mediante ensayos por inmunoabsorción ligada a enzimas (ELISA), se determinaron, por duplicado, las concentraciones de cortisol de cada una de las muestras siguiendo el protocolo del kit. Las lecturas del microplato se realizaron usando un fotocolorímetro DYNEX MRX y los valores fueron transformados a ng de cortisol/g de peso seco de la muestra.

### Análisis de datos

Para evaluar la validez biológica del protocolo de cuantificación de los niveles de cortisol, se analizaron las concentraciones de cortisol de tres muestras de heces



de un individuo en cuarentena de la población de Puyo (PY1), colectadas en fechas diferentes durante un periodo de dos meses previo a su deceso. La muestra PY1.1 fue colectada a fines de mayo 2013, la muestra PY1.2 a principios de junio 2013, y la muestra PY1.3, que fue la muestra más próxima a la muerte del individuo, a mediados de junio 2013. Se realizó una correlación de Spearman entre las concentraciones de cortisol y el orden cronológico en el que las muestras fueron tomadas (1: fecha más distante del deceso, 3: fecha más próxima al deceso).

Con las concentraciones de cortisol de 52 muestras con pesos secos entre 0.05 y 0.07 g de las tres poblaciones, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y una prueba de separación de medias de Tukey; el software utilizado para estos análisis fue R. Para evaluar, de forma preliminar, diferencias entre horas de deposición y sexo de los animales, se compararon los promedios de cortisol de aquellas muestras en las que se tenía información sobre el período del día en el que fueron depositadas (06h00 a 12h00 vs. 12h01 a 18h00) y entre muestras de las cuales se conocía el sexo del individuo (hembras vs. machos).

## Resultados

### Validación biológica

De las tres muestras analizadas del individuo del Puyo en cuarentena, la muestra PY1.3 tuvo la mayor concentración de cortisol con 799,44 ng/g muestra seca (Tabla 1). El coeficiente de correlación de Spearman entre la concentración de cortisol y la fecha de colección de las muestras evidencia una correlación perfecta ( $\rho=1$ ), aunque no significativa debido al bajo número de muestras ( $n=3$ ).

### Diferencias interpopulacionales en la concentración de cortisol

Los niveles de cortisol de las muestras de la población en cautiverio del Puyo fueron significativamente más altos que los de las muestras de las poblaciones silvestres de San Pablo y Tiputini ( $F_{2,49}=9.46$ ,  $p=0.00033$ , Tukey test Puyo vs. Tiputini  $p=0.0043848$ , Puyo vs. San Pablo  $p=0.0006135$ ). Estos resultados sugieren que el cautiverio tiene un efecto significativo sobre los niveles de cortisol (y de estrés) en esta especie de primate. En el test de separación de medias de Tukey no se encontraron diferencias significativas entre San Pablo y Tiputini (Fig 2).

### Diferencias por hora de deposición de la muestra y sexo en concentraciones de cortisol

El número de muestras analizadas para evaluar los efectos de la hora de deposición de la muestra y el sexo del individuo sobre las concentraciones de cortisol fue bajo ( $n$  06h00 a 12h00 = 5,  $n$  12h01 a 18h00 = 2;  $n$  hembras = 4,  $n$  machos = 3) por lo que no realizamos pruebas

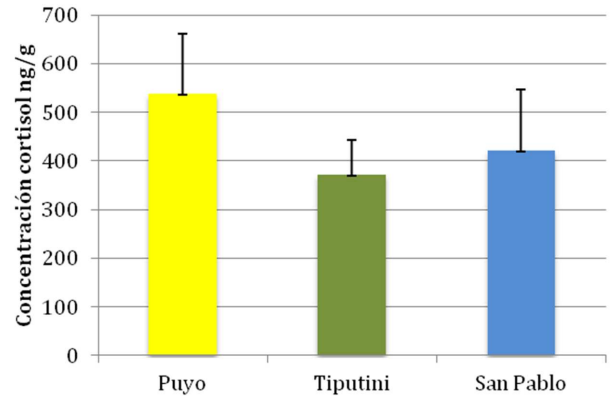


Figura 2: Promedios ( $\pm$  desviaciones estándar) de las concentraciones de cortisol en heces de las tres poblaciones de *C. pygmaea* en estudio ( $n$  Puyo = 18  $n$ , San Pablo = 11,  $n$  Tiputini = 23).

estadísticas con estos datos. Se registraron niveles de cortisol más altos en heces producidas y colectadas en horas de la tarde (12h01 a 18h00) (Fig 3) y en heces de hembras (Fig 4).

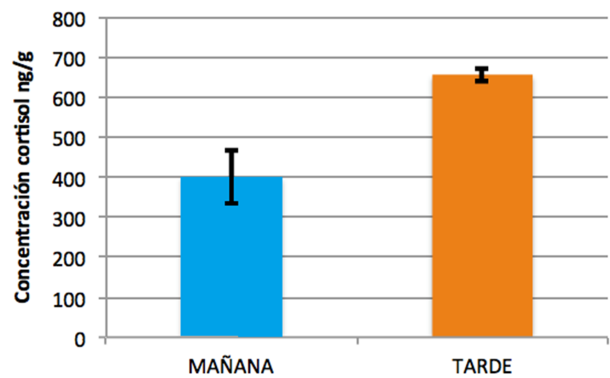


Figura 3: Concentración de cortisol en muestras de heces de individuos de *C. pygmaea* según la hora de deposición ( $n$  mañana: 06h00 a 12h00 = 5,  $n$  tarde: 12h00 a 18h00 = 2).

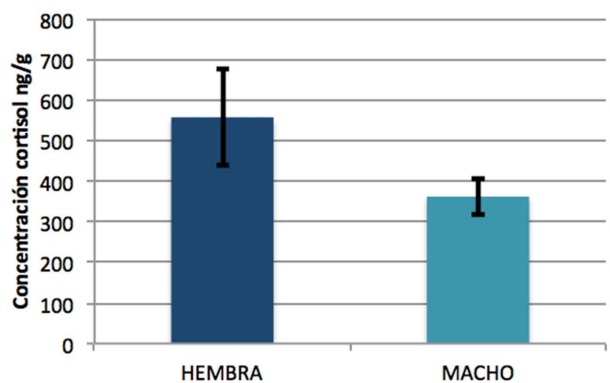


Figura 4: Concentración de cortisol en muestras de heces de individuos de *C. pygmaea* según el sexo ( $n$  hembras = 4,  $n$  machos = 3).

## Discusión

*Cebuella pygmaea* es una de las especies de primates más amenazadas en el Ecuador debido a su alta especialización de dieta y de hábitat. Las actividades antropogénicas como la construcción de carreteras, viviendas,

cultivos y tala de árboles han reducido severamente su hábitat [3]. Este impacto humano puede tener repercusiones en el comportamiento, el éxito reproductivo y la viabilidad de las poblaciones y puede verse reflejado en los niveles de estrés que estos primates experimentan [3].

La comparación preliminar realizada entre las tres poblaciones sugiere que el cautiverio es un factor de estrés importante para esta especie. Varias investigaciones demuestran que animales silvestres que son sometidos a cautiverio suelen tener niveles de corticosterona más altos en comparación con los individuos silvestres de la misma especie [16, 17, 18]. Sin embargo, en estos análisis es importante también considerar el tiempo de aclimatación y las condiciones ambientales del cautiverio [19]. Por otro lado, el hecho de que los niveles de cortisol no hayan sido significativamente diferentes entre las poblaciones de San Pablo (bosques altamente fragmentados) y Tiputini (bosques sin fragmentación antropogénica) sugiere que existen factores naturales que generan estrés en los leoncillos aun en bosques con mínimo impacto humano. Sin embargo, es también posible que estos resultados sean consecuencia del bajo número de muestras analizadas que no permitió controlar las variaciones individuales de los niveles de cortisol.

En este contexto, es importante continuar monitoreando los niveles de cortisol tanto de grupos de leoncillos en cautiverio, como en estado silvestre. Al relacionar las concentraciones de cortisol con factores del ambiente físico y social (demográfico) podremos identificar los principales factores de estrés para mejorar las condiciones de vida de los animales en cautiverio y evaluar el impacto de factores ambientales antropogénicos, como la fragmentación de los bosques, y naturales, como la depredación o la competencia interespecífica, en poblaciones silvestres de esta especie.

Estudios realizados con distintas especies de primates, y en otros animales, demuestran que son varios factores los que pueden alterar las concentraciones de cortisol. Un estudio realizado con muestras de sangre, indica que en especies diurnas, los niveles de cortisol disminuyen gradualmente durante todo el día para reducirse al mínimo justo antes de que el animal descansa por la noche. Los altos niveles de cortisol al despertar probablemente sirven para movilizar las reservas de energía en preparación para la actividad diaria [20, 21]. Sin embargo, un estudio mostró que para los titíes comunes (*Callithrix jacchus*), los niveles más altos de cortisol en heces ocurrían en la tarde, lo cual concuerda con nuestro estudio. Aunque esto podría parecer inesperado ya que este animal es una especie diurna, es posible atribuir este resultado al tiempo que el cortisol se mantiene en los productos fecales en el intestino antes de ser excretado fuera del cuerpo [21, 22]. Así los niveles de cortisol en heces indican en realidad las concentraciones de cortisol circulante que se produjeron en el cuerpo del individuo algunas horas antes [21]. Esto podría explicar las mayores

concentraciones de cortisol registradas en nuestro estudio en muestras producidas en la tarde. El bajo número de muestras en el que se basa nuestro análisis no permite llegar a resultados concluyentes. Nuevos análisis son necesarios para confirmar o refutar este posible patrón y sus causas. Así mismo, en estudios realizados con *C. jacchus* se ha determinado que las hembras tienen valores de referencia de cortisol tres veces mayores que los machos, independientemente de si éstas se están reproduciendo o no [23]. Aunque nuestros resultados coinciden con los de este estudio, necesitamos analizar un mayor número de muestras para conocer más sobre las diferencias entre sexos en los niveles de cortisol y estrés en esta especie de primate.

La validación biológica del protocolo de extracción y cuantificación de cortisol en heces del leoncillo, permitió evaluar como se relaciona la condición física del animal con la concentración de cortisol de las muestras de un individuo en cuarentena. Nuestros resultados sugieren que los desajustes fisiológicos que llevaron a la muerte del individuo fueron un factor de estrés que actuó en forma aditiva. Estos resultados evidencian también la efectividad de los análisis para detectar cambios en los niveles de cortisol de acuerdo a las condiciones fisiológicas de los individuos.

### Agradecimientos

El estudio fue realizado gracias a la colaboración de Charles T. Snowdon del Departamento de Psicología de la Universidad de Wisconsin, Toni Ziegler del Wisconsin Regional Primate Center, al Laboratorio de Biotecnología Vegetal y del Laboratorio de Enfermedades Tropicales de la Universidad San Francisco de Quito.

La investigación de campo se realizó bajo los permisos 0010-2012-FAU-MAE-DPO-PNY, 006-2013-IC-FAU-DPAP/MAE, 012-2014-FAU-MAE-DPAO-PNY y 004-IC-FAU-DPS/NA del Ministerio del Ambiente a Stella de la Torre. Agradecemos el apoyo en la investigación de campo de Hernán Payaguaje, Alfredo Payaguaje, Anna del Valle, Anna Zango, Robert Burton, Gary Judas, Marcela Garzón y Lucía Valles, así como de los directores y personal de la Estación de Biodiversidad Tiputini y del Centro de Rescate Yanacocha.

### Referencias

- [1] Tagliaro C.; Cruz, M.; Schneider, H.; Stanhope, I.; Stanhope, M. 2000. "Molecular studies of *Callithrix pygmaea* (Primates, Platyrrhini) based on transferrin intronic and ND1 regions: implications for taxonomy and conservation". *Genetics and molecular biology*, 23(4): 729-737.
- [2] Bairrao, E. 2010. "*Cebuella pygmaea*. Guía de manejo para Callitricidos". (Asociación Europea de Zoológicos y Acuarios) EAZA, ZooParc de Beauval. Segunda Edición.

- [3] de la Torre S.; Yépez, P.; Snowdon, C. 2009. "Conservation Status of Pygmy marmosets (*Cebuella pygmaea*) in Ecuador". Chapter 22. En: "The Smallest Anthropoids: The Marmoset/Callimico Radiation". L.C. Davis, S.M. Ford, L. Porter (eds.). Springer Science-Business Media: 451-464.
- [4] de la Torre S.; Yépez, P.; Snowdon, C.; Payaguaje, A. 2007. "Ecología, comportamiento y conservación del leoncillo *Callithrix (Cebuella) pygmaea* en Tierras Secoya". En: Caminando en el sendero, hacia la conservación del ambiente y la cultura Secoya. S. de la Torre y P. Yépez (eds). Fundación VIHOMA. Quito: 91-98.
- [5] Yépez, P.; de la Torre, S.; Snowdon, C. 2005. "Interpopulation differences in exudate feeding of Pygmy marmosets in Ecuadorian Amazonia". *American Journal of Primatology*, 66: 145-158.
- [6] Tirira, D. G. 2011. "Libro Rojo de los mamíferos del Ecuador". 2ª edición. Publicación especial sobre los mamíferos del Ecuador 8. Fundación Mamíferos y Conservación. Pontificia Universidad Católica del Ecuador & Ministerio del Ambiente del Ecuador, Quito.
- [7] de la Torre, S.; Rylands, A. 2008. "*Cebuella pygmaea*. The IUCN Red List of Threatened Species". Version 2014.2. <http://www.iucnredlist.org/details/41535/0>.
- [8] Vegas-Carrillo, S. 2008. "Efectos de la transformación del hábitat en la conducta y niveles de estrés de *Alouatta palliata mexicana*". Tesis doctoral. Universidad de Barcelona: Barcelona.
- [9] Rangel-Negrín A.; Alfaro, J.; Valdez, R.; Romano, M.; Serio-Silva, J. 2009. "Stress in Yucatan spider monkeys: effects of environmental conditions on fecal cortisol levels in wild and captive populations". *Animal Conservation ZSL*: 496-502.
- [10] Álvarez, C.; Arias, L. 2005. "Validación y aplicación de la prueba ELISA para medir cortisol fecal". *Medicina Veterinaria. COLCIENCIAS: Colombia*, 10: 53-64.
- [11] Romero, M.; Uribe, L.; Sánchez, J. 2011. "Stress biomarkers as indicators of animal welfare in cattle beef farming". *BioSalud*, 10(1): 71-87.
- [12] Brousset, D.; Galindo, F.; Valdez, R.; Romano, M., Schuneman, A. 2005. "Cortisol in saliva, urine and feces: non-invasive assessment of wild animals". *Etiología, fauna Silvestre y animales de laboratorio*, Universidad Nacional Autónoma de México: México D.F.: 335:337.
- [13] Keay, J.; Jatinder, B.; Matthew, C.; Gaunt, B.; Taranjit, K. 2006. "Fecal glucocorticoids and their metabolites as indicators of stress in various mammalian species: a literature review". *Journal of Zoo and Wildlife Medicine*, 37(3): 234-244.
- [14] Goymann, W.; Mostl, E.; Van't Hof, T.; East, M.; Hofer, H. 1999. "Noninvasive fecal monitoring of glucocorticoids in spotted hyenas, *Crocuta crocuta*". *General and Comparative Endocrinology*, 114: 340-348.
- [15] Ziegler, T.; Scheffler, G.; Snowdon, C. 1995. "The relationship of cortisol levels to social environment and reproductive functioning in female cotton top tamarins, *Saguinus oedipus*". *Hormones and Behavior*, 29: 407-424.
- [16] Marra, P. P.; Lampe, K. T.; Tedford, B. L. 1995. "Plasma corticosterone levels in two species of *Zonotrichia* sparrows under captive and free-living conditions". *Wilson Bulletin*, 107: 296-305.
- [17] Romero, L.; Wingfield, M. 1999. "Alterations in hypothalamic-pituitary-adrenal function associated with captivity in Gambel's white-crowned sparrows (*Zonotrichia leucophrys gambelii*)". *Comparative Biochemistry and Physiology B*, 122: 13-20.
- [18] Washburn, B. E.; Millspaugh, J. J.; Schulz, J. H.; Jones, S. B.; Mong, T. W. 2003. "Using fecal glucocorticoids for stress assessment in mourning doves". *Condor*, 105: 696-706.
- [19] Wingfield, J. C.; Smith, J. P.; Farner, D. S. 1982. "Endocrine responses of white-crowned sparrows to environmental stress". *Condor*, 84: 399-409.
- [20] Coe C. L.; Levine, S. 1995. "Diurnal and annual variation of adrenocortical activity in the squirrel monkey". *American Journal of Primatology*, 35: 283-292.
- [21] Cross, N.; Rogers, L. 2004. "Diurnal cycle in salivary cortisol levels in Common Marmosets". *Centre for neuroscience and animal behaviour*, School of Biological Biomedical and Molecular Science. University of New England: 134-139.
- [22] Sousa, M. B. C.; Ziegler, T. E. 1998. "Diurnal variation on the excretion patterns of fecal steroids in common marmoset (*Callithrix jacchus*) females". *American Journal of Primatology*, 46: 105-117.
- [23] Ferreira, J.; Cordeiro, M.; Sousa, M.; Freire, M. 2010. "Morning and afternoon patterns of fecal cortisol excretion among reproductive and non-reproductive male and female common marmosets, *Callithrix jacchus*". *Biological Rhythm Research*, 32(2): 159-167.

## Sensibilidad antimicrobiana entre los serogrupos de *Shigellae* aislados en la ciudad de Quito-Ecuador

Irina Villacrés Granda<sup>1\*</sup>, Iliana Alcocer<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Escuela de Ciencias Biológicas, Laboratorio de Microbiología. Avenida 12 de Octubre 1076 y Roca. -Casilla postal- 17-01-2184, Quito, Ecuador.

\*Autor principal/Corresponding author, e-mail: irinamaribel@gmail.com

Editado por/Edited by: Diego F. Cisneros-Heredia, Ph.D.(c)

Recibido/Received: 2015/06/29. Aceptado/Accepted: 2015/10/09.

Publicado en línea/Published on Web: 2015/12/30. Impreso/Printed: 2015/12/30.

### Antimicrobial resistance within serogroups of *Shigellae* isolates in the city of Quito Ecuador

#### Abstract

The pathotype *Shigellae* includes bacillus from the species *S. flexneri*, *S. sonnei*, *S. boydii* and *S. dysenteriae* which are causatives of the disease known as bacillary dysentery or shigellosis. The pathogenicity of the genus is characterized by the presence of high antibiotic resistance. The aim of this study was to identify the species and antimicrobial susceptibility in clinical isolates of *Shigellae*. We analyzed 79 isolates obtained from Zurita & Zurita Laboratorios and Vozandes Hospital in the city of Quito. Three species were obtained by serotyping, using polyclonal antisera: *S. flexneri* ( $n=50$ ; 63,29 %), *S. sonnei* ( $n=23$ ; 29,11 %), and *S. boydii* ( $n=6$ ; 7,59 %). The antimicrobial susceptibility was analyzed using the Kirby Bauer method and recommendations from the "Clinical and Laboratory Standards Institute" (CLSI). Most of the isolates showed resistance to tetracycline ( $n=76$ ; 96,20 %), ampicillin ( $n=75$ ; 94,94 %), trimethoprim/sulfamethoxazole ( $n=68$ ; 86,08 %) and chloramphenicol ( $n=67$ ; 84,81 %).

The results showed the incidence of multidrug resistance to antibiotics commonly used for treating shigellosis, and the presence of three species of *Shigellae*.

**Keywords.** Antibiotics, bacillary dysentery, *Shigellae*.

#### Resumen

El patotipo *Shigellae* comprende bacilos de las especies *S. flexneri*, *S. sonnei*, *S. boydii* y *S. dysenteriae*, causantes de la enfermedad conocida como disentería bacilar o shigelosis. La patogenicidad del género se caracteriza por la presencia de una alta multiresistencia a antibióticos. El objetivo de este estudio fue identificar las especies y la sensibilidad antimicrobiana en aislados clínicos de *Shigellae*. Se analizaron 79 aislados obtenidos de Zurita & Zurita Laboratorios y del Hospital Vozandes en la ciudad de Quito. Mediante serotipaje, con el uso de antisueros policlonales, se obtuvieron 3 especies: *S. flexneri* ( $n=50$ ; 63,29 %), *S. sonnei* ( $n=23$ ; 29,11 %), y *S. boydii* ( $n=6$ ; 7,59 %). La sensibilidad antimicrobiana se analizó siguiendo el método de Kirby-Bauer y las recomendaciones del "Clinical and Laboratory Standards Institute" (CLSI). La mayoría de las cepas mostraron resistencia a tetraciclina ( $n=76$ ; 96,20 %), ampicilina ( $n=75$ ; 94,94 %), trimetoprim/sulfametoxazol ( $n=68$ ; 86,08 %) y cloranfenicol ( $n=67$ ; 84,81 %). Los resultados obtenidos demostraron la incidencia de multiresistencia a antibióticos comúnmente utilizados para el tratamiento de shigelosis, y la presencia de 3 especies de *Shigellae*.

**Palabras Clave.** Antibióticos, disentería bacilar, *Shigellae*.

#### Introducción

El patotipo *Shigellae* comprende bacilos Gram negativos de 0,3 a 1  $\mu\text{m}$  diámetro y de 1 a 6  $\mu\text{m}$  de longitud, no móviles, no formadores de esporas, anaerobios facultativos, pertenecientes a la familia *Enterobacteriaceae* y causantes de la enfermedad conocida como shigelosis o disentería bacilar [1]. Su identificación se fundamen-

ta en características bioquímicas y antigénicas, en base a ellas se describen cuatro especies: *Shigella dysenteriae*, serogrupo A; *Shigella flexneri*, serogrupo B; *Shigella boydii*, serogrupo C; y, *Shigella sonnei*, serogrupo D; todos éstos causantes disentería bacilar, aunque con diferente gravedad [1–3].

La transmisión de estas bacterias se produce principal-

mente por ruta fecal-oral directa o indirecta en lugares que se caracterizan por una higiene deficiente, como guarderías o centros carcelarios, existiendo también un alto índice de contagio en personas que realizan viajes a países en vías de desarrollo, produciéndose el síndrome diarreico de los viajeros [4].

Alrededor del mundo la enfermedades diarreicas son consideradas un problema de salud pública, especialmente en países en vías de desarrollo donde se estima que causan alrededor de 165 millones de casos y 1.1 millón de muertes por año [4]. En el Ecuador se han registrado 516 567 casos hasta el 2007 y un total de 32 675 casos en el 2009 [5].

La resistencia a antibióticos en las especies del patotipo *Shigellae* ha ido aumentando lo que ha limitado el tratamiento y el uso de antimicrobianos como ampicilina y trimetoprim/sulfametoxazol [6, 7]. Esta resistencia ha sido adquirida debido al indiscriminado uso de antibióticos y la transferencia horizontal de genes [7]. Actualmente se recomienda ciprofloxacina como primera línea de tratamiento para pacientes con diarrea con sangre, indistintamente de su edad, debido a que este antibiótico es eficiente, seguro y de bajo costo [8].

El objetivo de este análisis fue identificar las especies de los aislados de *Shigellae* mediante el uso de sueros polivalentes y determinar la sensibilidad a antimicrobianos de éstos, para así definir la población analizada y formular datos que informen sobre el posible tratamiento de shigelosis en Quito- Ecuador.

## Materiales y Métodos

### Obtención y almacenamiento de aislados

79 aislados clínicos de *Shigellae* fueron colectados progresivamente en Zurita & Zurita Laboratorios y en el Hospital Vozandes en Quito desde el año 2005 hasta el año 2010.

Los aislados fueron mantenidos en congelación a  $-80^{\circ}\text{C}$  y  $-20^{\circ}\text{C}$  en una solución de caldo Infusión Cerebro Corazón (BHI) y 30 % de glicerol estéril. Actualmente se conservan en la Colección Bacteriana Quito Católica, CB-QCA del Laboratorio de Microbiología en la Escuela de Ciencias Biológicas de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

### Identificación serológica de aislados clínicos de *Shigellae*

La identificación de serotipos del patotipo *Shigellae* fue realizada utilizando la técnica de aglutinación en lámina [9], siguiendo las recomendaciones del fabricante [10]. Los aislados fueron enfrentados con cuatro antisueros policlonales comerciales Difco *Shigella* Antisera Poly: Grupo A, *S. dysenteriae*, serotipos 1-7; Grupo B, *S. flexneri*, serotipos 1-6; Grupo C, *S. boydii*, serotipos 1-7; y, Grupo D, *S. sonnei*, serotipos I y II. Se utilizó como controles positivos las cepas ATCC<sup>TM</sup>: *S. sonnei* 25931; *S.*

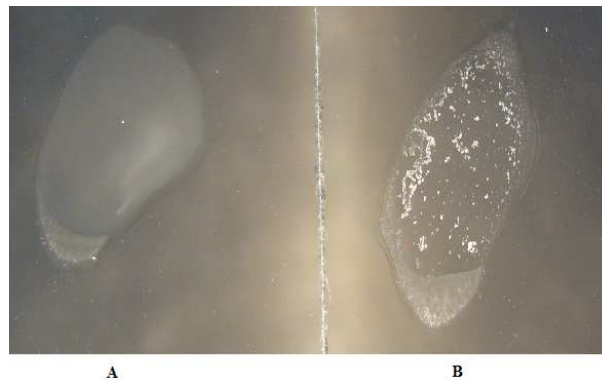


Figura 1: Prueba de aglutinación de sueros en *Shigella* spp. A. Prueba negativa. No se observa aglutinación. B. Prueba positiva. Se observa la aglutinación del suero con la bacteria.

*boydii* (1) 9207; y *S. flexneri* (2b) 12022; y, como control negativo, una gota de cloruro de sodio al 0,85 % y la cepa *Escherichia coli* ATCC 25922.

### Sensibilidad a antimicrobianos

Se utilizó el método de difusión con disco [11] en agar Müller-Hinton (Difco<sup>TM</sup>) siguiendo las recomendaciones del Clinical and Laboratory Standards Institute (CLSI) [12].

Los antibióticos utilizados se indican para la utilización en bacterias enteropatógenas causantes de síndrome diarreico. Estos son: ácido nalidíxico (30  $\mu\text{g}$ ), tetraciclina (30  $\mu\text{g}$ ), nitrofurantoina (300  $\mu\text{g}$ ), ampicilina (10  $\mu\text{g}$ ), ceftazidima (30  $\mu\text{g}$ ), ceftriaxona (30  $\mu\text{g}$ ), ciprofloxacina (5  $\mu\text{g}$ ), cloranfenicol (30  $\mu\text{g}$ ), trimetoprim/sulfametoxazol (23,75/1,25  $\mu\text{g}$ ), azitromicina (15  $\mu\text{g}$ ). Todos los antibióticos utilizados fueron de la marca BB-BBL. Los puntos de corte para cada antibiótico fueron establecidos según las recomendaciones del CLSI [14] para *Enterobacteriaceae* tomándose la medida en milímetros, siendo resistente, intermedio y sensible respectivamente (Tabla 1). Se utilizó como control las cepas ATCC<sup>TM</sup> *Shigella sonnei* 25931, *Shigella boydii* (1) 9207 y *Shigella flexneri* (2b) 12022.

Antimicrobiano	Punto de corte en milímetros		
	Resistente	Intermedio	Sensible
Ácido nalidíxico	$\leq 13$	14-18	$\geq 19$
Ampicilina	$\leq 13$	14-16	$\geq 17$
Azitromicina	$\leq 13$	14-17	$\geq 18$
Ceftazidima	$\leq 14$	15-17	$\geq 18$
Ceftriaxona	$\leq 13$	14-20	$\geq 21$
Ciprofloxacina	$\leq 15$	16-20	$\geq 21$
Cloranfenicol	$\leq 12$	13-17	$\geq 18$
Nitrofurantoina	$\leq 14$	15-16	$\geq 17$
Tetraciclina	$\leq 11$	12-14	$\geq 15$
Trimetoprim/sulfametoxazol	$\leq 10$	11-15	$\geq 16$

Tabla 1: Puntos de corte para los diferentes antibióticos utilizados en el análisis de la sensibilidad a antimicrobianos en *Shigellae*.

### Análisis estadístico

El análisis porcentual de los resultados se realizó empleando Microsoft Office Excel 2010 (©2010 Micro-



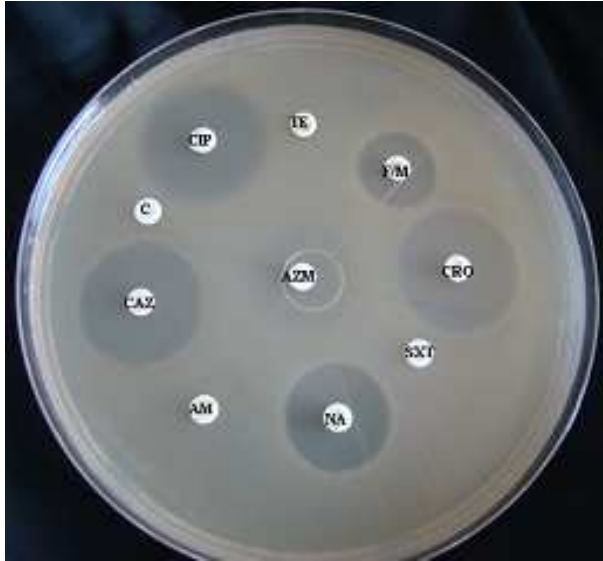


Figura 2: Difusión con disco realizada en muestras de *Shigella* spp. Antibiograma con discos de sensibilidad de antibióticos recomendados para el tratamiento de *Shigella* spp. TE: Tetraciclina; F/M: Nitrofurantoina; CRO: Ceftriaxona; SXT: Trimetoprim/sulfametoxazol; NA: Ácido nalidíxico; AM: Ampicilina; CAZ: Ceftazidima; C: Cloranfenicol; CIP: Ciprofloxacina; AZM: Azitromicina.

soft Corporation).

Para el estudio de los resultados obtenidos tanto en serotipaje como en resistencia a antimicrobianos, se utilizó el método estadístico de análisis de correspondencias múltiples (MCA); empleando el programa estadístico informático "Statistical Package for the Social Sciences" (SPSS) versión 12,0.

## Resultados

Por medio del método de aglutinación en lámina (Fig. 1) se obtuvo la identificación de las especies del género *Shigella* obteniéndose aislados positivos para cada especie: *Shigella flexneri* ( $n=50$ ; 63,29 %), *Shigella sonnei* ( $n=23$ ; 29,11 %), *Shigella boydii* ( $n=6$ ; 7,59 %), y *Shigella dysenteriae* ( $n=0$ ; 0,00 %) (Tabla 2).

Analizando íntegramente al género, se observó las siguientes resistencias: tetraciclina ( $n=76$ ; 96,20 %), ampicilina ( $n=75$ ; 94,94 %), trimetoprim/ sulfametoxazol ( $n=68$ ; 86,08 %), cloranfenicol ( $n=67$ ; 84,81 %), azitromicina ( $n=12$ ; 15,19 %), ácido nalidíxico ( $n=8$ ; 10,13 %), nitrofurantoina ( $n=5$ ; 6,33 %), ceftriaxona ( $n=1$ ; 1,27 %), ciprofloxacina ( $n=1$ ; 1,27 %), y ceftazidima ( $n=0$ ; 0,00 %) (Figs. 2, 3).

Individualmente, cada especie presentó diferentes resistencias las cuales están especificadas en la Tabla 3.

Se realizó una clasificación según patrones específicos de resistencia antimicrobiana mostrada durante el análisis. Los patrones de resistencia fueron divididos en 16 categorías representadas por números romanos (I-XVI) (Tabla 4).

La relación entre cada especie y la resistencia a antibióticos se observa en los anexos 1, 2 y 3. Existe alta heterogeneidad en los patrones de resistencia al relacionarlos con las especies con una concentración superior de casos de *S. flexneri* multirresistentes en relación a las otras especies.

## Discusión

Las enfermedades diarreicas a nivel mundial han sido atribuidas a diferentes agentes entéricos infecciosos, siendo uno de los más comunes las bacterias del patotipo Shigellae [1]. Mundialmente se producen dos mil millones de casos de diarrea cada año; a nivel de Latinoamérica y el Ecuador las enfermedades diarreicas agudas (EDA) son la segunda causa de morbilidad en la población en general, y de mortalidad en niños menores de 5 años y adultos mayores [13, 14]. Siendo las EDA un problema de salud a nivel mundial, la capacitación en identificación y determinación de la sensibilidad a antibióticos en enfermedades entéricas es imprescindible para determinar acciones epidemiológicas [13].

La shigelosis generalmente es transmitida por contacto directo fecal-oral o por la ingestión de comida o agua contaminada [1]. Existen, además vectores de la enfermedad como moscas y cucarachas en las zonas donde la eliminación de excretas es abierta [15]. En este estudio el 59,76 % de aislados fueron obtenidos a partir de muestras de heces fecales. El porcentaje obtenido de muestras de secreción vaginal (18,29 %) es considerado como una importante causa de vulvo vaginitis en países en vías de desarrollo [15].

Entre los marcadores fenotípicos, la serotipificación es el método de mayor agudeza para la determinación de serotipos del patotipo Shigellae [16]. Este método permite realizar estudios de vigilancia que determinen la prevalencia de serogrupos y serovariedades en diferentes zonas geográficas, ya sea en estudios de brotes o de casos esporádicos [16]. En este estudio el método de seroagrupación tuvo un excelente resultado obteniéndose las especies *S. flexneri*, *S. sonnei* y *S. boydii*. No se han descubierto o reportado hasta la fecha cepas de *S. dysenteriae* en el Ecuador [28] y en este estudio tampoco se aislaron.

Estudios referentes a la identificación de especies dentro del patotipo Shigellae han determinado que en países en vías de desarrollo la circulación de ciertas especies se encuentra relacionada con el nivel socioeconómico [15]. *S. flexneri* es conocida por ser predominante en países en vías de desarrollo y *S. sonnei* en países industrializados [1, 4]. Estudios recientes han indicado que *S. sonnei* está superando a las poblaciones de *S. flexneri* en países como Tailandia, Korea del Sur y Taiwan [17, 18]. En la presente investigación se observó que la especie más común resultó ser *S. flexneri*, seguido por *S. sonnei* y *S. boydii* y finalmente no se reportó presencia de *S. dysenteriae*. Estos datos son revalidados con estudios en Latinoamérica, especialmente en Brasil, Uruguay, Cuba

Código de congelación PUCE CB-QCA	Origen de muestra	Especie identificada de Shigellae	Total	Total de aislados por especie y porcentaje
3337, 3338, 3343, 3344, 3350, 3351, 3361, 3363, 3367, 3375, 3378, 3380, 3385, 3400, 3402, 3403, 3404, 3413, 3414, 3415, 3416, 3417	Heces	<i>Shigella flexneri</i>	22	
3345, 3348, 3352, 3354, 3356, 3360, 3365, 3370, 3377, 3379, 3381, 3382, 3383, 3384, 3386, 3389, 3418	Secreción Vaginal	<i>Shigella flexneri</i>	17	n=50; 63,29 %
3340, 3341, 3349, 3372, 3376, 3388, 3390, 3391, 3392, 3393, 3396	No determinado	<i>Shigella flexneri</i>	11	
3339, 3342, 3347, 3355, 3357, 3358, 3359, 3371, 3373, 3374, 3387, 3395, 3397, 3401, 3407, 3408, 3409, 3411, 3412	Heces	<i>Shigella sonnei</i>	19	
3353	Secreción vaginal	<i>Shigella sonnei</i>	1	n=23; 29,11 %
3369, 3394, 3410	No determinado	<i>Shigella sonnei</i>	3	
3362, 3366, 3368, 3399, 3405, 3406	Heces	<i>Shigella boydii</i>	6	n=6; 7,59 %

Tabla 2: Identificación de aislados por serotipaje siguiendo el método de aglutinación en lámina. Relación origen de muestra con especie identificada de Shigellae.

Identificación serológica	Antibióticos									
	Ácido nalidíxico	Ampicilina	Azitromicina	Ceftazidima	Ceftriaxona	Ciprofloxacina	Cloranfenicol	Nitrofurantoina	Tetraciclina	Trimetoprim/Sulfametoxazol
<i>S. flexneri</i> (n=50)	5	46	3	0	1	2	45	2	47	41
<i>S. sonnei</i> (n= 23)	3	23	8	0	0	0	21	2	23	22
<i>S. boydii</i> (n= 6)	0	6	1	0	0	0	1	1	6	5

Tabla 3: Resistencia antimicrobiana mostrada por las diferentes especies de Shigellae. Relación número de especies con resistencia a antibiótico.

y Argentina donde la información para la prevalencia de estas especies de *Shigella* son similares [19–22].

Durante años las enfermedades diarreicas como la shigelosis han sido asistidas con el uso de antibióticos como trimetoprim /sulfametoxazol, ampicilina, ciprofloxacina y azitromicina [22]; sin embargo, la aparición de aislados multiresistentes ha limitado el tratamiento y ha incrementado la prevalencia de la enfermedad [24]. La diversidad de fenotipos de resistencia mostrados por los

aislados pudiera deberse a que la resistencia está siendo mediada por plásmidos, con la excepción para quinolonas y azitromicina, y además por integrones o transposones que estén incorporados al cromosoma bacteriano [23].

Estudios competentes relacionados a la resistencia a antimicrobianos en el patotipo Shigellae en países de Latinoamérica como Brasil, Chile, Cuba, Argentina, y Uruguay reportan una alta resistencia a los antibióticos tri-



Figura 3: Resistencia a antibióticos en *Shigella* spp. A: Resistencia a trimetoprim/sulfametoxazol B: Resistencia a tetraciclina. C: Resistencia a ampicilina. D: Resistencia a cloranfenicol.

Fenotipos de resistencia	Patrón	Especies			Total de cepas y porcentaje
		S. flexneri	S. sonnei	S. boydii	
I	F/M, Te, CIP, C, NA, CRO, AM, SXT, AZM	1			n=1; 1,27 %
II	Te, C, NA, AM, SXT, AZM		2		n=2; 2,53 %
III	Te, C, NA, AM, AZM	3			n=3; 3,79 %
IV	Te, C, AM, SXT, AZM		4	1	n=5; 6,33 %
V	F/M, Te, C, AM, SXT	1	1		n=2; 2,53 %
VI	Te, C, AM, SXT	32	13		n=45; 56,96 %
VII	Te, NA, AM, SXT	1	1		n=2; 2,53 %
VIII	F/M, Te, AM, SXT	1		1	n=2; 2,53 %
IX	Te, AM, SXT	1		3	n=4; 5,06 %
X	Te, C, SXT	2			n=2; 2,53 %
XI	C, AM, SXT	1			n=1; 1,27 %
XII	Te, C, AM	5	1		n=6; 7,59 %
XIII	Te, AM			1	n=1; 1,27 %
XIV	Te, AZM	1			n=1; 1,27 %
XV	AM	1			n=1; 1,27 %
XVI	No presenta resistencia	1			n=1; 1,27 %

Tabla 4: Patrones de resistencia antimicrobiana mostrados por los aislados de *Shigellae*. F/M, Nitrofurantoina; Te, Tetraciclina; CIP, Ciprofloxacina; CAZ, Ceftazidima; CRO, Ceftriaxona; C, Cloranfenicol; NA, Ácidonalidíxico; AM, Ampicilina; SXT, Trimetoprim/Sulfametoxazol; AZM, Azitromicina.

metoprim/sulfametoxazol, cloranfenicol y ampicilina [19, 21, 22, 25, 26]. Mientras que para países como Canadá, Senegal e India se reporta una resistencia a ampicilina y tetraciclina [27]. Para Ecuador desde el año 2000 al 2010 se ha detectado una multiresistencia a los antibióticos trimetoprim/ sulfametoxazol, cloranfenicol, ampicilina y tetraciclina; sin embargo, la sensibilidad a cef-

triaxona y ciprofloxacina se ha mantenido [28].

En este estudio se observó una alta resistencia a tetraciclina, cloranfenicol, ampicilina y trimetoprim/ sulfametoxazol lo que concuerda con los datos reportados a nivel mundial y especialmente en Latinoamérica y Ecuador [28]. La resistencia a trimetoprim/sulfametoxazol y ampicilina ha sido atribuida a plásmidos transferibles



con pesos moleculares de 94,5 a 120 kb [20], por lo que puede ser explicada por el intercambio de material genético entre cepas, además cierta resistencia se debe a la presión selectiva pues la combinación de trimetoprim/sulfametoxazol ha sido muy utilizada para el tratamiento de shigelosis [19].

Debido a la alta multiresistencia a antibióticos de primera línea presente en *Shigellae* se considera indicado el uso de cefalosporinas de tercera generación como ceftazidima y ceftriaxona para lactantes que requieren hospitalización debido a la gravedad del cuadro clínico [29]. En adultos y niños menores de 5 años está indicada la ciprofloxacina como droga de primera elección, y la azitromicina está indicada para los niños que no requieren hospitalización [8, 30].

En resumen, este estudio demostró la presencia de tres especies del patotipo *Shigellae* con mayor prevalencia de *S. flexneri*, lo cual concuerda con estudios realizados en Latinoamérica. Además se determinó la sensibilidad a antimicrobianos presentándose el género como multiresistente a los antibióticos utilizados como primera línea de tratamiento.

### Agradecimientos

Esta investigación se realizó gracias a la donación de aislados por parte de los Laboratorios Zurita & Zurita y el Hospital Vozandes Quito. Un cordial agradecimiento a la Dra. Jeannette Zurita y al equipo del laboratorio de microbiología de la escuela de Ciencias Exactas de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

### Referencias

- [1] Murray, P.; Rosenthal, K.; Pfaller, M. 2013. "Medical Microbiology". Elsevier Inc: Philadelphia.
- [2] Germani, Y.; Sansonetti, P. 2006. "The Genus *Shigella*" en: "The Prokaryotes. A handbook on the Biology of Bacteria. 6. Proteobacteria: Gamma Subclass", M. Dworkin, S. Falkow, E. Rosenberg, K. Schleifer, E. Stackebrandt, *Springer*, New York: 99-116.
- [3] Ye, C.; Lan, R.; Xia, S.; Zhang, J.; Sun, Q.; Zhang, S.; Jing, H.; Wang, L.; Li, Z.; Zhou, Z.; Zhao, A.; Cui, Z.; Cao, J.; Jin, D.; Huang, L.; Wang, Y.; Luo, X.; Bai, X.; Wang, Y.; Wang, P.; Xu, Q.; Xu, J. 2010. "Emergence of a new resistant serotype X variant in an epidemic clone of *Shigella flexneri*". *Journal of Clinical Microbiology*, 48: 419-426.
- [4] Kotloff, K. L.; Winickoff, J. P.; Ivanoff, B.; Clemens, J. D.; Swerdlow, D. L.; Sansonetti, P. J.; Adak, G. K.; Levine, M. M. 1999. "Global burden of *Shigella* infections: implications for vaccine development and implementation of control strategies". *Bulletin of the World Health Organization*, 77: 651-666.
- [5] Carrera, M. S.; Yuga, J. C. 2012. "Anuario de Estadísticas Hospitalarias Camas y Egresos 2012". Instituto Nacional de Estadística y Censos: Quito, Ecuador. [http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/webinec/Estadisticas\\_Sociales/Camas\\_Egresos\\_Hospitalarios/Publicaciones-Cam\\_Egre\\_Host/Anuario\\_Camas\\_Egresos\\_Hospitalarios\\_2012.pdf](http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/webinec/Estadisticas_Sociales/Camas_Egresos_Hospitalarios/Publicaciones-Cam_Egre_Host/Anuario_Camas_Egresos_Hospitalarios_2012.pdf).
- [6] Seidlein, L.; Kim, D. R.; Ali, M.; Lee, H.; Wang, X. Y.; Thiem, V. D.; Canh, D. G.; Chaicumpa, W.; Agtini, M. D.; Hossain, A.; Bhutta, Z. A.; Mason, C.; Sethabutr, O.; Talukder, K.; Nair, G. B.; Dee, J. L.; Kotloff, K.; Clemens, J. 2006. "A multicentre study of *Shigella* diarrhoea in six Asian countries: disease burden, clinical manifestations, and microbiology". *PLoS Medicine*, 3(9): 1556-1569.
- [7] Gu, B.; Cao, Y.; Pan, S.; Zhuang, L.; Yu, R.; Peng, Z.; Qian, H.; Wei, Y.; Zhao, L.; Liu, X.; Tong, M. 2012. "Comparison of the prevalence and changing resistance to nalidixic acid and ciprofloxacin of *Shigella* between Europe-America and Asia-Africa from 1998 to 2009". *International Journal of Antimicrobial Agents*, 40: 9-17.
- [8] Centers for Disease Control and Prevention. CDC. 2014. "Health Information for International Travel 2014". Oxford University Press: New York.
- [9] Edwards, P.; Edwing, W. 1972. "Identification of *Enterobacteriaceae*". Burgers Publ. Co.: Minneapolis.
- [10] Difco. 2011. "Manual Difco *Shigella* Antisera Poly O". Becton, Dickinson and Company: County Clare: 11-13.
- [11] Bauer, A. W.; Kirby, W. N.; Sherrins, G. J.; Turk, M. 1966. "Antibiotic susceptibility testing by standardized single disk method". *American Journal of Clinical Pathology*, 45: 493-496.
- [12] Clinical and Laboratory Standards Institute. CLSI. 2010. "Performance standards for antimicrobial susceptibility testing; Sixteen International Supplement, CLSI document". Clinical and Laboratory Standards Institute: Pennsylvania.
- [13] Organización Panamericana de la Salud. 2009. "Informe Anual de la Red de Monitoreo/Vigilancia de la Resistencia a los Antibióticos". OPS: Basilea.
- [14] Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. INEC. 2009. "Anuario de Estadísticas Hospitalarias: Camas y Egresos. Diez principales causas de morbilidad. Lista Internacional Detallada-CIE-1015". INEC: Quito.
- [15] Gonzales, S.; Cecchini, D. 2003. "Diagnóstico e investigación epidemiológica contra las enfermedades transmitidas por alimentos". OPS: Buenos Aires.
- [16] Guerrant, R. L.; Hughes, J. M.; Lima, J. 1999. "Diarrhea in developing countries: magnitude, special setting and etiologies". *Journal of Infectious Diseases*, 1: 41.
- [17] Von Seidlein, L.; Kim, D. R.; Ali, M.; Lee, H.; Wang, X. Y.; Thiem, V. D.; Canh, D. G.; Chaicumpa, W.; Agtini, M. D.; Hossain, A.; Bhutta, Z. A.; Mason, C.; Sethabutr, O.; Talukder, K.; Nair, G. B.; Deen, J. L.; Kotloff, K.; Clemens, J. 2006. "A multicentre study of *Shigella* diarrhoea in six Asian countries: disease burden, clinical manifestations, and microbiology". *PLoS Medicine*, 3(9): 1556-1569.

- [18] Wei, H. L.; Wang, Y. W.; Li, C. C.; Tung, S. K.; Chiou, C. S. 2007. "Epidemiology and evolution of genotype and antimicrobial resistance of an imported *Shigella sonnei* clone circulating in central Taiwan". *Diagnostic Microbiology and Infectious Diseases*, 58: 469-475.
- [19] Mota, I.; Varela, G.; Gadea, M.; Caffer, M.; Sirok, A.; Schelotto, F. 2005. "Serotipos, perfil plasmídico y antibiogramas de cepas de *Shigella flexneri* aisladas de niños menores de 5 años con diarrea sanguinolenta usuarios de los servicios de Salud pública". *Revista Médica de Uruguay*, 21: 30-36.
- [20] Merino, A.; Hreňuk, E.; Ronconi, M.; Alonso, M. 2004. "Resistencia a antibióticos y epidemiología molecular de *Shigella* spp. en el noreste argentino". *Revista Panamericana de Salud Pública*, 15(4): 219- 224.
- [21] Ramírez, M.; Valdés, N.; Bravo, L.; Fernández, A.; Castañeda, N. 2004. "Perfil plasmídico resistencia antimicrobiana en cepas de *Shigella* aisladas en Cuba". *Revista Cubana de Medicina Tropical*, 56(3): 178-185.
- [22] Silva, T.; Nogueira, A.; Magalhaes, F.; Fagundes, A.; Pereira, L.; Puccinelli, P. 2008. "Characterization of *Shigella* spp. by antimicrobial resistance and PCR detection of ipa genes in an infantile population from Porto Velho (western Amazon region), Brazil". *Memorias del Instituto Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro*, 103(7): 731-733.
- [23] Xing, K.; Bing, G.; Shiyang, P.; Mingqing, T. 2011. "Epidemiology and molecular mechanism of integron-mediated antibiotic resistance in *Shigella*". *Arceives of Microbiology*, 193: 767-774.
- [24] Qu, M.; Zhang, X.; Liu, G.; Huang, Y.; Jia, L.; Liang, W.; Li, X.; Wu, X.; Li, J.; Yan, H.; Kan, B.; Wang, Q. 2014. "An eight-year study of *Shigella* species in Beijing, China: serodiversity, virulence genes, and antimicrobial resistance". *The Journal of Infection in Developing countries*, 8(7): 904-908.
- [25] Boheme, C.; Iglesias, T.; Loyola, A.; Soto, L.; Rodríguez, G.; Reydet, P. 2002. "Comparación de la susceptibilidad de especies de *Shigella* a antimicrobianos de uso habitual en el Hospital Regional de Temuco, Chile". *Revista Médica de Chile*, 130(9): 1021-1026.
- [26] Vila, J.; Gascón, J.; Abadía, S.; Gómez, J.; Marco, F.; Moreno, A. 1994. "Antimicrobial resistance of *Shigella* isolates causing traveler's diarrhea". *Antimicrobial Agents Chemotherapy*, 38(11): 2668-70.
- [27] Bassa, A.; Dadie, A.; Guessennd, N.; Gbonon, V.; Dako, E.; Dje, M.; Dosso, M. 2010. "Virulence Factors and Resistance Profile of *Shigella* Isolated During Infectious Diarrhea in Abidjan, Côte D'Ivoire". *Journal of Applied Sciences Research*, 6(6): 594-599.
- [28] Zurita, J. 2010. "*Shigella* spp." en "Resistencia bacteriana en el Ecuador". *Centro de Publicaciones PUCE: Quito*: 55-57.
- [29] Replogle, M.; Fleming, D.; Cieslak, O. 2000. "Emergence of Antimicrobial Resistance Shigellosis in Oregon". *Clinical Infectious Diseases*, 30: 515-519.
- [30] Saurina, G.; Quale, J. M.; Manikal, V. M. 2000. "Antimicrobial resistance in Enterobacteriaceae in Brooklyn, NY: epidemiology and relation to antibiotic usage patterns". *Journal Antimicrobial Chemotherapy*, 45: 895-898.

## Reporte del 1er Conteo Navideño de Aves de Quito, Ecuador

Diego F. Cisneros-Heredia<sup>1,2,3,4,9\*</sup>, Xavier Amigo<sup>1,3,4,5</sup>, Daniel Arias<sup>1</sup>, Josué Arteaga<sup>1</sup>, Jorge Bedoya<sup>1,6</sup>, Sandy Espinosa F.<sup>1,7</sup>, Eliana Montenegro<sup>1,2,4</sup>, Gonzalo Nazati<sup>1</sup>, Juan Manuel Carrión<sup>1,8</sup>

<sup>1</sup> Aves Quito (Club de observadores de aves de Quito), Ecuador.

<sup>2</sup> Universidad San Francisco de Quito, Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales, Laboratorio de Zoología Terrestre, calle Diego de Robles y Vía Interoceánica, edif. Darwin, of. DW-010A, casilla postal 17-1200-841, Quito, Ecuador.

<sup>3</sup> Aves y Conservación–BirdLife Ecuador, pasaje Joaquín Tinajero E3–05 y calle Jorge Drom, casilla postal 17–17 906, Quito, Ecuador.

<sup>4</sup> Red AvesEcuador.

<sup>5</sup> Ecuador Experience, calle San Ignacio N30-50 y Ave. Gonzalez Suarez, Quito, Ecuador.

<sup>6</sup> Yaku Parque Museo del Agua, calle El Placer OE11-271, Quito, Ecuador.

<sup>7</sup> Trek The World, Quito, Ecuador.

<sup>8</sup> Fundación Zoológica del Ecuador / Zoológico de Quito, Huertos Familiares s/n, casilla postal 17-17-349, Guayllabamba, Ecuador.

<sup>9</sup> King's College London, Department of Geography, Strand, London, UK

\* Autor principal/Corresponding author; correo electrónico: [diegofrancisco.cisneros@gmail.com](mailto:diegofrancisco.cisneros@gmail.com)

Editado por / Edited by: César Zambrano, PhD.

Recibido / Received: 2015/02/02. Aceptado / Accepted: 2015/05/11 .

Publicado en línea / Published online: 2015/12/30. Impreso / Printed: 2015/12/30.

## Report of the 1st. Christmas Bird Count of Quito, Ecuador

### Abstract

The 1st Christmas Bird Count of Quito recorded 131 species of birds, of 34 families and 15 orders, reflecting that Quito has a largest species richness of birds that previously estimated. The most represented families were Thraupidae, Trochilidae, and Tyrannidae, and the most abundant species: *Zenaida auriculata* Eared Dove, *Zonotrichia capensis* Rufous-collared Sparrow, *Turdus fuscater* Great Thrush, *Colibri coruscans* Sparkling Violet-ear, and *Spatula discors* Blue-winged Teal. Almost one-third of the species were recorded in periurban and rural zones with large natural vegetation cover, far from the urban centre; and over one-third of the species were rare, apparently having small populations. The routes at Pululahua, Pichincha volcano, the valley of Guayllabamba, between the Zoo of Quito and the new airport, and the Parque Arqueológico Rumipamba (incl. the Rumiloma ravine) had the largest species richness and the largest amount of unique species. Thirteen boreal migratory species of birds were recorded; including the rare *Progne subis* Purple Martin and the first individual of *Larus smithsonianus* American Herring Gull for Ecuador. Twenty-one taxa of birds observed at the count are almost endemic to the Andes of Ecuador. The Christmas Bird Count of Quito is a citizen science activity that can generate long-term information on the diversity and population evology of the birds, allowing the development of conservation strategies for the birds and wildlife of Quito.

**Keywords.** birds, birdwatching, citizen science, Christmas Bird Count, diversity, Ecuador, Quito, species richness, urban ecology.

### Resumen

El 1er Conteo Navideño de Aves de Quito registró 131 especies de aves, pertenecientes a 34 familias y 15 órdenes, reflejando que Quito tiene una riqueza de aves mayor a la estimada previamente. Las familias más representadas fueron Thraupidae, Trochilidae y Tyrannidae y las especies más abundantes: *Zenaida auriculata* Tortola Orejuda, *Zonotrichia capensis* Gorrión Ruficollarejo, *Turdus fuscater* Mirlo Grande, *Colibri coruscans* Colibri Orejivioleta Ventriazul y *Spatula discors* Cerceta Aliazul. Casi un tercio de las especies se registraron solamente en zonas periurbanas o rurales con amplia cobertura vegetal natural, alejadas del núcleo urbano; y más de un tercio de las especies fueron raras, y al parecer mantienen poblaciones pequeñas. Las rutas que recorrieron el Pululahua, el volcán Pichincha, el valle de Guayllabamba entre el Zoo de Quito y el nuevo aeropuerto, y el Parque Arqueológico Rumipamba (incl. la quebrada de Rumiloma) tuvieron la mayor riqueza de especies y la mayor cantidad de especies únicas. Se registró un total de 13 especies migratorias boreales, incluyendo al raro *Progne subis* Martín Purpúreo y el primer registro de *Larus smithsonianus* Gaviota Argénteo Americana para Ecuador. Veintiún taxa de aves observados durante el conteo son casi-endémicos de los Andes de Ecuador. El Conteo Navideño de Aves de Quito es una actividad de ciencia ciudadana que puede generar información de largo plazo sobre la diversidad y ecología poblacional de las aves, permitiendo el desarrollo de estrategias de conservación de las aves y la vida silvestre de Quito.

**Palabras Clave.** Aves, diversidad, ciencia ciudadana, Conteo Navideño de Aves, ecología urbana, Ecuador, observación de aves, Quito, riqueza de especies.

## Introduction

El Cuento Navideño de Aves (*Christmas Bird Count*, CBC) es el estudio sistemático de aves silvestres de mayor cobertura geográfica en el Hemisferio Occidental y uno de los programas de ciencia ciudadana más antiguos [1-2]. El conteo se organiza anualmente entre el 14 de diciembre y el 5 de enero y participan grupos de observadores de aves que identifican y cuentan todas las aves que ven dentro de un área determinada en un período de 24 horas. El primer CBC fue organizado en Estados Unidos y Canadá en el día de navidad de 1900 por iniciativa del ornitólogo Frank Chapman en respuesta a la tradición de la “cacería navideña” que era popular en Norteamérica en el siglo XIX. En dicha cacería, las personas competían por quien cazaba la mayor cantidad de presas, pero Chapman propuso que se cuente a las aves en lugar de matarlas [3]. Veintisiete observadores de aves participaron en el primer CBC de 1900, contando cerca de 18 500 individuos de 89 especies en 25 localidades de Estados Unidos y Canadá [4]. Desde entonces, los CBC se han incrementado ampliamente y convocan a una gran diversidad de personas, desde ornitólogos experimentados hasta amantes de las aves que recién empiezan a observarlas. En el CBC 114 (2013-2014), 71 659 observadores participaron en 2408 conteos y registraron más de 66 millones de aves de 2403 especies. En dicho año, 107 conteos se realizaron en países de América latina, el Caribe y las islas del Pacífico donde participaron 2561 observadores registrando más de 364 mil aves [5].

Los CBC son una fuente valiosa de datos sobre la biogeografía y ecología aviar. En la porción norte de América se han realizado decenas de estudios sobre la diversidad, distribución espacial, y ecología poblacional de las aves usando datos de los CBC (ej., [6-11] y citas en [2,12-13]). Los CBC norteamericanos tienen una significativa concentración de esfuerzo en áreas urbanas y semi-urbanas [2, 13] y son una excelente fuente de datos para analizar la diversidad, distribución y ecología de aves en ambientes urbanos (ej., [14-17]). De hecho, la naturaleza “urbana” de los conteos, unida a la diversidad y cantidad de participantes y la popularidad de la observación de aves entre el público, ha permitido que los CBC se consoliden como un programa de ciencia ciudadana donde, con costos mínimos, se colecta una gran cantidad de valiosos datos de comunidades aviarias urbanas [18-19].

En áreas neotropicales, los CBC han tenido un reducido uso en el estudio de las comunidades aviarias (ej., [20-23]), debido a la menor cobertura temporal y espacial, la variabilidad en la distribución y esfuerzo de muestreo en las regiones neotropicales, y la menor cantidad de personas y organizaciones involucradas. Desde 1994, nueve CBC se han realizado en Ecuador, seis de los cuales participaron en el CBC 115 de 2014-2015 [24] (Tabla 1). Los CBC ecuatorianos son notables debido a que usualmente encabezan la lista de conteos con la mayor cantidad de especies observadas [5]. A diferencia de América del Norte, todos los CBC ecuatorianos participantes hasta el momento se ubican en áreas predominantemente rurales, usualmente en regiones de alta diversidad como los bosques montanos, subtropicales y tropicales a ambos lados de los Andes o en la Amazonía (Tabla 1). Por esta razón, a finales del



**Figura 1. *Zenaida auriculata* Tórtola Orejuda, la especie más común de Quito, registrada como la especie más abundante del 1er Cuento Navideño de Aves de Quito.**

Fotografía por Sandy Espinoza F.

año 2014 se planteó la realización del primer CBC urbano de Ecuador en la ciudad capital, Quito. Este artículo presenta el reporte de este 1er Cuento Navideño de Aves de Quito, con un detalle de las especies y lugares, y observaciones generales relacionadas.

## Materials and Methods

### Área de Estudio

El Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) está localizado en la provincia de Pichincha, al centro-norte de los Andes de Ecuador, tiene un área de 4230,5 km<sup>2</sup> [25] y un rango altitudinal de 490–4870 m de elevación [26]. El DMQ está geopolíticamente organizado en 32 parroquias urbanas que corresponden al núcleo urbano de la ciudad capital del Ecuador: Quito (San Francisco de Quito) y 33 parroquias rurales. Desde su fundación en 1534 y hasta principios del siglo XX, el núcleo urbano de Quito tuvo un crecimiento reducido, mante-



**Figura 2. *Zonotrichia capensis* Gorrion Ruficollarejo, una de las especies más abundantes del 1er Cuento Navideño de Aves de Quito. Fotografía por Sandy Espinoza F.**



niéndose restringido a las inmediaciones del área conocida como el Centro Histórico (en los alrededores de la Plaza Grande o plazo mayor de la ciudad) [27]. A lo largo de la primera mitad del siglo XX y hasta la década de los 1960, el núcleo urbano tuvo una primera fase de crecimiento moderado, organizándose territorialmente de manera longitudinal debido a las barreras orográficas [27]. Sin embargo, a partir de la década de los 1960, el núcleo urbano ha tenido un crecimiento extensivo, cercano al 500% [27], formando un núcleo consolidado de entre 5 y 8 km de ancho, ca. 50 km de largo y ca. 202,5 km<sup>2</sup> en el valle de Quito [25], y paulatinamente extendiéndose hacia parroquias rurales ubicadas en valles aledaños en un proceso de transición y expansión urbana [27]. Dichas parroquias bajo proceso de expansión urbana se extienden ca. 298,7 km<sup>2</sup> [27] y para cuestiones de este estudio son denominadas como zonas periurbanas de Quito (*sensu* Avila Sanchez [28]).

Las zonas urbanas y periurbanas de Quito se asientan en la Hoya de Guayllabamba, un conjunto de valles interandinos (Cayambe, Pomasqui-Puéllaro, Guayllabamba, Quito, Cumbayá-Tumbaco, Los Chillos, Machachi) en la subcuenca hidrológica del mismo nombre [29]. Los límites geográficos de esta hoya son: (i) al norte el nudo de Mojanda-Cajas, donde destacan los volcanes Mojanda y Cusín; (ii) al sur el nudo de Tiopullo, con el volcán Rumiñahui; (iii) al este la Cordillera Oriental de los Andes con los volcanes Cayambe, cerro Puntas y Sincholagua; y (iv) al oeste la Cordillera Occidental de los Andes con los volcanes Casitagua, Pichincha, Atacazo, Corazón e Illinizas [29]. El núcleo urbano de Quito se sitúa sobre el estrecho valle de Quito, localizado en las faldas orientales del volcán Pichincha entre ca. 2650 y 3400 m de elevación, y se extiende por el norte hasta el límite de las parroquias de Pomasqui y San Antonio (cerca del volcán Casitagua), al sur hasta el sector de Tambillo (cerca del Volcán Atacazo) y hacia el este está limitado por una serie de lomas (Puengasi, Guangüiltagua, Itchimbía) separadas entre sí por grandes quebradas y que descienden hacia los valles de Cumbayá-Tumbaco y Los Chillos [29]. Las zonas periurbanas se asientan principalmente en los valles de Pomasqui-Puéllaro, Guayllabamba, Cumbayá-Tumbaco, Los Chillos y Machachi, a elevaciones entre ca. 1800 y 3100 m. Una extensa red de ríos cruza las zonas urbanas y periurbanas: Guayllabamba, Machángara, Monjas, Pita, Chiche, San Pedro [26,29].

Al menos ocho ecosistemas naturales cubrían originalmente las áreas donde ahora se asientan las zonas urbanas y periurbanas de Quito [26,30] (Tabla 2). Los herbazales lacustres montanos que cubrían los alrededores de la laguna de Ñaquito han desaparecido por completo por el drenaje del humedal y la expansión del núcleo urbano. Los otros siete ecosistemas han sido ampliamente desplazados por la actividad antrópica. En el núcleo urbano, la vegetación está restringida a pequeños jardines urbanos dispersos en la ciudad; bosques de Eucalipto, matorrales en regeneración y pastizales cultivados en parques urbanos y bosques protectores en la periferia; y cultivos, suelos en preparación y pastos cultivados en la periferia. Los pocos remanentes de ecosistemas naturales en el núcleo urbano se encuentran en las quebradas y bosques protectores que existen en los flancos de la ciudad donde se pue-



**Figura 3. *Colibri coruscans* colibrí Orejivioleta Ventriazul, una de las especies más abundantes del 1er Censo Navideño de Aves de Quito. Fotografía por Javier Zurita.**

den observar parches de arbustales montanos de los Andes norte y bosques altimontanos norandinos siempreverdes, aunque en muchos casos en precario estado de conservación. En las zonas periurbanas, amplias áreas están cubiertas por ecosistemas seminaturales y cultivados como matorrales en regeneración, bosques de Eucalipto, cultivos y pastos. También existen remanentes de ecosistemas nativos, pero la mayor parte de se encuentran degradados, modificados o reemplazados por vegetación seminatural y cultivada hasta el punto de casi desaparecer, y solo los arbustales secos interandinos presentan aún una cobertura significativa en las zonas periurbanas [26,30] (Tabla 2).

### Metodología del censo

El 1er Censo Navideño de Aves de Quito se realizó entre las 20h00 del 3 de enero de 2015 y las 18h00 del 4 de enero de 2015 con la participación de 51 observadores y un esfuerzo de muestreo combinado total de 77 horas. El círculo del CBC tuvo el diámetro oficial de 24,14 km y su punto central estuvo ubicado en las siguientes coordenadas: 0° 12' 53" S 78° 28' 31" W. El círculo fue censado por siete grupos de observadores que se dividieron entre ocho rutas dentro del círculo (Tabla 3). Todas las rutas seleccionadas se ubicaron en áreas con cobertura vegetal continua mayor a 0.01 km<sup>2</sup> (nativa o introducida, cultivada o natural). Este CBC cubrió una porción significativa de las zonas urbana y periurbana de la ciudad, incluyendo parques urbanos, reservorios artificiales, quebradas y áreas naturales circundantes con remanentes de varios hábitats nativos de la zona. Siete de las ocho rutas dentro del círculo se ubicaron en áreas urbanas y periurbanas de Quito, siendo la excepción la ruta del Pichincha que estuvo en un área rural-natural. Se siguió la metodología y lineamientos para los CBC establecidos por la National Audubon Society [31], incluyendo la sugerencia de que el primer censo se realice a manera de prueba, antes de enviar la aplicación oficial [31]. Se censaron tres rutas adicionales ubicadas fuera del círculo, dos (Pueblo Birding Garden y Zoo-Aeropuerto) en zonas periurbanas y la tercera (Pululahua) en un área rural. Se incluyó estas rutas adicionales para obtener información que

permita evaluar la posición del círculo y su representatividad de la diversidad de aves y ecosistemas de Quito. Con base en los datos del primer año se establecerá el círculo definitivo que se registrará ante la National Audubon Society para el CBC 216 (2016-2016). Todos los grupos estuvieron liderados por un observador de aves con experiencia y conocimiento de las aves de los Andes de Ecuador, todos los participantes estuvieron equipados con binoculares entre 8x32 y 10x50, y la mayor parte de participantes tenían conocimientos básicos para identificación de las especies de la zona. El 3 de enero se dictó un taller introductorio al conteo con el objetivo de dar a conocer información general y el procedimiento del conteo a los observadores participantes. Cuatro grupos realizaron un conteo nocturno el 3 de enero entre las 20h00 y las 22h30, y todos los grupos hicieron el conteo diurno entre las 05h30 y las 18h00 del 4 de enero. El clima durante el conteo fue: entre soleado y nublado a lo largo del día, sin viento en la mañana y con vientos moderados a fuertes en la tarde, en el valle de Quito la temperatura varió entre 10–22°C, en los valles aledaños entre 12–28°C, y en la ruta del Pichincha entre 6–18 °C. El 5 de enero se realizó el desconteo con la participación de todos los líderes de grupo.

## Taxonomía

La taxonomía y nomenclatura usadas siguen la propuesta del South American Classification Committee, American Ornithologists' Union [32], excepto en los siguientes casos: (a) se reconoce el género *Spatula* para *S. discors*, de acuerdo a la propuesta taxonómica para la familia Anatidae de Dickinson & Remsen [33] y del Hoyo et al. [34]; (b) para la taxonomía de la familia Thraupidae seguimos la propuesta taxonómica de Burns et al. [35], incluyendo la ubicación del género *Saltator* dentro de esa familia, la sinonimia del género *Thraupis* en *Tangara* y el uso del género *Geospizopsis* para *G. unicolor* y *G. plebejus* (previamente dentro del polifilético *Phrygilus*), (c) reconocemos la validez de la Gaviota Argétea Americana *Larus smithsonianus* como una especie separada de *L. argentatus* Gaviota Argétea Europea, según los argumentos propuestos por Collinson et al. [36].

## Resultados

En el 1er Conteo de Aves de Quito se registró un total de 3376 individuos pertenecientes a 131 especies, 34 familias y 15 órdenes en todas las rutas (Tabla 4, Figs. 1–9). Los órdenes más representados fueron Passeriformes con 81 especies y Apodiformes con 18 spp., y las familias fueron Thraupidae con 24 spp., Trochilidae 17 spp. y Tyrannidae 15 spp. La especie más abundante del conteo fue *Zenaida auriculata* Tórtola Orejuda (593 individuos, 17,57% del total de individuos observados), seguida por *Zonotrichia capensis* Gorrión Ruficollarejo, *Turdus fuscater* Mirlo Grande, *Colibri coruscans* Colibrí Orejivioleta Ventriazul y *Spatula discors* Cerceta Aliazul (Figs. 1–4). El 35,1% de las especies del conteo fueron raras, siendo registradas con uno (22,9%, 30 spp.) o dos individuos (12,2%, 16 spp.).



**Figura 4.** *Turdus fuscater* Mirlo Grande, una de las especies más abundantes del 1er Conteo Navideño de Aves de Quito. Fotografía por Sandy Espinoza F.

Se registró 2560 individuos de 101 especies dentro del círculo y 816 individuos de 83 especies fuera del círculo, incluyendo 29 especies, 7 familias y 4 órdenes que no fueron registrados en ninguna ruta dentro del círculo. La riqueza de especies varió entre 19 y 49 especies ( $\bar{x} = 33 \pm 10$  spp.,  $n = 8$ ) en las rutas dentro del círculo y 17–53 especies ( $\bar{x} = 38$  spp.,  $n = 3$ ) en las rutas fuera del círculo. La cantidad de individuos por ruta varió entre 124 y 751 individuos ( $\bar{x} = 320 \pm 197$  ind.,  $n = 9$ ) dentro del círculo y 69–459 ( $\bar{x} = 272$ ) fuera del círculo.

Las rutas con la mayor riqueza de especies fueron también las cuatro rutas con la mayor cantidad de especies únicas (i.e., especies que no fueron registradas en ninguna otra ruta): Pululahua con 17 spp. (12,88% de todas las especies registradas en el conteo), Pichincha 11 spp. (8,33%), Zoo-Aeropuerto 10 spp. (7,58%) y Rumipamba 7 spp. (6,06%), patrón que se mantiene cuando se evalúa especies registradas en solo dos rutas



**Figura 5.** *Larus smithsonianus* Gaviota Argétea Americana, primer individuo de esta especie observado en Ecuador. Registrado durante el 1er Conteo Navideño de Aves de Quito en la laguna del nuevo Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre de Quito. Fotografía: Juan Manuel Carrión.



(Tabla ...). La ruta con la mayor cantidad de individuos de una especie fue el Reservorio de Cumbayá (con un grupo de 200 individuos de la migratoria *Spatula discors*), seguida por el Jardín Botánico de Quito (con 145 individuos de *Zenaida auriculata*). Cuatro especies fueron registradas en todas las rutas del conteo: *Zenaida auriculata*, *Colibri coruscans*, *Zonotrichia capensis* y *Pheucticus chrysogaster* Picogruoso Sureño, a las cuales se suman *Synallaxis azarae* Colaespina de Azara y *Turdus fuscater* si se incluyen especies registradas en 10 de las 11 rutas.

*Zenaida auriculata*, la más común de todas las aves de Quito, se registró incluso en áreas verdes con diversidad ecológica y estructural muy baja, como el Parque de La Carolina (que rodea el Jardín Botánico de Quito) donde domina el pasto introducido y cultivado *Pennisetum clandestinum* y cuenta con escasos árboles. Las siguientes tres especies más comunes, *Zonotrichia capensis*, *Turdus fuscater* y *Colibri coruscans*, aprovechan áreas verdes con una mayor complejidad ecológica y estructural, como jardines urbanos y parques con mayor cobertura de árboles, donde abundan recursos alimenticios como semillas, frutos y néctar ofrecidos por plantas cultivadas introducidas y nativas, que también ofrecen espacios para anidación. *Colibri coruscans* es más abundante en zonas urbanas y periurbanas donde predominan plantas introducidas como *Hibiscus rosa-sinensis* Cucarda (Malvaceae), *Callistemon citrinus* Cepillo Rojo (Myrtaceae) o *Leonotis nepetifolia* Cola de León (Lamiaceae). La relación entre *C. coruscans* y *L. nepetifolia* es interesante, pues la gran abundancia de *C. coruscans* en la ruta del Reservorio de Cumbayá (la más alta para un colibrí en todo el CBC) estuvo relacionada con la extensiva presencia de *L. nepetifolia*, una planta que está invadiendo agresivamente los remanentes de vegetación ribereña, arbustal seco y vegetación saxícola en el valle de Cumbayá-Tumbaco.

La quinta especie más abundante de Quito, *Spatula discors*, es una de las varias especies de aves acuáticas que están ocupando los reservorios de agua artificiales, resaltando la importancia de estos ambientes acuáticos antrópicos que ofrecen áreas de reposo para especies migratorias, incluso raras y novedosas como *Larus smithsonianus*. Con la eliminación de la laguna de Ñaquito, Quito perdió un amplio componente de su avifauna, pero esta podría volver si se empieza a manejar los reservorios de manera adecuada y amigable con la vida silvestre. Nueve especies de aves acuáticas fueron registradas en el conteo: *Spatula discors*, *Podilymbus podiceps*, *Egretta thula*, *Fulica ardesiaca*, *Actitis macularia*, *Tringa melanoleuca*, *Choicocephalus serranus*, *Leucophaeus atricilla* y *Larus smithsonianus*, y dos especies asociadas a ríos: *Serpophaga cinerea* y *Sayornis nigricans*. Las primeras estuvieron asociadas directamente con dos humedales artificiales: el Reservoirio de Cumbayá y la laguna adenaña al nuevo Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre; mientras que las dos últimas con el Río Chiche.

Treinta y cinco especies se registraron exclusivamente en las zonas periurbanas o rurales con amplia cobertura vegetal natural, alejadas del núcleo urbano (se excluye a las especies migratorias por su alta movilidad, a nocturnas por diferencias metodológicas de las rutas y a



**Figura 6. *Sicalis flaveola* Jilguero Azafranado, una de las especies que ha expandido su rango de distribución hacia la Hoya de Guayllabamba. Fotografía por Javier Zurita.**

las acuáticas por su concentración en dos humedales artificiales): *Penelope montagnii*, *Parabuteo unicinctus*\*, *Geranoaetus polyosoma*\*, *Vanellus resplendens*, *Leptotila verreauxi*, *Columbina passerina*, *Columbina cruziana*, *Streptoprocne zonaris*\*, *Colibri thalassinus*, *Adelomyia melanogenys*, *Oreotrochilus chimborazo*, *Lesbia nuna*\*\*\*, *Lafresnaya lafresnayi*, *Myrtis fanny*\*\*, *Amazilia tzacatl*\*\*, *Phalcoboenus carunculatus*, *Grallaria ruficapilla*, *Grallaria ferrugineipectus*, *Myornis senilis*, *Scytalopus spillmanni*, *Leptasthenura andicola*, *Asthenes flammulata*, *Mecocerculus stictopterus*\*\*, *Serpophaga cinerea*, *Ochthoeca fumicolor*, *Cyanolyca turcosa*, *Henicorhina leucophrys*, *Saltator striatipectus*, *Thlypopsis ornata*\*\*, *Chlorornis riefferii*, *Dubusia taeniata*, *Catamblyrhynchus diadema*, *Myiothlypis coronata* y *Astragalinus psaltria*\*\*. De estas, las 3 especies marcadas con un asterisco\* han sido observadas en otras ocasiones sobrevolando el núcleo urbano, aunque parecen no reproducirse ahí; mientras que las seis especies con dos asteriscos\*\* se han observado en áreas urbanas en otras ocasiones pero parecen no mantener poblaciones reproductivas en el núcleo urbano.

Se registró en total 13 especies migratorias boreales incluyendo una de las especies más abundantes del conteo (*Spatula discors*), el raro *Progne subis* Martín Purpúreo (conocido de pocas localidades en Ecuador [37-39]) y el primer individuo de *Larus smithsonianus* Gaviota Argétea Americana registrado en Ecuador (en la laguna del nuevo Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre en Tababela, observado por primera ocasión por J. Nilsson el 21 de diciembre de 2014, in litt.; Fig. 5). Adicionalmente se observó tres individuos de *Falco peregrinus* en tres rutas diferentes; no se pudo determinar la subespecie a la que pertenecen pero podrían ser de la subespecie migratoria. Se observó cinco especies que parecen haber establecido poblaciones en los últimos 10-20 años en la zona periurbana de Quito a través de extensiones naturales: *Columbina cruziana*, *Molothrus bonariensis*, *Sicalis flaveola* (Fig. 6), *Mimus gilvus* (Fig. 7) y *Sporagra spinescens* [55,56] y una especie cimarrón: *Columba livia* Paloma Doméstica originalmente introducida como una especie doméstica pero con varias poblaciones autosustentables establecidas en zonas urbanas y periurbanas de Quito.

Se registró 21 taxa que son casi-endémicos de los Andes de Ecuador (i.e., su rango de distribución está ampliamente restringido [ $>80\%$ ] a Ecuador, [34,37]): *Penelope montagnii atrogularis*, *Fulica ardesiaca atrura*, *Columbina passerina quitensis*, *Athene cunicularia pichincae*, *Oreotrochilus chimborazo jamesoni*, *Lesbia nuna gracilis*, *Metallura tyrianthina quitensis*, *Eriocnemis luciani luciani*, *Lafresnaya lafresnayi saul*, *Phalcoboenus carunculatus*, *Cinclodes albidiventris*, *Asthenes flammulata flammulata*, *Mecocerculus leucophrys rufomarginatus*, *Cyanolitta turcosa*, *Thryothorus euophrys euophrys*, *Geospizopsis plebejus ocularis*, *Sporophila nigricollis vivida*, *Catamenia analis soderstromi*, *Atlapetes leucopertus leucopertus*, *Myiothlypis coronata elata*, y *Myioborus melanocephalus ruficoronatus*.

Las rutas urbanas y periurbanas combinadas tuvieron una riqueza de especies mayor (103 spp.) que las zonas rurales (78 spp.), pero más baja al analizarlas por separado (zonas periurbanas = 70 spp., zonas urbanas = 64 spp.). La riqueza de especies por ruta fue mayor en las zonas rurales (53–49,  $\bar{x} = 51$  spp.,  $n = 2$ ) que en las zonas urbanas o periurbanas, y no hubo diferencias significativas entre las zonas urbanas (19–43,  $\bar{x} = 31 \pm 10$  spp.,  $n = 4$ ) y la zonas periurbanas (17–45,  $\bar{x} = 31 \pm 11$  spp.,  $n = 5$ ). Hubo una mayor cantidad de individuos por ruta en las rutas urbanas (256–430,  $\bar{x} = 321 \pm 79$  ind.) y periurbanas (69–459,  $\bar{x} = 323 \pm 282$  ind.) que en las rutas rurales (192–288,  $\bar{x} = 240$  ind.). Las cinco especies más abundantes del conteo en general fueron las especies más abundantes en las zonas urbana y periurbana; sin embargo, en la zona rural los más abundantes fueron solo *Zenaida auriculata*, *Zonotrichia capensis* y *Turdus fuscater*; casi tres veces más abundantes que las dos especies que les siguen (*Colibri coruscans* y *Geospizopsis unicolor* Frigilo Plomizo).

## Discusión

Las aves fueron uno de los elementos de la biodiversidad más notorios en los primeros estudios de la historia natural de Quito realizados en el siglo XIX ([40-43] y citas en Paynter Jr. [44]). Sin embargo, poca información se ha generado y sistematizado sobre la ornitofauna del Quito contemporáneo, urbano y en expansión. Aproximaciones generales hacia inicios del siglo XXI estimaron que cerca de 40 especies de aves habitaban el núcleo urbano [45-47], pero hay muy poca información basada en evidencia sobre la ornitofauna de las zonas urbana y periurbana de Quito [26,48]. Los resultados del 1er Conteo Navideño de Aves de Quito son una breve y muy general aproximación a la comunidad de aves de Quito, pero claramente reflejan que es más rica de lo que se había estimado, con 103 especies de aves registradas en las zonas urbana y periurbana.

Las cuatro especies más abundantes del conteo son aves familiares para los quiteños y se han adaptado con éxito a zonas antrópicas [45-46,48]. Sin embargo, su adaptación (y aquella de otras especies presentes en zonas urbanas) es variable y depende de los recursos disponibles en la matriz urbana [52].

La mayor riqueza de especies se encontró en rutas con abundante cobertura de vegetación nativa, confirman-



Figura 7. *Mimus gilvus* Sinsonte Tropical, una de las especies que ha expandido su rango de distribución hacia la Hoya de Guayllabamba. Fotografía por Sandy Espinoza F.

do la importancia de la conservación de los remanentes de ecosistemas nativos, en particular las quebradas de Quito [26]. Sin embargo, dentro de la zona urbana, el Jardín Botánico de Quito refleja la importancia de áreas verdes urbanas de tamaño pequeño y moderado como un recurso importante para la conservación de la biodiversidad urbana y para generar conectividad con áreas periurbanas [49-53]. El JBQ es un área pequeña que alberga una rica comunidad de aves a pesar de ubicarse dentro de un parque urbano con baja estructura vegetal e inmerso en una densa matriz de construcciones urbanas. La clave del JBQ parece radicar en la gran diversidad de especies vegetales nativas y la complejidad estructural que ha alcanzado al mezclar abundantes árboles, arbustos y herbáceas [50-53].

Sin embargo, algunas especies de aves de Quito parecen tener bajos niveles de adaptación frente a la extensión de la frontera urbana. Casi un tercio de las especies del CBC se registraron solamente en zonas periurbanas o rurales con amplia cobertura vegetal na-



Figura 8. *Pipraeidea bonariensis* Tangara azuliamarilla, una de las especies de tangaras (familia Thraupidae) observada en el 1er Conteo Navideño de Aves de Quito. Fotografía por Javier Zurita.



tural, alejadas del núcleo urbano. Más de un tercio de las especies registradas en el CBC de Quito fueron raras, y al parecer mantienen poblaciones pequeñas. Especies que en el pasado se reportaron como aves comunes en Quito (ej., *Columbina passerina*, *Streptoprocne zonaris* y *Sicalis luteola* [40, 43, 45-46]), tuvieron pocos registros en este CBC y al parecer sus poblaciones han sufrido significativas disminuciones. Lastimosamente no existen datos sobre las tendencias poblacionales de estas especies y es necesario establecer procesos de monitoreo que evidencien su estado actual y las perspectivas a futuro, para determinar las estrategias necesarias para su conservación, en especial de frente al mantenimiento de áreas naturales protegidas en el Distrito Metropolitano de Quito [47]. La disminución de la diversidad de especies a lo largo de la gradiente urbana y rural ha sido documentada en varios estudios de aves, donde se ha evidenciado que el número de especies en el núcleo urbano se puede reducir hasta menos de la mitad versus zonas rurales [54]. La continua pérdida y fragmentación de los hábitats naturales hacia los centros urbanos reduce la riqueza de especies, pero muchas variables pueden afectar el impacto y consistencia de esta pérdida de especies por lo que es crucial el desarrollo de estudios empíricos que midan los impactos urbanos [50,52,54].

El proceso de urbanización avanza a paso acelerado en el Distrito Metropolitano de Quito y es vital generar información sobre la relación entre la flora y fauna silvestre y los ambientes urbanos, con el objetivo de buscar estrategias para su conservación y coexistencia armónica [26]. El Conteo Navideño de Aves de Quito es una actividad de ciencia ciudadana que puede ser clave para generar información de largo plazo sobre la diversidad y ecología poblacional de las aves, permitiendo de esa forma identificar especies y zonas dentro y alrededor de la ciudad que necesitan acciones socioambientales para su recuperación y conservación. Esta información será un valioso insumo para la toma de decisiones de planificación urbana para permitan el desarrollo de una ciudad en armonía con su medio natural, incluyendo la determinación de áreas de importancias para las aves en la urbe y de generación de prácticas para la promoción y el manejo de hábitats especiales (como reservorios y jardines).

### Agradecimientos

Agradecemos a todos los observadores que participaron del conteo por su entusiasmo para el desarrollo del 1er CBC de Quito; a las instituciones que auspiciaron el conteo: Fundación Zoológica del Ecuador, Zoo de Quito, Yaku Parque Museo del Agua, Trek the World, Red AvesEcuador, EcuadorExperience, Aves y Conservación / BirdLife Ecuador, Laboratorio de Zoología Terrestre / Universidad San Francisco de Quito, Parque Arqueológico Rumipamba, Jardín Botánico de Quito, Hostal Pulahua, Hotel Sebastian, Unidad de Espacio Público del Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, Quito Turismo, Empresa Pública de Parques Urbanos y Espacios Públicos, y Ministerio de Turismo del Ecuador.



**Figura 9. *Bubo virginianus* Buho Coronado Americano, una de las especies de la familia Strigidae observadas en el 1er Conteo Navideño de Aves de Quito. Fotografía por Jorge Bedoya.**

### Referencias

- [1] Butcher, G.S. 1990. "Audubon Christmas Bird Counts", en: "Survey designs and statistical methods for the estimation of avian population trends", J. R. Sauer, S. Droege (Eds), U.S. Fish Wildlife Service, Biological Report, 90(1): 5-13.
- [2] Dunn, E. H.; Francis, C. M.; Blancher, P. J.; Drennan, S. R.; Howe, M. A.; Lepage, D.; Robbins, C. S.; Rosenberg, K. V.; Sauer, J. R.; Smith, K. G. 2005. "Enhancing the Scientific Value of the Christmas Bird Count". *The Auk*, 122(1): 338-346. DOI: [http://dx.doi.org/10.1642/0004-8038\(2005\)122\[0338:ETSVOT\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1642/0004-8038(2005)122[0338:ETSVOT]2.0.CO;2)
- [3] Chapman, F. M. 1900. "A Christmas bird-census". *Bird-Lore* 2:192.
- [4] National Audubon Society. 2010. "The First Christmas Bird Count: December 25, 1900". [https://web.archive.org/web/20150503150903/http://www.audubon.org/sites/default/files/documents/First\\_Christmas\\_Bird\\_Count\\_birdsplaces.pdf](https://web.archive.org/web/20150503150903/http://www.audubon.org/sites/default/files/documents/First_Christmas_Bird_Count_birdsplaces.pdf). National Audubon Society: New York, EE.UU. Fecha de consulta: 10 Enero 2015
- [5] LeBaron, G.S. 2014. "The 114th Christmas Bird Count". <https://web.archive.org/web/20150503160342/http://www.audubon.org/content/114th-christmas-bird-count> National Audubon Society: New York, EE.UU. Fecha de consulta: 15 Enero 2015
- [6] Butcher, G. S.; Niven, D. K.; Sauer, J. R. 2006. "Using Christmas Bird Count data to assess population dynamics and trends of waterbirds". *American Birds*, 59: 23-25.
- [7] Distler, T.; Schuetz, J. G.; Velásquez-Tibatá, J.; Langham, G. M. 2015. "Stacked Species

- Distribution Models and Macroecological Models Provide Congruent Projections of Avian Species Richness Under Climate Change". *Journal of Biogeography*, 42 (5): 976–988. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/jbi.12479>
- [8] La Sorte, F.A.; Thompson, F.R. 2007. "Poleward shifts in winter ranges of North American birds". *Ecology*, 88: 1803–1812. DOI: <http://dx.doi.org/10.1890/06-1072.1>
- [9] Niven, D. K.; Sauer, J. R.; Butcher, G. S.; Link, W. A. 2004. "Christmas Bird Count provides insights into population change in land birds that breed in the boreal forest". *American Birds*, 58: 10–20.
- [10] Schmidt, K.A.; Ostfeld, R.S. 2003. "Songbird populations in fluctuating environments: predator responses to pulsed resources". *Ecology*, 84: 406–415. DOI: [http://dx.doi.org/10.1890/0012-9658\(2003\)084\[0406:SPIFEP\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1890/0012-9658(2003)084[0406:SPIFEP]2.0.CO;2)
- [11] Paprocki, N.; Heath, J. A.; Novak, S. J. 2014. "Regional Distribution Shifts Help Explain Local Changes in Wintering Raptor Abundance: Implications for Interpreting Population Trends". *PLoS ONE*, 9(1): e86814. DOI: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0086814>
- [12] Bock, C. E.; Root, T. L. 1981. "The Christmas Bird Count and avian ecology". *Studies in Avian Biology*, 6: 17–23.
- [13] Drennan, S. R. 1981. "The Christmas Bird Count: an overlooked and underused sample". *Studies in Avian Biology*, 6: 24–29.
- [14] Beddall, B. G. 1963. "Range expansions of the cardinal and other birds in the northeastern states." *Wilson Bulletin*, 75: 140–158.
- [15] Root, T., McDaniel, L. 1994. "State-by-state Winter population trends of select songbirds from 1960 to 1989", en: "Our living resources 1994: A report to the nation on the distribution, abundance, and health of United States plants, animals, and ecosystems". National Biological Survey, US Department of Interior: Washington, D.C., EE.UU. 21-23 pp.
- [16] Smith, P. G. 2003. "Winter bird use of urban and rural habitats in Ontario". *The Canadian Field-Naturalist*, 117(2): 173–183.
- [17] Lepage, D., Francis, C. M. 2002. "Do feeder counts reliably indicate bird population changes? 21 years of winter bird counts in Ontario, Canada". *The Condor*, 104(2): 255–270. DOI: [http://dx.doi.org/10.1650/0010-5422\(2002\)104\[0255:DFCRIB\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1650/0010-5422(2002)104[0255:DFCRIB]2.0.CO;2)
- [18] McCaffrey, R. E. 2005. "Using Citizen Science in Urban Bird Studies." *Urban Habitats*, 3(1): 70–86.
- [19] Dickinson, J. L., Zuckerberg, B., Bonter, D. N. 2010. "Citizen science as an ecological research tool: challenges and benefits". *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 41: 149–172. DOI: <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102209-144636>
- [20] Boyle, W. A. 2011. "Short-distance partial migration of Neotropical birds: a community-level test of the foraging limitation hypothesis." *Oikos*, 120: 1803–1816. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1600-0706.2011.19432.x>
- [21] Boyle, W. A.; Sigel, B. J. 2015. "Ongoing changes in the avifauna of La Selva Biological Station, Costa Rica: twenty-three years of Christmas Bird Counts." *Biological Conservation*. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biocon.2015.01.004>
- [22] Pashley, D. N.; Martin, R. P. 1988. "The contribution of Christmas Bird Counts to knowledge of the winter distribution of migratory warblers in the Neotropics." *American Birds*, 42(1): 1164–1176.
- [23] Robinson, W. D.; Angehr, G. R.; Robinson, T. R.; Petit, L. J.; Petit, D. R.; Brawn, J. D. 2004. "Distribution of bird diversity in a vulnerable Neotropical landscape." *Conservation Biology*, 18: 510–518. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1523-1739.2004.00355.x>
- [24] National Audubon Society. 2010. "The Christmas Bird Count Historical Results". <https://web.archive.org/web/20150503151601/http://netapp.audubon.org/cbcobservation/> - <http://www.christmasbirdcount.org>. National Audubon Society: New York, EE.UU. Fecha de consulta: 3 Mayo 2015
- [25] STHV-MDMQ. 2010. "Población e indicadores del Distrito Metropolitano de Quito". Enlace: <http://sthv.quito.gob.ec/images/indicadores/parr-oquia/Demografia.htm>. Secretaría de Territorio, Hábitat y Vivienda, Municipio del Distrito Metropolitano de Quito: Quito, Ecuador. Fecha de consulta: 15 abril 2015.
- [26] MDMQ, MECN. 2009. "Políticas y Estrategia del Patrimonio Natural del Distrito Metropolitano de Quito, 2009-2015". Municipio del Distrito Metropolitano de Quito y Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales: Quito, Ecuador.
- [27] Carrión, F.; Erazo Espinosa, J. 2012. "La forma urbana de Quito: una historia de centros y periferias". *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, 41(3): 503–522.
- [28] Ávila Sánchez, H. 2009. "Periurbanización y espacios rurales en la periferia de las ciudades". *Estudios Agrarios (Procuraduría Agraria, México)*, 41: 93–123.

- [29] Terán, F. 1976. “*Geografía del Ecuador*”. Ediciones Librería Cima: Quito. *Avances en Ciencias e Ingenierías*, 5(2): B24–B41.
- [30] MDMQ. 2011. “*Memoria Técnica del Mapa de Cobertura Vegetal del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ)*”. Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, Secretaria de Ambiente: Quito.
- [31] National Audubon Society. 2010. “*Christmas Bird Count Compiler Resources: Everything you need to know to run your Christmas Bird Count circle*”. <https://web.archive.org/web/20150504023912/http://www.audubon.org/conservation/christmas-bird-count-compiler-resources> National Audubon Society: New York, EE.UU. Fecha de consulta: 3 mayo 2015.
- [32] Remsen, J. V., Jr.; Areta, J. I.; Cadena, C. D.; Jaramillo, A.; Nores, M.; Pacheco, J. F.; Pérez, J.; Robbins, M. B.; Stiles, F. G.; Stotz, D. F.; Zimmer, K. J. 2015. “*A classification of the bird species of South America*”. <http://www.museum.lsu.edu/~Remsen/SACCBaseline.html> American Ornithologists' Union, South American Classification Committee. Fecha de consulta: 3 mayo 2015.
- [33] Dickinson, E. C.; Remsen, Jr., J. V. (Eds.). 2013. “*The Howard and Moore complete checklist of the birds of the World. Vol. 1. Non-passerines*”. Aves Press: Eastbourne, Reino Unido.
- [34] del Hoyo, J.; Elliott, A.; Sargatal, J.; Christie, D.A.; de Juana, E. (Eds.) 2015. “*Handbook of the Birds of the World Alive*”. <http://www.hbw.com/> Lynx Edicions: Barcelona, España. Fecha de consulta: 3 mayo 2015.
- [35] Burns, K. J.; Shultz, A. J.; Title, P. O.; Mason, N. A.; Barker, F. K.; Klicka, J.; Lanyon, S. M.; Lovette, I. J. 2014. “Phylogenetics and diversification of tanagers (Passeriformes: Thraupidae), the largest radiation of Neotropical songbirds. *Molecular Phylogenetics and Evolution*”, 75: 41–77. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ympev.2014.02.006>
- [36] Collinson, J. M.; Parkin, D. T.; Knox, A. G.; Sangster, G.; Svensson L. 2008. “Species boundaries in the Herring and Lesser Black-backed Gull complex. *British Birds*”, 101: 340–363.
- [37] Ridgely, R. S.; Greenfield, P. J. 2001. “*The Birds of Ecuador*”. Cornell University Press: Ithaca, EE.UU.
- [38] Cisneros-Heredia, D. F. 2006. “Información sobre la distribución de algunas especies de aves de Ecuador”. *Boletín SAO*, 16(1): 7–16.
- [39] Freile, J.F.; Ahlman, R.; Brinkhuizen, D. M.; Greenfield, P. J.; Solano-Ugalde, A.; Navarrete, L.; Ridgely, R. S. 2013. “Rare birds in Ecuador: First annual report of the Committee of Ecuadorian Records in Ornithology (CERO). *Avances en Ciencias e Ingenierías*, 5(2): B24–B41.
- [40] Velasco, J. 1989. “*Historia del reino de Quito en la América meridional*”. Casa de la Cultura Ecuatoriana: Quito, Ecuador.
- [41] Sclater, P. L.; Fraser, L. 1860. “List of birds collected by Mr. Fraser in the vicinity of Quito, and during excursions to Pichincha and Chimborazo; with notes and descriptions of new species”. *Proceedings of the Zoological Society of London*, 1860: 73–83.
- [42] Orton, J. 1871. “Contributions to the Natural History of the Valley of Quito. No. I”. *The American Naturalist*, 5(10): 619–626.
- [43] Chapman, F. 1926. “The distribution of bird-life in Ecuador”. *Bulletin of the American Museum of Natural History*, 55:1 – 784.
- [44] Paynter, Jr., R. A. 1993. “*Ornithological gazetteer of Ecuador*”. 2da Edición. Harvard University: Cambridge, EE.UU.
- [45] Carrion, J. M. 1996. “*Aves del Valle de Quito y sus alrededores*”. Fundación Natura: Quito, Ecuador.
- [46] Carrión, J. M. 2001. “*Aves de Quito, retratos y encuentros*”. SIMBIOE: Quito, Ecuador.
- [47] PNUMA; MDMQ; FLACSO Ecuador. 2011. “*Perspectivas del ambiente y cambio climático en el medio urbano: ECCO Distrito Metropolitano de Quito*”. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente PNUMA, Fondo Ambiental del Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales –FLACSO Sede Ecuador: Quito.
- [48] MECN; MDMQ. 2010. “*Áreas Naturales del Distrito Metropolitano de Quito: Diagnóstico Bioecológico y Socioambiental*”. Reporte Técnico N° 1, Serie de Publicaciones del Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales MECN: Quito, Ecuador.
- [49] Savard, J.-P.L.; Clergeau, P.; Mennechez, G. 2000. “Biodiversity concepts and urban ecosystems”. *Landscape and Urban Planning*, 48: 131–142. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-2046\(00\)00037-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-2046(00)00037-2)
- [50] Rudd, H.; Vala, J.; Schaefer, V. 2002. “Importance of backyard habitat in a comprehensive biodiversity conservation strategy: a connectivity analysis of urban green spaces.” *Restoration Ecology*, 10: 368–375. DOI: <http://dx.doi.org/10.1046/j.1526-100X.2002.02041.x>
- [51] Daniels, G.D.; Kirkpatrick, J.B. 2006. “Does variation in garden characteristics influence the conservation of birds in suburbia?” *Biological Conservation*, 133: 326–335. DOI:



http://dx.doi.org/10.1046/j.1526-100X.2002.02041.x

[52] Chamberlain, D.E.; Cannon, A.R.; Toms, M.P. 2004. "Associations of garden birds with gradients in garden habitat and local habitat. *Ecography*", 27: 589–600. DOI: http://dx.doi.org/10.1111/j.0906-7590.2004.03984.x

[53] Goddard, M. A.; Dougill, A. J.; Benton, T. G. 2010. "Scaling up from gardens: biodiversity conservation in urban environments". *Trends in Ecology & Evolution*, 25(2): 90–98. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.tree.2009.07.016

[54] McKinney, M. L. 2002. "Urbanization, Biodiversity, and Conservation". *BioScience*, 52(10): 883-890. DOI: http://dx.doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0883:UBAC]2.0.CO;2

[55] Cisneros-Heredia, D. F.; Henry, P.-Y. 2004. "New records concerning range and altitudinal distribution of Tropical Mockingbird *Mimus gilvus* in Ecuador". *Cotinga*, 21: 74–75.

[56] Henry, P.-Y. 2005. "New distributional records of birds from Andean and western Ecuador". *Cotinga*, 23: 27–32.

Código	Nombre	Ecosistema / Región	1er CBC	CBC más reciente
			No. (Año)	No. (Año)
ECCB	Cerro Blanco-Chongón-estuario de Puerto Hondo	Bosque tropical / Costa	102 (2002)	115 (2014)
ECCH	Chiles-Chical	Bosques montanos y páramos / Cordillera Occidental, Andes	113 (2013)	115 (2014)
ECGA	Gareno, Napo	Bosque tropical / Amazonía	111 (2010)	112 (2011)
ECLA	Loma Alta	Bosque tropical / Costa	104 (2003)	114 (2013)
ECBM	Los Bancos-Milpe	Bosque subtropical piedemontano / Cordillera Occidental, Andes	113 (2012)	115 (2015)
ECNM	Mindo-Tandayapa	Bosque subtropical y montano / Cordillera Occidental, Andes	95 (1994)	115 (2014)
ECNA	Napo	Bosque tropical / Amazonía	104 (2004)	108 (2007)
ECRU	Rio Upano	Bosque subtropical y tropical / Amazonía	110 (2009)	115 (2014)
ECYY	Yanayacu	Bosque subtropical y montano / Cordillera Oriental, Andes	107 (2006)	115 (2014)

Tabla 1. Conteos Navideños de Aves realizados en Ecuador (CBC por sus siglas en inglés). Fuente: National Audubon Society [24].

Ecosistema	Rango altitudinal	Precipitación	Temperatura Promedio	Cobertura remanente
	(en m)	(en mm)	(en °C)	(en km <sup>2</sup> )
Bosque altimontano norandino siempreverde	2600–4000	1000–2000	6–10	8
Arbustal montano de los Andes norte	2400–3300	1000–1500	8–18	15
Herbazal montano	2400–3300	100–1500	8–18	5
Herbazal lacustre montano	2800–2900	100–1500	8–18	0
Bosques seco interandino	1800–2200	500	16–22	6
Vegetación ribereña del piso montano xerofítico	1800–2500	500–1000	14–16	0,8
Arbustal seco interandino	1800–2700	500–1000	14–16	215
Vegetación saxícola montana interandina de los Andes norte	1900–2600	500–1000	14–16	5,5

Tabla 2. Ecosistemas naturales que cubrían originalmente las áreas donde ahora se asientan las zonas urbanas y periurbanas de Quito, y la cantidad de cobertura remanente en las zonas periurbanas. Fuente: Memoria Técnica del Mapa de Cobertura Vegetal del Distrito Metropolitano de Quito [30].









Orden	Familia	Especie	No. individuos registrados													
			RUM	GUA	ITC	JBQ	PIC	CHI	CUM	GUA	PBG	PUL	ZOO			
HIRUNDINIDAE		<i>Pygochelidon cyanoleuca</i>	8	3	3	25	25	16	11	31						
		<i>Orochelidon murina</i>	6			2	15									
		<i>Progne subis</i>					3								4	
TROGLODYTIDAE		<i>Riparia riparia</i>					5									
		<i>Troglodytes musculus</i>	1			6	1							14		
		<i>Cistothorus platensis</i>	4													
		<i>Pheugopedius euophrys</i>	6			4								2		
		<i>Henicorhina leucophrys</i>												1		
TURDIDAE		<i>Catharus ustulatus</i>	1				1									
		<i>Turdus fuscater</i>	54	42	28	55	22	7	58	15				24		
MIMIDAE		<i>Mimus gilvus</i>							3					2		
THRAUPIDAE		<i>Saltator striatipectus</i>												7		
		<i>Thyropsis ornata</i>												1		
		<i>Cnemathraupis eximia</i>							1							
		<i>Chlorornis riefferii</i>												1		
		<i>Anisognathus igniventris</i>	5				13							3		
		<i>Dubusia taeniata</i>												1		
		<i>Pipraeidea bonariensis</i>	6	13	9	1	7	2	1	1	1			1		
		<i>Tangara episcopa</i>				2			3					11		
		<i>Tangara vitriolina</i>						2	4	3				26		
		<i>Controstrum cinereum</i>	5	2	2	4	2		2	2	2			6		
		<i>Diglossa humeralis</i>	17	12	20	10	6							3		
		<i>Diglossa albilatera</i>		2												
		<i>Diglossa sittoides</i>							4	2						
		<i>Diglossa cyanea</i>	2	2		2	1									
		<i>Catamblyhynchus diadema</i>												1		
		<i>Geospizopsis unicolor</i>	4				18									
		<i>Geospizopsis plebejus</i>				2	2		1					2		

Orden	Familia	Especie	No. individuos registrados													
			RUM	GUA	ITC	JBQ	PIC	CHI	CUM	GUA	PBG	PUL	ZOO			
		<i>Sicalis flaveola</i>					3	31	4	4	11					
		<i>Sicalis luteola</i>					1									
		<i>Volatinia jacarina</i>						2								1
		<i>Sporophila luctuosa</i>	1	1					1							
		<i>Sporophila nigricollis</i>					1	4								1
		<i>Catamenia analis</i>	4	2	3	4	2									1
		<i>Catamenia inornata</i>	1			2	3									
	EMBERIZIDAE	<i>Arremon assimilis</i>	3													
		<i>Zonotrichia capensis</i>	25	20	68	31	10	23	70	16	5	48	35			
		<i>Atlapetes latinuchus</i>	3	6	6	4	2									1
		<i>Atlapetes leucopterus</i>	7					1								2
	CARDINALIDAE	<i>Piranga rubra</i>							2							
		<i>Pheucticus chrysogaster</i>	2	10	5	1	1	4	7	2	3	2	8			
		<i>Pheucticus ludovicianus</i>														1
	PARULIDAE	<i>Myiothlypis nigrocristata</i>	1	9			2									1
		<i>Myiothlypis coronata</i>														5
		<i>Myioborus miniatus</i>	8			1	2									
		<i>Myioborus melanocephalus</i>	1				2									
	ICTERIDAE	<i>Molothrus bonariensis</i>	2						3		3					
	FRINGILLIDAE	<i>Sporagra spinescens</i>							2							
		<i>Sporagra magellanica</i>	7													40
		<i>Astragalinus psaltria</i>														3
		<i>Euphonia cyanocephala</i>	2			4		2	3		2					16



## Otra nueva especie de rana *Pristimantis* (Anura: Terrarana) de las estribaciones occidentales del Volcán Pichincha, Ecuador

Mario H. Yáñez-Muñoz<sup>1,2\*</sup>, Carolina Reyes-Puig<sup>1</sup>, Patricia Bejarano-Muñoz<sup>1</sup> y Santiago R. Ron<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Biodiversidad, calle Rumipamba 341 y Av. de los Shyris, Casilla 17-07-8976. Quito, Ecuador.

<sup>2</sup>Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Museo de Zoología (QCAZ), Escuela de Ciencias Biológicas, Apartado 17-01 2154. Quito, Ecuador.

\*Autor principal/Corresponding author; e-mail: mayamu@hotmail.com

Editado por/Edited by: Diego F. Cisneros-Heredia, Ph.D.(c)

Recibido/Received: 2015/10/16. Aceptado/Accepted: 2015/12/02.

Publicado en línea/Published on Web: 2015/12/30. Impreso/Printed: 2015/12/30.

Zoobank: <http://zoobank.org/D0B9BAC3-6F81-4E82-8142-702EE78DEF4D>

LSID urn:lsid:zoobank.org:pub:D0B9BAC3-6F81-4E82-8142-702EE78DEF4D

Another new species of frog *Pristimantis* (Anura: Terrarana) in the western foothills of the Pichincha Volcano, Ecuador

### Abstract

We describe a new species of terrestrial frog *Pristimantis* from the western slopes of the Ecuadorian Andes, in the province of Pichincha, Ecuador. The species is a member of the *P. devillei* species-group and is characterized by having cranial crests with high frontoparietals, concealed tympanum, glandular dorsolateral folds and flanks, and subconical tubercles on the upper eyelid, ulnar region and heel.

**Keywords.** Andes, Craugastoridae, Quito, *Pristimantis pichincha* sp. nov.

### Resumen

Describimos una nueva especie de rana terrestre *Pristimantis* de las estribaciones occidentales de los Andes de Ecuador, en la provincia de Pichincha, Ecuador. La especie forma parte del grupo de especies *P. devillei* y se caracteriza por presentar cresta craneal elevada frontoparietalmente, tímpano oculto, pliegues dorsolaterales, flancos glandulares, y tubérculos subcónicos en el párpado, región ulnar y talón.

**Palabras Clave.** Andes, Craugastoridae, Quito, *Pristimantis pichincha* sp. nov.

### Introducción

Las investigaciones sobre la diversidad de ranas terrestres *Pristimantis* en las estribaciones occidentales del Distrito de Metropolitano Quito (DMQ) de los últimos seis años han identificado a este grupo de anfibios como el componente más sobresaliente de pequeños vertebrados en la región [1]. Un sorprendente número de especies nuevas han sido descritas en un corto período de tiempo [1–7]. Hace cinco años Yáñez-Muñoz *et al.* [2] inició con la descripción de tres nuevas especies, posteriormente Valencia *et al.* [3] contribuyó con una conspicua nueva especie de *Pristimantis* de coloración verde, Rojas *et al.* [5] aportaría con una nueva especie críptica del género, asociada al grupo de especies de *P. myersi*, Arteaga *et al.* [6] describiría otra especie más asociada a *P. subsigillatus* y finalmente Guayasamín *et al.*, [7] aportó con una nueva especie asociada

al grupo de *P. myersi*. Recientemente, Yáñez-Muñoz y Bejarano-Muñoz [4] presentaron un compendio de 48 especies de *Pristimantis* para las estribaciones occidentales del DMQ, lo que equivale al 27 % del total de ranas del género *Pristimantis* en Ecuador. Esta comunidad reportada para el DMQ se agrupa en dos grandes clados de *Pristimantis* (subgéneros *Hypodyction* y *Pristimantis*) y se distribuye en aproximadamente 11 grupos de especies [3]. Uno de estos corresponde al grupo de especies de *P. devillei* (*sensu* Padial *et al.* [8]) el cual contiene 23 especies distribuidas en los Andes de Colombia y Ecuador y se caracterizan por la presencia de crestas craneales y condición B del dedo V del pie (Hedges *et al.* [9]). En este artículo describimos una nueva especie del grupo de especies de *Pristimantis devillei*.

## Materiales y Métodos

La descripción de la especie sigue el formato estandarizado propuesto por Lynch y Duellman [8], el uso de los caracteres diagnósticos siguen las definiciones e ilustraciones propuestas por Duellman y Lehr [9]. La clasificación sistemática de la familia y de grupos de especies para Terrarana sigue la propuesta de Padial *et al.* [10] y Hedges *et al.* [11]. Los especímenes colectados fueron sacrificados en una solución de benzocaína, fijados en formalina al 10 % y preservados en etanol al 70 %. El sexo y la edad de los especímenes se determinó a partir de características sexuales secundarias (hendiduras bucales, almohadillas nupciales y tamaño) y por la inspección directa de las gónadas a través de incisiones dorsolaterales. Las medidas fueron tomadas con un calibre electrónico (precisión  $\pm 0.01$  mm, redondeadas al 0.1 mm más cercano) siguiendo el formato de Duellman y Lehr [10]. Los patrones de coloración en vida se tomaron de las notas de campo y fotografías a color. Las localidades, sus coordenadas y elevaciones fueron determinadas en base a las notas de campo. Se examinó los especímenes de las siguientes colecciones (ver Apéndice 1): División de Herpetología del Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales (DHMECN) del Instituto Nacional de Biodiversidad (INB), Museo de Zoología de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador (QCAZ) y University of Kansas Natural History Collection (KU). En todo el texto se hace uso de las siguientes abreviaciones para los créditos fotográficos e información asociada: Patricia Bejarano-Muñoz (CRP), Carolina Reyes-Puig (CRP) y Mario H. Yáñez-Muñoz (MYM).

	Hembras n = 15				Machos n = 9			
	min	max	$\bar{x}$	$\pm$	min	max	$\bar{x}$	$\pm$
LRC	28	35,8	32,4	2,4	17,3	27,5	21,1	3,8
ON	3	3,2	3,01	0,2	1,7	2,5	2,1	0,3
LC	9,9	11,5	11	0,7	6,8	9,4	8,0	0,9
AC	10,2	13,3	11,9	0,7	6,5	10,2	7,7	1,4
DIO	3,4	4,1	3,9	0,4	1,8	3,6	2,6	0,6
DIN	3,7	3,2	2,9	0,4	2,4	1,8	2,2	0,2
LT	14,4	18,6	16,6	0,9	14,9	9,4	11,3	1,9
LP	14,3	19,7	17,4	2,4	17,1	11,2	14,7	1,8
LM	8,7	11,8	10,7	0,9	9,1	5,4	6,8	1,3
DO	3,4	4	3,8	0,3	3,5	1,9	2,4	0,6
AP	2,2	2,7	2,5	0,23	2,3	1,57	2,0	0,2

Tabla 1: Set de medidas morfométricas de la serie tipo de *Pristimantis pichincha* sp. nov., mínimo (min), máximo (max), media ( $\bar{x}$ ) y desviación estándar ( $\pm$ ).

## Resultados

### *Pristimantis pichincha* sp. nov.

*Pristimantis* sp. A Yáñez-Muñoz y Bejarano-Muñoz [4]

**Holotipo:** DHMECN 7882 hembra, colectada en la Reserva Biológica Yanacocha (0°06'14.0" S, 78°35'06.0" O, 3200 m) (Fig. 6), cantón Quito, provincia de Pichincha, República de Ecuador, el 22 febrero del 2009 por MYM, M.G. Herrera-Madrid y Stalin Cáceres.

**Paratopotipos (16):** Hembras adultas (4): DHMECN 7271, 7275 con los mismo datos del holotipo; DHMECN

4211, 4213 colectados en la localidad típica, por Cecilia Tobar y Mónica Arellano el 22 de octubre del 2006. Hembras subadultas (3): DHMECN 4202, 4212, 4214 con los mismos datos de DHMECN 4211. Machos adultos (9): DHMECN 4229, 4230, 7273, 7277, 7281, con los mismos datos del holotipo; DHMECN 4215, 4217, 4219 y 4230 con los mismos datos de DHMECN 4211.

**Paratipos (7):** Hembras adultas DHMECN 8755, 8763, 8767, 8768, 8778-8780 colectadas en el Valle del Toaza (0°12'3.80"S, 78°37'23.04"O, 3420 m de elevación) (Fig. 6), Quito, Provincia de Pichincha por PBM y María Pérez el 23 de mayo del 2011.

**Material referido (21):** Juveniles DHMECN 7274, 7284, 7278 y 7279 con los mismos datos del holotipo; DHMECN 4206, 4207, 4209, 4210, 4216, 4218, 4220, 4221, 4227 y 4231 con los mismos datos de DHMECN 4215; DHMECN 4223-4226 en la misma localidad del holotipo, en enero del 2007, colectados por MYM y Stalin Cáceres; DHMECN 8766 y 8781 con los mismos datos de DHMECN 8755.

**Etimología:** El epíteto específico *pichincha* hace referencia a la región geográfica donde la serie tipo fue colectada, en las faldas occidentales del volcán Pichincha del Distrito Metropolitano de Quito.

**Nombre común sugerido:** Cutín de Pichincha

**Nombre común en inglés sugerido:** Pichincha Robber Frog

**Diagnosis:** *Pristimantis pichincha* es asignado al género *Pristimantis* acorde a los caracteres diagnósticos de Hedges *et al.* [11], tímpano no diferenciado, cresta craneal y procesos dentígeros del vómer presentes, discos expandidos en forma de "T" en las falanges terminales y dedo V del pie más largo que el dedo III. La nueva especie es asignada al grupo de especies de *P. devillei* (sensu Hedges *et al.* [11]), por presentar cuerpos esbeltos y moderadamente robustos; dedo I más corto que el dedo II; dedo V ligeramente más largo que del dedo III y no se extiende hacia el tubérculo subarticular distal del dedo IV; discos de los dígitos expandidos; tímpano oculto; cresta craneal presente; y procesos vomerinos odontóforos presentes. *Pristimantis pichincha* puede ser diferenciado de sus congéneres por la siguiente combinación de caracteres: (1) piel del dorso granular, con verrugas redondeadas posteriormente y en los flancos; con pliegues dorsolaterales glandulares completos, ubicados paravertebralmente; piel del vientre areolada, pliegue discoidal presente; (2) membrana timpánica oculta bajo la piel, cuando el anillo timpánico está visible se observa sólo su mitad inferior; (3) hocico en vista dorsal y de perfil ligeramente redondeado (Fig. 2); (4) párpado superior con uno o dos tubérculos subcónicos; párpado más estrecho que la distancia interorbital; cresta craneal presente, con bordes frontoparietales elevados; (5) procesos vomerinos presentes, grandes, triangulares de contorno, de uno a cuatro dientes vomerinos; (6) machos sin hendiduras vocales ni almohadillas nupciales;

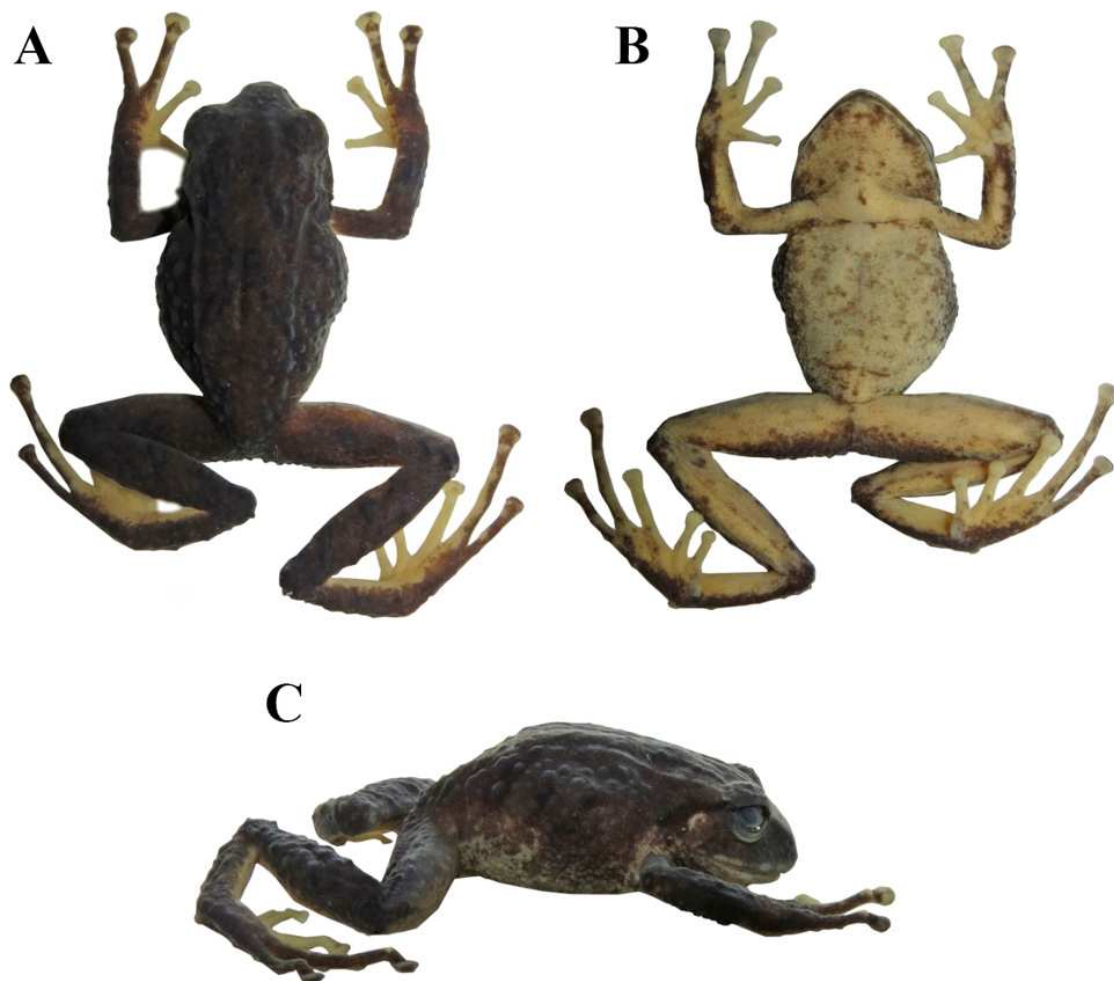


Figura 1: Aspecto dorsal (A), ventral (B) y lateral (C) del Holotipo de *Pristimantis pichincha* sp. nov. (DHMECN 7282, hembra). Fotos: MYM.

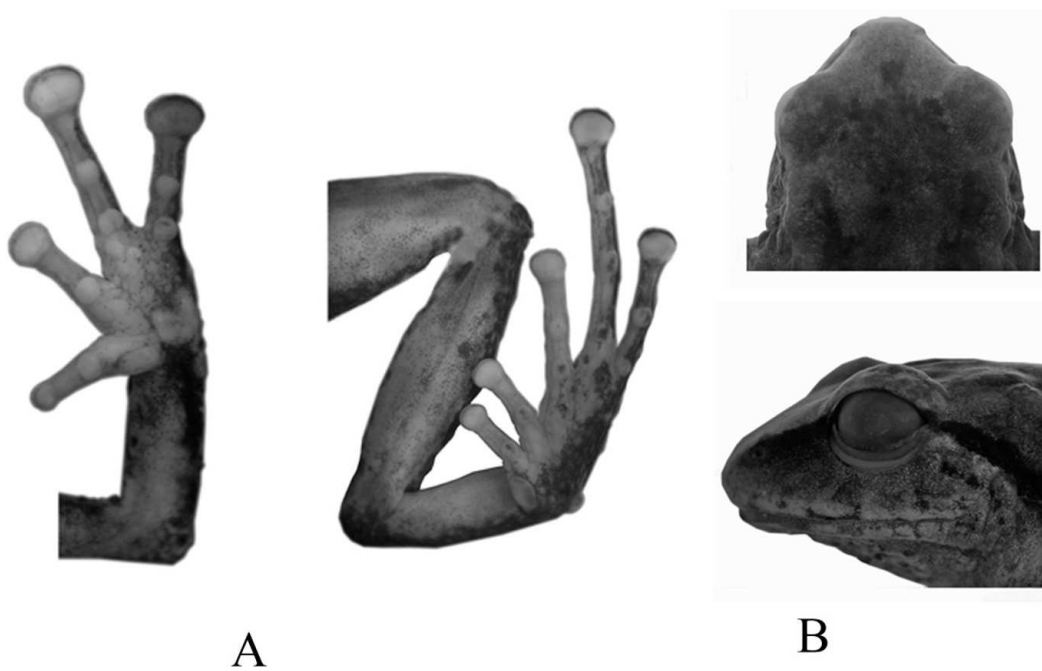


Figura 2: *Pristimantis pichincha* sp. nov. (Paratipo DHMECN 8780, hembra). (A) Detalle de las extremidades, (B) Detalle de la cabeza en vista dorsal y de perfil. Fotos: MYM.

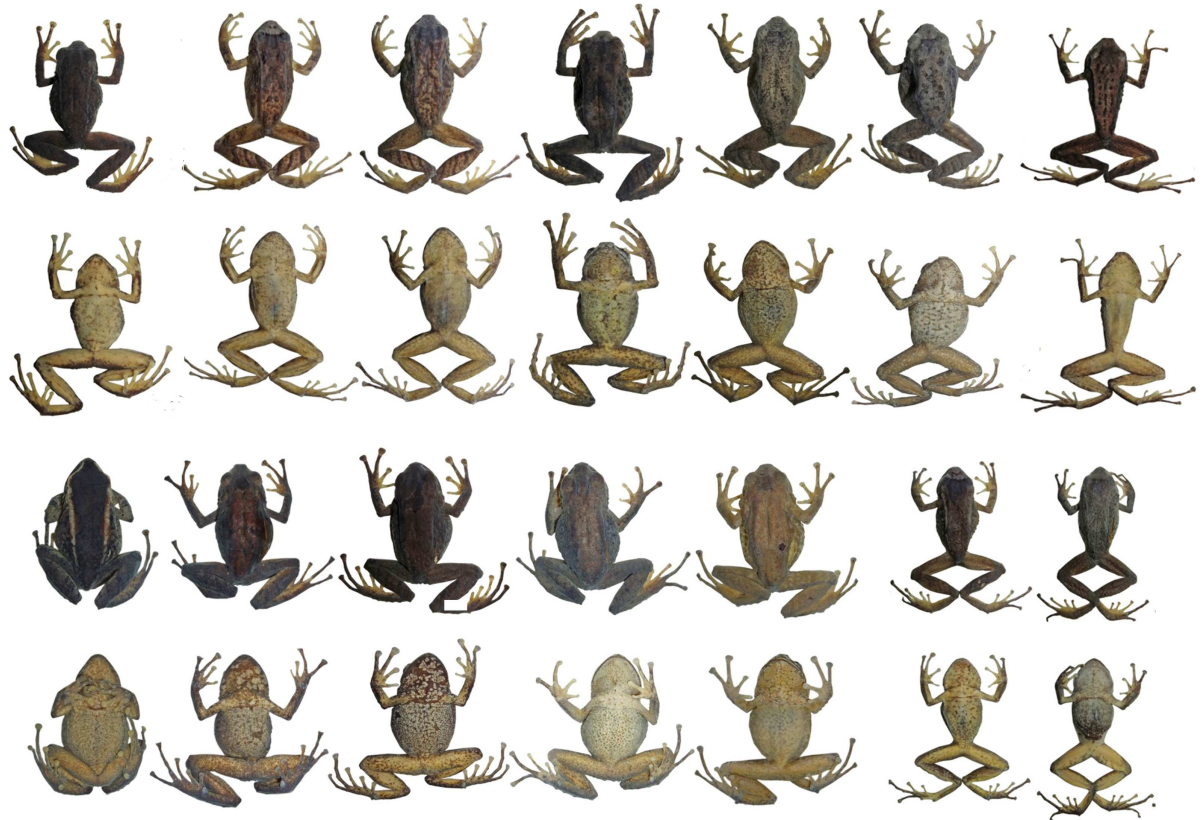


Figura 3: Variación de la coloración dorsal y ventral de hembras en *Pristimantis pichincha* sp. nov. De izquierda a derecha primera y segunda fila: Holotipo DHMECN 7282, DHMECN 4211, DHMECN 4213; DHMECN 8780; DHMECN8779; DHMECN8778; DHMECN 4202; tercera y cuarta fila: DHMECN 7271; DHMECN 7275, DHMECN 8779; DHMECN 8763; DHMECN 8768; DHMECN 4212; DHMECN 4214. Fotos: MYM, CRP.



Figura 4: Variación de la coloración dorsal y ventral de machos en *Pristimantis pichincha* sp. nov. Fila superior: DHMECN 7277, DHMECN 4215, DHMECN 7273, DHMECN 4230. Fotos: MYM; CRP.



(7) dedo de la mano I más corto que el II; los dígitos II–III–IV con discos más anchos que el dedo adyacente y almohadillas dilatadas, discos marginados en todos los dedos manuales; (8) dedos manuales con rebordes cutáneos laterales; (9) tubérculos ulnares, presentes, subcónicos; (10) talón con tubérculo cónico y tarso con tubérculos subcónicos en su borde externo; pliegue tarsal interno presente (Fig. 2); (11) tubérculo metatarsal interno grande, ovoide, dos a tres veces más grande que el tubérculo externo; tubérculo metatarsal externo mediano, triangular; tubérculos supernumerarios plantares; (12) dedos del pie con rebordes cutáneo laterales; membrana interdigital ausente; dedo del pie V más largo que el III, almohadilla del dedo del pie V no se extiende más allá de longitud del disco del dedo III (Fig. 2); discos del pie de menor tamaño que los de la mano; (13) dorso variable desde café oscuro, café grisáceo hasta beige, algunos individuos con marcas en forma de “V” invertida café oscuras o manchas paravertebrales claras; vientre y garganta desde crema inmaculado, crema salpicado con café, a crema grisáceo; superficies posteriores de las pantorrillas con barras transversales; en vida iris cobrizo; (14) longitud rostro-cloacal en hembras 28–35.8 mm ( $\bar{x} = 32,4 \pm 2,4$ ,  $n = 15$ ), en machos 17,3–27,5 mm ( $\bar{x} = 21,1 \pm 3,8$ ,  $n = 3$ ).

**Comparación con especies similares:** La combinación de pliegues dorsolaterales glandulares, flancos glandulares, tubérculos subcónicos en el talón y codo, diferencian a *P. pichincha* de otras especies de ranas *Pristimantis* con tímpano oculto o ausente de las estribaciones occidentales de los Andes ecuatorianos. *Pristimantis pichincha* (caracteres entre paréntesis) es similar a *Pristimantis devillei* de la cual se diferencia por la presencia de tímpano prominente (membrana oclulta bajo la piel y de ser visible el anillo timpánico se observa solo en la mitad inferior), hocico subacuminado en vista dorsal y de perfil (redondeado), ausencia de tubérculos sobre el ojo (1 a 2 tubérculos subcónicos presentes), cresta craneal baja (presente con bordes frontoparietales elevados), vomerinos oblicuos de contorno (triangulares de contorno), ausencia de tubérculos en el talón y borde externo del tarso (talón con un tubérculo cónico y borde externo del tarso con tubérculos subcónicos), vientre crema con reticulaciones cafés (desde crema inmaculado, crema salpicado con café, a crema grisáceo). Otra especie que debe ser comparada con *P. pichincha* es *P. vertebralis*, la cual se diferencia por poseer tímpano prominente (membrana oclulta bajo la piel y de ser visible el anillo timpánico se observa solo en la mitad inferior), tubérculos ulnares ausentes (presentes subcónicos), distintiva pigmentación negra en la superficie superior de los discos digitales (ausente), vientre crema amarillento con puntos cafés (desde crema inmaculado, crema salpicado con café, a crema grisáceo). *Pristimantis pichincha* y *P. truebae* comparten el carácter de tímpano oculto, no obstante, *P. truebae* presenta pliegues dorsolaterales indistintos (pliegues dorsolaterales glandulares), hocico subacuminado de perfil (redondeado), cresta craneal baja en hembras y ausente en

machos (presente con bordes frontoparietales elevados), párpado con tubérculos bajos (1 a 2 tubérculos subcónicos presentes), talón con tubérculos pequeños y borde externo del tarso sin tubérculos (talón con un tubérculo cónico y borde externo del tarso con tubérculos subcónicos), *P. truebae* presenta tamaños corporales mayores que *P. pichincha*. Comparaciones con otras especies del grupo de *P. devillei* son presentadas en la Tabla 2.

**Descripción del holotipo:** Hembra adulta, cabeza tan larga como ancha; hocico redondeado en vista dorsal y de perfil; distancia ojo–narina 13,2 % de la LRC; canto rostral en vista dorsal y región loreal en vista lateral ligeramente cóncavos; narinas débilmente protuberantes, dirigidas lateralmente; área interorbital ligeramente elevada por crestas craneales, más ancha que el párpado superior, el mismo que equivale a 81,8 % de la DIN; cresta craneal evidente; párpado superior con dos tubérculos subcónicos; membrana timpánica ausente, anillo timpánico no visible, con dos tubérculos postrictales subcónicos; coanas pequeñas, redondeadas de contorno no cubiertas por el piso palatal del maxilar; procesos dentígeros del vómer de contorno triangular, con 2–4 dientes; lengua mas larga que ancha, de forma ovalada, adherida un 50 % al piso de la boca.

Textura del torso granular con verrugas redondeadas en la región posterior del dorso y hacia los flancos; pliegues dorsolaterales granulares presentes, se extienden desde la región posterocular hasta la porción anterior de la inserción de los muslos; piel del vientre areolada. Pliegue discoidal débilmente definido; cloaca rodeada de verrugas redondeadas en la región superior. Brazos esbeltos con tubérculos ulnares subcónicos a redondeados; dedos de la mano con finos rebordes cutáneos laterales presentes en todos los dedos, tubérculo palmar acorazonado, dos veces el tamaño de tubérculo tenar que es ovalado; tubérculos subarticulares redondeados y prominentes, tubérculos supernumerarios presentes distribuidos en toda la palma de la mano; terminaciones digitales dilatadas más anchas que los dígitos en los dedos II–IV, con almohadillas definidas por surcos circunmarginales.

Extremidades posteriores esbeltas, longitud de la tibia 56 % de la LRC, con un tubérculo cónico en el talón, borde externo del tarso con dos o más tubérculos alargados; pliegue tarsal interno débilmente definido, en  $\frac{1}{4}$  de la longitud del tarso; dedos del pie con finos rebordes cutáneos laterales, que se extienden basalmente hacia la inserción de los dedos a modo de membranas interdigitales; tubérculos subarticulares redondos y protuberantes; tubérculo metatarsal interno presente, 3 veces el tamaño del externo que es subcónico; tubérculos supernumerarios plantares presentes, indistintos; discos dilatados en los dedos III–V; dedo V solo alcanza la base del tubérculo subarticular distal del dedo IV.

**Coloración en preservado del holotipo:** Dorsalmente café oscuro, con marcas negras en forma de V invertida y barras en las superficies posteriores de las patas. Las



Especie	Tubérculos en el talón	Tubérculos en el borde externo del tarso	Pliegue metatarsal interno
<i>supernatis</i>	Presentes, cónico	Presentes, pequeños subcónicos	Presente, 3/4 del tarso
<i>quinquagesimus</i>	Presentes, calcar	Presentes, cónicos	Presente débilmente definido
<i>duellmani</i>	Presentes, pequeños subcónicos	Presentes, pequeños subcónicos	ausentes
<i>romanorum</i>	Presentes, pequeños cónicos	Presentes, pequeños cónicos	ausentes
<i>thymalopsoides</i>	Presentes, pequeños cónicos	Ausentes	ausentes
<i>sobetes</i>	Presentes, cónico	Presentes, pequeños cónicos	ausentes
<i>devillei</i>	ausente	Ausentes	Presente, 3/4 del tarso
<i>pichincha</i>	Presentes, cónico	Presentes, subcónicos	presente, 1/8 del tarso
<i>surdus</i>	ausente	Ausentes	Presente débilmente definido
<i>truebae</i>	Presente, pequeño aplanados	Ausentes	Presente débilmente definido
<i>curtipes</i>	ausente	Ausentes	ausentes
<i>gentryi</i>	Presente, pequeño aplanados	Presentes, pequeños redondeados	Presente débilmente definido
<i>vertebralis</i>	Presentes, pequeños cónicos	Presentes, pequeños cónicos	ausentes
<i>buckleyi</i>	ausente	Ausentes	ausentes

Especie	Tubérculos metatarsal interno	Tubérculos metatarsal externo	Tubérculos supernumerarios	Reborde cutáneos del pie
<i>supernatis</i>	Oval 4X	redondo	Presentes	Presentes
<i>quinquagesimus</i>	Oval 6-8X	subcónico	Presentes, base de los dedos	presentes
<i>duellmani</i>	Oval 8X	débilmente definido	Presentes, base de los dedos	Presentes
<i>romanorum</i>	Oval 2X	oval	Presentes	Presentes
<i>thymalopsoides</i>	Oval 6-8X	oval	Presentes, base de los dedos	Presentes
<i>sobetes</i>	Oval 5-6X	subcónico	Presentes, base de los dedos	Presentes
<i>devillei</i>	Oval 3-4X	oval	Ausentes	Presentes
<i>pichincha</i>	Oval 2-3X	triangular	Presentes	Presentes
<i>surdus</i>	Oval 5X	débilmente definido	Presentes, base de los dedos	Presentes
<i>truebae</i>	Oval 4X	oval	Presentes, base de los dedos	Quillas
<i>curtipes</i>	Oval 2x	triangular	Presentes	presentes
<i>gentryi</i>	Oval 3X	subcónico	Presentes	Presentes
<i>vertebralis</i>	Oval 4-8X	cónico	Presentes	Presentes
<i>buckleyi</i>	Oval 3-4X	redondo	Débilmente definidos	Presentes, estrechos

Especie	Condición del dedo V del pie	Membranas interdigitales	Coloración	Tamaños	
				Hembra	Macho
<i>supernatis</i>	C	ausente	Flancos crema con teneues marcas negras en forma de barras	37,4-38,9	22,7
<i>quinquagesimus</i>	B	ausente	Con puntos negros en los flancos o con marcas blancas	27,8-30,1	33,6-42,2
<i>duellmani</i>	B	Presente, basal	Sin coloración distintiva	33,6-45,8	24,9-36,0
<i>romanorum</i>	B	ausente	Flancos con bandas crema	38,9-41,0	31,0-34,1
<i>thymalopsoides</i>	C	ausente	Con puntos naranja o crema amarillento en los flancos	46,9 - 55,4	28,0-34,4
<i>sobetes</i>	B	ausente	Flancos con bandas café oscuro interrumpidas	27,1 - 41,3	
<i>devillei</i>	B	ausente	Reticulado de amarillo en los muslos	34,7-44,7	19,6-31,6
<i>pichincha</i>	B	ausente	Con barras naranjas en los flancos	17,0-35,8	19,7-31,3
<i>surdus</i>	B	ausente	Sin coloración distintiva	40,4 - 54,6	24,5 - 36,9
<i>truebae</i>	B	ausente	Sin coloración distintiva	45,0 - 45,8	25,5 - 39,0
<i>curtipes</i>	B	ausente	Con manchas claras en las superficies ocultas	25,7-44,2	19,2-27,7
<i>gentryi</i>	B	ausente	Distintiva mancha café en el dorso	29,6 - 41,6	23,0 - 28,5
<i>vertebralis</i>	B	ausente	Dedos negros	35,0 - 45,2	21,1 - 33,8
<i>buckleyi</i>	B	ausente	Sin coloración distintiva	37,1-48,8	24,5-28,7

Tabla 2: Caracteres comparativos de las especies del grupo de especies de *P. devillei*.

superficies dorsales de las manos y pies, en los dedos I–II y I–III, crema amarillento, dedos externos en las extremidades café oscuro; ventralmente crema con tenues marcas café oscuro. Mancha labial, superficie posterior de los flancos, ingles y axila, color crema (Fig. 1).

**Coloración en vida:** dorso y flancos desde café oscuro, café verdoso, hasta café amoratado; pueden presentar marcas paravertebrales crema amarillento. Superficies de los dedos de manos I–II y de los pies I–III, anaranjados o amarillentos; vientre crema amarillento, con o sin tenues o fuertes manchas café oscuro, superficie anterior de los muslos anaranjado, café oscuro o amarillo; iris cobrizo (Fig. 5).

**Medidas del holotipo:** Longitud rostro-cloacal = 28,53; longitud cefálica = 11,67; ancho cefálico = 11,12; distancia interorbital = 3,99; ancho del párpado = 2,7; diámetro horizontal del ojo = 3,77; distancia ojo-narina = 3,58; distancia internarinal = 3,3; diámetro horizontal

del tímpano = 1,5; longitud de la tibia = 16,02; longitud del pie = 17,1; longitud de la mano = 10,47.

**Variación:** Los especímenes examinados presentaron variación en la textura dorsal y ancho de los pliegues, así como en los patrones de coloración. Los pliegues dorsolaterales y crestas dermales están bien definidos en la mayoría de los especímenes, aunque algunas hembras pueden presentar más pronunciado estos caracteres o tenerlos finamente delineados en machos. *Pristimantis pichincha* exhibe una coloración muy variable, desde beige claro sin marcas oscuras, café claro con marcas en forma “X” o “V” invertida, con marcas paravertebrales claras, hasta homogéneamente café oscuro (Fig. 3–4). Las hembras en su mayoría presentan una coloración ventral crema blanquecino, aunque algunos individuos exhiben vientres finamente salpicados con manchas grises, hasta con grandes marcas café oscuras en la garganta (Fig. 3). En los machos la coloración ventral varía



Figura 5: Coloración en vida de *Pristimantis pichincha* sp. nov. De izquierda a derecha: DHMECN 7271♀, DHMECN 8789♀, DHMECN 7273♂, DHMECN 4202 ♀ subadulta. Fotos: MYM.

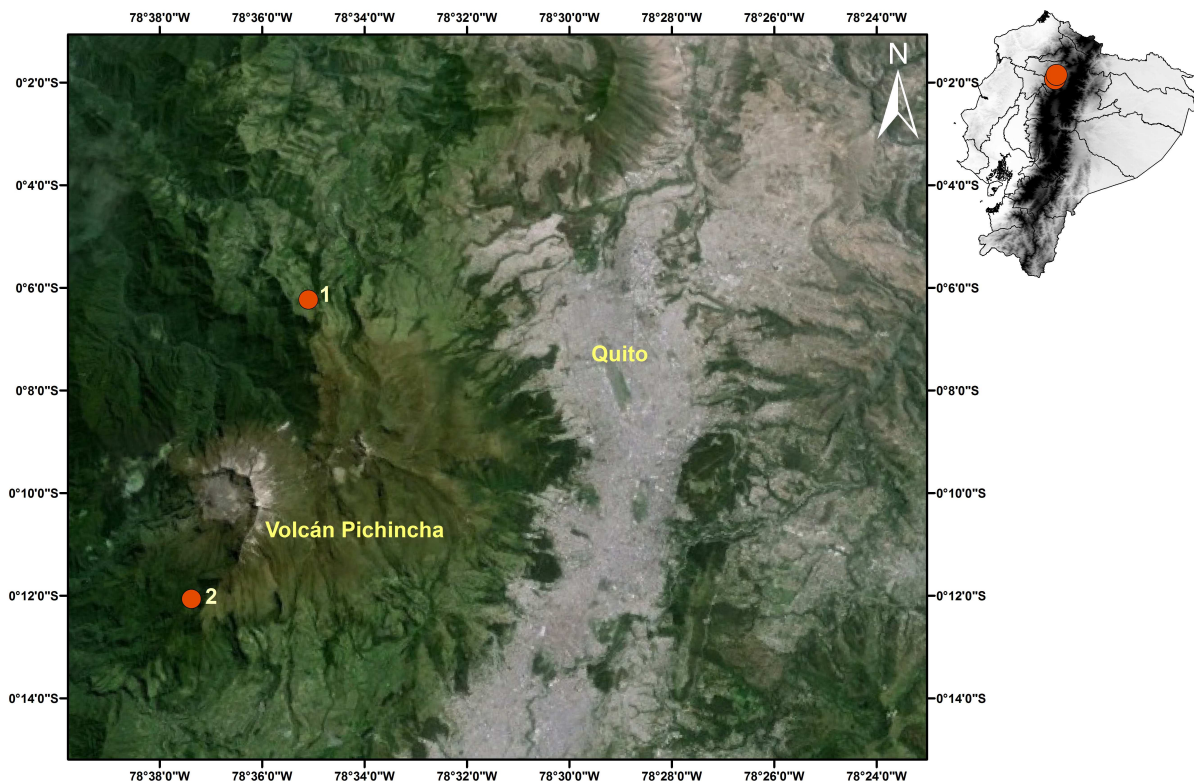


Figura 6: Mapa de localidades de *Pristimantis pichincha* sp. nov. Pichincha, 1) Reserva Biológica Yanacocha, localidad tipo; 2) Valle del Toaza.

desde crema blanquecina, crema grisáceo hasta crema con manchas café oscuras (Fig. 4). La mayoría de especímenes mostraron el tímpano oculto, sin embargo, en ciertos individuos fue visible la mitad inferior del mismo.

**Distribución e historia natural:** Esta especie se conoce de dos localidades de los bosques montanos en las estribaciones occidentales de los Andes de Ecuador en

Provincia de Pichincha, en un rango de elevación de 3200 a 3500 m en el ecosistema de Bosque siempreverde montano alto, caracterizado por estar densamente cubierto por de epífitas y bromelias. Los especímenes de la serie tipo fueron capturados en la noche sobre hojas y ramas de arbustos entre 0,5–1,5 metros en el interior del bosque. *Pristimantis pichincha* fue registrado en simpatria con *P. leoni* y *P. unistrigatus*.

**Comentarios:** Trabajos filogenéticos en preparación (Ron y Yáñez-Muñoz en prep.) evidencian que *Pristimantis pichincha* forma parte del complejo de especies *P. devillei*, pudiendo representar la especie hermana de *P. devillei* en las estribaciones occidentales de los Andes de Ecuador. Las relaciones filogenéticas de *Pristimantis devillei* han sido confusas. Lynch [12] en la redescrición de la especie sugirió que *P. devillei* estaba relacionado a *P. surdus*. Posteriormente se consideró equivoco no asociar *Pristimantis devillei* con *P. buckleyi* o *P. vertebralis* [13] y atribuyendo el error de Lynch [12] a la falta de especímenes de estas dos especies. La supuesta relación de *Pristimantis chloronotus* y *P. devillei* también resultó una asociación prematura. Hedges et al. [11] advirtió sobre la estrecha relación de esta especie con los grupo putativos *P. curtipes* y *P. surdus*. Aparentemente *Pristimantis devillei* es un linaje evolutivo endémico circunscrito a la cuenca alta del Napo, que podría tener por lo menos una especie más en el área de los bosques altimontanos de Oyacachi.

### Agradecimientos

Las expediciones de campo estuvieron enmarcadas dentro del proyecto “Monitoreo Biológico: una herramienta para el manejo adaptativo de las áreas naturales protegidas y bosques protectores del DMQ” y “Caracterización ecosistémica de los bosques y vegetación protectora del DMQ”, financiado por el Fondo Ambiental del Ilustre Municipio del Distrito Metropolitano de Quito. El trabajo de MYM y SRR en la colección de anfibios del QCAZ contó con el apoyo y financiamiento del proyecto: “Inventario y caracterización genética y morfológica de los Anfibios, reptiles y Aves de los Andes de Ecuador” financiado por la Pontificia Universidad Católica del Ecuador (PUCE) y la Secretaría Nacional de Educación Superior Ciencia y Tecnología del Ecuador (SENESCYT PIC-08-470). La investigación de MYM y CRP está enmarcada dentro del programa de investigación Red Terrara Ecuador del MECN-INB. Dejamos constancia de nuestro agradecimiento a los colectores de la serie tipo: Mauricio Herrera-Madrid, Cecilia Tobar, Mónica Arellano, Stalin Cáceres y María B. Pérez. A Paúl Guerrero, Nathaly Uvillus, Luis A. Oyagata y Cristófer Rojas por la colaboración en la toma de datos del material tipo. El Ministerio del Ambiente otorgó la autorización de investigación 001-2007-ICFLO-FAU-DRFP-MA.

### Referencias

- [1] Yáñez-Muñoz, M. H.; Meza-Ramos, P.; Ramírez, S. M.; Reyes-Puig, J. P.; and Oyagata, C. L. 2009. “Anfibios y Reptiles del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ)”: 9-41 en: Guía de Pequeños Vertebrados del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ). Publicación Miscelanea No. 5. Serie de Publicaciones del Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales (MECN) - Fondo Ambiental del MDMQ. 1-89. Imprenta Nuevo Arte. Quito - Ecuador.
- [2] Yáñez-Muñoz, M. H.; Meza-Ramos, P.; Cisneros-Heredia, D. F.; Reyes-Puig, J. P. 2010. “Descripción de tres nuevas especies de ranas del género *Pristimantis* (Anura: Terrarana: Craugastoridae) de los bosque nublados del Distrito Metropolitano de Quito, Ecuador”. *Avances en Ciencias e Ingeniería*. 2 (3): B16-B27.
- [3] Valencia, J.; Bejarano-Muñoz, E. P.; Yáñez-Muñoz, M. H. 2013. “Una nueva especie de rana *Pristimantis* verde (Anura: Craugastoridae) de los bosques andinos del Distrito Metropolitano de Quito, Ecuador”. *Herpetotropicos*, 9: 25-35.
- [4] Yáñez-Muñoz, M. H.; Bejarano-Muñoz, P. 2013. “Lista actualizada de ranas terrestres *Pristimantis* (Anura: Craugastoridae) en las Estribaciones Occidentales del Distrito Metropolitano de Quito, Andes de Ecuador”. *Boletín Técnico Serie Zoología*. 11(8-9): 125-150.
- [5] Rojas-Runjaic, F.; Delgado, A.; Guayasamín, J. M. 2014. “A new rainfrog of the *Pristimantis myersi* Group (Amphibia, Craugastoridae) from Volcán Pichincha, Ecuador”. *Zootaxa*, 3780: 36-50.
- [6] Arteaga-Navarro, A.F.; Yáñez-Muñoz, M. H.; Guayasamín, J. M. 2013. “Una nueva rana del grupo de *Pristimantis lacrimosus* (Anura: Craugastoridae) de los bosques montanos del noroeste de Ecuador”. Addendum, en Arteaga-Navarro, A.F.; Bustamante, L. M.; Guayasamín, J. M. 2013. The Amphibians and Reptils of Mindo, The life in th cloud forest. Universidad Tecnológica Indoamérica, Quito, Ecuador.
- [7] Guayasamín, J.; Krynak, T.; Krynak, K.; Culebras J.; Hutter C. R., 2015. “Phenotypic plasticity raises questions for taxonomically important traits: a remarkable new Andean rainfrog (*Pristimantis*) with the ability to change skin texture”. *Zoological Journal of the Linnean Society*, 173(4): 913-928.
- [8] Lynch, J. D.; W. E. Duellman. 1997. “Frogs of the genus *Eleutherodactylus* (Leptodactylidae) in western Ecuador: Systematics, Ecology, and Biogeography. *University of Kansas, Museum of Natural History, Special Publication*, 23: 1-236.
- [9] Duellman, W. E.; Lehr, E. 2009. “Terrestrial Breeding Frogs (Strabomantidae) in Perú”. NTV Science. Germany: 382.
- [10] Padial, J.; Grant, T.; Frost, D. 2014. “Molecular systematics of terraranas (Anura: Brachycephaloidea) with an assessment of the effects of alignment and optimality criteria”. *Zootaxa*, 3825: 1-132.
- [11] Hedges, S.; Duellman, W.; Heinicke, W. E. 2008. “New World direct-developing frogs (Anura: Terrarana): Molecular phylogeny, classification, biogeography, and conservation”. *Zootaxa*, 1737: 1-182.
- [12] Lynch, J. D. 1969. “Identity of two Andean *Eleutherodactylus* with the description of a new species (Amphibia: Leptodactylidae)”. *Journal of Herpetology*, 3: 135-143.

- [13] Lynch, J. D.; Duellman, W. E. 1980. "The *Eleutherodactylus* of the Amazonian slopes of the Ecuadorian Andes (Anura: Leptodactylidae)". *The University of Kansas, Museum of Natural History, Miscellaneous Publications*, 69: 1-86.

## APÉNDICE I

**Especímenes examinados:** *Pristimantis devillei* ECUADOR: **Napo:** Papallacta, KU 143413, KU 165403; Guango Lodge, DHMECN 124985-86, 12488, 12495-97 *Pristimantis vertebralis* ECUADOR: **Pichincha,** Palmira, 2734, DHMECN 2024. **Imbabura:** Reserva Alto Chocó, 2500-2900m, DHMECN 2024, 2025. Pichincha, Reserva Biológica Verdecocha, 2400-3200m, DHMECN 4240, 4241, 7347. **Pichincha,** Bosque Protector Tandacato, 2048-3083, DHMECN 4880-4888. Pichincha, Cordillera de Atacazo Saloya, 2751-3414m, DHMECN 6823. Pichincha, Río Cambugán, 1800m, DHMECN 7211. **Pichincha,** Reserva Maquipucuna, 2600-2800m, DHMECN 7235. Pichincha, Estación Chiquilpe OCP, 3316m, DHMECN 8569, 8572. **Pichincha,** Valle del Toaza, 3420m, DHMECN 8755. *Pristimantis quinquesimus:* **Imbabura:** Reserva Alto Chocó, DHMECN 1428-38; Cuellaje límite de la Reserva Cotacachi - Cayapas, QCAZ 43312-13; QCAZ43317, QCAZ43541; Intag, Reserva Siempre Verde, QCAZ35320, QCAZ35325; Santa Rosa, NW de Cotacachi, 2 km antes de llegar a la estación a la reserva, QCAZ40765; **Pichincha:** Chiriboga, KU 167854 (Paratipo); La Victoria, QCAZ24849, DHMECN4910-11; Reserva Bellavista, DHMECN 7064-65. *Pristimantis romanorum:* **Bolívar:** Recinto Tres Marías, Reserva Peñas Blancas, QCAZ42705; **Cotopaxi:** Pilaló, QCAZ16228; **Pichincha:** Cooperativa El Porvenir, finca El Cedral, QCAZ48562, QCAZ48598; km 36 vía Calacalí- La Independencia, Reserva Orquideológica "El Pahuma", DHMECN 4252 (Holotipo), DHMECN 4193-95, DHMECN 6799-802, QCAZ42939, QCAZ42943, QCAZ42971, QCAZ42972, QCAZ42973, QCAZ42974; Bosque Protector Verdecocha, DHMECN 4251, DHMECN4253; El Porvenir Reserva Maquipucuna, DHMECN 8800. *Pristimantis sobetes:* **Bolívar:** Bosque Protector Cashca Totoras, QCAZ21077; **Cotopaxi:** Salinas, Recinto Tres Marías, Reserva Peñas Blancas, QCAZ42704; A 18,2 km de Quillotuña, vía Pucayacu, QCAZ40391, QCAZ40398, QCAZ40402; Naranjito, Bosque Integral Otonga (BIO), QCAZ10676, QCAZ11736, QCAZ11737, QCAZ11740, QCAZ12310, QCAZ23302, QCAZ30985, QCAZ30986, QCAZ35357, QCAZ37699, QCAZ24660; Naranjito, Finca de Don Tomás Granja, QCAZ32329, QCAZ32337, QCAZ32339; Peñas Coloradas, QCAZ37997; Pilaló, QCAZ16225, QCAZ16227; San Francisco de las Pampas, sector Río Esmeraldas, QCAZ571; San Francisco de las Pampas, QCAZ33118; **Sto. Domingo:** Manuel Cornejo Astorga (Tandapi), Sarapullo, QCAZ35402; **Pichincha:** Reserva Las Gralarias, QCAZ39572, QCAZ44884, QCAZ44885, QCAZ44886, QCAZ44887, QCAZ44888, QCAZ44890, QCAZ49650, QCAZ49651, QCAZ49656, QCAZ49658, QCAZ50720, QCAZ50721; El Golán, DHMECN 8805-06; Estación Experimental "La Favorita",

DHMECN2025-26, DHMECN3896; La Unión-Río Cinto, DHMECN5885-87, DHMECN5895-98, DHMECN 5949; Lloa Mindo- San Carlos, DHMECN5925-28, DHMECN5931-33, DHMECN5936-37; Reserva Biológica Tamboquinde-Tandayapa, DHMECN4271-76; Zaragoza-Río Cinto, DHMECN 7441-65. *Pristimantis supernatis.* **Carchi:** Ipueran, DHMECN1682; Hacienda La Breña, DHMECN3557; **Sucumbíos:** Santa Bárbara, QCAZ50029, QCAZ50028, QCAZ46569; Alto la Bonita, DHMECN 6488. *Pristimantis surdus:* **Imbabura:** 15 km N Cuicocha, vía Apuela, QCAZ10849; Km vía Apuela-Otavallo, QCAZ12686, 24; Cuicocha, QCAZ12686, 24; Intag, QCAZ39676, QCAZ39683, QCAZ39686, QCAZ39766; **Pichincha:** Aloguincho, QCAZ8728; Chiriboga, 34 km SO Quito, QCAZ34565; Lloa, QCAZ7974, QCAZ7975, QCAZ7977, QCAZ7978; Río Otongoro, vía Quito-Chiriboga, QCAZ49505, QCAZ49531, QCAZ566, QCAZ567, QCAZ568, QCAZ585-86, QCAZ774; Bosque La Victoria, DHMECN 4902-06; Cordillera del Saloya, DHMECN 6824; Los Alpes, KU 117607.

## Dos nuevas especies de ranas *Pristimantis* (Craugastoridae) de la cordillera de los Sacha Llanganatis, vertiente oriental de los Andes de Ecuador

Juan Pablo Reyes-Puig<sup>1,2</sup>, Carolina Reyes-Puig<sup>1,2,3</sup>, María B. Pérez L.<sup>2</sup>, Mario H. Yáñez-Muñoz<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Fundación Ecominga-Red de Protección de Bosques Amenazados / Fundación Oscar Efrén Reyes, calle 12 de

Noviembre N° 270 y Luis A. Martínez, Baños, Ecuador.

<sup>2</sup>Instituto Nacional de Biodiversidad, División de Herpetología,

calle Rumipamba 341 y Av. de los Shyris, Casilla 17-07-8976, Quito, Ecuador.

<sup>3</sup>Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Museo de Zoología (QCAZ), Escuela de Ciencias Biológicas, Apartado 17-01 2154, Quito, Ecuador.

\*Autor principal/Corresponding author, e-mail: mayamu@hotmail.com

Editado por/Edited by: Diego F. Cisneros-Heredia, Ph.D.(c)

Recibido/Received: 2015/10/16. Aceptado/Accepted: 2015/12/02.

Publicado en línea/Published on Web: 2015/12/30. Impreso/Printed: 2015/12/30.

Zoobank: <http://zoobank.org/52E32075-9B2F-4CD8-879F-CCDD68E295FA>

LSID urn:lsid:zoobank.org:pub:52E32075-9B2F-4CD8-879F-CCDD68E295FA

### Two new species of frogs *Pristimantis* (Craugastoridae) in the mountains of the Sacha Llanganatis, eastern slope of the Andes of Ecuador

#### Abstract

We describe two new species of terrestrial frogs of the genus *Pristimantis* from the cloud forest of the Reserva Río Zuñag, located on the slopes of the Cordillera de los Sacha Llanganatis, buffer zone of the Llanganates National Park, on the eastern slopes of the central Andes of Ecuador. The first species differs from its congeners by presenting a distinctive brown colouration and hidden surfaces of posterior limb and groin black. The second is the only species of *Pristimantis* in the region characterized by the presence of a dermal occipital “W” crest, a distinctive pale-shaped inverted “V” mark, and hidden surfaces of groin and posterior limb reddish.

**Keywords.** Brachycephaloidea, Craugastoridae, *Pristimantis pinchaque* sp. nov., *Pristimantis sacharuna* sp. nov., terrarana, Llanganates National Park, cloud forest, Ecuador.

#### Resumen

Describimos dos especies nuevas de ranas terrestres del género *Pristimantis* provenientes del bosque nublado de la Reserva Río Zuñag, ubicada en las estribaciones de la cordillera de los Sacha Llanganatis, área de amortiguamiento del Parque Nacional Llanganates, en la vertiente oriental de los Andes centrales de Ecuador. La primera especie se diferencia de sus congéneres por presentar un distintivo patrón de coloración en tonos café y superficies ocultas de extremidades posteriores e ingles negras. La segunda es la única especie de *Pristimantis* en la región caracterizada por la presencia de una cresta dérmica occipital en forma de “W”, una distintiva marca pálida en forma de “V” invertida y superficies ocultas de ingles y extremidades posteriores de color rojizo.

**Palabras Clave.** Brachycephaloidea, Craugastoridae, *Pristimantis pinchaque* sp. nov., *Pristimantis sacharuna* sp. nov., terrarana, Parque Nacional Llanganates, bosque nublado, Ecuador.

#### Introducción

El género *Pristimantis* incluye actualmente 176 especies en Ecuador, de las cuales 95 son endémicas [1, 2]. La diversidad del género ha incrementado significativamente durante los últimos 12 años, con 40 especies nuevas descritas, en especial descubiertas en regiones aisla-

das y poco exploradas. Desde el año 2005 hasta la fecha, el equipo de investigadores del Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales del Instituto Nacional de Biodiversidad (MECN-INB), la Fundación Oscar Efrén Reyes y la Fundación Ecominga ha levantado información sistemática sobre la diversidad herpetofaunística de la cuen-



ca alta del río Pastaza. Nuestros resultados han identificado una sorprendente diversidad de ranas *Pristimantis* endémicas de la cuenca alta del Pastaza y el Corredor Ecológico Llanganates Sangay, de las cuales seis han sido descritas como nuevas [3–7]. Dentro de esta importante área para la conservación, el sistema montañoso conocido como Sacha Llanganatis (Parque Nacional Llanganates PNL), constituye una de las regiones más inaccesibles y mejor conservadas de los Andes orientales y Amazonía alta en la región central del Ecuador [8]. La Fundación Ecominga estableció una reserva en los bosques nublados de los Sacha Llanganatis, en el sector Río Zuñag, zona de amortiguamiento del PNL, donde se han recolectado varios especímenes de interés taxonómico [6,8], entre ellos dos nuevas especies de ranas *Pristimantis* que son descritas en el presente artículo.

### Materiales y Métodos

La descripción de las especies sigue el formato estandarizado propuesto por Lynch y Duellman [9]. La clasificación sistemática de la familia sigue la propuesta de Padial *et al.* [10] y los grupos putativos de especies de Hedges *et al.* [11] y Padial *et al.* [10]. Los especímenes colectados fueron sacrificados en una solución de benzocaína, fijados en formalina al 10 % y preservados en etanol al 70 %. La determinación del sexo y edad de los especímenes fue realizada por identificación de características sexuales secundarias (almohadillas nupciales y tamaño) y por inspección directa de gónadas a través de incisiones dorsales. Las medidas morfométricas fueron tomadas con un calibrador electrónico (precisión  $\pm 0.01$  mm, redondeadas al 0.1 mm más cercano) según la propuesta de Duellman y Lehr [12]. Los patrones de coloración en vida fueron extraídos de las notas de campo y fotografías a color. Las localidades, sus coordenadas y elevaciones fueron determinadas en base a las notas de campo de los colectores y tomadas con un GPS. En todo el texto se hacen uso de las siguientes abreviaciones para los créditos fotográficos e información asociada: JPR = Juan P. Reyes-Puig, CRP = Carolina del Pilar Reyes-Puig, y MYM = Mario H. Yáñez-Muñoz. Los especímenes examinados se presentan en el Apéndice I y están depositados en la División de Herpetología del Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales, Quito (DHMECN) y en el Museo de Zoología de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito (QCAZ).

### Resultados

#### *Pristimantis pinchaque* sp. nov.

*Pristimantis* sp. C Reyes-Puig *et al.* [6]

*Pristimantis* sp. Yáñez-Muñoz *et al.* [8]

Fig. 1-4, 10

**Holotipo:** DHMECN 5222, hembra adulta, colectada en la Reserva Ecológica Río Zuñag, área de amortiguamiento del Parque Nacional Llanganates (01°22'31,3"

S, 078°09'43,5" W, 1600 m), parroquia Río Negro, cantón Baños de Agua Santa, provincia de Tungurahua, República del Ecuador, por MYM, Miguel Urgilés y Andrés Laguna, el 7 de mayo del 2008.

**Paratopotipo:** DHMECN 5221, macho juvenil, colectado con el holotipo.

**Etimología:** El epíteto específico "*pinchaque*" es un patronímico en alusión al tapir o danta de montaña (*Tapirus pinchaque*), especie de mamífero considerado como un animal difícil de observar en su hábitat natural debido al alto riesgo de extinción que enfrenta en los ecosistemas de los Andes [13, 14]. Al igual que el tapir andino, *Pristimantis pinchaque* es una especie rara y escasa. El nombre es también un reconocimiento al Proyecto de Conservación del Tapir de Montaña en las vertientes orientales de los Andes centrales de Ecuador (PCTA), que desde el año 2007 ejecuta proyectos de monitoreo y conservación en el Corredor Ecológico Llanganates-Sangay.

**Nombre común sugerido:** Cutín tapir

**Nombre común en inglés sugerido:** Tapir Robber Frog

**Diagnóstico:** *Pristimantis pinchaque* se diferencia de otros congéneres por la siguiente combinación de caracteres: (1) piel del dorso lisa, flancos densamente cubiertos por verrugas; vientre areolado; fino pliegue dorsolateral que se extiende desde la región occipital hasta los  $\frac{3}{4}$  posteriores del dorso; pliegue discoidal presente pero débilmente definido; (2) membrana y anillo timpánico presente, equivalente al 33,3 % del diámetro del ojo; tubérculos postrictales subcónicos, pliegue supratimpánico presente con varios tubérculos redondeados pequeños; (3) hocico largo, subacuminado en vista dorsal, redondeado de perfil; (4) párpado superior con un tubérculo cónico grande, rodeado de varios tubérculos subcónicos más pequeños, con un tubérculo en la región lacrimonasal cónico (Fig. 3), párpado más angosto que el espacio interorbital, tubérculo interorbital subcónico pequeño; sin crestas craneales; (5) procesos dentígeros del vómer presentes; (6) estado de las hendiduras del saco vocal desconocido; (7) dedo I de la mano más pequeño que el dedo II; discos digitales dilatados, expandidos en los dedos II–IV, dos veces el ancho del dígito; (8) dedos de la mano con finos rebordes cutáneos laterales; (9) brazos con pequeños tubérculos ulnares redondeados; (10) talón con un tubérculo redondeado a subcónico; borde externo del tarso con pequeños tubérculos redondeados a subcónicos; pliegue metatarsal interno presente; (11) dos tubérculos metatarsales, el interno oval de 4 a 5 veces el tamaño del externo que es redondeado; (12) dedos del pie con rebordes cutáneos laterales, más desarrollados en la base de los dedos I–V; tubérculos supernumerarios plantares presentes; dedo V más largo que el III y no se extiende más allá del tubérculo subarticular distal del dedo IV; (13) coloración dorsal café claro (café claro en vida), flancos y extremidades homogéneamente café oscuro; extremidades levemente bandeadas con café



claro; hocico café claro, bandas interorbital, supratimpánica y suboculares diagonales café oscuro; garganta y vientre café claro (café brillante en vida), salpicado de crema; ingle y superficies ocultas de las extremidades posteriores café grisáceo (negro en vida); iris homogéneamente café cobrizo; (14) longitud rostro-cloacal en la única hembra conocida es de 32,6 mm y en el paratipo macho juvenil 17,4 mm.

**Comparación con especies similares:** *Pristimantis pinchaque* se diferencia de otras especies de *Pristimantis* por su distintivo patrón de coloración dorsal de tonos café claro y oscuro, superficies ocultas de extremidades posteriores e ingle negras, un tubérculo cónico en el párpado, un tubérculo subcónico interorbital y un tubérculo en la región lacrimal cónico y dedos del pie con rebordes cutáneos laterales, más desarrollados en la base de los dedos III-V. Dos especies de *Pristimantis* en la región del Pastaza exhiben un distintivo patrón de coloración negro en las ingles y superficies ocultas de las extremidades posteriores (*Pristimantis loujosti* [15] y *P. pycnodermis* [16]), sin embargo, en su morfología y coloración externa ambas especies son particularmente diferentes de *P. pinchaque*. La primera presenta una distintiva coloración crema anaranjado, con una piel glandular gruesa, presencia de un pliegue prominente en la superficie superior de la base de la mano, iris cobre claro fuertemente reticulado de negro y es conocida únicamente de su localidad tipo en el límite norte del Parque Nacional Sangay. La segunda exhibe una distintiva coloración verde con largas manchas negras en los flancos, superficies ocultas de la pierna, muslo y tarso, y habita los Andes surorientales de Ecuador. Además, ambas alcanzan una longitud rostro-cloacal máxima de 51,7 mm y 44,4 mm respectivamente (32,20 mm en *P. pinchaque*).

En su morfología y coloración externa, *Pristimantis pinchaque* es similar a tres especies de *Pristimantis* de los bosques montano bajos de la cuenca alta del Pastaza (*P. cremnobates* [17], *P. rubicundus* [18] y *P. nigrogriseus* [19]). Estas especies se diferencian de *P. pinchaque* (caracteres entre paréntesis) por: *Pristimantis rubicundus* presenta la piel del dorso fuertemente tuberculada (lisa), el primer dedo de la mano ligeramente más largo que el segundo (I dedo de la mano más corto que el II), carece de tubérculo cónico sobre el párpado (presente) y presenta una coloración ventral marmoleada; *P. cremnobates* posee la piel del dorso finamente tuberculada (lisa), presencia de crestas dermales (fino pliegue dorsolateral), carece de tubérculos cónicos sobre el párpado (presente) y su coloración ventral es rosada, café rojizo hasta amarillento; *P. nigrogriseus* por otro lado muestra una piel del dorso finamente granular (lisa), ausencia de pliegue dorsolateral (presente), párpado superior sin tubérculos cónicos (presente), rebordes cutáneos laterales indefinidos (presentes, finos), ausencia de tubérculos en el borde externo del tarso (presentes, subcónicos en vida), iris rojo (café cobrizo), y su coloración dorsal café oscuro con conspicuas manchas amarillas en

las superficies de los muslos e ingles (café claro con ingles y superficies ocultas de los muslos negras).

Hay algunas especies de *Pristimantis* de la región del Pastaza que presentan tubérculos cónicos en el párpado, pero éstas difieren de *P. pinchaque* por su distintiva coloración dorsal con tonos de verde e inguinal llamativa [20]. Otra especie de *Pristimantis* de las estribaciones surorientales de los Andes de Ecuador con un patrón de coloración ventral en vida similar a *P. pinchaque* es *P. almendariz* [21], sin embargo, esta especie carece de anillo y membrana timpánica, y posee distintivos tubérculos cónicos en la región escapular y en el codo.

**Descripción del holotipo:** Hembra adulta, cabeza ligeramente más larga que ancha; hocico subacuminado de aspecto triangular en vista dorsal, y redondeado de perfil (Fig. 2); distancia ojo-narina 14,5 % de la longitud rostro-cloacal; canto rostral ligeramente cóncavo, narinas levemente elevadas, dirigidas lateralmente (Fig. 2); área interorbital plana, más ancha que el párpado superior, que equivale al 79 % la distancia interorbital; cresta craneal ausente; párpado superior con un tubérculo cónico grande, rodeado de varios tubérculos subcónicos más pequeños, con un tubérculo en la región lacrimal cónico (Fig. 3), párpado más angosto que el espacio interorbital, tubérculo interorbital subcónico pequeño y un subcónico nasal (Fig. 2); membrana timpánica diferenciada de la piel que la rodea, anillo timpánico evidente y ovalado, con margen posterior cubierto  $\frac{3}{4}$  partes por un pliegue posttimpánico que se extiende hasta la inserción de la mandíbula, tímpano visible dorsalmente, diámetro del tímpano 52,3 % del diámetro del ojo, tubérculos postrictales aplanados (subcónicos en vida), con tubérculos esparcidos aplanados en la superficie del labio superior, algunos de ellos sobresaliendo en tamaño y en forma de hileras; coanas pequeñas, redondas de contorno, no cubiertas por el piso palatal del maxilar; procesos dentígeros del vómer grandes, de contorno triangular, de 6 a 8 dientes ubicados posteromedialmente en relación a las coanas; lengua tan ancha como larga, de contorno irregularmente redondo, aproximadamente el 60 % adherida al piso de la boca.

La textura de la piel en la parte media del dorso es lisa, flancos densamente cubiertos por verrugas pequeñas, algunas de ellas sobresalen a manera de pústulas pigmentadas de blanco; vientre areolado; fino pliegue dorsolateral continuo, que se extiende desde la región occipital hasta los  $\frac{3}{4}$  posteriores del dorso; pliegue discoidal presente, débilmente definido; cloaca rodeada por pequeñas verrugas redondeadas; brazos esbeltos con pequeños tubérculos ulnares en la superficie dorsal y ventral del antebrazo, aplanados (subcónicos en vida), algunos de ellos pigmentados de blanco en la punta; dedos con finos rebordes cutáneos laterales, desarrollados en la base de los dedos II, III y IV (Fig. 3), tubérculo palmar de contorno acorazonado, tubérculo tenar ovalado con un surco anterior más evidente (Fig. 2); tubérculos subarticulares redondos prominentes, con pocos tubérculos supernumerarios; terminaciones digitales dilatadas, apro-



Figura 1: Vista dorsal, ventral y de perfil de L holotipo de *Pristimantis pinchaque* sp. nov. (DHMECN 5222, hembra). Fotografías: Carolina Reyes-Puig.

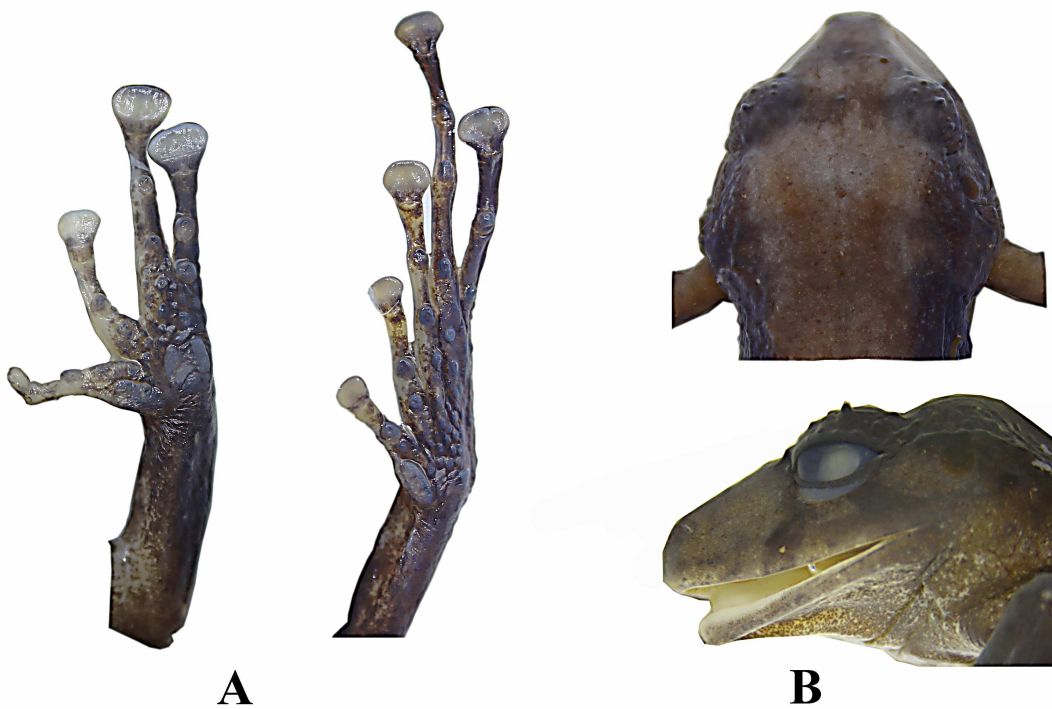


Figura 2: Detalles de *Pristimantis pinchaque* sp. nov. (DHMECN 5222, hembra, holotipo). (A) Extremidades; (B) cabeza en vista de dorsal y de perfil. Fotografías: Carolina Reyes-Puig.

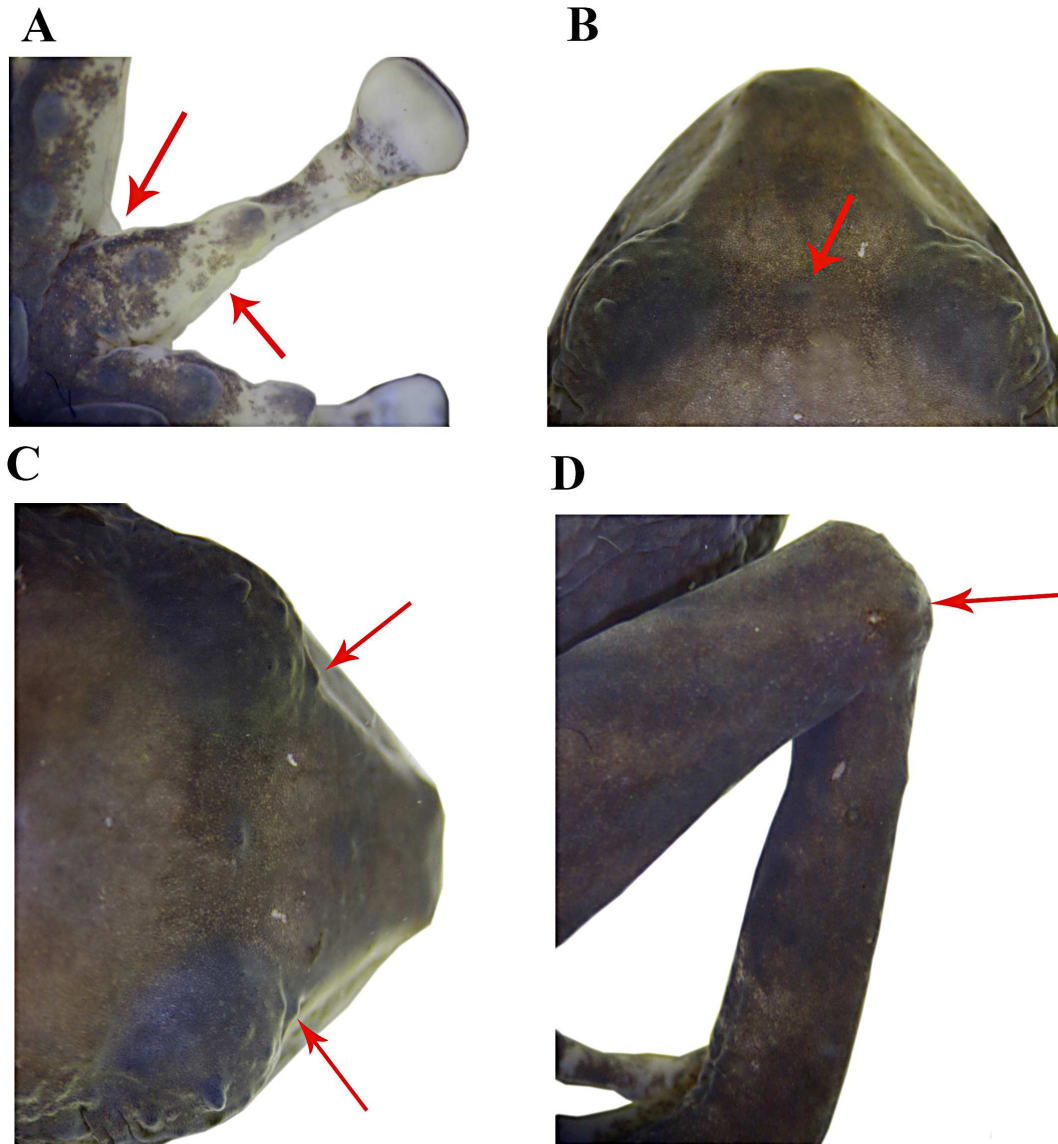


Figura 3: Detalles de *Pristimantis pinchaque* sp. nov. (DHMECN 5222, hembra, holotipo). Señalados por flechas: (A) rebordes cutáneos laterales de la mano; (B) tubérculo interorbital; (C) tubérculo en la región lacrimal; (D) tubérculo del talón. Fotografías: Carolina Reyes-Puig.

ximadamente el doble o más de los dedos II, III y IV, con almohadillas definidas por surcos circunmarginales (Fig. 2).

Extremidades posteriores esbeltas, longitud de la tibia 53,9% de la longitud rostro-cloacal, talón con un tubérculo redondeado (subcónico en vida) (Fig. 3), borde externo del tarso con pequeños tubérculos redondeados (subcónicos en vida); pliegue tarsal interno presente, se extiende hasta el primer tercio del tarso; dedos del pie con rebordes cutáneos laterales presentes, más desarrollados en la base de los dedos I–V; tubérculos subarticulares grandes, prominentes; tubérculo metatarsal interno ovalado y alargado de cinco a seis veces el tamaño del externo que es subcónico, redondeado; tubérculos supernumerarios plantares presentes (Fig. 2); discos dilatados en todos los dedos, ligeramente más anchos que los dígitos, más pequeños que los de la mano, con hendiduras circunmarginales; dedo V más grande que el III,

alcanza sólo la base del tubérculo subarticular distal el dedo IV (Fig. 2).

**Coloración en preservado del holotipo:** Coloración dorsal café claro en el medio, café oscuro hacia los flancos, salpicado de pequeños puntos blancos; extremidades levemente bandeadas con café claro; hocico café claro; bandas interorbital, supratimpánica y suboculares diagonales café oscuro; ingle y superficies ocultas de extremidades posteriores gris negruzco; garganta y vientre café claro salpicado de crema, garganta café claro; superficies ventrales de los antebrazos café oscuro, con pequeñas manchas pálidas poco definidas; las superficies dorsales de los dedos de la mano I–II y del pie I–III, pigmentados en las falanges distal y media en triada blanco-café- blanco, superficies dorsales de los mismo dedos pigmentadas de blanco (Fig. 1-2).

**Coloración en vida:** Dorsalmente café claro, tornán-





Figura 4: Variación dorsal y ventral en la serie tipo de *Pristimantis pinchaque* sp. nov. Izquierda: DHMECN 5222, hembra, holotipo; derecha: DHMECN 5221, macho, paratipo. Fotografías: Carolina Reyes-Puig.

dose café oscuro hacia los flancos, salpicado de pequeños puntos blancos; extremidades en fondo café oscuro con bandas café; bandas interorbital, supratimpánica y suboculares diagonales café oscuro; garganta y vientre café brillante, salpicado de crema, ingle y superficies ocultas de extremidades posteriores de color negro; superficies ventrales de las extremidades anteriores y posteriores presentan un color café oscuro con manchas café en matiz anaranjado; las superficies dorsales de los dedos y discos de la mano I-II y del pie I-III, pigmentados con café en matices anaranjado; hocico café claro, banda interocular café oscura poco definida y manchas suboculares café oscuro débilmente definidas; iris homogéneamente café en tonalidad cobriza (Fig. 10).

**Medidas del holotipo (en mm):** Longitud rostro-cloacal = 32,5; distancia órbita-narina = 4,7; longitud cefálica = 13,7; ancho cefálico = 13,5; distancia interorbital = 3,8; distancia internarinal = 3,6; longitud de la tibia = 17,5; longitud del pie = 16,9; longitud de la mano = 10,9; diámetro horizontal del tímpano = 2,2; longitud horizontal del ojo = 4,6; ancho del párpado = 3,0.

**Variación:** Variación de las medidas morfométricas de la serie tipo son presentadas en la Tabla 1. Externamen-

te tanto el paratopotipo y el holotipo soy muy similares, únicamente la coloración dorsal del paratipo (DHMECN 5221) exhibe dos bandas paravertebrales café claro, separadas medialmente por una banda café oscura, pliegues dorsolaterales de color negro, las superficies posteriores de los flancos densamente punteado de blanco, así como los tubérculos postrictales y aquellos ubicados en la superficie del labio superior (Fig. 4). Algunos tubérculos, como los ulnares y del talón, pueden disminuir en tamaño o notoriedad por efectos de la preservación.

**Distribución e historia natural:** *Pristimantis pinchaque* es conocido únicamente de su localidad tipo en la Cordillera de los Sacha Llanganates, en la Reserva Ecológica Río Zuñag de la Fundación Ecominga, parroquia Río Negro, Cantón Baños, Provincia de Tungurahua; en el área de amortiguamiento del Parque Nacional Llanganates a 1600 metros de altitud (Fig. 5). Parece ser una especie rara pues durante varios años de muestreos en la zona no se han registrado más especímenes de los conocidos en la serie tipo [6, 8]. El holotipo (DHMECN 5222), presentó oviductos dilatados en el mes de mayo. *Pristimantis pinchaque* ha sido registrado en sim-

patría con *P. acuminatus*, *P. altamazonicus*, *P. altamnis*, *P. ardyae*, *P. bellae*, *P. bicantus*, *P. eriphus*, *P. galdi*, *P. ganonotus*, *P. incomptus*, *P. prolatus*, *P. quaquaversus*, *P. rubicundus*, y *P. ventrimarmoratus* [6, 8].

**Comentarios taxonómicos:** La morfología externa de *Pristimantis pinchaque* sugiere mayor similitud con algunos miembros del subgénero *Hypodyction*, grupo de especies de *P. rubicundus* [11]. No obstante, al no disponer de evidencias filogenéticas contundentes y manteniendo un criterio conservador [10], no asignamos a esta especie a ningún grupo de especies de *Pristimantis*. Consideramos oportuna la descripción de esta especie, aun cuando disponemos de un reducido número de especímenes, por sus características diagnósticas únicas: dorso con una distintiva coloración café claro y oscuro, superficies ocultas de extremidades posteriores e ingle negras. Confiamos que muestreos más intensivos en la localidad tipo permitirán obtener más ejemplares que aumenten nuestro conocimiento sobre su variación y relaciones filogenéticas.

***Pristimantis sacharuna* sp. nov.**

*Pristimantis* sp. B Reyes-Puig et al. [6]

**Holotipo:** QCAZ 52496, hembra grávida, colectada en la Reserva Ecológica Río Zuñag (01°22'31,3" S 078°09'43,5" O, 2200 m), parroquia Río Negro, cantón Baños de Agua Santa, provincia de Tungurahua, República del Ecuador, por Fernando Ayala, Diego Paucar, JRP, Yerka Segredo, Fausto Recalde, Santiago Recalde y Luis Recalde, el 18 de enero del 2012.

**Paratopotipo:** DHMECN 5218, hembra adulta, colectada en la localidad tipo el 13 de mayo del 2008 por MYM, Miguel A. Urigilés y Andrés C. Laguna.

**Etimología:** El epíteto específico *sacharuna* hace referencia a un ser mitológico de la cosmovisión Kichwa Amazónica. La traducción literal del nombre sacharuna es "hombre de la selva", existiendo leyendas e historias en toda la región oriental, incluyendo las inmediaciones de la localidad tipo de la especie, Reserva Río Zuñag.

**Nombre común sugerido:** Cutín Sacharuna

**Nombre común en inglés sugerido:** Sacharuna Robber Frog

**Diagnosis:** *Pristimantis sacharuna* se caracteriza por la siguiente combinación de caracteres: (1) piel del dorso finamente granular, más granular en los flancos, sin pliegues dorsolaterales, con una cresta dérmica en forma de "W" en la región occipital, con un fino pliegue escapular en forma de "V" invertida, vientre areolado, pliegue discoidal indistinto; (2) membrana y anillo timpánico presente, de forma oval, equivalente al 48 % del diámetro del ojo, tubérculos postrictales presentes subcónicos; (3) hocico subacuminado en vista dorsal y ligeramente redondeado de perfil (Fig. 7); (4) párpado superior con un tubérculo subcónico, más angosto que el espacio interorbital; crestas craneales ausentes; (5) procesos

Medida	<i>Pristimantis pinchaque</i>		<i>Pristimantis sacharuna</i>
	Macho n=1	Hembra n=1	Hembras n=2
LRC	17,4	32,5	18,5 - 19,5 (19,0 ± 0,7)
DON	2,4	4,7	6,3 - 8,9 (2,4 ± 0,1)
LC	7,8	14,0	7,8 - 8,7 (8,3 ± 1,0)
AC	7,4	13,5	6,3 - 6,8 (6,6 ± 0,3)
DIO	2,3	3,8	2,1 - 2,1 (2,1 ± 0,1)
DIN	2,1	3,6	1,9 - 2,0 (1,9 ± 0,1)
LT	9,8	17,5	10,6 - 10,9 (10,7 ± 0,2)
LP	8,1	16,9	9,7 - 10,2 (10,00 ± 0,3)
LM	5,7	10,9	6,3 - 6,5 (6,4 ± 0,2)
DT	1,1	2,2	1,2 - 1,2 (1,2 ± 0,1)
DO	2,7	4,2	2,3 - 2,9 (2,6 ± 0,4)
AP	2,0	3,0	1,6 - 1,9 (1,8 ± 0,2)

**Tabla 1:** Medidas morfométricas de la serie tipo de dos especies nuevas de *Pristimantis* de la cordillera de los Sacha Llanganates. Rango de medidas se expresa como media ± desviación estándar. Las siguientes abreviaciones son usadas: Longitud rostro-cloacal = LRC; distancia órbita-narina = DON; longitud cefálica = LC; ancho cefálico = AC; distancia interorbital = DIO; distancia internarinal = DIN; longitud de la tibia = LT; longitud del pie = LP; longitud de la mano = LM; diámetro horizontal del tímpano = DT; longitud horizontal del ojo = DO; ancho del párpado = AP.

dentígeros del vómer presentes; (6) hendiduras bucales y almohadillas nupciales desconocidas; (7) dedo I más pequeño que el dedo II, discos ligeramente más anchos que los dígitos, expandidos en los dedos III y IV, redondeado en el dedo II y levemente expandido en el dedo I, tubérculos supernumerarios ausentes; (8) dígitos de la mano con finos rebordes cutáneos laterales; (9) tubérculos ulnares presentes, subcónicos; (10) un tubérculo subcónico en el talón, borde externo del tarso con dos a tres tubérculos subcónicos (reducidos por efectos preservación); (11) dos tubérculos metatarsales, el interno es oval, 2,5 veces en tamaño que el externo que es subcónico; (12) dedos del pie con finos rebordes cutáneos laterales, sin membranas interdigitales, tubérculos supernumerarios plantares ausentes, dedo V más largo que el dedo III y no alcanza la base del tubérculo subarticular distal del dedo IV; discos de los dedos del pie más estrechos que los de la mano; (13) dorso homogéneamente café oscuro, con una cresta dérmica occipital en forma de "W" café oscuro (café rojizo en vida), con una marca pálida (crema a café cremoso en vida) en forma de "V" invertida en la región escapular; extremidades bandeadas de café oscuro, separadas por interespacios



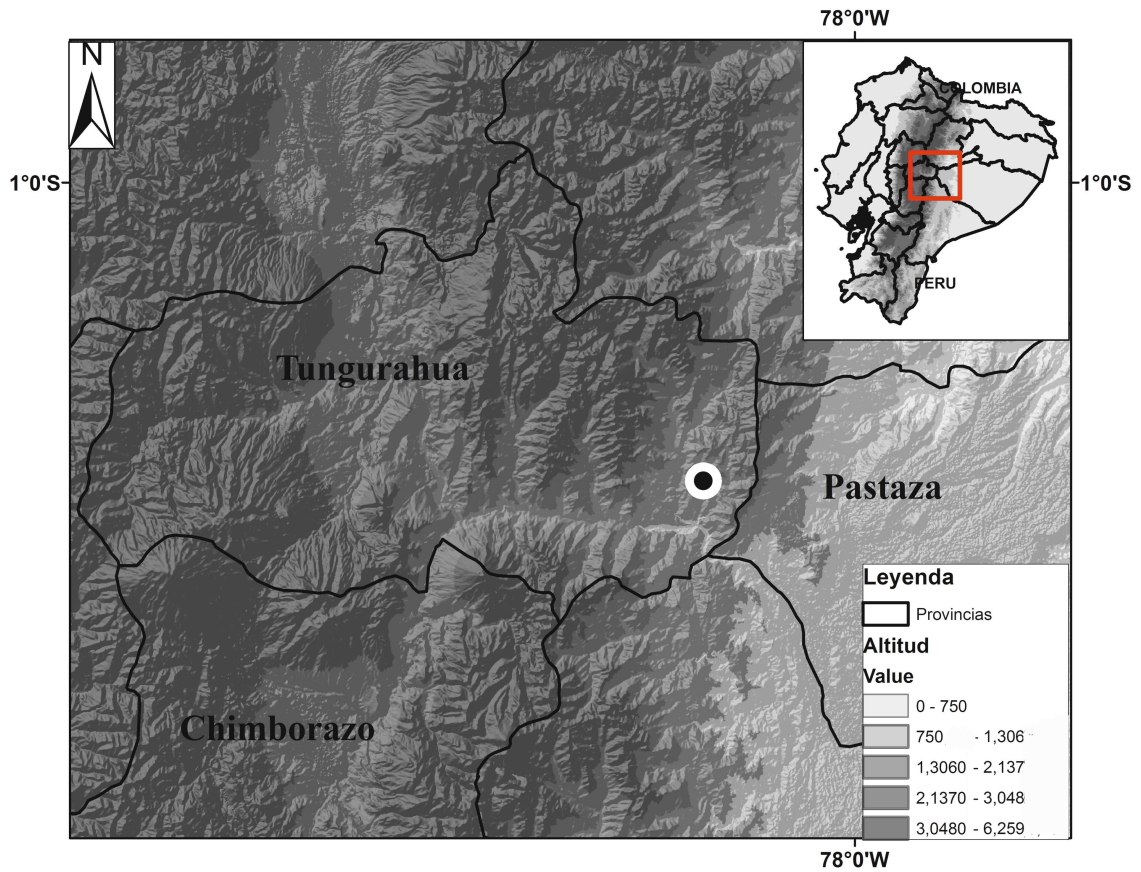


Figura 5: Mapa de la cuenca alta del Río Pastaza mostrando la ubicación de la Reserva Ecológica Río Zuñag, localidad tipo de *Pristimantis pinchaque* sp. nov. y *Pristimantis sacharuna* sp. nov.



Figura 6: Vista dorsal, ventral y de perfil del holotipo de *Pristimantis sacharuna* sp. nov. (QCAZ 52496, hembra). Fotografías: Carolina Reyes-Puig.

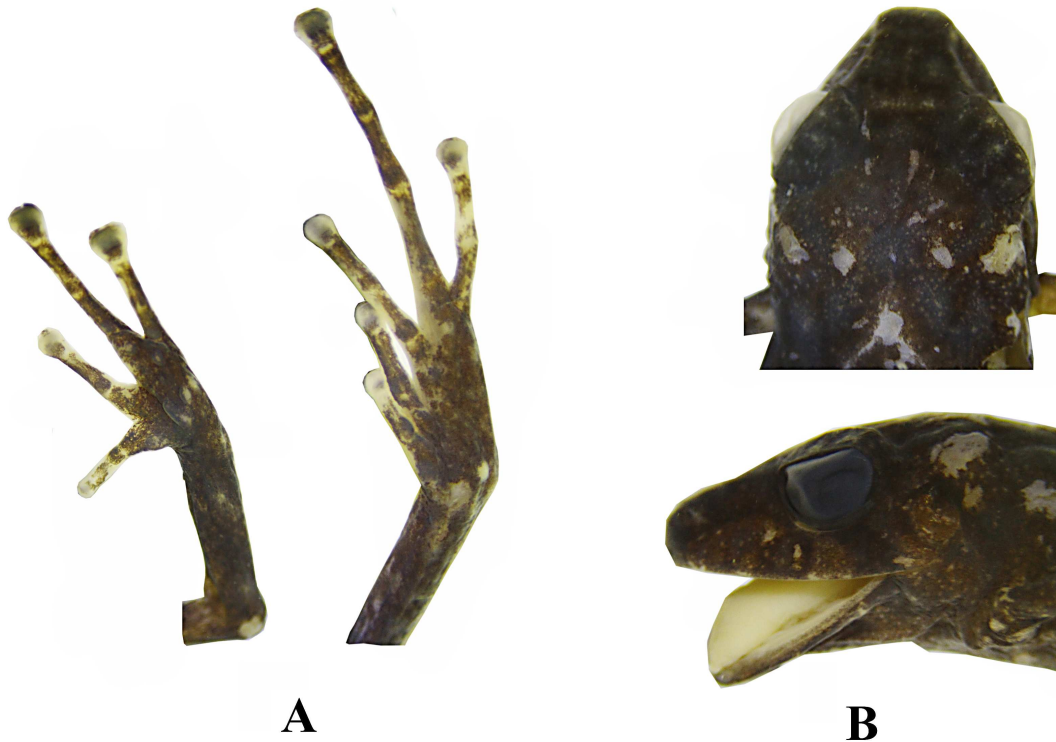


Figura 7: Detalles de *Pristimantis sacharuna* sp. nov. (DHMECN 5218, hembra, paratopotipo). (A) Extremidades; (B) cabeza en vista de dorsal y de perfil. Fotografías: Carolina Reyes-Puig.

café crema; banda supra timpánica, cantal y dos barras suboculares diagonales café oscuro (café rojizo en vida); vientre crema amarillento densamente punteado de café; garganta crema a café con densas manchas café oscuro; superficies ocultas de la ingle, muslo y pierna crema amarillento (rojo en vida); iris cobrizo en las 3/4 partes, tercio superior dorado; (14) longitud rostro-cloacal en dos hembras 18,5–19,5 mm.

**Comparación con especies similares:** *Pristimantis sacharuna* es la única especie de *Pristimantis* en los bosques nublados de la cuenca alta del Pastaza con una cresta dérmica occipital en forma de “W” y una distintiva marca pálida en forma de “V” invertida, con tubérculos subcónicos en la región ulnar y borde externo del tarso, dígitos distintivamente pequeños y estrechos con almohadillas ligeramente ensanchadas. Exhibe una distintiva coloración dorsal café con marcas café rojizas, superficies ocultas de los muslos e ingles rojas. En su patrón de coloración en vida, *P. sacharuna* (caracteres entre paréntesis) podría ser confundido con *P. puruscafeum* [22] pero este último se caracteriza por presentar los discos de los dedos del pie y mano casi del doble de ancho que los dígitos (ligeramente ensanchados); tubérculos supernumerarios en manos y pies presentes (ausentes); sin coloración inguinal rojiza (presente); coloración ventral rojo vino con marcas crema (homogéneamente café); iris gris hacia los bordes superior e inferior, con una banda cobriza en el medio (iris cobrizo en su mayoría, tercio superior dorado). En la forma y ancho relativo de los dígitos y patrones de coloración en vida, *Pristimantis sacharuna* es similar a *P. bicantus*

[23], *P. marcoreyesi* [22] y *P. sirnigeli* [24]. La primera se distribuye en las estribaciones orientales entre Napo y Pastaza, el dedo V del pie es ligeramente mayor al III (mayor), sin tubérculos subcónicos en el párpado, talón, cúbito y tarso (presentes); sin rebordes cutáneos laterales (presentes), superficies ocultas de las ingles con o sin tonalidad rojo o salmón (rojo intenso), longitud rostro-cloacal máxima de 21,7 mm (19,5 mm). *Pristimantis marcoreyesi* de los bosques montanos de la cuenca alta del Río Pastaza alcanza un tamaño corporal de hasta 30,8 mm, posee pliegues dorsolaterales débilmente definidos (ausentes), un fino pliegue escapular en forma de “V” invertida (marca pálida en forma de “V” invertida), párpado superior con dos o más tubérculos subcónicos (un tubérculo), tubérculos ulnares aplanados (subcónicos), talón y borde externo del tarso con tubérculos redondeados (subcónicos); iris con banda media café oscura, bronce con reticulaciones oscuras en fondo crema (cobrizo en las 3/4 partes, tercio superior dorado) y ausencia de manchas inguinales rojas (presente). *Pristimantis sirnigeli* de las estribaciones occidentales de los Andes de Ecuador presenta un tamaño corporal máximo de 24,1 mm, tubérculo del párpado cónico (subcónico), tubérculos ulnares bajos (subcónicos); talón con pequeños tubérculos aplanados (uno subcónico); tubérculos supernumerarios plantares numerosos (ausentes); dorsalmente café con marcas oscuras, vientre en tonalidad lila (café con marcas rojas, homogéneamente café).

Otra especie con tubérculos cónicos grandes en los antebrazos y tarso es *Pristimantis bellae* [25] que puede ser diferenciada de *P. sacharuna* por presentar los dígi-

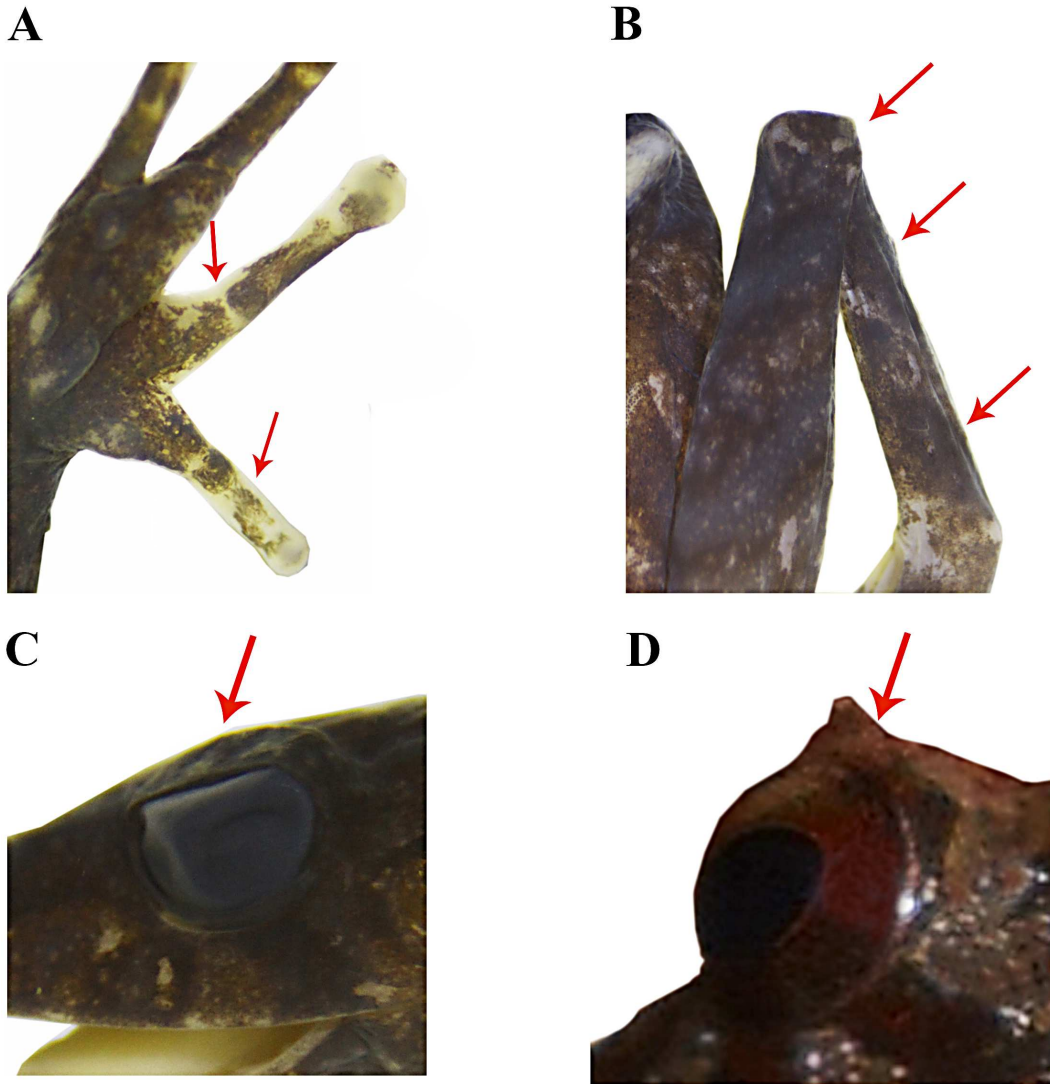


Figura 8: Detalles de *Pristimantis sacharuna* sp. nov. (DHMECN 5218, hembra, paratopotipo). Señalados con flechas: (A) rebordes cutáneos laterales de la mano; (B) tubérculo en el talón y tarso (reducidos por efecto de preservación); (C) tubérculo sobre el párpado reducido por efecto de preservación; (D) tubérculo sobre el párpado en vida. Fotografías: Carolina Reyes-Puig.

tos anchos (ligeramente ensanchados); tubérculo cónico grande en el párpado (subcónico); talón con tubérculo cónico calcar (subcónico); con conspicuo pliegue dérmico en la región escapular en forma de “V” invertida continuo hacia las  $\frac{3}{4}$  partes del dorso (pequeño sólo escapular); superficies ocultas de las ingles blanco y negro (rojo); iris bicolor con barra transversal café oscuro, borde superior e inferior plateado (cobrizo en su mayoría, tercio superior dorado).

**Descripción del holotipo:** Hembra adulta, cabeza más larga que ancha; hocico subacuminado en vista dorsal y ligeramente redondeado de perfil (Fig. 7); distancia ojo-narina 12,6% de la longitud rostro-cloacal; canto rostral ligeramente cóncavo, región loreal cóncava; narinas protuberantes dirigidas lateralmente; área interorbital plana, más ancha que el párpado superior, el párpado superior equivale al 77% la distancia interorbital; cresta craneal ausente (Fig. 7); párpado superior con un tubérculo subcónico (Fig. 8); membrana timpánica di-

ferenciada de la piel que la rodea, anillo timpánico evidente y ovalado, con fino pliegue supratimpánico y un tubérculo redondeado cerca al borde superior del tímpano, tímpano no visible dorsalmente, dirigido lateralmente, diámetro del tímpano 54,2% del diámetro del ojo, con tres tubérculos postrictales subcónicos, con uno en la parte superior del tímpano y dos en la parte posterior; coanas pequeñas, redondas de contorno, no cubiertas por el piso palatal del maxilar; procesos de los odontóforos vomerinos presentes, de contorno triangular con 5 dientes; lengua más larga que ancha, de forma acorazonada, 40% adherida al piso de la boca.

Textura del dorso finamente granular, pliegue escapular en forma de “V” invertida, con una cresta dérmica en forma de “W” en la región occipital (Fig. 6). Vientre areolado, pliegue discoidal indistinto; sin ornamentación cloacal. Brazos esbeltos con tubérculos ulnares subcónicos (reducidos por efecto de preservación); dedos con finos rebordes cutáneos laterales (Fig. 8), en los





**Figura 9:** Variación dorsal y ventral en la serie tipo de *Pristimantis sacharuna* sp. nov. Izquierda: QCAZ 52496, hembra, holotipo; derecha: DHMECN 5218, hembra, paratipo. Fotografías: Carolina Reyes-Puig.

dedos II–IV, tubérculo palmar bilobulado, tubérculo tenar ovalado; tubérculos subarticulares de los dedos de la mano débilmente definidos, aplanados y no visibles de perfil, sin tubérculos supernumerarios; discos con terminaciones digitales ligeramente más anchas que el dedo, expandidas en los dedos III y IV en una proporción de  $1\frac{1}{2}$  el ancho del dígito, ligeramente más ancho en el dedo II y del mismo ancho del dígito en el dedo I; todos los dedos con almohadillas definidas por surcos circunmarginales (Fig. 7).

Extremidades posteriores esbeltas, longitud de la tibia 54,2 % de la longitud rostro-cloacal, con un tubérculo subcónico en el talón (Fig. 8), borde externo del tarso con tres pequeños tubérculos subcónicos; pliegue tarsal interno ausente; dedos del pie con rebordes cutáneos laterales, sin membranas interdigitales, discos de los dedos del pie más estrechos que los discos de la mano, terminaciones digitales ligeramente más anchas que los dedos; tubérculos subarticulares débilmente definidos, aplanados y no visibles de perfil, sin tubérculos supernumerarios; tubérculos metatarsales presentes, el interno oval 2,5 veces de tamaño del externo que es subcónico; dedo V ligeramente mayor al III no alcanza

la base del tubérculo subarticular distal el dedo IV (Fig. 7).

**Coloración en preservado del holotipo:** Dorso homogéneamente café claro, con manchas café oscuro en forma de “W” en la región occipital, en “V” invertida en la región medio dorsal y en “V” en la región sacral; marca pálida en forma de “V” invertida en la región escapular; parte de los flancos y extremidades bandeadas en varios tonos de café oscuro, en las extremidades posteriores separadas por interespacios finamente delineados de crema; banda supratimpánica, cantal, dos barras suboculares diagonales café oscuro; barra interocular crema. Vientre café cremoso salpicado de café oscuro; garganta crema con manchas irregulares café oscuros; superficies ocultas de la ingle crema rosáceo (Fig. 6).

**Coloración en vida:** Dorso desde café grisáceo a café rojizo, finamente punteado de gris claro; marcas café grisáceo a café rojizo en forma de “W” en la región occipital, en “V” invertida en la región medio dorsal y en “V” en la región sacral; marca crema a café cremoso en forma de “V” invertida en la región escapular; bandas interorbital, supratimpánica, suboculares y latero-



Figura 10: Coloración en vida de dos especies nuevas de *Pristimantis* de los bosques nublados de la cordillera de los Sacha Llanganatis. Arriba: *Pristimantis pinchaque* sp. nov. (DHMECN 5222, hembra, holotipo, longitud rostro-cloacal = 32,5 mm). Abajo: *Pristimantis sacharuna* sp. nov. (QCAZ 52496, hembra, holotipo, longitud rostro-cloacal = 19,5 mm). Fotografías: Mario H. Yáñez-Muñoz.

nasales café rojizo. Región posterior de los flancos y extremidades con bandas café rojizo, interespacios café oscuro a gris salpicado de blanco. Vientre y superficies ventrales de las extremidades café oscuro, con pequeñas puntos indistintos gris blanquecinos, garganta café oscuro con patrón irregular de manchas grises; superficies ocultas de las ingles y extremidades posteriores rojas. Iris cobrizo, con el tercio superior dorado (Fig. 10).

**Medidas del holotipo (en mm):** Longitud rostro-cloacal = 19,5; distancia órbita-narina = 2,5; longitud cefálica = 7,8; ancho cefálico = 6,3; distancia interorbital = 2,1; distancia internarinal = 1,9; longitud de la tibia = 10,6; longitud del pie = 9,7; longitud de la mano = 6,3; diámetro horizontal del tímpano = 1,2; longitud horizontal del ojo = 2,3; ancho del párpado = 1,6.

**Variación:** Variación de las medidas morfométricas de la serie tipo son presentadas en la Tabla 1. Los patrones de coloración y ornamentación dorsal en preservado son muy similares en los dos especímenes tipo (QCAZ 52496, DHMECN 5218). Sin embargo, el paratopotipo (DHMECN 5218) exhibe una coloración dorsal más oscura. Ventralmente, el holotipo (QCAZ 52496) posee una coloración ventral café cremoso salpicada de café oscuro y la garganta crema con manchas irregulares café oscuro, mientras que el paratopotipo (DHMECN 5218) presenta el vientre crema densamente punteado de café oscuro y la garganta café con manchas irregulares café

oscuro (Fig. 9).

**Distribución e historia natural:** *Pristimantis sacharuna* es conocido únicamente de su localidad tipo en el bosque nublado de la Reserva Ecológica Río Zuñag, a 2200 metros de elevación (Fig. 5). De acuerdo con lo reportado por Reyes-Puig et al. [6] y Yáñez-Muñoz et al. [8], *P. sacharuna* es una especie rara en los muestreos en ecosistemas de bosque siempreverde montañosos. Los dos especímenes fueron colectados en un período de cuatro años de muestreo. *Pristimantis sacharuna* ha sido registrado en simpatria con *P. ardyae*, *P. cf. eriphus*, *P. galdi* y *P. bellae* [6, 8]. Los dos ejemplares de la serie tipo presentaron parásitos de la Familia Epidermoptidae (Acari) en las superficies ventrales de los muslos e ingle.

**Comentarios taxonómicos:** La descripción de *P. sacharuna* está basada en un limitado número de especímenes, sin embargo, sus caracteres morfológicos distintivos justifican su delimitación como una especie nueva. Aunque su morfología externa es muy similar a *Pristimantis puruscafeum* Reyes-Puig et al. y *P. bellae* Reyes-Puig y Yáñez-Muñoz, hemos observado mayor analogía con el grupo de especies de *P. myersi* [8] al ser una especie de tamaño corporal pequeño (longitud rostro cloacal < 28.0 mm), con hocico corto, cuerpo robusto, extremidades cortas, dedo I es más corto que el dedo II y V del dedo del pie ligeramente más largo que el III sin extenderse hasta el borde proximal del subarticular dis-



tal tubérculo del dedo del pie IV y los discos digitales ligeramente ensanchados. Al no contar con evidencias concluyentes, nos abstenemos de sugerir la asignación a este grupo de especies.

### Agradecimientos

La ejecución de la primera fase de investigación contó con el apoyo brindado por Fundación Ecominga Red de Protección de Bosques Amenazados y su equipo: Lou Jost, Nigel Simpson, Javier Robayo, Fausto Recalde, Luis Recalde, Jesús Recalde, Santiago Recalde y sus familias. Santiago R. Ron (QCAZ) impulsó la segunda fase de investigación en la reserva a través del proyecto “Inventario y caracterización genética y morfológica de los anfibios, reptiles y aves de los Andes del Ecuador” financiado por la Pontificia Universidad Católica del Ecuador y la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia y Tecnología del Ecuador (SENESCYPIC-08-470). El Ministerio del Ambiente otorgó los permisos 008-09-IC-FAUDNB/MA y 00108-IC-FAUD- DN-BAPVS/MA para la colección de especímenes. Durante las expediciones de campo contamos con la importante colaboración de Fernando Ayala, Andrés Laguna, Diego Paucar, Fausto Recalde, Luis Recalde, Santiago Recalde, Yerka Sagredo, Miguel Urgilés e Israel Valencia. Un reconocimiento especial a la Fundación Oscar Efrén Reyes por las facilidades durante la organización logística de las expediciones. El trabajo de MYM y CRP es parte del Programa de investigación Red Terrana Ecuador, respaldado por el MECN-INB. JRP, CRP y MYM agradecen especialmente a Marco Miguel Reyes-Puig, por su inspiración para continuar por el camino del conocimiento y conservación de la biodiversidad. Un especial agradecimiento a esa fuerza mística del monte, que mantiene el equilibrio en la naturaleza y guía nuestros pasos en las largas caminatas.

### Referencias

- [1] Ron, S. R.; Guayasamín, J. M.; Yáñez-Muñoz, M. H.; Merino-Viteri, A.; Ortiz, D. A.; Nicolalde, D. A. 2014. “AmphibiaWebEcuador”. Version 2014.0. Museo de Zoología, Pontificia Universidad Católica del Ecuador. <http://zoologia.puce.edu.ec/Vertebrados/anfibios>.
- [2] Frost, D. R. 2015. “Amphibian Species of the World: an Online Reference”. Version 6.0 Enlace: <http://research.amnh.org/herpetology/amphibia/index.html>. American Museum of Natural History: New York, USA.
- [3] Reyes-Puig, J.; Yáñez-Muñoz, M.; Cisneros-Heredia, D.; Ramírez, S. 2010. “Una nueva especie de rana *Pristimantis* (Terrarana: Strabomantidae) de los bosques nublados de la cuenca alta del río Pastaza, Ecuador”. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 2(3): B78-B82.
- [4] Yáñez-Muñoz, M.; Cisneros-Heredia, D.; Reyes-Puig, J. 2010. “Una nueva especie de rana terrestre *Pristimantis* (Anura:Terrarana:Strabomantidae) de la cuenca alta del Río Pastaza, Ecuador”. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 2(3): B28-B32.
- [5] Reyes-Puig, J.; Yáñez-Muñoz, M. 2012. “Una nueva especie de *Pristimantis* (Anura: Craugastoridae) del corredor ecológico Llangantes-Sangay, Andes de Ecuador”. *Papeis Avulsos de Zoologia*, 52(6): 81-91.
- [6] Reyes-Puig, M.; Reyes-Puig, J.; Yáñez-Muñoz, M.; 2013. “Ranas terrestres del género *Pristimantis* (Anura: Craugastoridae) de la Reserva Ecológica Río Zúñag, Tungurahua, Ecuador: Lista anotada y descripción de una especie nueva”. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 5(2): B5-13.
- [7] Reyes-Puig, J.P.; Reyes-Puig, C.; Ramírez-Jaramillo, S.; Pérez L., M. B.; Yáñez-Muñoz, M. H. 2014. “Tres nuevas especies de ranas terrestres *Pristimantis* (Anura: Craugastoridae) de la cuenca alta del Río Pastaza, Ecuador”. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 6(2): B51-B62.
- [8] Yáñez-Muñoz, M. H.; Reyes-Puig, J. P.; Morales, M. 2013. “Reserva Ecológica Río Zúñag: El puente entre la selva nublada y la selva subtropical amazónica”, en: “Herpetofauna en áreas Prioritarias para la Conservación: El sistema de reservas Jocotoco y Ecominga”. Monografía 6: 1-408. Serie de Publicaciones del Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales (MECN), Fundación para la Conservación Jocotoco, Fundación Ecominga: Quito: 215-229.
- [9] Lynch, J. D.; Duellman, W. E. 1997. “Frogs of the genus *Eleutherodactylus* (Leptodactylidae) in western Ecuador: Systematics, ecology, and biogeography”. *University of Kansas, Museum of Natural History, Special Publication*, 23: 1-236.
- [10] Padial, J.; Grant, T.; Frost, D. 2014. “Molecular systematics of Terraranas (Anura: Brachycephaloidea) with an assessment of the effects of alignment and optimality criteria”. *Zootaxa*, 3825: 1-132.
- [11] Hedges, S.; Duellman, W.; Heinicke, W. E. 2008. “New World direct-developing frogs (Anura: Terrarana): Molecular phylogeny, classification, biogeography, and conservation”. *Zootaxa*, 1737: 1-182.
- [12] Duellman, W.; Lehr, E. 2009. “Terrestrial-breeding frogs (Strabomantidae) in Peru”. Natur-und Tier-Verlag, Naturwissenschaft: Münster.
- [13] Downer, C. 1997. Status and action plan of the Mountain Tapir (*Tapirus pinchaque*), en: “Status survey and conservation Action Plan: Tapirs”, D.M. Brooks, R.E. Bodmer, S. Matola (Eds.), IUCN/SSC Tapir Specialist Group: Gland: 75-88.
- [14] Downer, C. 1996. “The mountain tapir, endangered “flagship” species of the high Andes”. *Oryx*, 30(1): 45-58.
- [15] Yáñez-Muñoz, M. H.; Cisneros-Heredia, D. F.; Reyes-Puig, J. P. 2010. “Una nueva especie de rana terrestre *Pristimantis* (Anura: Terrarana: Strabomantidae) de la cuenca alta del Río Pastaza, Ecuador”. *Avances en Ciencias e Ingenierías*, 3(1): B28-B32.
- [16] Lynch, J. D. 1979. “Leptodactylid frogs of the genus *Eleutherodactylus* from the Andes of Southern Ecuador”. *The University of Kansas, Museum of Natural History, Miscellaneous Publications*, 66: 1-62.

- [17] Lynch, J. D.; Duellman, W. E. 1980. "The *Eleutherodactylus* of the Amazonian slopes of the Ecuadorian Andes (Anura: Leptodactylidae)". *The University of Kansas, Museum of Natural History, Miscellaneous Publications*, 69: 1-86.
- [18] Jiménez de la Espada, M. 1875. "Vertebrados del viaje al Pacífico verificado de 1862 a 1865 por una comisión de naturalistas enviada por el gobierno Español. Batracios". Batracios. A. Miguel Ginesta: Madrid.
- [19] Andersson, L. G. 1945. "Batrachians from East Ecuador collected 1937, 1938 by Wm. Clarke-MacIntyre and Rolf Blomberg". *Arkiv för Zoologi. Stockholm*, 37A(2): 1-88.
- [20] Yáñez-Muñoz, M. H.; Bejarano-Muñoz, P.; Brito M. J.; Batallas R. D. 2014. "Ranas terrestres de los Andes Surorientales de Ecuador II: Una nueva especie de *Pristimantis* verde espinosa de los bosques montanos del Parque Nacional Sangay (Anura: Craugastoridae)". *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 6(2): B63-B74.
- [21] Brito, J.; Pozo-Zamora, G. 2013. "Una nueva especie de rana terrestre del género *Pristimantis* (Amphibia: Craugastoridae), de la Cordillera de Kutukú, Ecuador". *Papéis Avulsos de Zoología*, 53: 315-325.
- [22] Reyes-Puig, J. P.; Reyes-Puig, C.; Ramirez-Jaramillo, S. R.; Perez, M. B.; Yáñez-Muñoz, M. H. 2014. "Tres nuevas especies de ranas terrestres *Pristimantis* (Anura: Craugastoridae) de la cuenca alta del Río Pastaza, Ecuador". *Avances en Ciencias e Ingenierías*, 6(1): B51-B62.
- [23] Guayasamín, J. M.; Funk, C. W. 2009. "The amphibian community at Yanayacu Biological Station, Ecuador, with a comparison of vertical microhabitat use among *Pristimantis* species and the description of a new species of the *Pristimantis myersi* group". *Zootaxa*, 2220: 41-66.
- [24] Yáñez-Muñoz, M. H.; Meza-Ramos, P.; Cisneros-Heredia, D. F.; Reyes-Puig, J. P. 2010. "Descripción de tres nuevas especies de ranas del género *Pristimantis* (Anura: Terrarana: Strabomantidae) de los bosques nublados del Distrito Metropolitano de Quito, Ecuador". *Avances en Ciencias e Ingenierías*, 2(3): B16-27.
- [25] Reyes-Puig, J. P.; Yáñez-Muñoz, M. H. 2012. "Una nueva especie de *Pristimantis* (Anura: Craugastoridae) del corredor ecológico Llanganates-Sangay, Andes de Ecuador". *Papéis Avulsos de Zoología*, 56: 81-91.

#### APÉNDICE I. Especímenes examinados:

***Pristimantis bicantus*** ECUADOR: Tungurahua: Bosque Protector La Candelaria, 2000m, DHMECN 4966-67, 4970, 5248-5250. ***Pristimantis marcoveysi*** ECUADOR: Tungurahua: El Triunfo-Río Alisal, 3131m, DHMECN 11343; Nahuazo Runtún, 2710m, DHMECN 4816, 4819, 4822. ***Pristimantis bellae***: ECUADOR: Tungurahua DHMECN 4812-4810, Bosque Protector Cerro La Candelaria, 2000 m. ***Pristimantis puruscafeum*** ECUADOR: Tungurahua: Bosque Protector Cerro La Candelaria, 3100 m, DHMECN 4981, 4879-80, 5085. ***Pristimantis sirnigeli*** ECUADOR: Imbabura: DHMECN 2232-2234 Reserva Alto Chocho, 2950 m; Pichincha: DHMECN 6803, Cordillera de Saloya, 3050 m; DHMECN

4250, Reserva Verde Cocha, 3000 m. ***Pristimantis cremnobates*** ECUADOR: Napo: Reserva Biológica Narupa, DHMECN 9762-74. ***Pristimantis loujosti*** ECUADOR: Tungurahua: La Candelaria-Las Palmas, 2100 m, DHMECN 4843. ***Pristimantis rubicundus*** ECUADOR: Tungurahua: Reserva Río Zúñag, 1269 m, DHMECN 5199, 5200, 5251.

## Alteraciones de coloración en el plumaje de aves silvestres del Ecuador

Héctor Cadena-Ortiz<sup>1,2,3\*</sup>, Daniela Bahamonde-Vinueza<sup>1,2</sup>, Diego F. Cisneros-Heredia<sup>1,4,5,6</sup>, Galo Buitrón-Jurado<sup>2,7</sup><sup>1</sup>Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales, Instituto Nacional de Biodiversidad. Calle Rumipamba 341 y Av. de los Shyris. Casilla: 17-07-8976. Quito, Ecuador.<sup>2</sup>Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Escuela de Biología, Museo de Zoología (QCAZ), Av. 12 de Octubre 1076 y Roca, Casilla Postal 1701519, Quito, Ecuador.<sup>3</sup>Equipo Técnico Yasuni - Programa de Reparación Ambiental y Social, Ministerio Del Ambiente. Av. La Coruña E25-58 y San Ignacio. Quito, Ecuador.<sup>4</sup>Universidad San Francisco de Quito USFQ, Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales, Laboratorio de Zoología Terrestre, calle Diego de Robles y Vía Interoceánica, Campus Cumbayá, Quito, Ecuador.<sup>5</sup>King's College London, Department of Geography, Strand, London, UK.<sup>6</sup>Aves & Conservación / BirdLife en Ecuador, Quito, Ecuador.<sup>7</sup>Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, Centro de Ecología, Caracas 1020-A, Apartado 2032, Venezuela.

\* Autor principal/Corresponding author, e-mail: fercho\_cada@yahoo.es

Editado por/Edited by: Cesar Zambrano, Ph.D.

Recibido/Received: 2015/03/15. Aceptado/Accepted: 2015/12/03.

Publicado en línea/Published on Web: 2015/12/30. Impreso/Printed: 2015/12/30.

## Alterations of coloration in the plumage of wild birds of Ecuador

## Abstract

This paper analyze 61 cases of plumage chromatic aberrations (total or partial absence of pigments in some or all feathers) in 43 species of wild birds, grouped into 21 families, including 51 new records and being the first report for these aberrations in Ecuador for 14 families. Records were compiled from our own data, skilled birdwatchers's personal communications and visits to ornithological collections in Quito, Ecuador. The most common aberration was leucism and the species with the highest number of reports were the Greater Thrush *Turdus fuscater* and the Rufous-collared Sparrow *Zonotrichia capensis*. Most records came from rural areas in the high Andean region where Pichincha was the province with more records. The documentation of the distribution and frequency of these aberrations has important implications for conservation and monitoring as to evidence the possible causes that induce these alterations within bird populations; to this end, we also present the definition of the most important types of chromatic aberrations in order to familiarize birdwatchers with and to promote their report.

**Keywords.** albinism, birds, dilution, leucism, melanism, schizochroism.

## Resumen

Este artículo analiza 61 casos de aberraciones cromáticas del plumaje (ausencia total o parcial de pigmentos en algunas o en todas las plumas) en 43 especies de aves silvestres ecuatorianas, agrupadas en 21 familias, incluyendo 51 nuevos registros y siendo este el primer reporte de aberraciones en Ecuador para 14 familias. Esta compilación incluye datos colectados por los autores, comunicaciones personales de expertos observadores de aves y visitas a colecciones ornitológicas de museos en Quito, Ecuador. La alteración más común fue el leucismo y las especies con mayor número de reportes fueron el Mirlo Grande *Turdus fuscater* y el Gorrió Ruficollarejo *Zonotrichia capensis*. La mayoría de registros proviene de áreas rurales en la zona altoandina, siendo Pichincha la provincia con más registros. La documentación de la distribución y frecuencia de estas aberraciones de coloración de plumaje tiene importantes implicaciones de conservación y monitoreo, permitiendo evidenciar las posibles causas que inducen estas alteraciones en las poblaciones de aves; por ello también presentamos definiciones de los principales tipos de aberraciones cromáticas con el fin de familiarizar a los observadores de aves y estimular la difusión de sus registros.

**Palabras Clave.** albinismo, aves, dilución, esquizocroismo, leucismo, melanismo.

## Introducción

La coloración de las plumas está asociada a varias funciones clave para la supervivencia de las aves como termorregulación, camuflaje ante depredadores, y comunicación visual durante interacciones antagonistas, de cortejo, alarma y advertencia a los depredadores [1, 5, 6, 10]. La mayoría de colores del plumaje en las aves son producidos por la combinación de uno o varios tipos de pigmentos, entre los cuales, los más frecuentes y extendidos son los carotenoides, porfirinas y melaninas [5]. Las características estructurales de las plumas tienen un papel importante en la coloración, influyendo en la dispersión de la luz a través de espacios microscópicos de aire o sobre la absorción y reflexión de la luz [1–3]; por ejemplo, en las plumas iridiscentes de los colibríes y en algunos tipos de plumajes azules o blancos [2, 4].

Los carotenoides son un conjunto de pigmentos que son usualmente ingeridos con el alimento por las aves y otros vertebrados, debido a su incapacidad de sintetizarlos [1, 5, 6]. No obstante, muchas especies de aves tienen la capacidad de modificarlos químicamente y depositarlos selectivamente [7], a excepción de los Psittacidae, los cuales no incorporan carotenoides en sus plumajes y sintetizan pigmentos llamados psitacofulvinas, que originan coloraciones amarillas, naranjas y rojas [8, 9]. Los carotenoides producen colores rojos, naranjas, amarillos, ciertos azules y verdes [5], entre los que destacan las xantófilas que son un tipo particular de carotenoides más fácilmente absorbidos en comparación a otros tipos y producen coloraciones amarillas [5]. Las porfirinas son un tipo particular de proteínas que incorporan átomos metálicos en su estructura y producen colores que varían entre el marrón, rojo, magenta y verde y tienden a encontrarse usualmente en partes de las plumas no expuestas a la luz solar [2]. Finalmente, las melaninas son los pigmentos más comunes y son producidos en los animales por el catabolismo de aminoácidos como la tirosina, triptófano y fenilamina [2, 10]. Este tipo de pigmentos proveen los tonos pardos, negros, grises, antes y ciertos tonos de naranja y amarillo [2]. En las plumas prevalecen dos tipos de melaninas: las eumelaninas y feomelaninas. Las eumelaninas son grandes gránulos negruzcos de forma regular y producen coloraciones oscuras de marrón, gris y negro, mientras las feomelaninas son gránulos rojizos o café claros de forma irregular y producen colores café rojizos y algunos amarillos [1, 5].

Una aberración cromática se define como el exceso, falta o ausencia de la cantidad de pigmentos en algunas o todas las plumas, generando individuos visiblemente diferentes del resto de la población [6]. La causa principal es la expresión de alelos mutantes o desviaciones en la expresión génica, lo que interrumpe o altera los procesos normales de pigmentación durante el desarrollo de las plumas, aunque otros factores como la dieta, edad, enfermedades y lesiones, también han sido sugeridos [6, 11–13]. El propósito de este artículo es describir los principales tipos de alteraciones de coloración en

aves en base a una revisión bibliográfica, ayudando así a su identificación por observadores de aves. Además, aportar al conocimiento de estas aberraciones cromáticas presentando varios registros encontrados en aves del Ecuador y contextualizar el tipo de aberración, taxonomía del ave y procedencia geográfica del registro.

## Métodos

Realizamos una revisión bibliográfica acerca de los tipos de alteraciones cromáticas en aves con el propósito de facilitar su reconocimiento. La nomenclatura y definiciones de los tipos de aberraciones cromáticas fueron resumidas a partir de las propuestas de varias publicaciones [6, 13, 14]. Recopilamos registros de aves con aberraciones cromáticas a partir de observaciones propias, comunicaciones con miembros del foro en línea Aves\_Ecuador ([https://espanol.groups.yahoo.com/neo/groups/Aves\\_Ecuador](https://espanol.groups.yahoo.com/neo/groups/Aves_Ecuador)) y visitas a las siguientes colecciones ornitológicas en Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional (EPN), Museo de Zoología, Pontificia Universidad Católica del Ecuador (QCAZ) y Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales (MECN). Identificamos el tipo de aberración y las localidades de observación con el objetivo de evaluar la frecuencia y extensión de este tipo de avistamientos en el Ecuador. Seguimos la taxonomía de Remsen *et al.* [15] y los nombres en español de Ridgely y Greenfield [16]. Los registros sin respaldo fotográfico son considerados suficientemente confiables debido a que fueron realizados por observadores experimentados con las aves del país. Presentamos descripciones del plumaje y fotografías de los registros para facilitar el reconocimiento de estas alteraciones y estimular la difusión de este tipo de observaciones en el Ecuador.

## Resultados

### Definición de términos

**Albinismo.** Está alteración se refiere a la ausencia total de melanina en el plumaje y otras partes del cuerpo, resultando generalmente en aves con plumaje completamente blanco y con falta de pigmento en las partes blandas como ojos (presentándose con una coloración rojiza), picos, piel, patas y pies, por lo cual es bastante notoria [6, 13, 14]. Es producida por un trastorno genético que genera una ausencia de la enzima tirosinasa, la cual cataliza la reacción de formación de melanina, aunque no influye en la formación de carotenoides, por lo que especies cuyos plumajes poseen coloraciones amarillas o rojizas derivadas de estos pigmentos los mantienen [13, 14]. El albinismo es una aberración de coloración difícil de verificar en registros históricos, especialmente en ausencia de descripciones del color de las partes blandas, debido a que puede confundirse con otras aberraciones como leucismo o esquizocroismo que también afectan a la deposición de melanina en el plumaje [13].

**Leucismo.** Es la alteración de plumaje más frecuente en la naturaleza [6, 13, 17]. El leucismo corresponde

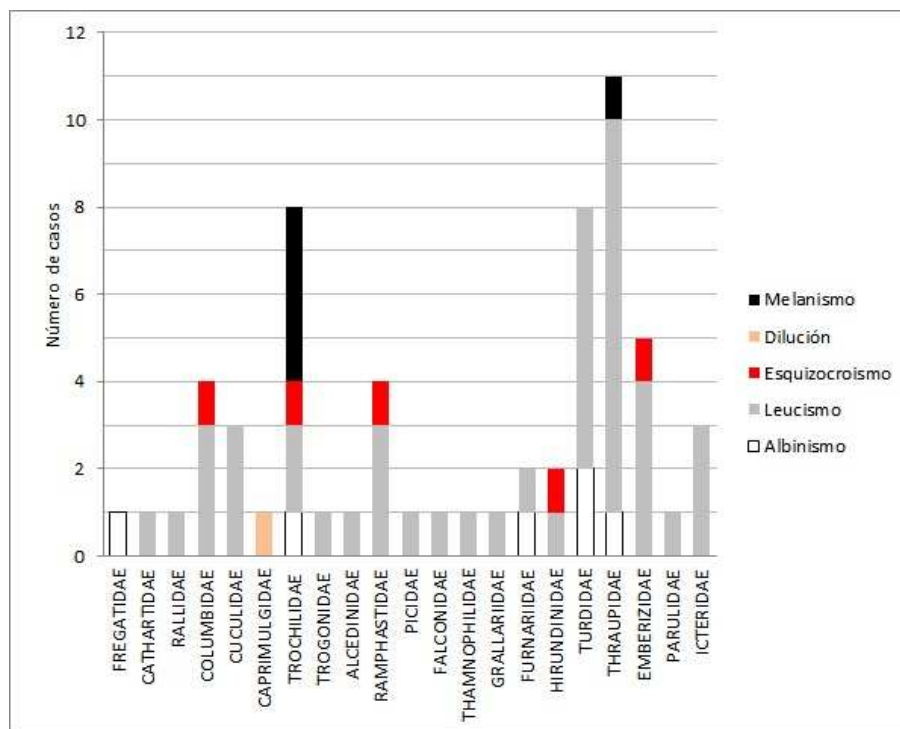


Figura 1: Registros de aberraciones de color en Ecuador, organizados por familia y según tipo de aberración.

a la pérdida de la facultad de depósito de un tipo o de todos los pigmentos en algunas plumas (*leucismo parcial*) o en todo el plumaje (*leucismo total*). Esto resulta en plumas de coloración blanco immaculado. Incorrectamente ha sido denominado albinismo parcial [6, 13]. A diferencia del albinismo, los pigmentos en las partes blandas generalmente no se ven afectados y por tanto la coloración de los ojos, picos y patas es usualmente mantenida [6,13,14]. La sustitución específica de plumas pigmentadas con carotenoides, por plumas blancas, se conoce como *leucismo no carotenóide* [18].

**Esquizocroísmo.** Esta alteración describe la pérdida de solo un tipo de melanina (eumelanina o feomelanina) o pigmentos xantófilos en todo el plumaje, aunque hay una retención de otros pigmentos [6, 13, 14]. La falta de eumelanina es denominada *esquizocroísmo feo* o *no eumelánico* y resulta en plumajes pardos debido a la presencia únicamente de feomelanina en las plumas. En cambio, la falta de feomelanina resulta en *esquizocroísmo no feomelánico* y produce individuos de plumajes grises o negros, debido a que las plumas sólo presentan eumelanina negra, gris y castaña [6, 13, 14].

**Dilución.** Es una alteración poco conocida y el término describe la reducción uniforme en la cantidad de todos los pigmentos aunque no su pérdida. Está alteración produce una disminución homogénea de la intensidad de color en todo el plumaje, luciendo una coloración más pálida [6, 13, 14]. Hay dos formas de dilución: pastel e isabelina. La dilución *pastel* ocurre cuando hay una reducción cuantitativa de ambas melaninas (eumelanina y feomelanina) y por lo cual las plumas negras se tornan grises y las pardo rojizas se vuelven pardo amari-

lentas. Además, al igual que en otras alteraciones sobre la cantidad de melanina, las plumas se blanquean por acción de la luz solar. La dilución *isabel* describe en cambio una reducción cuantitativa solo de la eumelanina que torna grisáceas a las plumas negras [6,14]. En especies con plumajes coloreados solamente por eumelaninas (e. g. Corvidae) es muy difícil distinguir una mutación *pastel* o *isabel*, debido a que ambas producen el mismo efecto [6, 14].

### Recuento de especies

Analizamos un total de 61 casos de aberraciones del plumaje en 43 especies de aves silvestres ecuatorianas, pertenecientes a 21 familias (Tabla 1, Fig. 1), incluyendo 51 registros de aberraciones del plumaje en aves ecuatorianas reportados por primera ocasión en este artículo, basados en especímenes de museo (9 registros), fotografías (23) y observaciones (19). Dos especímenes no pudieron asignarse confiablemente como casos de aberración cromática (ver Discusión). Nuestros resultados incluyen el primer reporte de aberraciones cromáticas en Ecuador para Rallidae, Columbidae, Cuculidae, Trochilidae, Trogonidae, Alcedinidae, Picidae, Falconidae, Thamnophilidae, Grallariidae, Furnariidae, Hirundinidae, Emberizidae e Icteridae. En la compilación de todos los registros ecuatorianos (datos inéditos y publicados), la alteración más común fue el leucismo (Fig. 2–3) representando el 73 % de las aberraciones registradas y las especies con mayor número de reportes (5 cada una) fueron el Mirlo Grande *Turdus fuscater* y el Gorrión Rucifollarejo *Zonotrichia capensis*. A nivel geográfico, la mayoría de datos provinieron de la región Altoandina y en particular de la provincia de Pichincha, con 46 %



Familia	Especie	Provincia	Localidad	Zona UTM	Northing	Easting	Fecha del registro	Tipo Registro
FREGATIDAE	<i>Fregata magnificens</i>	El Oro	Isla Santa Clara	17 S	9649416,45	562650,26	13-dic-02	R [45]; V (ST)
CATHARTIDAE	<i>Coragyps atratus</i>	El Oro	Piñas	17 S	9480363,00	644187,00	30-oct-05	R [30]
RALLIDAE	<i>Fulica ardesiaca</i>	Imbabura	Lago San Pablo	17 S	10023005,86	808981,38	sep-2010	V (DC)
COLUMBIDAE	<i>Zenaida auriculata</i>	Pichincha	Quito, barrio Monteserrín	17 S	9982636,30	782288,10	2000 a 2015	Fig. 3a (DC)
COLUMBIDAE	<i>Zenaida auriculata</i>	Pichincha	Quito, barrio Jacarandá	17 S	9982636,30	782288,10	2000 a 2015	V (DC)
COLUMBIDAE	<i>Zenaida auriculata</i>	Pichincha	Av. Gaspar de Villarreal	17 S	9981253,00	780224,00	20-jul-07	Fig. 3b (GBJ) y (CR)
COLUMBIDAE	<i>Columbina buckleyi</i>	Guayas	NE de la Reserva Manglares Churute	17 S	9735813,00	656840,00	jul-14	V (OC)
CUCULIDAE	<i>Crotophaga sulcirostris</i>	Guayas	Reserva Ecológica Manglares Churute, Laguna el Canelón	17 S	9732466,00	655601,00	22-jul-14	Fig. 3c (OC)
CUCULIDAE	<i>Crotophaga sulcirostris</i>	Guayas	Reserva Ecológica Churute, Coop. Agrop. Cristóbal Colón	17 S	9721607,11	647570,96	01-sep-14	V (OC)
CUCULIDAE	<i>Crotophaga ani</i>	Orellana	Sacha, Cañón de los Monos	18 S	9955545,00	272709,00	2013	Fig. 3d (JA)
CAPRIMULGIDAE	<i>Nyctipolus nigrescens</i>	Zamora-Chinchipec	Cabañas Ecológicas Copalinga	17 S	9552053,00	729447,00	2006 y 2009	R [46]
TROCHILIDAE	<i>Colibri coruscans</i>	Pichincha	Amaguaña, Santa Isabel	17 S	9979381,85	779890,44	14-dic-08	Fig. 3e (SR)
TROCHILIDAE	<i>Colibri coruscans</i>	Pichincha	Quito, Jardín Botánico	17 S	9957830,20	777868,50	26-jul-12	Fig. 3f (RA)
TROCHILIDAE	<i>Colibri coruscans</i>	Pichincha	Pomasquí	17 S	9976337,45	790631,65	2013	V (JML)
TROCHILIDAE	<i>Colibri coruscans</i>	Pichincha	Cumbayá	17 S	9978092,72	785262,77	ene-2013	V (DC)
TROCHILIDAE	<i>Helianthus micraster</i>	El Oro	Tapichalaca	17 S	9502166,19	706804,74	01-feb-10	Fig. 3g (MS, GS)
TROCHILIDAE	<i>Adelomyia melanogenys</i>	Pichincha	Nanegal, Lodge Santa Lucía	17N	765792,00	13099,00	28-jul-15	V (XA), Fig. 3h (AB)
TROCHILIDAE	<i>Lesbia victoriae</i>	Pichincha	Quito, Museo del Agua Yaku	17 S	9975939,55	776169,57	01-oct-14	Fig. 3i (JB)
TROCHILIDAE	<i>Amazilia tzacatl</i>	Pichincha	Mindo	17 S	9994611,22	747627,33	10-nov-12	V (JML)
TROGONIDAE	<i>Pharomachus auriceps</i>	Pichincha	Quito, Reserva Maquipucuna	17 N	6073,56	758275,17	22-dic-12	Fig. 3j (DM)
ALCEDINIDAE	<i>Chloroceryle americana</i>	Guayas	área Nacional de Recreación Isla Santay Y Gallo	17 S	9753878,00	625780,00	ago-15	Fig. 3k (WB)
RAMPHASTIDAE	<i>Aulacorhynchus haematopygus</i>	Pichincha	Tulipe, Hacienda Cafetera Las Tolos	17 N	5529,88	762125,92	2013	V (XA)
RAMPHASTIDAE	<i>Andigena hypoglauca</i>	Carchi	A c.a. 5 km del Carmelo vía a Julio Andrade	18 N	209002,00	718400,00	30-ago-2015	Fig. 1 (LT)
RAMPHASTIDAE	<i>Pteroglossus torquatus</i>	Pichincha	San Miguel de los Bancos, Reserva Milpe	17 S	9996313,00	737442,00	22-ago-05	R [30]
RAMPHASTIDAE	<i>Pteroglossus torquatus</i>	Pichincha	Gualea, Reserva Un Poco del Chocó	17 S	9994324,00	740567,00	28-jul-10	V (NB)
PICIDAE	<i>Colaptes rivoli</i>	Pichincha	Calacalí	17 S	9999976,36	776492,21	may-1990	V (DC)
FALCONIDAE	<i>Falco sparverius</i>	Imbabura	Ibarra	17 S	10037932,80	820595,51	ene-2013	V (DC)
THAMNOPHILIDAE	<i>Thamnophilus schistaceus</i>	Orellana	Estación Científica Yasuni	18 S	9925800,00	344179,00	24-jun-09	Fig. 3m (HC, DB)
GRALLARIIDAE	<i>Grallaria quitensis</i>	Pichincha	Paluguillo, páramo de Guamani-Papallacta	17 S	9970845,12	801241,58	nov-2013	V (DC)
FURNARIIDAE	<i>Furnarius leucopus</i>	Pichincha	Tulipe, Hacienda Cafetera Las Tolos	18 N	5529,88	762125,92	2013	V (XA)
FURNARIIDAE	<i>Cinclodes fuscus</i>	Cotopaxi	Parque Nacional Cotopaxi, llanura al este del volcán Atahualpa	17 S	9922468,40	780683,26	20-nov-07	Fig. 3n (ECL)
HIRUNDINIDAE	<i>Pygochelidon cyanoleuca</i>	Pichincha	Parque Nacional Podocarpus, Bombuscaro	17 N	14858,82	792262,17	11-oct-09	Fig. 3o (HC, DB)
HIRUNDINIDAE	<i>Pygochelidon cyanoleuca</i>	Pichincha	Tumbaco, La Morita	17 S	9976337,45	790631,65	2013	V (JFF)
TURDIDAE	<i>Catharus ustulatus</i>	Loja	Parque Nacional Podocarpus, Bombuscaro	17 S	9542855,00	722020,00	12-dic-05	R [30]
TURDIDAE	<i>Turdus maculirostris</i>	Pichincha	Nanegalito	17N	0754789	0013841	9-abr-15	Fig. 3p (JML)
TURDIDAE	<i>Turdus fusca</i>	Azuay	Cerca de la reserva Mazan	17 S	9515256,00	701596,00	25-oct-05	Fig. 3q (BT)
TURDIDAE	<i>Turdus fusca</i>	Carchi	Reserva Ecológica El ángel	18 N	9968693,42	776218,23	05-nov-11	Fig. 3r (JML)
TURDIDAE	<i>Turdus fusca</i>	Loja	Yungana	17 S	9683366,00	711923,00	04-may-12	R [30]
TURDIDAE	<i>Turdus fusca</i>	Napo	Cuyuja	17 S	170210,00	76977,00	25-dic-14	Fig. 3s (HC)
TURDIDAE	<i>Turdus fusca</i>	Carchi	A c.a. 5 km del Carmelo vía a Julio Andrade	18 N	209002,00	718400,00	24-ago-15	Fig. 3t (LT)
TURDIDAE	<i>Turdus serranus</i>	Napo	Cosanga, cabañas San Isidro	18 S	9935991,90	180744,89	08-may-09	Fig. 3u (ECL)
THRAUPIDAE	<i>Anisognathus igniventris</i>	Carchi	Cordillera Virgen Negra	18 N	205500,00	75272,00	22-oct-07	P (QCAZ3055), Fig. 3v (Col. GBJ)
THRAUPIDAE	<i>Thraupis episcopus</i>	Pichincha	Tumbaco, La Morita	18 S	9976337,45	790631,65	2013	V (JFF)
THRAUPIDAE	<i>Diglossa humeralis</i>	Cotopaxi	Misha Guayco	17 S	9909972,96	730497,43	01-nov-76	P (EPN 281), Fig. 3w (Col. M. Olalla)
THRAUPIDAE	<i>Diglossa humeralis</i>	Pichincha	Páramo de Río Pichán	17 S	9985434,00	769829,00	01-feb-09	P (QCAZ 4373), Fig. 3x (Col. CR)
THRAUPIDAE	<i>Diglossa cyanea</i>	Carchi	bosque El Chamizo	18 N	54992,00	191226,00	07-nov-07	P (QCAZ 3011), Fig. 3y (Col. GBJ)
THRAUPIDAE	<i>Sporophila castaneiventris</i>	Pastaza	Río Liquino, Camp. Sitio1.	18 S	9838156,00	227058,00	27-jun-08	P (QCAZ3011), Fig. 3z (Col. GBJ)
THRAUPIDAE	<i>Sporophila corvina</i>	El Oro	Piñas, Reserva Buenaventura	17 S	9607369,00	724023,00	13-nov-05	R [30]
THRAUPIDAE	<i>Sporophila nigricollis</i>	Pichincha	cerca de Nanegalito	17 N	758003,63	6877,98	2013	V (JML, BH)
THRAUPIDAE	<i>Catamenia homochroa</i>	Pichincha	San Tadeo, Mindo	17 N	1992,00	744868,00	14-feb-74	P (MECN7588), Fig. 3z1 (Col. M. Olalla)
THRAUPIDAE	<i>Geospiza fuliginosa</i>	Galápagos	San Cristobal	16 S	9901480,00	226846,00	28-ago-13	PNG
THRAUPIDAE	<i>Geospiza conirostris</i>	Galápagos	Isla Española	16 S	9842583,11	187552,00	17-dic-13	R [40]
EMBERIZIDAE	<i>Zonotrichia capensis</i>	Cotopaxi	Latacunga, Poalo	17 S	9901569,12	759091,62	01-jun-80	P (MECN5714), Fig. 3a2 (Col. R. Betancurt)
EMBERIZIDAE	<i>Zonotrichia capensis</i>	Pichincha	Quito, Parque Metropolitano	17 S	9980347,65	782290,75	ene-1999	V (DC)
EMBERIZIDAE	<i>Zonotrichia capensis</i>	Loja	Guanguiltagua, Loja, campus de la Universidad Nacional de Loja	17 S	9553695,32	699436,92	oct-2011	V (DC)
EMBERIZIDAE	<i>Zonotrichia capensis</i>	Pichincha	Tumbaco, La Morita	17 S	9976337,45	790631,65	2013	V (JFF)
EMBERIZIDAE	<i>Zonotrichia capensis</i>	Pichincha	Quito, Av. Las Casas	17 S	9978741,55	778082,95	07-abr-14	Fig. 3a3 (RC, HC)
PARULIDAE	<i>Setophaga pitayumi</i>	El Oro	Piñas, Reserva Buenaventura	17 S	9607551,00	612920,00	19-dic-05	R [30]
ICTERIDAE	<i>Dives warszewiczi</i>	Guayas	Reserva Ecológica Manglares Churute, Coop. Agrop. Cristóbal Colón	17 S	647570,96	9721607,11	01-ago-14	V (OC)
ICTERIDAE	<i>Molothrus bonariensis</i>	Azuay	Santa Isabel, Reserva Yunguilla	17 N	759712,94	16593,36	17-mar-03	P (MECN 8265), Fig. 3z4 (Col. A. Sornozza)
ICTERIDAE	<i>Molothrus bonariensis</i>	Azuay	Santa Isabel, Reserva Yunguilla	17 N	759712,94	16593,36	03-may-08	P (MECN 8278), Fig. 3z5

Tabla 1: Datos complementarios de los registros de aves con aberraciones cromáticas en Ecuador mencionados en este artículo. La taxonomía está actualizada de acuerdo a Remsen et al. [15]. En la columna “Tipo de Registro” se incluye las siguientes categorías: Fotográfico (Fig.), visual (V), piel (P), o referencia bibliográfica (R) y las abreviaciones entre paréntesis corresponden a los observadores: Alain Blanc (AB), Boris Herrera (BH), Boris Tinoco (BT), Daniela Bahamonde-Vinueza (DB), Carlos Rodríguez (CR), Diego F. Cisneros-Heredia (DC), Douglas Moore (DM), Eduardo Carrión L. (ECL), Galo Buitrón-Jurado (GBJ), Graciela Santos (GS), Héctor Cadena-Ortiz (HC), José Aguirre (JA), Jorge Bedoya (JB), José María Loaiza (JML), Juan Fernando Freile (JFF), Libardo Tello (LT), Manuel Sánchez (MS), Nicole Büttner (NB), Orlando Carrión (OC), Roger Ahlman (RA), Rubén Cadena (RC), Salomón Ramírez (SR), Santiago Torres (ST), Wilver Bravo (WB), Xavier Amigo (XA).

de los registros (Tabla 1). Los registros de aberraciones cromáticas fueron más frecuentes en áreas rurales (periurbanas, parches de bosque, reservas naturales) representando un 66 %, mientras las áreas urbanas obtuvieron el 34 % restante. A continuación, los registros son detallados con una descripción del plumaje de los individuos, el probable tipo de aberración y datos adicionales de comportamiento aportados por los observadores:

### Rallidae

**Focha Andina *Fulica ardesiaca*.** Un individuo adulto con probable leucismo parcial fue observado en el Lago San Pablo, Imbabura, en septiembre de 2010. El ave mostró manchas blanquecinas distribuidas a lo largo del pecho y cuello. El ave fue observada por varios minutos pudiendo confirmarse que las manchas blancas correspondían a cambios en la coloración del plumaje y no a manchas de heces o gotas de agua, como estaba nadando no se pudo observar las partes inferiores del cuerpo. El individuo tenía el escudo del pico de color rojizo.

### Columbidae

**Tórtola Orejuda *Zenaida auriculata*.** Se observó varios individuos con plumaje de adulto pero con manchas irregulares blancas en la corona, cobertoras alares o rectrices, sugiriendo leucismo (Fig. 2). Estas observaciones se hicieron periódicamente, un día al mes durante una hora, en jardines urbanos de dos barrios de Quito, Pichincha: por nueve años (2000–2010) en Monteserrín y cinco años (2010–2015) en Jacarandá. La media de individuos por día de observación en Monteserrín fue de 13 individuos, y de 27 individuos en Jacarandá. El porcentaje de incidencia de leucismo en estas poblaciones fue de 23 % en Monteserrín y 15 % en Jacarandá. Otro registro de esta especie corresponde a un individuo juvenil que exhibió un plumaje canela rufo muy claro con una mezcla de plumas blancas dispersas en todo el cuerpo especialmente conspicuas en las alas (Fig. 4). Sus patas mostraron una coloración coral rosácea, no tan brillante como en individuos normales; pico rosado más pálido en la punta, cera blanca, anillo ocular rosado con un ligero tinte azulado. Estas características concuerdan con un esquizocroísmo feo. El individuo evidenció plumas primarias parcialmente desarrolladas, corta longitud del pico y pequeño tamaño corporal, características de un juvenil. Fue encontrado en el suelo y devuelto cerca de su nido en la base de una palma *Phoenix canariensis*; en Ñaquito otro barrio de Quito, el 20 de julio 2007.

**Tortolita Ecuatoriana *Columbina buckleyi*.** Un individuo aparentemente juvenil con todas las plumas de la cabeza de coloración blanca y resto del plumaje normal. Acorde a esta descripción, el registro correspondió probablemente a un caso de leucismo. Fue observado mientras buscaba comida en compañía de dos individuos adultos en el suelo, al noreste de la Reserva Manglares Churute, Guayas, en julio de 2014.

### Cuculidae

**Garrapatero Piquiestriado *Crotophaga sulcirostris*.** Un individuo con leucismo que tenía la coloración del plumaje blancuzca, aunque el pico y patas fueron negruzcos (Fig. 2), fue observado merodeando en el borde de la Laguna del Cancón, Reserva Ecológica Manglares Churute, Guayas, el 22 de julio de 2014. El individuo era parte de una bandada de 12 individuos y mostró un comportamiento más esquivo y asustadizo en comparación a los otros individuos. Otro individuo de esta especie, encontrado el 1 septiembre de 2014 en un sector aledaño de la Reserva Manglares-Churute, exhibía varias manchas blanquecinas a manera de estrías sobre algunas partes del cuerpo, incluyendo las alas, cabeza y vientre, lo que igualmente sugiere un probable caso de leucismo.

**Garrapatero Piquiliso *Crotophaga ani*.** Un individuo con leucismo tenía el plumaje de coloración normal en el cuerpo, las alas y la cola pero tenía un parche de plumas completamente blancas, formando un conspicuo collar en el área de la barbilla, garganta y extendiéndose hasta el área auricular (Fig. 2). Las partes blandas (pico, iris, patas) mostraron la coloración típica de esta especie. El individuo fue visto como parte de una bandada de 15 a 20 individuos y fue encontrado en el Cañon de los Monos, Orellana, durante tres años consecutivos desde el 2013.

### Trochilidae

**Orejivioleta Brillante *Colibri coruscans*.** Tres individuos melánicos fueron registrados en Pichincha. Desde el 14 de diciembre de 2008 y durante cerca de tres meses en Amaguaña, se registró un individuo (Fig. 5) con plumaje pardo muy oscuro, sin parche auricular de plumas azules, con la cola con una banda subterminal pardo muy oscura, las coberteras subcaudales fueron blanco sucio y la pechera mostró el patrón característico hallado en esta especie aunque de color pardo oscuro. El segundo individuo fue observado el 26 de julio de 2012 por varios días en el Jardín Botánico de Quito, un individuo (Fig. 5) con un plumaje parduzco muy oscuro y sin el parche de plumas coberteras auriculares de color azul, con la cola con una banda subterminal oscura aunque de color parduzco (no azul metálico), y las puntas con un tono pardo más claro. El tercer registro fue el 2013 en Pomasqui, donde un individuo descrito como melánico fue observado por al menos una semana libando de las flores de *Leonotis nepetifolia* (Lamiaceae), sin observarse interacciones agresivas de persecución o expulsión por otros individuos. Finalmente un *C. coruscans* adulto fue registrado en Cumbayá, Pichincha, en enero 2013, con varias plumas blancas en la región pectoral, encima y mezcladas con el parche pectoral característico de esta especie. El individuo fue observado en repetidas ocasiones hasta agosto 2014 exhibiendo constantemente las manchas blancas, un registro probable de leucismo.

**Solángel Goliflama *Heliangelus micraster*.** Un individuo (Fig. 4) en Tapichalaca, El Oro, el 01 de febrero



Figura 2: Casos de leucismo en Tórtola Orejada *Zenaida auriculata* de Quito, prov. de Pichincha (1ª fila, izquierda); Garrapatero Piquies-triado *Crotophaga sulcirostris* de la Laguna del Canción, prov. de Guayas (1ª fila, centro); Garrapatero Piquiliso *Crotophaga ani* de Cañon de los Monos, prov. de Orellana (1ª fila, derecha); Colacintillo Colinegro *Lesbia victoriae* de Quito, prov. de Pichincha (2ª fila, izquierda), Quetzal Cabecidorado *Pharomachrus auriceps* de Maquipucuna, prov. de Pichincha (2ª fila, derecha); Martín Pescador Americano Verde *Chloroceryle americana* de Isla Santay, prov. de Guayas (3ª fila, izquierda); Tucán Andino Pechigrís *Andigena hypoglauca* de la vía Carmelo - Julio Andrade, prov. de Carchi (3ª fila, centro); Batará Alillano *Thamnophilus schistaceus* de la Estación Científica Yasuní, prov. de Orellana (3ª fila, derecha); Cinclodes Alifranjeado *Cinclodes fuscus* del Parque Nacional Cotopaxi, prov. de Cotopaxi (4ª fila, izquierda); Mirlo Ecuatoriano *Turdus maculirostris* de Nanegalito, prov. de Pichincha (4ª fila, centro); y Mirlo Grande *Turdus fuscater* de la Reserva Ecológica El Ángel, prov. de Carchi (4ª fila, derecha).





Figura 3: Casos de leucismo en Mirlo Grande *Turdus fuscater* de Cuyuja, prov. de Napo (1ª fila, izquierda); Mirlo Negribrillos *Turdus serranus* de Cosanga, prov. de Napo (1ª fila, centro); Tangara Montaña Ventriescarlata *Anisognathus igniventris* de la Cordillera Virgen Negra, prov. de Carchi (1ª fila derecha); Pinchaflores Negro *Diglossa humeralis* de Misha Guayco, prov. de Cotopaxi (2ª fila, izquierda); y de Páramo de Pichán, prov. de Pichincha (2ª fila, derecha); Pinchaflores Enmascarado *Diglossa cyanea* de El Chamizo, prov. de Carchi (3ª fila); Espiguero Ventricastaño *Sporophila castaneiventris* del Río Liquino, prov. de Pastaza (4ª fila, izquierda); Semillero Paramero *Catamenia homochroa* de San Tadeo, prov. de Pichincha (4ª fila, derecha); Gorrión Ruficollarejo *Zonotrichia capensis* de Quito, prov. de Pichincha (5ª fila, izquierda); y Vaquero Brillante *Molothrus bonariensis* de Yunguilla, prov. de Azuay (5ª fila, centro y derecha).





Figura 4: Individuos con esquizocroísmo feo de Soláncel Goliflama *Heliangelus micraster* de Tapichalaca, prov. de Zamora-Chinchi (arriba izquierda); de Tortola Orejuda *Zenaida auriculata* de Quito, prov. de Pichincha (arriba centro); de Golondrina Azuliblanca *Pygochelidon cyanoleuca* de Atahualpa, prov. de Pichincha (arriba derecha, junto a un individuo en plumaje normal); y de Gorrión Ruficollarejo *Zonotrichia capensis* de Poaló, prov. de Cotopaxi (abajo), Ecuador.



Figura 5: Individuos melánicos de Orejivioleta Brillante *Colibri coruscans* observados en el Jardín Botánico de Quito (izquierda) y Amagñaña (derecha), prov. de Pichincha, Ecuador.



de 2010, mostraba coloración atípica y bastante distintiva, su aspecto general fue pardo rojizo muy pálido, con varias plumas blancuzcas visibles en las alas, la espalda, lores y el pecho; probablemente un adulto debido a la presencia de una gorguera bien desarrollada de color rosado, aunque de aspecto deslucido. El pico y las patas lucieron una coloración negro pizarra al igual que el iris. La coloración del plumaje sugiere un caso de esquizocroísmo feo.

**Colibrí Jaspeado *Adelomyia melanogenys*.** Un individuo con el plumaje completo de color blanco (Fig. 6), la coloración de sus partes blandas difirió al color oscuro característico en individuos normales: su pico fue anaranjado claro y sus patas rosadas; el individuo corresponde con un caso de albinismo. El colibrí fue observado el 28 y 29 de julio de 2015, alimentándose en las flores de una Ericaceae, en el Lodge Santa Lucia, Pichincha, cerca de esta planta habían bebederos para colibríes donde fueron observados alimentarse otros individuos de *A. melanogenys* de coloración normal, pero no el individuo albino.

**Colacintillo Colinegro *Lesbia victoriae*.** Un individuo con leucismo (Fig. 2) mostró varias plumas blancas en la corona llegando hasta el borde del ojo, y además una pluma en el álula y el filo externo de la primaria más externa, blancas. La cola larga y bien desarrollada sugiere que era un adulto. Fue observado por más de un año desde el 1 de octubre de 2014, en los jardines del Museo del Agua Yaku, Quito, donde además mostró un comportamiento muy territorial desplazando a individuos de su misma especie en varias ocasiones.

**Amazilia Colirrufa *Amazilia tzacatl*.** Un individuo descrito como melánico fue observado el 10 de noviembre de 2012 por un lapso aproximado de una hora donde se notó que se alimentaba con escasa regularidad en un bebedero mostrando una menor actividad de visita comparado a otros individuos de la misma especie. Además, tendió a permanecer alejado del bebedero y refugiado en el follaje durante varios minutos, en Mindo, Pichincha.

### Trogonidae

**Quetzal Cabecidorado *Pharomachrus auriceps*.** Un individuo presentó el borde de las plumas secundarias y terciarias de color crema en ambas alas y mucho más marcado en el borde de las plumas ubicadas junto al cuerpo (Fig. 2). El resto del plumaje mostró la coloración normal de las hembras de esta especie lo que evidenció leucismo parcial. El registro fue realizado el 22 dic. 2012 en la Reserva Maquipucuna, Pichincha.

### Alcedinidae

**Martín Pescador Americano Verde *Chloroceryle americana*.** Un ejemplar con un plumaje atípico fue observado por varios días en agosto 2015, en la Isla Santay, Guayas (Fig. 2). Su cabeza, cuello y alas mostraron una coloración blancuzca muy distintiva. Probablemente también un caso de leucismo, aunque no puede

descartarse completamente el esquizocroísmo, considerando que la coloración verde iridiscente en Alcedinidae es de tipo estructural y asociada al patrón de disposición de eumelanina en las plumas.

### Ramphastidae

**Tucanete Lomirrojo *Aulacorhynchus haematopygus*.** Un individuo fue observado en Tulipe, Pichincha, en el 2013 y fue descrito con un plumaje blancuzco, probablemente leucístico. Estaba anidando acompañado por otro individuo de apariencia normal.

**Tucán Andino Pechigrís *Andigena hypoglauca*.** Un individuo exhibió un plumaje con una mezcla de plumas blancas dispersas en dorso, en ambas alas, en la rabadilla y al menos una rectriz (Fig. 2). Se evidencia el colorido de su pico como en individuos normales; este registro corresponde a un caso probable de leucismo. El individuo fue fotografiado en la vía Carmelo Julio Andrade, el 30 de agosto de 2015.

**Arasari Collarejo *Pteroglossus torquatus*.** Un individuo solitario fue visto en Gualea, Pichincha, el 28 de julio de 2010, con el plumaje de la cabeza, dorso y cola de color blanco, el pecho amarillento y con las bandas rojizas presentes, aunque careció de la banda ventral negra. Presumiblemente se trató de un caso de leucismo.

### Picidae

**Carpintero Dorsicarmesí *Colaptes rivolii*.** Un individuo adulto fue observado en Calacalí, Pichincha, en mayo de 1990, exhibiendo manchas grandes de color blancuecinas en las cobertoras alares y espalda lo cual sugirió un caso de leucismo parcial. El carpintero estaba alimentándose en el tronco de un árbol de 6 m de aguacate *Persea americana*.

### Falconidae

**Cernícalo Americano *Falco sparverius*.** Un individuo macho adulto fue observado en Ibarra, Imbabura, en enero de 1998, exhibiendo plumas blancas que cubrían gran parte de la corona y el cuello en lugar de las plumas de color gris pizarra y mostrándose como extensiones de la mancha blanca fácil presente normalmente en la especie. En el cuello, las manchas negras características de la especie estaban presentes rodeadas de las plumas blancas, en lugar de plumas rufas. Esto sugiere también un probable caso de leucismo parcial.

### Thamnophilidae

**Batará Alillano *Thamnophilus schistaceus*.** Un individuo (Fig. 2) fue capturado con redes de neblina y posteriormente liberado el 24 de junio de 2009 en la Estación Científica Yasuní, Orellana. Mostró una pluma de contorno en la frente de coloración blanca, así como en las puntas de las coberteras de las alas. El resto del plumaje y las partes blandas presentaron una coloración normal. Evidencia de leucismo parcial.

### Grallariidae



Figura 6: Individuos albinos de Colibrí Jaspeado *Adelomyia melanogenys* del Lodge Santa Lucia, prov. de Pichincha (izquierda); y de Mirlo Grande *Turdus fuscater* de la Reserva Mazán, prov. de Azuay (centro) y de la vía Carmelo - Julio Andrade, prov. de Carchi (derecha).

**Gralaria Leonada, *Grallaria quitensis*.** Un individuo adulto fue observado en Paluguillo, páramo de Guamaní-Papallacta, Pichincha, en noviembre de 2013. El ave mostró un probable caso de leucismo debido a que exhibió la garganta, parte del pecho, cuello y espalda de color blanquecino. El individuo fue observado durante varios minutos mientras saltaba entre árboles de *Polylepis* sp.

#### Furnariidae

**Hornero del Pacífico *Furnarius leucopus*.** Un ejemplar presentó coloración blanquecina, un albino, pero no se puede descartar leucismo. Fue observado solo, caminando en el pasto en Tulipe, Pichincha, en el 2013.

**Cinclodes Alifranjeado *Cinclodes fuscus*.** Un individuo exhibió una coloración leucística, con varias plumas completamente blancas en su parte dorsal, desde la corona hasta la rabadilla (Fig. 2). Estuvo alimentándose con otros miembros de su especie en el Parque Nacional Cotopaxi, el 20 de noviembre de 2007.

#### Hirundinidae

**Golondrina Azuliblanca *Pygochelidon cyanoleuca*.** Dos casos de aberración cromática en Pichincha. El primero (Fig. 4), un individuo en Atahualpa, Pichincha, el 11 de octubre de 2009, mostró un plumaje distintivamente más claro, todas las plumas dorsales y de la cabeza de color normalmente azul oscuro metálico eran de color muy pálido ligeramente azulado. Las plumas de las alas y cola mostraron una tonalidad parda rojiza y las patas fueron gris rosáceo. Esta coloración sugiere un probable caso de esquizocroísmo feo. El ave en cuestión estaba perchada en un alambre dentro de un grupo mixto formado por individuos de su especie y de la Golondrina Ventricafé (*Orochelidon murina*). El segundo caso fue un individuo observado en Tumbaco, el 2013, y correspondió a un caso probable de leucismo, debido a la presencia de plumas blancas en gran parte del dorso incluyendo un poco de la nuca y la corona y también en las coberteras superiores de las alas. Estaba dentro de una bandada de 15 individuos de coloración normal.

#### Turdidae

**Mirlo Ecuatoriano *Turdus maculirostris*.** Un individuo presentó varias plumas rectrices centrales de color blanco, el resto de su plumaje y partes blandas eran de color normal (Fig. 2), coloración correspondiente a leucismo. El ave estuvo alimentándose en el suelo en compañía de otro individuo de su especie, en Nanegalito, Pichincha, el 9 de abril de 2015 a las 18h00.

**Mirlo Grande *Turdus fuscater*.** Reportamos cuatro individuos con alteraciones. El primero (Fig. 6) fue un individuo observado en la Reserva Mazán, Azuay, el 25 de octubre de 2005. Su plumaje presentó una coloración blanca inmaculada, con el pico y las patas de coloración amarillenta, más pálida en comparación a la encontrada en individuos de apariencia normal. Muy probablemente un albino. El segundo ejemplar (Fig. 2) fue leucístico, fotografiado en la Reserva Ecológica El Ángel, Carchi, el 5 de noviembre de 2011. Mostró dos plumas secundarias blancas, una en cada ala de forma simétrica. El tercer individuo (Fig. 3), también leucístico, fue capturado en redes de neblina y posteriormente liberado, en un bosque andino en Cuyuja, Napo, el 25 de diciembre de 2014. El ejemplar mostró varias plumas completamente blancas en el área periocular, a ambos lados de la cabeza de una forma dispersa y asimétrica. Finalmente el cuarto registro (Fig. 6), se trataría de otro individuo albino, con las mismas características del primer individuo, fotografiado el 24 de agosto de 2015, en la vía Carmelo - Julio Andrade, Carchi.

**Mirlo Negribrilloso *Turdus serranus*.** Un individuo (Fig. 3) fue fotografiado mientras vocalizaba en Cosanga, Napo, el 8 de mayo de 2009. Mostró parches de plumas blancas muy conspicuas en la garganta y el vientre que evidenciaron leucismo. Las patas también mostraron una apariencia más pálida en comparación a la coloración típica de esta especie.

#### Thraupidae

**Tangara Montana Ventriescarlata *Anisognathus igniventris*.** Un individuo (Fig. 3) fue observado en un parche de arbustos en compañía de otro individuo, en la Cordillera Virgen Negra, Carchi, el 22 de octubre de 2007. Fue posteriormente capturado con redes de neblina y colectado (QCAZ3055). La coloración del plumaje

fue normal, a excepción de la rectriz derecha más externa que fue de color blanco indicando leucismo.

**Tangara Azuleja *Thraupis episcopus*.** Un individuo observado en compañía de otros dos individuos de coloración normal, en Tumbaco, Pichincha, en el 2013, tuvo plumas blancas en la cara, lados del cuello y pecho. Probablemente un leucístico.

**Pinchaflor Negro *Diglossa humeralis*.** Dos registros con leucismo parcial. El primero, un individuo colectado en Misha Guayco, Cotopaxi, el 1 de noviembre de 1976, etiquetado como hembra (EPN 281; Fig. 3). Mostró una sola pluma de contorno blanca en la frente. El segundo, un individuo colectado en el Páramo de Pichán, Pichincha, el 1 de febrero de 2009, también etiquetado como hembra (QCAZ 4373; Fig. 3). Mostró solo una pluma blanca en la parte superior del pecho.

**Pinchaflor Enmascarado *Diglossa cyanea*.** Un individuo leucístico (Fig. 3) colectado en el borde del bosque andino El Chamizo, Carchi (QCAZ 3011), el 7 de noviembre de 2007. El espécimen presentó un plumaje bastante distintivo debido a un parche gular blanco, extendiéndose ligeramente debajo del ojo. Además, el plumaje mostró una coloración más opaca comparado a otros individuos de la misma especie colectados en el área y también exhibió las cuatro plumas primarias (P9 a P6) del ala izquierda de color blanco. El iris tuvo una coloración normal, aunque las plumas de las patas y las garras fueron de color blanco rosáceo.

**Espiguero Ventricastaño *Sporophila castaneiventris*.** Un individuo leucístico colectado cerca del Río Liquino, Pastaza, el 27 de junio de 2008 (QCAZ3011, Fig. 3). La coloración y el aspecto del individuo fueron normales a excepción de la presencia de una pluma blanca en la frente.

**Espiguero Ventriamarillo *Sporophila nigricollis*.** Un individuo fue descrito de aspecto general blanco a excepción de una línea muy tenue de traslape entre el pecho y el vientre, similar a la que presentan los machos de esta especie. Aparente leucismo parcial. El individuo fue observado mientras se alimentaba y desplazaba con normalidad junto a un grupo mixto de 40 individuos formado por otros individuos de su especie, además de *Volatinia jacarina* y *Tiaris olivaceus*; cerca de Nanegalito, Pichincha, el 2013.

**Semillero Paramero *Catamenia homochroa*.** Un espécimen adulto, etiquetado como hembra, colectado en San Tadeo, Pichincha, el 14 de febrero de 1974 (MECN 7588; Fig. 3). El individuo exhibió un plumaje blanco a excepción de pocas plumas en su dorso que son de color canela y negras, sugiere un caso de leucismo.

#### Emberizidae

**Gorrión Ruficollarejo *Zonotrichia capensis*.** Cinco registros de esta especie, un caso de esquizocroísmo feo

y cuatro individuos leucísticos. El primero fue un individuo con esquizocroísmo colectado en Poaló, Cotopaxi, el 1 de junio de 1980 (MECN5714; Fig. 4), notoriamente blancuzco; presentó primarias cremosas con secundarias canela con tinte rojizo, plumas de contorno acanelado pardusco, pico rojizo sin collar rufo, vientre blanco, corona pardo blancuzca, cola blanca con mucho desgaste. Los registros de individuos con leucismo provienen de Pichincha. El primero fue una observación en el Parque Metropolitano Guanguiltagua de Quito, en enero de 1999, presentando manchas generales blanquecinas en las cobertoras alares. Otro registro incluyó un individuo con características leucísticas observado en el campus de la Universidad Nacional de Loja, ciudad de Loja, Ecuador, en octubre de 2011, tenía plumas blancas que cubrían casi todo el cuello, espalda y las escapulares. Otro individuo fue encontrado en Tumbaco, en el 2013, con pocas plumas blancas en la espalda y la corona; lo que sugiere un caso de leucismo. Finalmente un individuo (Fig. 3) de Quito observado el 7 de abril de 2014 con la mayoría de las plumas de la cabeza de color blanco, salvo unas negras sobre la zona auricular, con las bandas superciliares y mandibulares ausentes, aunque el collarín presentó la coloración rojiza y los bordes negros típicos de esta especie. Algunas plumas de las alas tuvieron también una coloración blanquecina. El resto del cuerpo mostró una coloración normal similar a la de otro individuo junto al cual estaba alimentándose.

#### Icteridae

**Negro Matorralero *Dives warszewiczi*.** Un individuo leucístico que mostró una mancha blanca en el hombro derecho y fue observado llevando pajas secas en el pico, probablemente para la construcción de un nido, en la Reserva Manglares Churute, el 1 de agosto de 2014.

**Vaquero Brilloso *Molothrus bonariensis*.** Dos especímenes adultos machos, con leucismo parcial, colectados en la Reserva Yunguilla, Azuay. El primer espécimen (MECN 8265; Fig. 3) exhibió tres plumas ventrales de color blanco que resaltaron sobre el resto del plumaje normal, de color azul púrpuro metálico y fue colectado el 17 de marzo de 2003. El segundo espécimen (MECN 8278; Fig. 3) mostró un plumaje de apariencia normal a excepción de una pluma de contorno en el cuello de color blanco y fue colectado el 3 de mayo de 2008

#### Discusión

Debido al origen genético de la mayoría de anomalías de coloración en el plumaje de las aves silvestres [6], documentar su distribución y frecuencia tiene importantes implicaciones de conservación y monitoreo; especialmente si estas condiciones pueden estar asociadas a factores ambientales, el tamaño de las poblaciones [3] o a la alimentación [6]. La presencia de individuos con coloraciones atípicas ha sido documentada en áreas contaminadas por sustancias químicas y radiactivas [11,12]; así mismo suelen presentarse con mayor frecuencia en poblaciones silvestres diezmadadas,

existiendo varios registros en especies de aves extintas o críticamente amenazadas de extinción, debido a la mayor probabilidad de endogamia entre estos organismos [19]. Consecuentemente, la incidencia de alteraciones de plumaje podría ser un indicador importante de los efectos de la fragmentación de hábitats, escasez de recursos o contaminación sobre las poblaciones de aves silvestres [11, 12, 19]. Además, las causas de las aberraciones cromáticas no están completamente entendidas y presentan fenotipos novedosos que son importantes en los procesos de evolución de las aves y también suelen ser retos de identificación para los observadores [20, 21].

De todas las aberraciones, el leucismo parece ser el más común en la naturaleza y ha sido el más frecuentemente reportado en regiones templadas y tropicales [6, 14, 17, 21, 22]. En el Reino Unido y Norteamérica el leucismo ha sido frecuentemente reportado en familias con especies de plumajes de coloraciones oscuras, negras o pardas, principalmente en Strigidae, Turdidae, Corvidae, Hirundinidae, Passeridae, Sturnidae, Icteridae y Emberizidae, pero además en aves acuáticas como Anatidae y Podicipedidae [17, 23, 24]. Algo similar se ha reportado en Argentina donde una revisión museológica encontró 42 especímenes con aberraciones cromáticas, de los cuales 17 ejemplares (40,5 %) correspondieron a individuos leucísticos, siendo Icteridae la familia con el mayor número de especies con alteraciones [14]. En otros países de Sudamérica, el leucismo ha sido también una alteración frecuentemente reportada con individuos de Phalacrocoracidae, Ardeidae, Furnariidae, Turdidae y Thraupidae en Chile, Perú, Brasil, Colombia y Venezuela [25–28]. Los datos de Europa y Norteamérica indican que el leucismo y el albinismo son frecuentemente encontrados en los mirlos (Turdidae) [29].

Nuestros resultados indican que de manera similar a lo reportado en otros países, el leucismo fue la aberración más frecuente (73 %), y también evidente en familias con especies que exhiben plumajes de coloración oscura como Cuculidae, Hirundinidae, Turdidae e Icteridae. Turdidae fue también la familia que incluyó a la especie con mayor número de casos. Reportes previos de leucismo en *Turdus fuscater* provienen de Loja en el Ecuador y de los Andes colombianos [27, 30]. Otras especies de Turdidae de Sudamérica han sido también registradas con leucismo en Perú, Brasil y Chile e incluyen a *T. rufigiventris*, *T. falklandicus* y *T. chiguanco* [25, 26, 28], a las cuales se adicionan nuestros registros de *T. serranus* y *T. maculirostris*.

Otros grupos como Trochilidae, Icteridae y Thraupidae también destacan por el número de observaciones en el Ecuador. El leucismo en Icteridae ha sido previamente documentado en Norteamérica y otros países de Sudamérica como Argentina, Chile y Perú [14, 23, 26]. En Sudamérica sólo encontramos un registro previo de aberración cromática en *Molothrus bonariensis*, donde un ejemplar albino ha sido documentado en Argentina [14], aunque individuos leucísticos se han registrado en

*M. ater* en Norteamérica [23]. Es probable que estas aberraciones sean más comunes considerando que los dos casos de leucismo en *M. bonariensis* en el Ecuador provienen de una sola localidad y fueron poco conspícuos. Estas alteraciones serán probablemente encontradas también en otros géneros de Icteridae ecuatorianos como *Sturnella* y *Quiscalus* para los cuales también existen registros en Sudamérica [14, 25]. Con respecto a los colibríes, existen pocos casos documentados de aberraciones de plumaje y han correspondido generalmente a individuos albinos o leucísticos en Costa Rica y Norteamérica [23], siendo el registro de *Adelomyia melanogenys* albino, el primero en el Ecuador. El melanismo en esta familia parece ser bastante infrecuente (F.G. Stiles comm. pers.) y resalta la importancia de los registros ecuatorianos de *Colibri coruscans*. Casos documentados de colibríes melánicos son escasos y en algunos casos estos individuos fueron descritos como especies distintas en el siglo XIX, como por ejemplo *Eriocnemis dyselius* que parece ser un caso de melanismo de *Eriocnemis cupreovertris* [31] y el de *Pinarolaema buckleyi* de Bolivia que corresponde probablemente a un espécimen melánico de *Colibri coruscans* [32]. El plumaje de *Pinarolaema buckleyi* fue ilustrado y discutido por Gould [33] como parduzco con un brillo púrpureo sobre el dorso, las coberteras supracaudales y rectrices fueron pardas aunque con una banda sub-terminal azul acero y en la parte inferior el vientre fue parduzco con tonos verde metálicos, las coberteras subcaudales blancas y la garganta pardo más claro de apariencia escamosa. Los dos individuos melánicos ecuatorianos mostraron un plumaje similar al descrito en este espécimen de Bolivia aunque hubo algo de variación, ya que el brillo púrpureo no fue evidente en las fotografías, la banda subterminal careció de la coloración azul acero y la garganta tampoco tuvieron una coloración más clara comparado al resto del cuerpo. El esquizocroísmo en colibríes como el registrado con *Heliangelus micraster* es al parecer también muy escaso con dos casos probables previamente documentados en *Heliangelus mavors* y *Boissonneau flavescens* [34].

Es importante resaltar que algunos de los registros encontrados en el Ecuador representan y documentan aberraciones no observadas anteriormente en algunas familias y géneros de aves como el leucismo en Trogonidae, Alcedinidae y Thamnophilidae. Los registros presentados adicionan información sobre este tipo de alteraciones en Columbidae, Ramphastidae, Emberizidae y Thraupidae en Sudamérica. Una aberración de plumaje en tucanes había sido reportada previamente en el Ecuador [30], en Columbidae han sido reportadas en *Patagioenas fasciata*, *Zenaida auriculata* y *Columbina cruziana* (e. g. [14, 25, 35]). Asimismo, aunque existen varios registros de individuos aberrantes entre los pinchaflores (*Diglossa* spp.), hemos encontrado sólo un reporte en otros géneros de tangaras con un caso de alteración en *Buthraupis montana* en Colombia [36] pero ninguno en *Anisognathus* o *Thraupis*.





**Figura 7:** Dos especímenes con coloración atípica que no pudieron asignarse confiablemente como casos de aberración cromática debido a posibles efectos de la edad del espécimen (*Buteogallus anthracinus*, EPN 095, arriba) o a posible alteración debida a sustancias químicas (*Chlorornis riefferii*, QCAZ963, abajo).

El leucismo ha sido reportado más frecuentemente en especies observadas dentro de áreas urbanas [13]. Sin embargo, la recopilación de registros de alteraciones de plumaje encontrada en el Ecuador indicó una mayor frecuencia de leucismo en especies observadas en áreas rurales 70 % ( $n = 43$ ), lo que podría deberse a que estas áreas generalmente presentan mayor riqueza de especies comparado a las zonas urbanas y por ende hay mayor atención por parte observadores de aves; pero hay que destacar que la mayoría de registros ecuatorianos de alteraciones provienen de especies tolerantes a ambientes antropogénicos y con poblaciones abundantes como *Zenaida auriculata*, *Colibri coruscans*, *Turdus fuscater*, *Molothrus bonariensis* y *Zonotrichia capensis*, y cuya distribución es principalmente andina [16]. En consecuencia la región Altoandina tuvo un mayor porcentaje de registros mientras la región amazónica, que posee la mayor riqueza de especies del país, registró sólo dos casos.

Se ha sugerido que los individuos con aberraciones de coloración en el plumaje podrían tener una menor expectativa de vida debido a su mayor exposición ante los depredadores y conflictos intraespecíficos [37]. Estos efectos serían más pronunciados en individuos albinos cuya coloración los hace más conspicuos para los depredados, además de las dificultades en la búsqueda

de presas y detección de depredadores debido a la menor agudeza visual producida por la ausencia de melanina en el iris [38]. Las observaciones de los individuos aberrantes en el Ecuador son interesantes porque en al menos tres registros, los individuos fueron observados de forma repetida durante algunos años, meses o días como ocurrió con *Crotophaga ani*, *Lesbia victoriae* y *Heliangelus micraster*. Además, también los registros de *Lesbia victoriae* y *Colibri coruscans* sugieren que los individuos aberrantes fueron capaces de defender exitosamente territorios durante algunos días o meses.

La frecuencia de aberraciones cromáticas puede elevarse dentro de las poblaciones debido a cuellos de botella y el consecuente aumento de endogamia. Esto ha sido demostrado en poblaciones de aves pequeñas y aisladas como las de islas y fragmentos de bosque donde la frecuencia de individuos con alteraciones en la pigmentación aumenta [12, 19, 38]. Esta situación no es aún evidente en los registros del Ecuador, donde sólo se han reportado dos casos en especies insulares como el Pinzón de Darwin de Cactus (*Geospiza conirostris*), una especie endémica de las islas Galápagos [40] y otra en el Pinzón de Darwin Pequeño (*Geospiza fuliginosa*), donde un ejemplar albino fue reportado a través de la red social Facebook por el Parque Nacional Galápagos (PNG) en la Isla San Cristobal (<http://on.fb.me/1TvcnOk>). No

obstante, algunos de los registros en fragmentos de bosques como los de *Andigena hypoglauca*, *Diglossa cyanea* y *Anisognathus igniventris* en Carchi o de *Pharomachrus auriceps* y *Aulacorhynchus haematopygius* podrían deberse a esta situación, aunque esto requiere mucho más estudio ya que otros factores pueden también influir en la presencia de alteraciones en la coloración del plumaje de aves silvestres [11]. Varios de los registros en áreas urbanas y de especies ecológicamente tolerantes a la presencia humana, como *Zenaida auriculata*, *Colibri coruscans*, *Turdus fuscater* y *Zonotrichia capensis*, sugieren también que individuos con aberraciones cromáticas podrían ser más fácilmente detectados o frecuentes en estas áreas, lo cual podría deberse a una menor tasa de depredación o mayor disponibilidad de recursos.

La frecuencia de aberraciones cromáticas en las aves del Ecuador podría ser mayor al número de registros aquí presentados. Muchas de las alteraciones fueron poco conspicuas, como los casos de *Molothrus bonariensis*, *Sporophila castaneiventris* y *Diglossa humeralis* que presentaron una o pocas plumas de color blanco. Estas alteraciones pudieron ser observadas y detalladas, especialmente para definir el tipo de aberración cromática, en especímenes de museo y capturas con redes de neblina. Esto realza la importancia de las colecciones biológicas del Ecuador aunque su uso para determinar alteraciones de coloración en el plumaje de las aves debe realizarse con cautela debido a que ciertos especímenes pueden mostrar cambios en el tono o intensidad del color del plumaje debido al paso del tiempo o el uso de sustancias durante la preservación o curación del material [41–43]. Estas alteraciones dificultan la detección de ciertas aberraciones de pigmentación como albinismo, dilución, esquizocroísmo o eritromelanismo que son difíciles de identificar.

Ninguna de las colecciones revisadas tuvo ejemplares con dilución aunque se encontró un ejemplar de *Zonotrichia capensis* (MECN5714; Fig. 4), presumiblemente con esquizocroísmo. Dos especímenes, un *Buteogallus anthracinus* colectado en 1931 (EPN95) de coloración general muy clara y de tono muy pálido, y un *Chlorornis riefferii* colectado en 1981 (QCAZ963) de color atípico, no pudieron asignarse confiablemente como casos de aberración cromática (Fig. 7). Esto debido a la ausencia de otros ejemplares que permitan descartar si la coloración de los especímenes estuvo asociada a la edad del espécimen como sucedió con *Buteogallus anthracinus*, o a información en la etiqueta sobre la preparación del espécimen y la posible alteración debida a sustancias químicas como sucedió con *Chlorornis riefferii*. En el caso de registros visuales o fotográficos debe tenerse una mayor cautela para identificar alteraciones de coloración, hay que considerar las condiciones de luz así como la edad y estado del plumaje para identificar patrones inusuales en la coloración del plumaje. Estos detalles usualmente sí son considerados por los observadores de aves experimentados.

Es importante documentar y difundir las coloraciones aberrantes en aves y otros vertebrados con descripciones detalladas, fotografías o especímenes. En Ecuador solo recientemente se ha descrito el primer caso de un murciélago albino en base a un espécimen [44]. Con mayor información se podrá vislumbrar la existencia de patrones espaciales y temporales o evidenciar las causas indirectas de estas aberraciones en las poblaciones, cómo podrían ser la fragmentación o contaminación. Las aves son observadas frecuentemente por especialistas y aficionados. Por ejemplo, de 497 miembros del foro virtual Aves\_Ecuador, 16 (incluidos los autores) ya han visto al menos un ave con alteraciones de color y de seguro aún quedan muchas fotografías y notas de campo de aves con aberraciones cromáticas sin ser publicadas por lo que hacemos un llamado a compartirlas y seguirlas documentando.

### Agradecimientos

Queremos agradecer a los curadores y colaboradores de las colecciones ornitológicas César Garzón y Glenda Pozo (MECN), Santiago Burneo y Azul Mizhquero (QCAZ), y Daniel y Edith Montalvo (EPN), quienes nos permitieron revisar los especímenes bajo su cuidado. Además, a quienes desinteresadamente compartieron sus observaciones y fotografías para la elaboración de este manuscrito: Rubén Cadena; José Aguirre; Douglas Moore; Salomón Ramírez; Boris Herrera; Alain Blanc; Libardo Tello; Graciela Santos; Wilver Bravo y los miembros del foro Aves Ecuador: en particular a José María Loaiza; Xavier Amigo; Boris Tinoco; Carlos Rodríguez; Eduardo Carrión L.; Jorge Bedoya; Juan F. Freile; Manuel Sánchez; Nicole Büttner; Orlando Carrión; Roger Ahlman y Santiago Torres. Agradecemos también a Carlos Ponce y Erick Rosales por su ayuda para georeferenciar los datos y a F. Gary Stiles por sus comentarios y observaciones sobre colibríes melánicos.

### Referencias

- [1] Ritchie, B. W.; Harrison, G.J.; Harrison, L.R. 1994. "Avian Medicine: Principles And Application". Wingers Publishing, Inc.: Lake Worth, FL, EE.UU.
- [2] Gray, D. A. 1996. "Carotenoids and sexual dichromatism in North American passerine birds". *American Naturalist*, 148(3): 453-480.
- [3] Davis, L. S. 2007. "Smithsonian Q & A: Penguins: The Ultimate Question & Answer Book". Harper Collins: New York.
- [4] Prum, R. O. 1999. "The anatomy and physics of avian structural colours", en: "Proceedings of the XXII International Ornithological Congress", N.J. Adams, R.H. Slotow (Eds.). BirdLife South Africa: Johannesburg, S29.1: 1633-1653
- [5] Gill, F.B. 2007. "Ornithology". 3rd edition. W.H. Freeman and Company: New York, EE.UU.

- [6] Van Grouw, H. 2006. "Not every white bird is an albino: sense and nonsense about colour aberrations in birds". *Dutch Birding*, 28: 79-89.
- [7] Brush, A. H. 1990. "Metabolism of carotenoid pigments in birds". *The FASEB Journal*, 4(12): 2969-2977.
- [8] McGraw, K. J.; Nogare, M. C. 2004. "Carotenoid pigments and the selectivity of psittacofulvin-based coloration systems in parrots". *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 138(3): 229-233.
- [9] Stradi, R.; Pini, E.; Celentano, G. 2001. "The chemical structure of the pigments in *Ara macao* plumage". *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 130(1): 57-63.
- [10] Hill, G. E.; McGraw, K. J. (Eds.). 2006. "Bird coloration: function and evolution". Vol. 2. Harvard University Press: Cambridge, MA, EE.UU.
- [11] Ellegren, H.; Lindgren, G.; Primmer, C.R.; Møller, A.P. 1997. "Fitness loss and germline mutations in barn swallows breeding in Chernobyl". *Nature*, 389: 593-596.
- [12] Bensch, S.; Hansson, B.; Hasselquist, D.; Nielsen, B. 2000. "Partial albinism in a semi-isolated population of great reed warblers". *Hereditas*, 133: 167-170.
- [13] Guay, P. J.; Potvin, D.A.; Robinson, R.W. 2012. "Aberrations in plumage coloration in birds". *Australian Field Ornithology*, 29: 23-30.
- [14] Urcola, M. R. 2011. "Aberraciones cromáticas en aves de la colección ornitológica del Museo Argentino de Ciencias Naturales 'Bernardino Rivadavia' ". *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales*, 13(2): 221-228.
- [15] Remsen, J.; Cadena, C.; Jaramillo, A.; Nores, M.; Pacheco, J.; Robbins, M.; Schulenberg, T.; Stiles, F.; Stotz, D.; Zimmer, K. 2015. "A classification of the bird species of South America". American Ornithologists' Union, South American Classification Committee. <http://www.museum.lsu.edu/Remsen/SACCBaseline.html>.
- [16] Ridgely R. R.; Greenfield, P. 2006. "Birds of Ecuador". Fundación Jocotoco: Quito.
- [17] Sage, B. L. 1963. "The incidence of albinism and melanism in British birds". *British Birds*, 56: 409-416.
- [18] Buckley, P. A. 1982. "Avian Genetics", en: "Diseases of cage and aviary birds", M. Petrak (Ed.), Lea and Febiger: Philadelphia, pp. 21-110.
- [19] Hume, J. P.; van Grouw, H. 2014. "Colour aberrations in some extinct and endangered birds". *Bulletin British Ornithological Club*, 134: 168-193.
- [20] Lebbin, D. 2005. "Aberrant plumage in a Black-and-white Tanager (*Conothraupis speculigera*)". *Boletín SAO*, 15: 100-104.
- [21] Pavez, E. F. 2008. "Plumaje de color anormal en Cóndor Andino (*Vultur gryphus*) en Chile Central". *Boletín Chileno de Ornitología*, 14(1): 52-55.
- [22] Li, D.; Li, J.; Wu, Y. 2010. "A leucistic Little Grebe *Tachybaptus ruficollis* in Hebei Province and a review of albinistic and leucistic species in China". *Birding-ASIA*, 16: 75-77.
- [23] Gross, A. O. 1965. "The incidence of albinism in North American birds". *Bird-Banding*, 36: 67-71.
- [24] Jehl, J.R. 1985. "Leucism in eared grebes in western North America". *Condor*, 87: 439-441.
- [25] Torres, M.; Franke, I. 2008. "Reporte de albinismo en *Podiceps major*, *Pelecanus thagus* y *Cinclodes fuscus* y revisión de aves silvestres albinas del Perú. *Revista Peruana de Biología*, 15(1): 105-108.
- [26] Fuentes, D.; González-Acuña, D. 2011. "Aberraciones cromáticas del plumaje en aves: nuevos reportes en Chile". *Boletín Chileno de Ornitología*, 17 (2): 113-121.
- [27] Rodríguez-Pinilla, Q.; Gómez-Martínez, M. J. 2011. "Leucismo incompleto en *Turdus fuscaters* (Passeriformes: Turdidae) en los Andes Colombianos". *Boletín Científico, Centro de Museos, Museo de Historia Natural*, 15(1): 63-67.
- [28] Junior, C. C. G.; da Silva, E. A.; de Luca, A. C.; Pongiluppi, T.; Molina, F. de B. 2008. "Record of a leucistic Rufous-bellied Thrush *Turdus rufiventris* (Passeriformes, Turdidae) in São Paulo city, Southeastern Brazil". *Revista Brasileira de Ornitología*, 16(1): 72-75.
- [29] Stirling, I. 1969. "An albinistic Adelie Penguin". *Condor*, 71: 78.
- [30] Hosner, P. A.; Lebbin, D. J. 2006. "Observations of plumage pigment aberrations of birds in Ecuador, including Ramphastidae". *Boletín SAO*, 16: 30-43.
- [31] Graves, G. R. 1998. "Taxonomic notes on hummingbirds (Aves: Trochilidae). 1. *Eriocnemis dyselius* Elliot, 1872 is a melanistic specimen of *Eriocnemis cupreiventris* (Fraser, 1840)". *Proceedings of the Biological Society of Washington*, 111(2): 420-424.
- [32] Zimmer, J. T. 1950. "Studies of Peruvian birds. No. 57, The genera *Colibri*, *Anthracothorax*, *Klais*, *Lophornis*, and *Chlorestes*". *American Museum novitates*, 1463: 1-28.
- [33] Gould, J. 1861. "A monograph of the Trochilidae, or Family of Humming Birds". vols. III, IV. Taylor & Francis: London.
- [34] Butler, A. L. 1927. "Humming-birds of special interest to Trochilidists". *Bulletin of the British Ornithological Club*, 48(317-319): 8-11.
- [35] Braun, C. E.; Boyd, R.L. 1979. "Albinism in mourning doves". *The Southwestern Naturalist*, 198-200.
- [36] Botero, J.; Jaramillo, M.; Teske, U. 2007. "Un Azulejo Real (*Buthraupis montana*) con coloración atípica". *Ornitología Colombiana*, 10: 51-53.
- [37] Holt, D. W.; Robertson, M.W.; Ricks, J.T. 1995. "Albino eastern screech-owl, *Otus asio*". *Canadian Field Naturalist*, 109 (1): 121-122.

- [38] Nogueira, D. M.; Alves, M. A. S. 2011. "A case of leucism in the burrowing owl *Athene cunicularia* (Aves: Strigiformes) with confirmation of species identity using cytogenetic analysis". *Zoologia (Curitiba)*, 28(1): 53-57.
- [39] Holyoak, D. T. 1978. "Variable albinism of the flight feathers as an adaptation for recognition of individual birds in some Polynesian populations of *Acrocephalus* warblers". *Ardea*, 66(3), 112-117.
- [40] Grace, J. K.; Tompkins, E. M.; Anderson, D. J. 2013. "Leucistic adult Large Cactus-Finch (*Geospiza conirostris*) on Española Island, Galápagos: A potential continuation of nestling beak color". *The Wilson Journal of Ornithology*, 125(1): 201-204.
- [41] McNett, G. D.; Marchetti, K. 2005. "Ultraviolet degradation in carotenoid patches: live versus museum specimens of wood warblers (Parulidae)". *The Auk*, 122(3): 793-802.
- [42] Pohland, G.; Mullen, P. 2006. "Preservation agents influence UV-coloration of plumage in museum bird skins". *Journal of Ornithology*, 147(3): 464-467.
- [43] Armenta, J. K.; Dunn, P.O.; Whittingham, L.A. 2008. "Effects of specimen age on plumage color". *The Auk*, 125(4): 803-808.
- [44] Brito, J. M.; León, C. 2014. "Primer caso de albinismo en *Vampyrus spectrum* (Chiroptera: Phyllostomidae) para Ecuador". *Mammalogy Notes*, 1(2):14-15.
- [45] Haase, B. J. M. 2011. "Aves marinas de Ecuador continental y acuáticas de las piscinas artificiales de Ecuasal". Aves & Conservacion, Bird Life International-Ecuador, and Ecuasal: Guayaquil.
- [46] Solano-Ugalde, A.; Vits, C.; Ingels, J. 2012. "Notes on the breeding of the Blackish Nightjar (*Caprimulgus nigrescens*) in south-eastern Ecuador, including the first record of aberrantly coloured juveniles". *Boletín SAO*, 21: 1-8.



## Transition between the dry and rainy season in Cumbayá (Ecuador): 2014 to 2015 comparison from observations at USFQ's Atmospheric Measurement Station (EMA)

María Cazorla<sup>1\*</sup>, Julieta Juncosa<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad San Francisco de Quito - Instituto de Investigaciones Atmosféricas - Colegio de Ciencias e Ingeniería.  
Diego de Robles S/N, Cumbayá, Ecuador.

\*Autor principal/Corresponding author, e-mail: cazorla.chem@gmail.com

Editado por/Edited by: Cesar Zambrano, Ph.D.

Recibido/Received: 2015/10/31. Aceptado/Accepted: 2015/11/01.

Publicado en línea/Published on Web: 2015/12/30. Impreso/Printed: 2015/12/30.

### Abstract

In this work we compare the length of the dry summer season and the transition into the rainy season in Cumbayá (located in a valley east of Quito, Ecuador) between the years 2014 and 2015. Meteorological observations used for comparison are solar radiation flux density, ambient temperature, relative humidity, and precipitation. Measurements were taken continuously at Universidad San Francisco de Quito's Atmospheric Measurement Station (EMA, Spanish acronym). Data analysis shows that compared to 2014, there was a delay of almost one month for the arrival of the rainy season in 2015. In 2014 the rainy season began on 12 September, while in 2015 the first seasonal rains occurred starting 9 October. September 2015 was an extremely dry month with daytime relative humidity minima as low as 6%. In September 2015, almost 5% of the ambient temperature 10-min data points were above 26°C compared to 0.67% in September 2014. Unseasonable warm and dry conditions augmented the severity of wild fires that developed within the surrounding forests in mid September 2015.

**Keywords.** Quito, dry season, rainy season.

## Transición entre la estación seca y lluviosa en Cumbayá (Ecuador): comparación entre los años 2014 y 2015 a partir de las observaciones de la Estación de Mediciones Atmosféricas (EMA) de la USFQ

### Resumen

En este trabajo se compara la duración de la época seca del verano y la transición hacia la época lluviosa en Cumbayá (localidad ubicada en el valle oriental de Quito, Ecuador) entre los años 2014 y 2015. Las observaciones meteorológicas utilizadas para la comparación son la radiación solar, la temperatura ambiente, la humedad relativa y la precipitación. Las mediciones fueron tomadas continuamente en la Estación de Mediciones Atmosféricas (EMA) de la Universidad San Francisco de Quito. Los datos muestran que la estación lluviosa en 2015 llegó prácticamente con un mes de retraso en comparación con 2014. Así, en 2014 la estación lluviosa se inició el 12 de Septiembre, mientras que en 2015 ocurrió el 9 de Octubre. Septiembre de 2015 fue un mes extremadamente seco, con valores de humedad relativa al medio día tan bajos como 6%. Durante Septiembre de 2015 casi un 5% de valores máximos de temperatura (promedios de 10 minutos) superaron los 26°C; mientras que en Septiembre de 2014, sólo un 0.67% de los datos superó tal marca. Las condiciones extremadamente secas y calientes del mes de Septiembre de 2015 agravaron la severidad de los incendios forestales que se desarrollaron en los bosques aledaños durante ese período.

**Palabras Clave.** Quito, estación seca, estación lluviosa.

### Introduction

In Quito (Ecuador) and its adjacent valleys, the duration of the dry season and the transition into the rainy season are critical factors that impact the development and severity of wild fires that often affect the region during the summer months. For example, in Septem-

ber 2015 Quito battled a serious wave of wild fires that devastated about 30 km<sup>2</sup> (3023.71 ha) of surrounding woods [1, 2]. Many of these events occurred within the forests that enclose densely populated towns (Puembo, Tumbaco, and Cumbayá) located across Quito's eastern valley. According to a Quito's COE report (Emergency

Operations Council, Spanish acronym) the occurrence of fires in summer 2015 turned out to be 132% larger than in summer 2014 [1].

During the summer months, seasonal wind gusts, intense surface insolation, warm ambient temperatures, low humidity, and scarce precipitation are some of the variables that contribute with suitable conditions for wild forests to develop pervasively. At Universidad San Francisco de Quito's Atmospheric Measurement Station (EMA, Spanish acronym), environmental monitoring efforts have been started since last summer with the purpose of building an observational record of physical meteorology and air quality measurements for the region. In this work, we report a comparison between the duration of the dry season between 2014 and 2015 from meteorological observations taken at EMA ( $0^{\circ}11'47''$  S,  $78^{\circ}26'6''$  W, 2391 meters above sea level). In addition, we report the appearance of the transition period towards the rainy season for both years. The variables used for comparison are ambient temperature, relative humidity, solar radiation, and precipitation. Temporal resolution of data presented corresponds to 10-minute averages for each measured quantity. Details regarding ground station instrumentation and an initial assessment of meteorological data quality can be found in [3].

#### Solar radiation comparison

Summertime solar radiation measurements are depicted in Fig. 1 for July, August and September 2014 (top panel), and 2015 (bottom panel). Plotted 10-min data (in green) and the corresponding diurnal profile (black line) reveal that on average July 2015 was considerably cloudier compared to the clearer skies in July 2014. Advancing towards the equinox, solar radiation around noontime was more intense for the months of August and September 2015 when compared to the previous year. For example, between 11h00 and 14h00, solar radiation measurements above  $1100 \text{ W m}^{-2}$  in 2015 correspond to 1.4% of the data points in August and 3.2% in September, whereas in 2014 the same percentages are 0.92% and 2.2%, correspondingly.

#### Ambient temperature comparison

Ambient temperature measurements for July, August and September are plotted against the hour of the day in Fig. 2 for 2014 (top panel), and 2015 (bottom panel). In July 2015 there was larger abundance of cloudiness (previous section). As a result, July 2015 was a cooler month than July 2014, as depicted by the diurnal profile curves (blue solid lines) for every case. Thus, in July 2015 the average temperature maximum was  $23.4^{\circ}\text{C}$  with a narrower diurnal profile curve and larger data dispersion around it. In contrast, in July 2014 the mean temperature maximum was  $24.3^{\circ}\text{C}$ , the diurnal profile curve had a wider peak, and 10-min points were more compact around the mean. On the other hand, as the surface received more intense insolation during August and September 2015 when compared to 2014 (previous section), ambient temperatures were accordingly higher. On

average, temperature maxima were  $25^{\circ}\text{C}$  and  $26^{\circ}\text{C}$  on August and September 2015, respectively. In contrast, average temperatures for the same months in 2014 were  $23.3^{\circ}\text{C}$  and  $24^{\circ}\text{C}$ . The percentage of 10-min temperature points above  $26^{\circ}\text{C}$  between 11h00 and 15h00 in August and September 2015 were 1.5% and 4.8%. However, in 2014 there were no 10-min data points above  $26^{\circ}\text{C}$  in August, while in September only 0.67% of the data was above the  $26^{\circ}\text{C}$ -mark.

#### Relative humidity comparison

Regarding relative humidity, dry conditions in summer 2014 were observed since July. As shown in the top panel of Fig. 3, July 2014 had drier days and remarkably drier nights than the following months, whereas September 2014 was more humid. In addition, the first rain occurred on 12 September 2014 (more details in the next section). In contrast, there was more dispersion of relative humidity data points around noontime in July 2015 when compared to the following months in the same year. Hence, in 2015 dry conditions started in August and intensified considerably towards the end of summer. For example, in September 2015 the average daytime relative humidity minimum was 25% with a couple of days when values dropped dramatically and reached values as low as 6% (Fig. 3 bottom panel, September). It was during this time period when wild fires developed in a very intense fashion. Precipitation recorded at EMA during September 2015 was practically absent (only 3.1 mm for the monthly total, more in the next section) as opposed to what happened the previous year.

#### Precipitation comparison

A comparison of the monthly precipitation totals for the months of June through October 2014 and 2015 is presented in Table 1. June and October have been included in this comparison in order to identify the length of the summertime and the transition from the dry into the rainy season on both years. Fig. 4 depicts total monthly precipitation curves obtained with data in Table 1. In this analysis the initiation of the rainy season has been identified on the first day of rain within the month when considerable total precipitation occurred immediately after the previous dry summer months. Hence, in

Month	Cumulative precipitation (mm)	
	2014	2015
June	11.6	6.2
July	-	13.8
August	0.7	-
September	89.7 (*)	3.1
October	126.7	116
Onset of rainy season	September 12th	October 9th

(\*) There was partial loss of data at the EMA site during this month. Hence, the precipitation total for September 2014 was obtained in part with measurements from a nearby monitoring station operated by the City's network [4].

**Table 1: Monthly precipitation totals in mm for June through October taken at EMA during 2014 and 2015.**

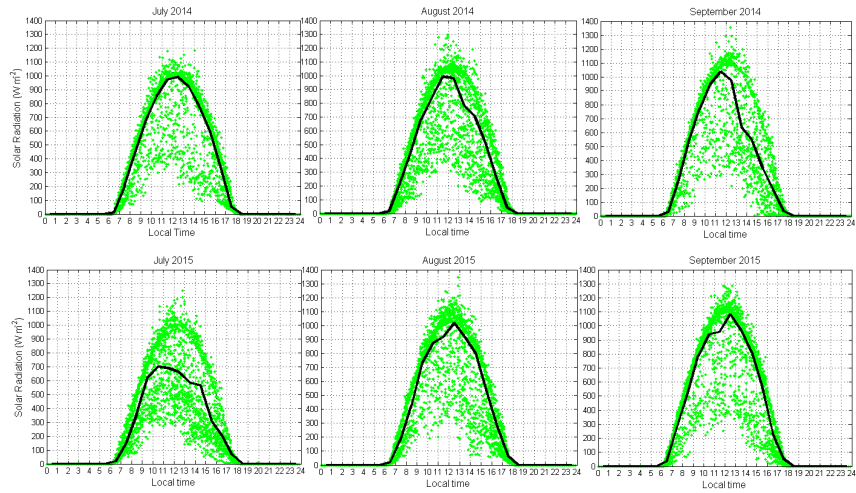


Figure 1: Solar radiation measurements for July, August and September taken at EMA during 2014 (top panel) and 2015 (bottom panel). Green points are 10-min data. Black solid line depicts the diurnal profile obtained with the hourly median.

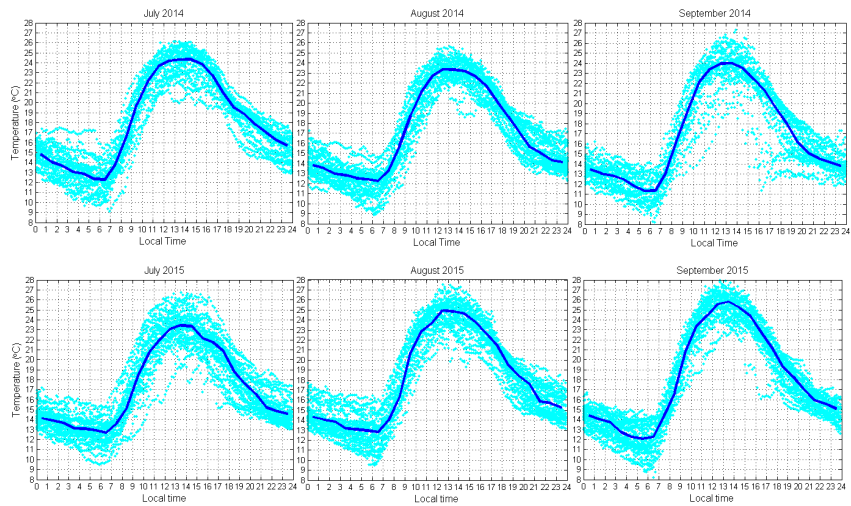


Figure 2: Ambient temperature observations for July, August and September taken at EMA during 2014 (top panel) and 2015 (bottom panel). Cyan points are 10-min data. Blue solid line depicts the diurnal profile obtained with the hourly mean.

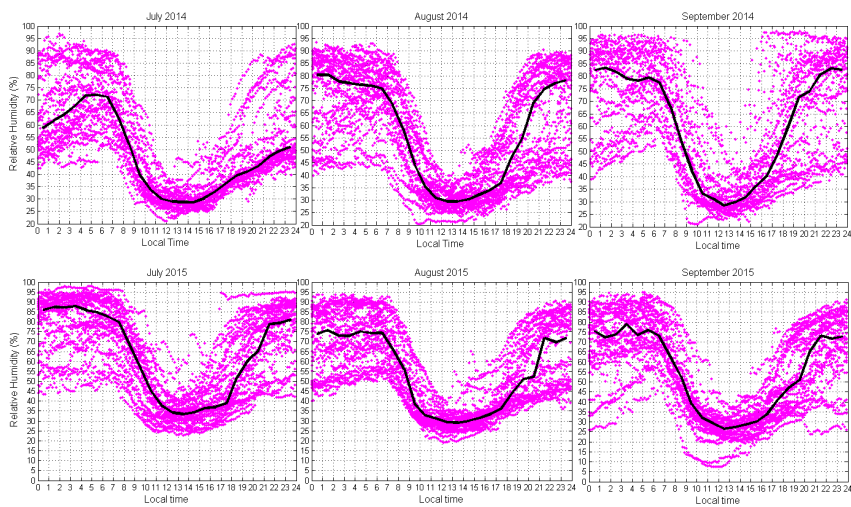


Figure 3: Relative humidity measurements for July, August and September taken at EMA during 2014 (top panel) and 2015 (bottom panel). Magenta points are 10-min data. Black solid line depicts the diurnal profile obtained with the hourly mean.

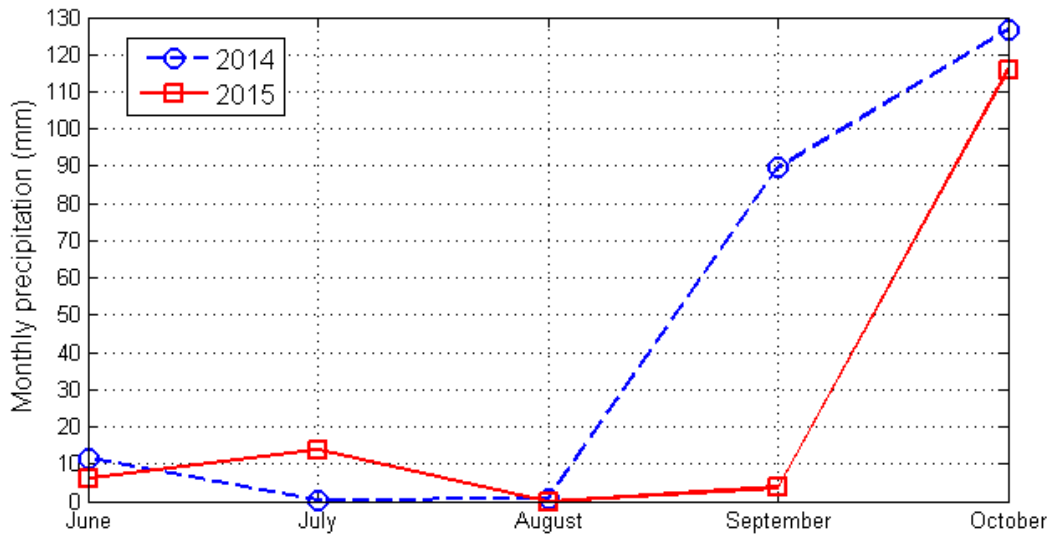


Figure 4: Cumulative monthly precipitation collected at the EMA site from June to October 2014 (blue dashed line with circles) and 2015 (red line with squares).

2014 the rainy season began on September 12th, while in 2015 the rainy season began on October 9th.

[4] Secretaría de Ambiente DMQ. 2014. "Red de Monitoreo DMQ". <http://190.152.144.75/reportes/ReporteDiariosData.aspx>.

### Summary

Data analysis shows that in 2014 the rainy season began on September 12th, after three months of scarce precipitation. During this time period, June 2014 was partially dry, while July and August 2014 were dry. In contrast, June and July 2015 were partially dry, while August was dry, and September 2015 was an extremely dry month. Thus, the rainy season in 2015 began on October 9th, after four months of scarce rainfall and almost a month later than in 2014. Additionally, September 2015 was unseasonably warm with almost 5% of the daytime temperature maxima surpassing 26°C, while in September 2014 only 0.6% of the temperature maxima surpassed the same mark. Such dry and warm conditions during September 2015 along with summertime wind gusts (not analyzed in this report) favored the pervasiveness of wild fires that devastated a considerable area of woods that surround Quito's eastern valley.

### References

- [1] COE Metropolitano (Consejo de Operaciones de Emergencia). 2015. "Análisis del Plan de Incendios Forestales en el DMQ desde Julio hasta Septiembre". Secretaría del Ambiente de Quito, Noviembre 2015.
- [2] Pacheco, M. 2015. "3102 hectáreas de espacios verdes fueron consumidas por el fuego en Quito". El Comercio. <http://www.elcomercio.com/actualidad/hectareas-espacios-verdes-consumidas-fuego.html>.
- [3] Cazorla, M.; Tamayo, E. 2014. "Atmospheric measurement station at University San Francisco de Quito (EMA): ground-based physical meteorology instrumentation and assessment of initial measurements". *Av. Cienc. Ing. (Quito)*. 6(2): C21-C30.



## Using a Multivariate Accommodation Model to Study Anthropometric Differences between Ethnic Groups in Ecuador

Jacinto J. Arichabala<sup>1</sup>, Ximena M. Cordova<sup>2\*</sup>, Gonzalo R. Mendieta<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Mathematics, Universidad San Francisco de Quito, Ecuador.

<sup>2</sup>Department of Industrial Engineering, Universidad San Francisco de Quito, Ecuador.

<sup>3</sup>Department of Economics, Universidad de las Americas, Ecuador.

\*Autor principal/Corresponding author, e-mail: jacinto\_arichabala@yahoo.com

Editado por/Edited by: Cesar Zambrano, Ph.D.

Recibido/Received: 2015/02/06. Aceptado/Accepted: 2015/04/26.

Publicado en línea/Published on Web: 2015/12/30. Impreso/Printed: 2015/12/30.

### Abstract

In this paper we use MAM to study the anthropometric differences of ethnic groups in Ecuador. The objective of this paper is to build anthropometric descriptors for men and women from groups of mestizos and indigenous inhabitants of the highlands of Ecuador and determine whether these descriptors are different for each population. We use ten anthropometric measurements from data obtained from men and women self-identified as mestizos (639) and Indigenous (99) of the Central Sierra region of Ecuador. We carried out a principal components analysis and from these factors we built anthropometric descriptors for each individual population and the combined population. We also evaluate the level of adjustment and then we compared MAM to traditional modeling. The results show that there are differences in body configurations for different populations. For these case study we found that the MAM performs better than traditional modeling, however when we analyzed the percentage of people excluded in each population we found that there are biases in coverage.

**Keywords.** Anthropometry, ergonomics, multivariate accommodation models, ethnic groups, Ecuador

## Uso de un Modelo de Alojamiento Multivariado para estudiar las Diferencias Antropométricas entre Grupos Étnicos en Ecuador

### Resumen

En este trabajo se utiliza MAM para estudiar las diferencias antropométricas de grupos étnicos en Ecuador. El objetivo de este trabajo es construir descriptores antropométricos para hombres y mujeres de los grupos de mestizos e indígenas del altiplano del Ecuador y determinar si estos descriptores son diferentes para cada población. Utilizamos diez mediciones antropométricas de datos obtenidos de hombres y mujeres auto identificados como mestizos (639) e Indígenas (99) de la región Sierra Centro del Ecuador. Se realizó un análisis de componentes principales y de estos factores construimos descriptores antropométricos para cada población individual y la población combinada. También evaluamos el nivel de ajuste y luego comparamos MAM con el modelado tradicional. Los resultados muestran que hay diferencias en configuraciones de cuerpo para las diferentes poblaciones. Para estos caso de estudio, se encontró que el MAM se comporta mejor que el modelado tradicional, sin embargo, cuando analizamos el porcentaje de las personas excluidas en cada población encontramos que existen sesgos en la cobertura.

**Palabras Clave.** Antropometría, ergonomía, modelos de acomodación multivariante, grupos étnicos, Ecuador

### Introduction

It has been shown, that for the successfully ergonomic design, it is necessary that the anthropometric data used represent the characteristics of potential users [8]. Because many anthropometric variables vary from one population to another, when looking for an appropriate er-

gonomic design it is important that we use anthropometric data of the specific population for which the design is being sought. Although many countries have developed design guidelines that ensure the development of safe and comfortable workplaces, in Ecuador such guidelines are just beginning to gain importance [8, 12], this

despite that the Constitution of the Republic of Ecuador, in paragraph 5 of Article 326 states: “Everyone has the right to develop their work in a suitable work environment that ensures the health, integrity, safety, health and welfare of the worker“ (Constitución del Ecuador, 2008). However, this is not possible with workstations that are not designed for the people who will use them.

Traditionally, ergonomists have used anthropometric tables with the percentiles 5% and 95% to accommodate the middle 90% of the population on each variable independently. The human dimensions are multivariate in nature, with different strengths of correlation, thus the boundaries determine by this approach, which can be thought as multidimensional cube, can result in accommodation models that at times are anatomically impossible. This results in a loss of accommodation, with the corresponding increase in risks and costs. [14, 18].

More and more, the use of anthropometrics tables for accommodation purposes are being replaced by the use of Multivariate Accommodation Models (MAM) [10]. These models, albeit less simple than the use of tables, are much better suited in providing more realistic anthropometric models, which result in better designs or accommodations. MAM uses Principal Component Analysis (PCA) to reduce the dimensionality of the model., This allows us to find a small understandable set of descriptors of human dimensions. Additionally, we can find accommodation ellipsoids with fewer dimensions that in most cases will fit better than traditional modeling. In many cases it is possible to identify and map different body configurations in the ellipsoids of accommodation, thus obtaining better models for design purposes [28].

The Constitution of the Republic of Ecuador also established that Ecuador is a “multicultural and multiethnic“ state, given that ethnic diversity has always been an important factor affecting anthropometric data and the scope of their applications, are important the anthropometric research to populations data mixed with ethnic and gender information as it currently cannot be found isolated populations of these groups but rather as mixture of all together.

### Methodology

#### Objective

The aim of this work is to use MAM (Multivariate Accommodation Models) to build anthropometric descriptors for men and women from two Ecuadorian ethnic groups Mestizos and Native Ecuadorians from the Central Sierra (highland), and study whether these descriptors are sufficiently different for each population so as to have a critical impact in accommodation issues.

#### Subjects and Anthropometric Measures

For this study, we used 10 anthropometric measurements that were collected from men and women between 18

Ethnic group	Gender		
	Female	Male	Total
Mestizo	311	328	639
Native-american	52	47	99
Total	363	375	738

Table 1: Sample Size

and 65 years of age; 639 mestizos and 99 native americans. Table 1 shows the gender and ethnic distribution in the sample.

The data was collected in the provinces of Pichincha, Tungurahua, Chimborazo and Imbabura, since these provinces have the highest percentage of self-identified persons as Mestizo or Native Ecuadorians Indigenous (represented approximately 90% of the population in that region). For more details on these data see the study by [8]. For our analysis the variable Sitting Height Normal was excluded due to its very high correlation (0.89) with Sitting Height Erect. Table 2 gives the 9 measures and their definitions used in this study.

#### Principal Components Analysis

The PCA was done on the standardized variables. As a first step the correlation matrix of all the variables was examined. As mentioned above, we found, with no surprise, that Sitting Height Erect and Sitting Height Normal were very highly correlated. We decided to drop the variable Sitting Height Normal for the rest of the study.

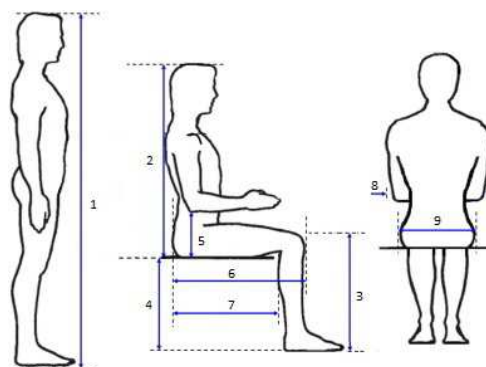


Figure 1: Anthropometric measurements, adapted from [6]

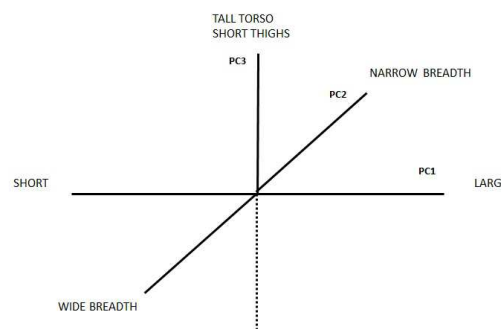


Figure 2: Anthropometric descriptors of the first 3 PCs for the mestizo males population

Measurement	Definition
1 Height	Distance vertical from the level of the patella to the floor (seated).
2 Sitting height erect	Distance vertical from the superior level of the head to the seat surface. With erect back (seated).
3 Knee Height	Distance vertical from the level of the patella to the floor (seated).
4 Popliteal height	Distance vertical from the floor to the popliteal measure with bend knees at 90 degrees (seated).
5 Elbow rest height	Distance vertical from the underside of elbow to seat surface with the arm at right angle (seated).
6 Buttock knee length	Horizontal distance from back of buttocks to knee cap (seated).
7 Buttock popliteal length	Horizontal distance from posterior buttocks to popliteal angle (seated).
8 Elbow to elbow breadth	Horizontal distance from posterior aspect of left elbow to posterior aspect of right elbow. (elbows flexed at right angle (seated).
9 Hip breadth	Horizontal distance of the hips (seated).

Table 2: Anthropometric measurements adapted from [13]

The analysis of the individual subpopulations will be presented firsts, follow by that of the combined population.

**PCA for mestizo males**

The PC loads and amount of variability accounted for by the first five standardized PCs for the male population is shown on Table 3.

Based on the results of the PCA we built the following anthropometric descriptors. PC1 has important loads in variables that contribute to tallness, while PC2 load on elbow to elbow breadth and hip breadth which seems to describe body breadth. PC3 loads heavily in sitting height erect and elbow rest height characteristics of a short torso; in addition PC3 presents positive loads on buttock knee length and long buttock popliteal length, descriptors of a body with long thighs.

Figure 2 illustrates the anthropometric descriptions of the first three PCs for the mestizo male population

**PCA for mestizo females**

The results of the PCA for the first five standardized PCs for the female population are shown on Table 4.

A similar analysis to the one done on males shows that with 5 PCs we have accounted for 80% of the variation. As before PC1 describes tallness. PC2 loads heavily on both breadth measures so it seems that PC2 measures breadth, while PC3 loads positively knee height and popliteal height and also loads negatively in buttock knee length and buttock popliteal length seems to describe short thighs and long legs.

When we compare the analysis of the male and female populations we see that the descriptors of PC1 and PC2

are very similar. The case of PC3 is particular in as much we cannot give this component a similar interpretation in both case.

The Figure 3 illustrates the anthropometric descriptions of the first three PCs for the female population.

**PCA for indigenous males**

The PC loads and amount of variability accounted for by the first five standardized PCs for the male population is shown on Table .

Looking at the results of the PCA we built anthropometric descriptors. The PC1 loads heavily negatively on the variables knee height and popliteal height that gives us information about a person with short legs, while the PC2 loads on the variables buttock knee length and buttock popliteal length characteristics of a body of long thighs. PC3 has high correlation with variables height, sitting height erect and hip breadth that seems to describe a small and narrow torso.

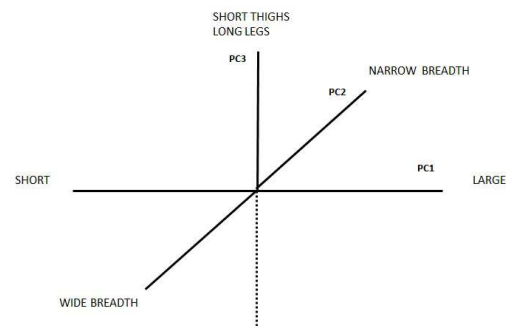


Figure 3: Anthropometric descriptors of the first 3 PCs for the mestizo female population.

Dimension	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
Height	-0.443	0.075	-0.312	0.344	-0.131
Sitting height erect	-0.356	-0.156	-0.531	0.142	-0.052
Knee height	-0.432	0.275	0.080	-0.414	-0.031
Popliteal height	-0.405	0.298	-0.023	-0.514	-0.059
Elbow rest height	-0.050	-0.445	-0.484	-0.192	0.481
Buttock knee lenght	-0.366	0.008	0.224	0.553	-0.195
Buttock poplietal lenght	-0.333	0.058	0.392	0.151	0.699
Elbow to elbow breadth	-0.194	-0.544	0.208	-0.239	-0.459
Hip breadth	-0.201	-0.555	0.363	-0.062	0.084
<i>Standard deviation</i>	1.56	1.22	1.11	1.03	0.90
<i>Proportion of variance</i>	0.27	0.17	0.14	0.12	0.09
<i>Cumulative proportion</i>	0.27	0.44	0.57	0.69	0.78

Table 3: PC loads and variability for the first five PCs (mestizos males)

Dimension	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
Height	0.427	-0.216	0.050	-0.414	0.168
Sitting keight erect	0.421	0.024	0.209	-0.312	0.437
Knee height	0.276	-0.068	0.570	0.273	0.205
Popliteal height	0.247	-0.100	0.518	0.172	-0.663
Elbow rest height	0.156	0.505	-0.043	-0.589	-0.342
Buttock knee lenght	0.380	-0.289	-0.451	0.188	-0.113
Buttock poplietal lenght	0.431	-0.280	-0.361	0.077	-0.206
Elbow to elbow breadth	0.273	0.536	-0.116	0.213	-0.176
Hip breadth	0.271	0.483	-0.106	0.441	0.311
<i>Standard deviation</i>	1.62	1.24	1.16	0.95	0.88
<i>Proportion of variance</i>	0.29	0.17	0.15	0.10	0.09
<i>Cumulative proportion</i>	0.29	0.46	0.61	0.71	0.80

Table 4: PC loads and variability for the first five PCs (Mestizo females)

Dimension	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
Height	0.174	-0.300	-0.377	0.490	0.006
Sitting height erect	-0.242	-0.285	-0.474	0.027	0.217
Knee height	-0.586	0.153	-0.150	0.269	-0.026
Popliteal height	-0.611	0.204	-0.138	0.106	-0.153
Elbow rest height	0.289	0.195	-0.291	0.308	0.574
Buttock knee lenght	0.210	0.561	-0.298	0.153	-0.200
Buttock poplietal lenght	0.084	0.417	0.372	0.499	-0.114
Elbow to elbow breadth	0.192	-0.336	-0.150	0.278	-0.697
Hip breadth	0.152	0.352	-0.507	-0.480	-0.248
<i>Standard deviation</i>	1.42	1.30	1.14	1.01	0.93
<i>Proportion of variance</i>	0.23	0.19	0.15	0.11	0.10
<i>Cumulative proportion</i>	0.23	0.41	0.56	0.67	0.77

Table 5: PC loads and variability for the first five PCs (indigenous males)

It is important to note that the PC1 is a descriptor of tallness in all locations except for this population; the Figure 4 illustrates the anthropometric descriptions of the first three PCs for the indigenous male population.

**PCA for indigenous females**

The loads corresponding to the 5 PC's and its variability explained is shown on Table . Note that 5 components capture 84% of the variability.

In this case PC1 also loads on variables that contribute to the tallness. PC2 loads significantly in knee height

and popliteal height and strongly negatively on the buttock knee length and buttock popliteal length variables that describe a body of small thighs and long legs, while PC3 loads on hip breadth and elbow rest height features of a short torso and wide breadth.

**PCA for the combine population**

After analyzing the individual populations we proceeded to carry a similar analysis on the combine population. The results of the PCA are shown on Table .

With 5 PCs we have accounted for 82% of the variation.

Dimension	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
Height	-0.416	0.016	-0.386	0.016	-0.360
Sitting height erect	-0.300	0.168	0.283	-0.143	-0.646
Knee height	-0.217	0.618	-0.008	0.177	0.207
Popliteal height	-0.231	0.626	0.005	0.054	0.134
Elbow rest height	-0.258	-0.236	-0.409	0.459	-0.282
Buttock knee lenght	-0.494	-0.258	0.249	0.137	0.316
Buttock poplietal lenght	-0.488	-0.267	0.279	0.094	0.307
Elbow to elbow breadth	0.246	0.059	-0.129	0.737	0.084
Hip breadth	0.164	0.015	0.669	0.405	-0.335
Standard deviation	1.64	1.40	1.06	0.99	0.92
Proportion of variance	0.30	0.22	0.13	0.11	0.10
Cumulative proportion	0.30	0.52	0.64	0.75	0.84

Table 6: PC loads and variability for the first five PCs (indigenous females)

Dimension	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
Height	-0.450	0.113	-0.147	0.234	-0.302
Sitting Height erect	-0.424	0.031	-0.006	0.296	-0.306
Knee height	-0.400	0.144	0.440	-0.051	0.176
Popliteal height	-0.356	0.142	0.540	-0.051	0.352
Elbow rest height	-0.012	-0.439	-0.086	0.764	0.437
Buttock knee lenght	-0.366	0.021	-0.526	-0.189	0.052
Buttock poplietal lenght	-0.361	0.002	-0.419	-0.248	0.447
Elbow to elbow breadth	-0.254	-0.540	0.156	-0.078	-0.491
Hip Breadth	-0.056	-0.678	0.096	-0.407	0.158
Standard deviation	1.82	1.17	1.03	1.00	0.83
Proportion of Variance	0.37	0.15	0.12	0.11	0.08
Cumulative Proportion	0.37	0.52	0.64	0.75	0.83

Table 7: PC loads and variability for the first five PCs (Combine)

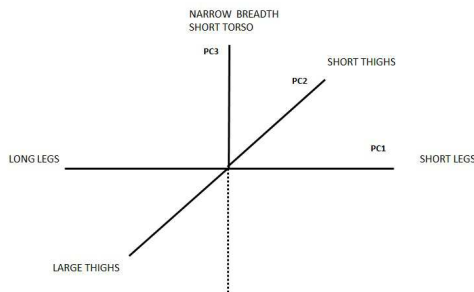


Figure 4: Anthropometric descriptors of the first 3 PCs for the indigenous male population

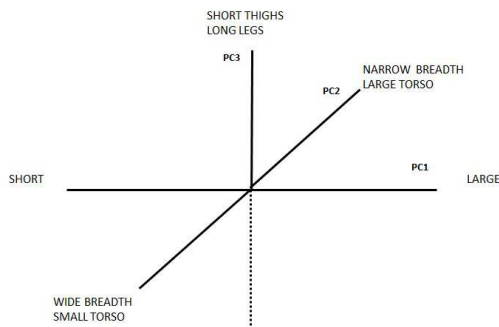


Figure 5: Anthropometric descriptors of the first 3 PCs for the indigenous female population

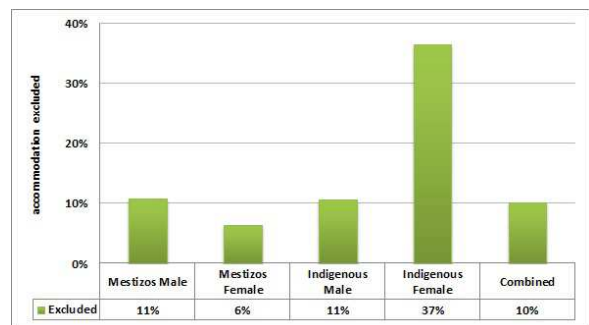


Figure 6: BIAS in MAM combined population coverage.

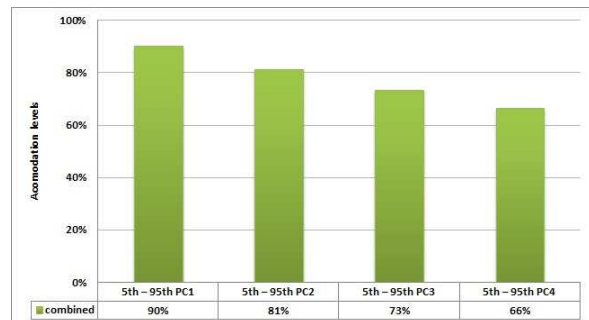
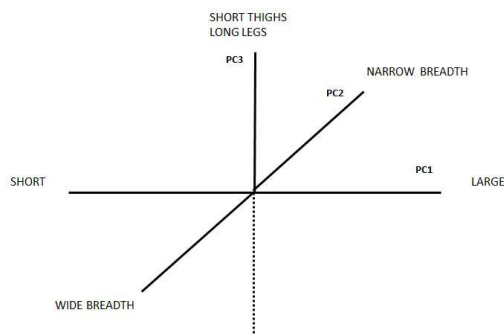


Figure 7: Sequential reduction in accommodation levels using progressive cuboids in the combine population.





**Figure 8: Anthropometric descriptors for the first three PCs (combine population).**

PC1 is still a descriptor of Tallness. However one must be aware that the directions are opposite in some cases to the individual populations. PC2 is very similar to PC2 of the mestizo male population. Similarly we can observe that the PC3 is similar to PC3 of mestizo female population.

This combine analysis seems to confirm that in very few instances a mixture of two populations may be adequately analyzed, for the purpose of interpretability, as a single population. The fact that loads on the PCs of the combine population seem to be dissimilar (signs) to those on the individual population hints to the possibility that coverage of the accommodation ellipsoid, although correct, might exclude disproportionately individuals from one of the populations. We can also note that the descriptors represent the largest populations excluding the representation of minorities or small populations.

When the mix of the population is complex even MAM does not work very well, and it is important to consider the bias in coverage, Figure 6, shows that there is a marked bias in the coverage of the population of indigenous women.

In Figure 7, below, we illustrate the reduction of accommodation when using cuboids as oppose to ellipsoids in the first four PC

For illustration purposes we include Figure 8, which contains the corresponding anthropometric descriptors for the combined population

### Conclusions and Future Work

We have built anthropometric descriptors for each population and we have found that different configurations according to gender and ethnicity, these descriptors can be used to build stations suitable for these groups, since as has been demonstrated using the MAM carries higher levels of accommodation

In the combined analysis we have found that the descriptors represent the largest populations excluding the representation of minorities or small populations, we

have also found bias in the coverage of the ellipsoids of accommodation. It seems important to study when empirical ellipsoids for the combined populations do not have the desired coverage and also when they show bias towards one of the subpopulations.

It is important that Ecuador counts with anthropometric descriptors for each ethnic group, as has been observed [12] there are significant differences between anthropometric dimensions of each group and gender. It is recommended the study be extended to cover such ethnic groups from the coast like cholos, mestizos, montubios and afroecuatorianos. Also it is important to have larger samples for this groups and more anthropometric variables.

### References

- [1] Arichabala, J.; Córdova, X.; García, G.; Mendieta, G. 2013. "Model to Using a Multivariate Accommodation Study a Mixed Population". *The 2nd Industrial And Systems Engineering World Conference*.
- [2] Ash, R. 1972. "Real Analysis and Probability". *Academic Press, New York*.
- [3] Carranza, A. "El Uso de Tablas Antropométricas en Ergonomía". *Ergonomía Ocupacional S.C.*
- [4] Cobb, G. 2008. "Introduction to Design and Analysis of Experiments". *Wiley*.
- [5] Córdova, X; Fernández, J. 1994. "Conceptual errors in anthropometric percentile values for mixed populations". *Advances in Industrial Ergonomics and Safety*, 6:697-704.
- [6] Dianat, I; Ali Karimi, M.; Asl Hashemi, A; Bahrampour, S. 2013. "Classroom furniture and anthropometric characteristics of Iranian high school students: Proposed dimensions based on anthropometric data". *Applied Ergonomics*, 44: 101-108.
- [7] Fernández, J.; Marley, R; Noriega, S.; Ibarra, G. 2008. "Ergonomía Ocupacional. Diseño y Administración del Trabajo". *International Journal of Industrial Engineering*.
- [8] García, G.; Córdova, X. 2012. "Anthropometric Study of Ecuadorian Higher Education Community". *The 1st Industrial And Systems Engineering World Conference*.
- [9] Gordon, C.; Corner, B. 2004. "Multivariate Anthropometric Models for Soldier System Design, Testing, and Validation". *International Soldier System Conference*.
- [10] Guan, J.; Hsiao, H.; Bradtmiller, B; Kau, T.; Reed, M.; Jahns, S.; Loczi, J.; Hardee, L.; Piamonte, D. 2012. "U.S. Truck Driver Anthropometric Study and Multivariate Anthropometric Models for Cab Designs". *The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*.
- [11] Lema, D.; García, G.; Córdova, X. 2013. "Anthropometric Comparison among Three Ethnic Groups of Ecuadorian Highland Region". *The 2nd Industrial And Systems Engineering World Conference*.

- [12] Lin, Y.; Wang, M.; Wang, E. 2004. "The comparisons of anthropometric characteristics among four people in East Asia". *Applied Ergonomics*.
- [13] Moroney, W.; Smith, M. 1972. "Empirical Reduction in Potential User Population as the Result of Imposed Multivariate Anthropometric Limits". *Naval Aerospace Medical Research Laboratory*.
- [14] Moyano, H. 2007. "Mezclas Finitas de Distribuciones Normales: Una alternativa para Clasificar". *Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ciencias, Escuela de Matemáticas*.
- [15] Peña, D. 2002. "Análisis de Datos Multivariantes". *Mc Graw-Hill*.
- [16] Pheasant, S.; Haslegrave, C. 2005. "Anthropometry, Ergonomics and the Design of Work, Third Edition". *CRC Press, Taylor and Francis Group*.
- [17] Robinette, K; McConville, J. 1981. "An Alternative to Percentile Models". *Society of Automotive Engineers*.
- [18] Ross, S. 2009. "A First Course in Probability". *Pearson*.
- [19] Shiriyayev, A. 1984. "Probability". *Springer-Verlag*.
- [20] Valero, E. 2013. "Antropometría". *Centro Nacional de Nuevas Tecnologías Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo*
- [21] Vapnik, V. 1998. "Statistical Learning Theory". *Wiley-Interscience*.
- [22] Vera, D. 2005. "Paquete de R para selección de variables en regresión lineal utilizando componentes principales". *Universidad San Francisco de Quito*.
- [23] Zehner, G.; Meindl, R.; Hudson, J. 1993. "A Multivariate Anthropometric Method for Crew Station Design: Abridged". *Human Engineering Division, Armstrong Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base*.

## Spatial Variability of Water Retention Curve Fractal Dimension

Samuele De Bartolo<sup>1\*</sup>, Carmine Fallico<sup>1</sup>, María Fernanda Rivera-Velasquez<sup>2</sup>, Massimo Veltri<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Università della Calabria, Dipartimento di Ingegneria Civile, Ponte P. Bucci Cubo 41 B, 87036, Rende, Italia.

<sup>2</sup>Universidad Nacional de Chimborazo, Facultad de Ingeniería, Avenida Antonio José de Sucre, EC060104 Riobamba, Ecuador.

\*Autor principal/Corresponding author, e-mail: samuele.debartolo@unical.it

Editado por/Edited by: Cesar Zambrano, Ph.D.

Recibido/Received: 2015/10/16. Aceptado/Accepted: 2015/11/20.

Publicado en línea/Published on Web: 2015/12/30. Impreso/Printed: 2015/12/30.

### Variabilidad Espacial de Dimensiones Fractales en Curvas de Retención de Agua

#### Abstract

The study of spatial variability of specific quantities characterizing the unsaturated soil is very important for the evaluation of polluting phenomena. Geostatistics is a useful tool for estimating the spatial variability of the considered parameters. The aim of this study is to improve the understanding of the spatial variability of the fractal dimension of water retention curves, showing the behaviour of this parameter in the site examined and particularly at the points where measures were not performed. The assessment of the fractal dimension was calculated by the analysis of scaling obtained from some fractal models and a comparison among the correspondent results was performed.

**Keywords.** Water Retention Curves, Geostatistics, Fractal Dimension, Scaling Analysis.

#### Resumen

El estudio de la variabilidad espacial de específicas magnitudes que caracterizan el suelo no saturado es muy importante para la evaluación de los fenómenos de contaminación. La Geoestadística es una herramienta útil para la estimación de la variabilidad espacial de los parámetros considerados. El objetivo de este estudio es mejorar la comprensión de la variabilidad espacial de la dimensión fractal en las curvas de retención de agua, mostrando de esta manera el comportamiento de este parámetro en los puntos muestreados y de manera particular en los puntos donde no existen muestras. La evaluación de la dimensión fractal se calculó por el análisis de escalamiento obtenido a partir de algunos modelos fractales y la posterior comparación entre los resultados correspondientes.

**Palabras Clave.** Curvas de retención del agua, Geoestadística, Dimensión Fractal, Análisis de escalamiento.

#### Introduction

By using fractal geometry to characterise pore space, groundwater behaviour can be effectively related to the water and structural properties in the soil. The available field and laboratory methods that are able to define correctly the properties of unsaturated soil are very expensive and time-consuming. In the literature there are many models that can interpret various phenomena by fractal geometry characterising the porous media, such as water retention curves (WRC) and hydraulic conductivity [1]. These models were the outcome of theoretical and experimental studies designed to describe soil fractal structure in terms of soil particle size distribution [2], solid aggregate typology distribution [3, 4], pore-solid interface area [5], pore-phase fractal mass [6, 7] and solid-phase fractal mass [8–10]. Essentially, the basic fractal scheme used in these models to describe soil

fractal scaling behaviour in terms of either the solid or the pore phase is the Menger sponge [5, 11, 12]. These models are characterized by a single geometric parameter that represents a scale invariant, namely, the fractal dimension ( $D_f$ ) [11]. Different studies [2, 5, 8, 9, 11, 12] show that in the porous media the scaling law represents a connection among water contained, matrix potential and the porous medium. Therefore, the valuation of the fractal dimension is very important on the field scale, because this value is correlated to the scale process of WRC at the single point of measure. In fact, it could be of great interest to have not only information on WRC in each location where the sampling was carried out, but, obviously, also at other points where this measure was not performed. For this purpose, the geostatistic [13, 14] offers a group of methods to describe quantitatively the spatial continuity that is an essential feature of many natural phenomena [15, 16]. Therefore

ISSN 1390-5384



this approach allows the fractal dimension to be considered as a random function and to be represented on the field scale of the measures. The fractal dimension distribution is performed beginning from the knowledge of the WRC in a limited series of points on the specific area investigated. That allows useful information to be obtained about the fractal dimension values also at points where the measurements are lacking. The comparison among the results obtained in this way by the fractal models permits interesting considerations on the availability of these for the retention curve description.

## Materials and Methods

### Description of investigation area

The site where the measurements took place is an experimental field of the Turbolo basin in Calabria, Italy (Fig. 1), which furnishes the data set for the spatial characterisation of the fractal dimension through geostatistical analysis. This site covers an area of 2800 m<sup>2</sup> (70 x 40 metres) and a specific instrumentation was used for continuous monitoring, at various locations and at different depths. To characterize the unsaturated soil, an experimental field was selected with a rectangular surface of 800 m<sup>2</sup> (40 x 20 metres), sloping lengthwise at a gradient of about 6%. Metallic cylinders 0.05 metres in diameter and 0.051 metres high, with a sharp bottom rim for better penetration, were pressed vertically into the undisturbed soil to take a total of 30 cores. Fig. 1 shows the locations where the undisturbed soil cores were extracted. These samples were analysed in the laboratory, where the particle size distribution, the bulk density, the saturated hydraulic conductivity and the water content at different pressure heads were determined to plot the WRC, by using the conventional Richards apparatus.

### Fractal models for WRC definition

The use of WRC fractal models and the spatial interpolation methods allows indications to be obtained about

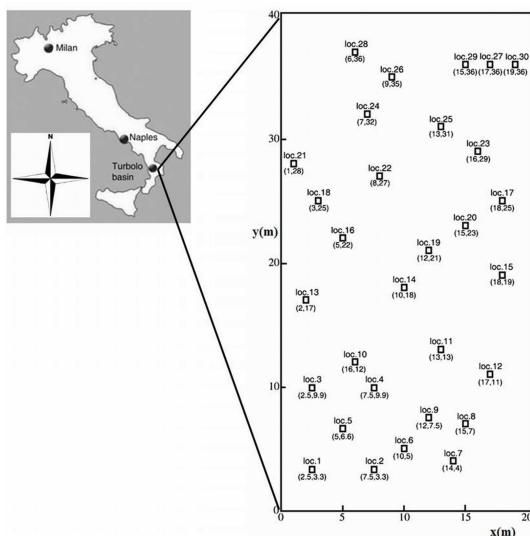


Figure 1: Turbolo River and experimental field.

the soil spatial variability i. e. of the characteristic soil parameters, specifically of the  $D_f$ . The literature shows that fractal geometry has been successfully used to interpret water retention and the variability of hydraulic conductivity in soils with different textural structures [4, 17, 18]. Among the existing fractal models and according to Perfect et al. [19] the WRC are commonly grouped in three classes namely the Tyler and Wheatcraft [20] (TW), the Rieu and Sposito [8, 9] (RS) and the Perrier et al. [22] pore solid fractal (PSF) models.

The model of Tyler and Wheatcraft [20] is based on a two-dimensional Sierpiński carpet stretched to form a capillary bundle, and is easily extensible to three dimensions. This model is applied within the limit of infinite iterations when the porosity is unity. The analytic expression of TW model is the following:

$$\theta(h) = \theta_S \left( \frac{h}{h_{min}} \right)^{D_f - 3} \quad (1)$$

where  $\theta_S$  is the saturated water content,  $h$  is the generic water potential,  $h_{min}$  is the water potential commonly named air-entry value [21] and  $D_f$  is the fractal dimension.

The Rieu and Sposito [8, 9] model treats the WRC as a partially fragmented porous medium with porosity less than or equal to 1. This model can be represented by the following relation:

$$\theta(h) = \theta_S - 1 + \left( \frac{h}{h_{min}} \right)^{D_f - 3} \quad (2)$$

where the parameters assume the same mean as shown above.

The model of Perrier et al. [22], known as the pore-solid fractal (PSF) model, represents a generalization of the solid and pore mass fractal models. Similarly to the TW and RS models, the PSF model characterises both the solid and pore phases of the porous media. It also exhibits self-similarity to a degree, in the sense that where local structure occurs, it is seen to be similar to the whole structure [12].

According to Bird et al. [12], the PSF model can be represented by the following relation:

$$\theta(h) = (\theta_S - A) - A \left( \frac{h}{h_{min}} \right)^{D_f - 3} \quad (3)$$

In equation (3) the parameter  $A$  is defined as [23]:

$$A = \frac{p}{p + s} \quad (4)$$

where  $p$  and  $s$  are the pore and solid phase fractions at each scale. This parameter is variable between the saturated water content ( $\theta_S$ ) and 1 (i.e.  $\theta_S \leq A \leq 1$ ).

Evaluating the (1), (2) and (3) expressions, the fractal dimension can be estimated by analysing the log-log plots of  $\theta^*$  versus  $(h_{min}/h)$ , in which  $\log\theta^*$  is defined as follows:

$$\begin{aligned} \log \theta^* &= \log \frac{\theta}{\theta_s}; \log \theta^* = \log (\theta + 1 - \theta_s); \\ \log \theta^* &= \log \frac{\theta + A - \theta_s}{A} \end{aligned} \quad (5)$$

respectively for the TW, RS and PSF models. More precisely,  $D_f$  is calculated in the scaling range that is delimited by lower  $\log (h/h_{min})_{inf}$  and upper  $\log (h/h_{min})_{sup}$  values, where the determination coefficient  $R^2$  of the regression curve is maximum. Commonly for each WRC, it is possible to identify two scaling ranges: one lower for very low water content and the other upper for larger water contents [5, 11, 24, 25].

**Assessment of the fractal dimension**

The individualization of fractal dimension distribution can be carried out considering the scaling procedure defined in Fallico et al. [25], analysing the log-log plots of  $\theta^*$  versus  $(h_{min}/h)$ , in which  $\log\theta^*$  is defined for each fractal model by relations (5).

Specifically, according to experimental studies by Toledo et al. [5], Millàn and Gonzàles-Posada [24] and Fallico et al. [25], it is possible to define two scaling ranges of the WRC, one for the larger and the other for the smaller water contents. In this context the fractal dimension can be defined, for each of the two scaling ranges, as the slope of the straight regression line interpolating the experimental WRC points with the highest coefficient of determination  $R^2$  [26]. This procedure allows the scaling range to be determined in which the fractal dimension is an invariant of scale. The WRC models considered in the present study are the three represented by the relationships (1), (2) and (3) above shown. Since the methodology of the fractal analysis and also the results are those reported in Fallico et al. [25], where all the setting values are defined, the reader should refer to this study for all details. Altogether, ten data sets of the fractal dimensions were considered, specifically, five samples are related to the lower range (I) and the others represent the upper range (II). These values include also the three relative to the PSF model, with  $A=0.30$ ,  $A=0.45$  and  $A=0.60$ , that are representative of the examined unsaturated soil [25]. This was carried out for each location. By means of a geostatistics analysis performed for each model data set to individualise the spatial distribution of the fractal dimension, in the present study we checked the reliability of the models and defined that showing the best fitting of the measured values. This latter approach can be considered an extension of the investigation carried out previously by Fallico et al. [25].

**Geostatistical analysis**

The theoretical basis of the geostatistics was described by several authors [16, 27]. This procedure represents a class of statistical techniques developed to analyse and predict values of a variable distributed in space or time. Generally, geostatistics is accepted as a science to study the random and structural character or spatial autocorrelation [28] of natural phenomena with the support of Regionalized Variables Theory and variograms [13, 16].

The exploratory data analysis (EDA) is the preliminary phase of geostatistical analysis. This procedure identifies the principal parameters of descriptive statistic performing a graphical description of the data set (Box-plot, Q-Q plot etc.). Then the EDA represents a good method to locate anomalous values (outliers) [29] and to verify the existence of outliers by statistics tests [30]. In the geostatistics a normal and/or lognormal distribution of the variable under study is desirable when the hypothesis of stationarity occurs [31] and different hypothesis tests can be considered [32, 33] to effect the verification of this hypothesis. In geostatistics, the modeling of spatial data is accomplished through the calculation of the experimental variogram, showing the increase in variability between sample locations and a generic point. The variogram describes the spatial relationship between the sample values as a function that relates the variance ( $\gamma$ ) to the distance of sample separations ( $d$ ) usually called lag. The variogram equation is given as [13]:

$$\gamma(d) = \frac{1}{2N(d)} \sum_{i=1}^{N(d)} [z(u_i) - z(u_i + d)]^2 \quad (6)$$

where  $N(d)$  is the number of sample pairs [13, 34],  $\gamma(d)$  is the semivariance,  $z(u_i)$  and  $z(u_i + d)$  are the observation values of the studied variable measured at point  $u_i$  and at a point separated by  $d$  vector, respectively. To verify the presence of eventual anisotropy in the data, often the variogram surface [16] and/or the directional variograms [14, 15] are usually displayed. The anisotropy of the variogram surface (these values tend to be more similar in one or more preferred directions than in others) reveals a covariance structure that is usually related to the orientation of natural phenomena acting in the studied area; the directional variograms reveal the changes in the variogram parameters as the direction changes when the phenomenon is anisotropic. The experimental variogram is commonly fitted by using a mathematical equation [15, 16] whose main parameters are sill ( $C$ ) or partial sill ( $C_1$ ), range ( $A$ ) and nugget ( $C_0$ ). The variogram model is a curved line through the experimental variogram points. Afterwards, the interpolation phase is commonly performed to obtain the spatial distribution of the investigated parameter according to the purpose of the geostatistical methodology. In the field of Earth Sciences this phase is named kriging, which is one of the most commonly used estimation techniques that uses variogram model parameters. It is a



Fractal Model	Min.	Max.	Mean	Median	Stand. Error	Stand. Dev.	Var.	Kurt.	Skew.
TW(I)	2.8943	2.9779	2.9509	2.9530	$3.30 \cdot 10^{-3}$	$1.80 \cdot 10^{-2}$	$3.30 \cdot 10^{-4}$	3.5408	-1.5992
RS(I)	2.9630	2.9931	2.9836	2.9842	$1.18 \cdot 10^{-3}$	$6.50 \cdot 10^{-3}$	$4.22 \cdot 10^{-5}$	3.2441	-1.5044
PSF0.30(I)	2.8468	2.9731	2.9327	2.9323	$4.81 \cdot 10^{-3}$	$2.59 \cdot 10^{-2}$	$6.72 \cdot 10^{-4}$	2.9248	-1.1723
PSF0.45(I)	2.8964	2.9834	2.9583	2.9603	$3.32 \cdot 10^{-3}$	$1.82 \cdot 10^{-2}$	$3.31 \cdot 10^{-4}$	4.3097	-1.7475
PSF0.60(I)	2.9305	2.9880	2.9706	2.9719	$2.23 \cdot 10^{-3}$	$1.22 \cdot 10^{-2}$	$1.49 \cdot 10^{-4}$	3.7734	-1.6387
TW(II)	2.7423	2.8362	2.7782	2.7715	$5.06 \cdot 10^{-3}$	$2.63 \cdot 10^{-2}$	$6.93 \cdot 10^{-4}$	-0.1022	0.8807
RS(II)	2.9388	2.9616	2.9476	2.9468	$9.22 \cdot 10^{-4}$	$4.79 \cdot 10^{-3}$	$2.29 \cdot 10^{-5}$	1.4767	0.8048
PSF0.30(II)	2.1094	2.6960	2.5322	2.5688	$2.64 \cdot 10^{-2}$	$1.37 \cdot 10^{-1}$	$1.89 \cdot 10^{-2}$	1.9191	-1.2707
PSF0.45(II)	2.8063	2.8757	2.8342	2.8294	$3.30 \cdot 10^{-3}$	$1.71 \cdot 10^{-2}$	$2.94 \cdot 10^{-4}$	-0.1562	0.4601
PSF0.60(II)	2.8806	2.9229	2.8961	2.8952	$1.83 \cdot 10^{-3}$	$9.53 \cdot 10^{-3}$	$9.08 \cdot 10^{-5}$	1.001	0.6895

**Table 1: Parameters of EDA (minimum, maximum, mean, median, standard error, standard deviation, variance, kurtosis, skewness) of sets derived from the  $D_f$  values calculated for the first (I) and second (II) range and for each considered fractal model.**

method of interpolation which predicts unknown values from data observed at known locations and it minimizes the variance of the chosen linear combination of the data subject to the constraint that the estimator must be unbiased. In the present paper, the ordinary kriging [15, 16] is chosen to interpolate the punctual data of examined variable. Assuming the intrinsic hypothesis, the linear system of ordinary kriging equations can be expressed as:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N \lambda_i \gamma(u_i, u_j) + \mu = \gamma(u_i, u) \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{cases} \quad (7)$$

where  $\lambda_i$  is an unknown weight for the measured value at the  $i$  location,  $\mu$  is Lagrange multiplier,  $\gamma(u_i, u_j)$  is the value of variogram corresponding to a vector with origin in  $u_i$  and extremity  $u_j$  and  $\gamma(u_i, u)$  represent the variogram between  $u_i$  and  $u$  (unsampled location). Moreover, to estimate the values at new locations, a statistical spatial prediction technique, producing a measure of the uncertainty associated with a given model, was utilized. In geostatistics, this is often referred to as the prediction variance, i.e. the estimated variance of the prediction error. The ordinary kriging variance is defined as [14]:

$$\sigma^2(u) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(u_i, u) - \mu \quad (8)$$

This parameter depends on the data configuration but does not depend on the data values. To check the optimal adaptation of the variogram model (or theoretical) with the experimental variogram, a cross-validation was applied [35]. This procedure consists in the application of the spatial model selected to predict a value in each sampling point. The cross-validation compares the predicted and observed data; the difference between these values is called error of estimate. Two diagnostics statistics are performed to verify the reliability of the

model. The mean deviation or mean error ( $ME$ ) is given by the following expression:

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [z^*(u_i) - z(u_i)] \quad (9)$$

where  $z^*(u_i)$  is the measured value at the  $i$  location and  $z(u_i)$  the estimated value. The variance of standardised error ( $VSE$ ) can be expressed as:

$$VSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{[z^*(u_i) - z(u_i)]^2}{\sigma^2(u_i)} \quad (10)$$

in which  $\sigma^2(u_i)$  is the kriging variance. The  $VSE$  parameter corresponds to the relationship between the experimental and theoretical variance. If the variogram model is careful then the mean error should be ideally 0 because the kriging is unbiased, while the  $VSE$  value should be 1.

## Results y Discussion

In Table 1 the parameters of EDA, comprising the  $D_f$  values calculated for the first (I) and second (II) range of scaling, are summarised for all the considered fractal models.

These results show that the RS model, for high (I) and low (II) water contents, has a medium value of fractal dimension equal to 2.9836 and 2.9476, respectively. Then for this fractal model the variable has the highest values. The averages of the data sets for high water contents are between 2.9327 and 2.9836, while for low water contents the average values are included in a larger range, that is, between 2.5322 and 2.9476. This situation leads to a first consideration of a consistent heterogeneity of fractal dimension values for the second range of scaling, even if the number of the experimental points for this range is very limited. Both for high and low water contents, the RS model shows the smallest values of variance that are  $4.22 \cdot 10^{-5}$  and  $2.29 \cdot 10^{-5}$ , respectively, whereas the PSF model with  $A=0.30$  has the largest values,  $6.72 \cdot 10^{-4}$  and  $1.89 \cdot 10^{-2}$ .

Test	TW (I)		RS (I)		PSF <sub>0.30</sub> (I)		PSF <sub>0.45</sub> (I)		PSF <sub>0.60</sub> (I)	
	Norm.	Lognorm.	Norm.	Lognorm.	Norm.	Lognorm.	Norm.	Lognorm.	Norm.	Lognorm.
<b>K-S</b>	0.1596	0.1598	0.1403	0.1382	0.1194	0.1227	0.1572	0.1561	0.1483	0.1467
<b>A-D</b>	1.1204	1.1230	0.9560	0.9416	0.4776	0.4788	1.1417	1.1424	1.0607	1.0534
$\chi^2$	1.5528	1.5531	1.6453	1.6474	0.16834	0.1800	0.8223	0.8198	0.8221	0.8224
Test	TW (II)		RS (II)		PSF <sub>0.30</sub> (II)		PSF <sub>0.45</sub> (II)		PSF <sub>0.60</sub> (II)	
	Norm.	Lognorm.	Norm.	Lognorm.	Norm.	Lognorm.	Norm.	Lognorm.	Norm.	Lognorm.
<b>K-S</b>	0.1596	0.1598	0.1403	0.1382	0.1194	0.1227	0.1572	0.1561	0.1483	0.1467
<b>A-D</b>	1.1204	1.1230	0.9560	0.9416	0.4776	0.4788	1.1417	1.1424	1.0607	1.0534
$\chi^2$	1.5528	1.5531	1.6453	1.6474	0.1683	0.1800	0.8223	0.8198	0.8221	0.8224

Table 2: Numerical results of the K-S, A-D and  $\chi^2$  tests; (I) and (II) are the two scaling ranges of the high and low water contents, respectively.

The kurtosis coefficient is always positive for all the fractal models, therefore the data sets have a leptokurtic distribution. Only the TW and PSF with  $A=0.45$  for low water contents differ because the kurtosis coefficient is negative. For all the fractal models with high water contents and for the PSF model with  $A=0.30$  and for low water contents, the skewness negative indicates that the mean is to the left of the median of the distributions. For the others fractal models this parameter is positive. To verify the assumption around the normal and/or lognormal distribution of the data sets, the Kolmogorov-Smirnov (K-S), Anderson-Darling (A-D) and Chi-Square ( $\chi^2$ ) hypothesis tests were used. Table 2 gives the results of these tests, for which the significance level  $\alpha$  is 0.05. It can be verified that the statistical value always results smaller than the critical values that are 0.242, 2.502 and 7.815 for K-S, A-D and  $\chi^2$  tests, respectively. Then, all the data sets of  $D_f$  associated with each fractal model can be well interpreted with normal and log-normal distributions.

To check the presence of anomalous values in the data sets, the Dixon test was used. The statistic experimental parameter ( $Q_{exp}$ ) is compared to a critical value ( $Q_{crit}$ ) that is possible to find in specific tables [30] and for different values of the significance level ( $\alpha$ ). Table 3 gives the outliers values with respective locations and the results of the Dixon test for each fractal model and for high and low water contents.

Fractal Model	Location	Outlier	$Q_{exp}$	$Q_{crit}$ ( $\alpha=0.1$ )
TW(I)	2	2.89426	0.4438	0.285
	26	2.90098		
RS(I)	2	2.96688	0.4310	0.285
	26	2.96295		
PSF <sub>0.30</sub> (I)	2	2.84677	0.3887	0.218
PSF <sub>0.45</sub> (I)	2	2.9140	0.4937	0.285
	26	2.89643		
PSF <sub>0.60</sub> (I)	2	2.94012	0.4634	0.285
	26	2.93053		
RS(II)	2	2.9616	0.340	0.224
PSF <sub>0.30</sub> (II)	26	2.10942	0.3746	0.224
PSF <sub>0.45</sub> (II)	2	2.8757	0.2282	0.224
PSF <sub>0.60</sub> (II)	2	2.92292	0.3039	0.224

Table 3: Anomalous values (outliers) for each fractal model and results of the Dixon test.

Assuming a significance level  $\alpha$  of 0.1, for all the data sets and for all the hypothesized outliers, the  $Q_{crit}$  parameter is smaller than the  $Q_{exp}$  value. Then, unlike the PSF model with  $A=0.30$ , each fractal model for the first range of scaling has anomalous values at the locations 2 and 26. These outliers are 2.89426 and 2.90098 for the TW model, 2.96688 and 2.96295 for the RS model, 2.84677 for the PSF model with  $A=0.30$  at the location 2, 2.9140 and 2.89643 for the PSF model with  $A=0.45$ , 2.94012 and 2.93053 for the for the PSF model with  $A=0.60$ . For the second range of scaling, in the TW model there are no outliers. The RS, the PSF with  $A=0.45$  and the PSF with  $A=0.60$  models show outliers at location 2 that are 2.9616, 2.8757 and 2.92292, respectively. The PSF model with  $A=0.30$  has an anomalous value of fractal dimension of 2.10942 at location 26. After a preliminary statistical study of the data sets, the results of the structural analysis are shown, which is based on the study of possible anisotropies, the construction of the experimental variogram and the relative model. The study of the directional variograms and of the variogram maps allows the  $D_f$  distribution to be considered as an isotropic phenomenon, for each fractal model and for the first and second range of scaling. For example, Fig. 2 displays the variogram map and the directional variograms for the RS fractal model and the first range of scaling. Analyzing the variogram map, it can be seen that the fractal dimension variable is a phenomenon distributed uniformly in any direction.

This circumstance was verified for each fractal model. The directional variograms was identified in East, North-East, North and North-West directions by an angular tolerance of 22.5°. Examining these variograms, it can be affirmed that they have a similar behaviour in each direction and do not reveal the changes of variogram parameters, which are: sill, range and nugget. In accordance with these results, the fractal dimension is an isotropic event and omnidirectional variograms were used to effect the geostatistical analysis. Table 4 shows the quantities that define the structural analysis for high and low water contents and for each fractal model, which are: lag, lag number, the variogram model and the respective parameters.

The lag is 3 metres for fractal models with high water contents, whereas for low water contents it assumes a value equal to 2.9 metres and 2.8 metres for TW and the

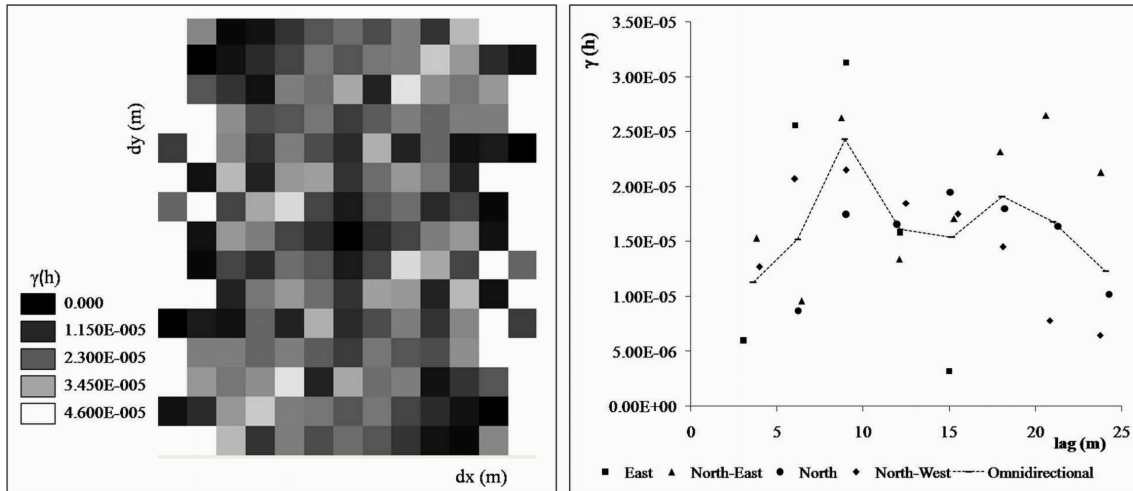


Figure 2: Variogram map (left) and directional variograms (right) of the fractal dimension variable for the RS fractal model and for high water contents. The right figure also shows the omnidirectional variogram.

Fractal model	Lag (m)	Lags num.	Variogram model	A (m)	C <sub>1</sub> (m <sub>2</sub> )	C (m <sub>2</sub> )	C <sub>0</sub> (m <sub>2</sub> )
TW(I)	3	8	Spherical	11	4.10·10 <sup>-5</sup>	1.27·10 <sup>-4</sup>	8.60·10 <sup>-5</sup>
RS(I)	3	8	Spherical	13	1.14·10 <sup>-5</sup>	1.74·10 <sup>-5</sup>	6.00·10 <sup>-6</sup>
PSF <sub>0.30</sub> (I)	3	8	Spherical	14.5	2.00·10 <sup>-4</sup>	3.96·10 <sup>-4</sup>	1.96·10 <sup>-4</sup>
PSF <sub>0.45</sub> (I)	3	8	Spherical	15	6.80·10 <sup>-5</sup>	1.22·10 <sup>-4</sup>	5.40·10 <sup>-5</sup>
PSF <sub>0.60</sub> (I)	3	8	Spherical	14.5	3.36·10 <sup>-5</sup>	5.78·10 <sup>-5</sup>	2.42·10 <sup>-5</sup>
TW(II)	2.9	8	Spherical	14	5.20·10 <sup>-4</sup>	6.70·10 <sup>-4</sup>	1.50·10 <sup>-4</sup>
RS(II)	2.8	8	Spherical	12	8.70·10 <sup>-6</sup>	1.72·10 <sup>-5</sup>	8.50·10 <sup>-6</sup>
PSF <sub>0.30</sub> (II)	2.8	8	Spherical	13	8.30·10 <sup>-3</sup>	1.31·10 <sup>-2</sup>	4.80·10 <sup>-3</sup>
PSF <sub>0.45</sub> (II)	2.8	8	Spherical	12	1.55·10 <sup>-4</sup>	2.69·10 <sup>-4</sup>	1.14·10 <sup>-4</sup>
PSF <sub>0.60</sub> (II)	2.8	8	Spherical	12	4.90·10 <sup>-5</sup>	7.70·10 <sup>-5</sup>	2.80·10 <sup>-5</sup>

Table 4: Results of structural analysis for each data set of fractal dimension variable.

Fractal Model	ME	VSE	Fractal Model	ME	VSE
TW(I)	2.53·10 <sup>-4</sup>	1.0089	TW(II)	-1.99·10 <sup>-4</sup>	1.0048
RS(I)	4.7·10 <sup>-5</sup>	1.0056	RS(II)	-1.31·10 <sup>-4</sup>	1.0018
PSF <sub>0.30</sub> (I)	7.22·10 <sup>-4</sup>	1.0035	PSF <sub>0.30</sub> (II)	-2.1·10 <sup>-4</sup>	1.0166
PSF <sub>0.45</sub> (I)	2.80·10 <sup>-4</sup>	1.0042	PSF <sub>0.45</sub> (II)	-2.95·10 <sup>-4</sup>	1.0084
PSF <sub>0.60</sub> (I)	1.69·10 <sup>-4</sup>	1.0008	PSF <sub>0.60</sub> (II)	-2.0·10 <sup>-4</sup>	1.0171

Table 5: Results of cross-validation. The table gives the ME and VSE values for each data set.

others models, respectively. The lags number is 8 for all the data sets, then the experimental variogram furnishes a spatial correlation of measured points around 22.4 and 24 metres. The assumed type of model is the result of the cross-validation that will be treated later. The selected spherical models are characterized by a range value between 11 metres and 15 metres for the first range of scaling. For the second range this parameter varies between 12 metres and 14 metres. The sill varies between  $1.22 \cdot 10^{-4}$  and  $1.74 \cdot 10^{-5}$  for the first range of scaling, whereas for the other condition it assumes  $1.31 \cdot 10^{-2}$  and  $7.7 \cdot 10^{-5}$ . The nugget is included between  $1.96 \cdot 10^{-4}$  and  $6 \cdot 10^{-6}$  for fractal models with high water contents; this parameter varies between  $4.8 \cdot 10^{-3}$  and  $8.5 \cdot 10^{-6}$  for low water contents.

The experimental variograms and the respective models with the equations are shown in Figure 3. Afterwards,

Table 5 gives the results of cross-validation. It shows that for each data set of fractal dimension the ME and VSE values are very near to 0 and 1, respectively.

Then the selected variogram models represent good functions that interpolate the experimental variograms. The results are reported for all fractal models with high and low water contents.

To represent the spatial variability of fractal dimension an interpolation of the available data by ordinary kriging was performed to estimate the values where measures are not available. Selecting an opportune grid (0.25 x 0.25 metres) for the examined surface, the interpolation in each node of this was carried out to obtain the variable values in each of these nodes. The maps of the fractal dimension variable for each fractal model with high and low water contents are shown in Figs. 4 and 5

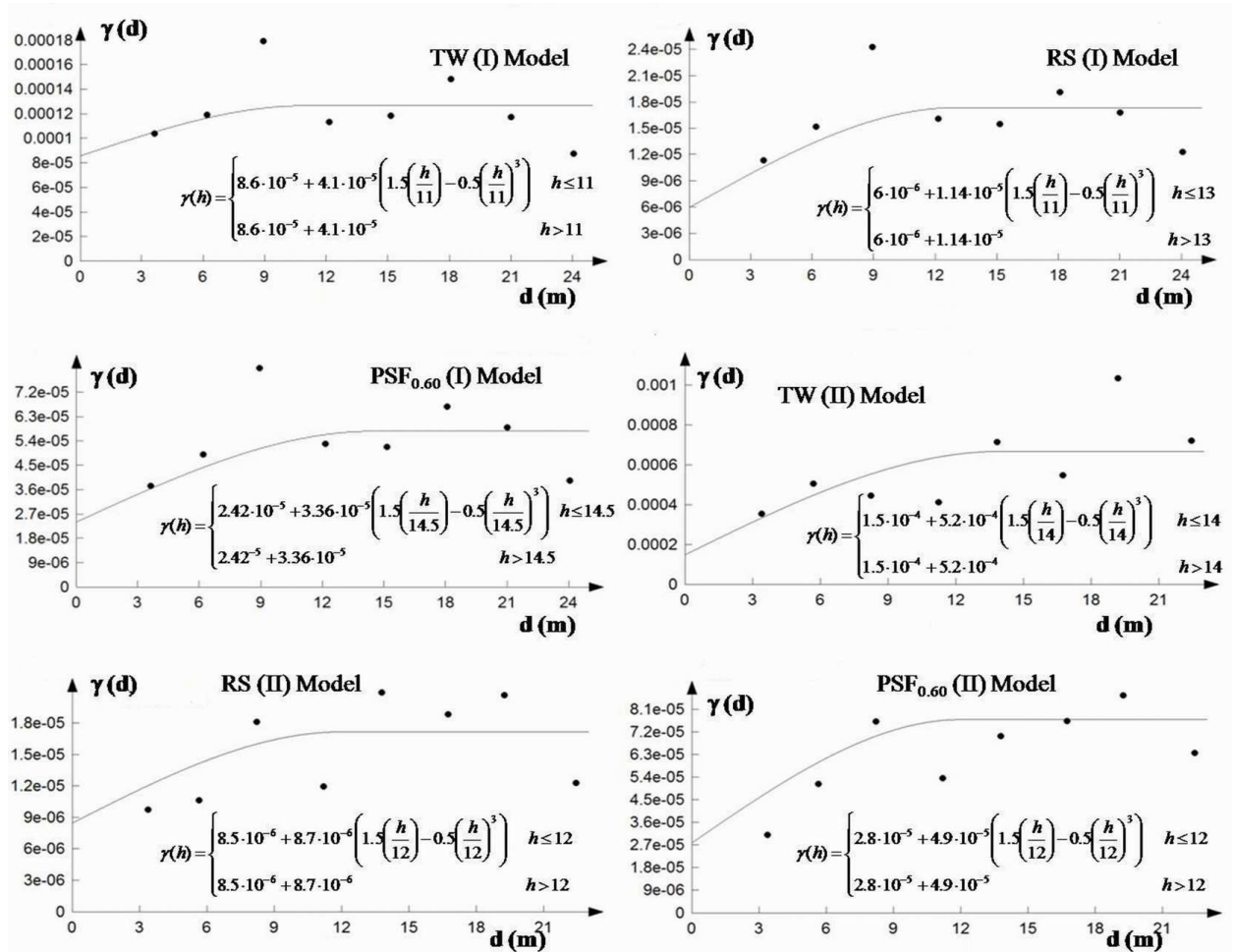


Figure 3: Experimental variograms and models for TW, RS and PSF with  $A=0.60$  fractal models for high and low water contents. These plots also show the equations of spherical variogram models for each data set of fractal dimension variable.

respectively.

$D_f$  assumes values between 2.9314 and 2.9779 for high water contents in the TW model; it has low values in two zones of the considered area and, precisely, in the South-West and North-West parts. The highest values, between 2.96 and 2.9779, characterise all the central area and a small zone to the South-East. The  $D_f$  variable varies between 2.7423 and 2.8362 for the same fractal model and for low water contents; in this case all the area has very low values (between 2.7423 and 2.78) except for the North zone and a small portion located in the South-West of this area.

Examining the RS fractal model, the  $D_f$  variable has values between 2.9760 and 2.9931 and between 2.9388 and 2.9538 for high and low water contents respectively; in the first case, it has the lowest values in the North part of the site and in a small South-West zone. The greatest values of  $D_f$  variable (2.987÷2.99), as for the TW model, were estimated in the central and South-East zones. In the second case, the examined area shows the highest values in the North and South-East portions, whereas the remaining area is characterised by very low values.

For the PSF fractal model with  $A=0.30$  and for the first range of scaling, fractal dimension assumes values between 2.8959 and 2.9731; the smaller values are in the South-West and North-East parts of the site whereas the greatest values are in the South-East and the central zones. Considering the second range of scaling, the  $D_f$  variable has values between 2.3291 and 2.6960; observing the map, in this case  $D_f$  assumes the lowest values (between 2.3329 and 2.45) in South-West and central parts of the site; in the remaining area there are the greater values.

For the PSF with  $A=0.45$  model the  $D_f$  variable has values between 2.9394 and 2.9834 and between 2.8063 and 2.8599 for the high and low water contents respectively. In the first case it is possible to see the presence of very low values in the North part and in a South-West small area; the highest values are in the central and in the South-East zones. The fractal dimension has very high values in the North-West and South-East zones for low water contents; the smaller values are in the South-West area and in a small zone of the experimental site.

Finally, for the PSF with  $A=0.60$  model,  $D_f$  has values between 2.9572 and 2.9880 for the high water contents; it has low values in two zones of the study area and,

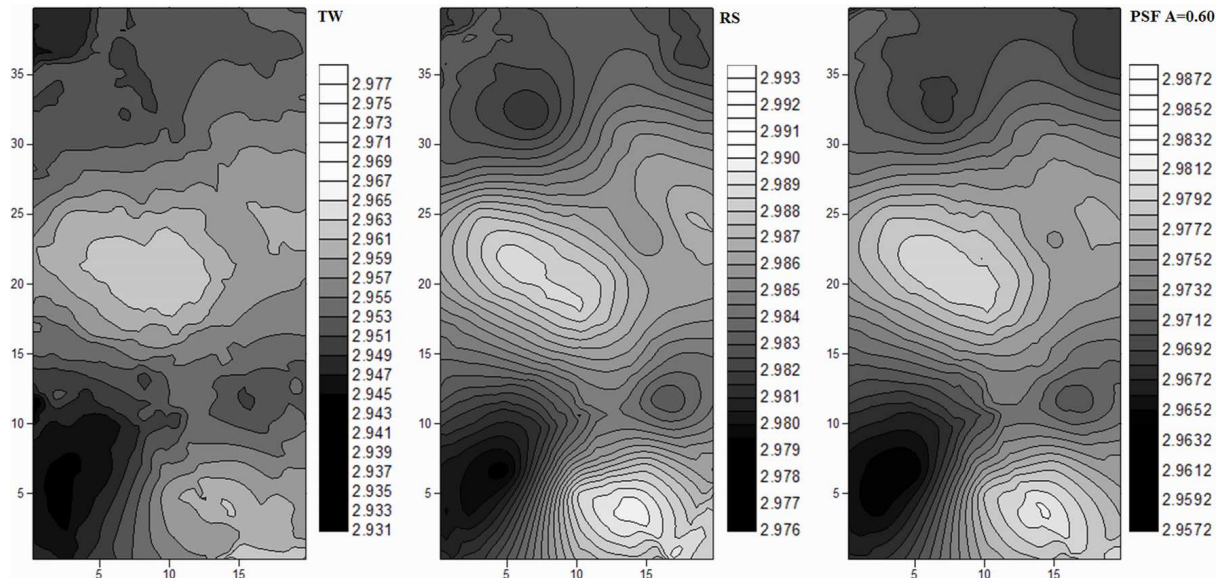


Figure 4: Maps of the  $D_f$  variable for high water contents and for the TW, RS and PSF with  $A=0.60$  fractal models.

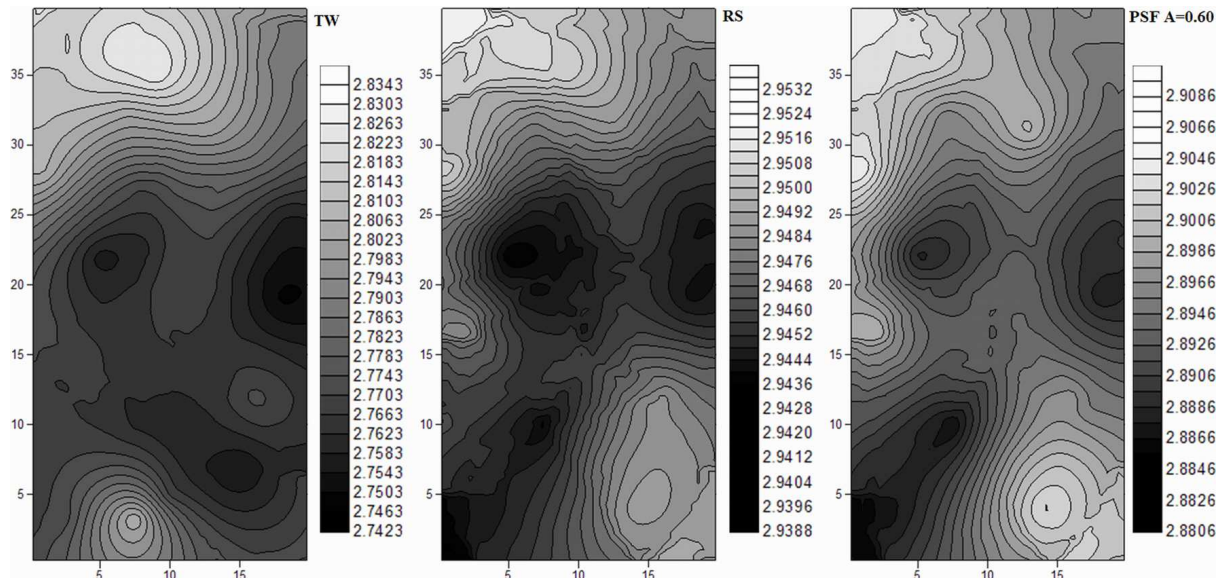


Figure 5: Maps of the  $D_f$  variable for low water contents and for the TW, RS and PSF with  $A=0.60$  fractal models.

precisely, in the Northern and South-West parts. The highest values characterize the central and South-East zones. For the same fractal model and for low water contents,  $D_f$  varies between 2.8806 and 2.9101; in this case the experimental site has very low values in the central and South-West areas whereas the highest values are in the South-East and North-West parts.

After spatial interpolation by ordinary kriging, it is essential to evaluate the error and the accuracy of prediction (evaluation of ordinary kriging variance) related to each location and for all the fractal models. Fig. 6 gives these results by the normalized error and variance for the locations 1, 11, 22, 28 and for high water contents. They show that for all the locations (except n. 28) the RS model has the smallest error values whereas the highest errors characterize the TW and PSF with

$A=0.30$  fractal models. In some locations, the fractal dimension variable was overestimated with respect to locally calculated values. Fig. 6 shows this comparison for each model and for some among the most significant locations. Specifically, at location 22 the fractal dimension was overestimated for the TW and RS models, whereas this variable was underestimated for all the PSF models. Finally, examining location 28, the PSF model with  $A=0.30$  is the only model that has a larger estimate value with respect to the calculated values.

Fig. 7 gives the same results for locations 2, 11, 26, 29 and for low water contents. The results of the variance values show a very explicit condition: in the RS fractal model the accuracy of prediction proves the best, whereas the PSF model with  $A=0.30$  appears the least reliable. In the same Fig. 7, the graph relative to loca-



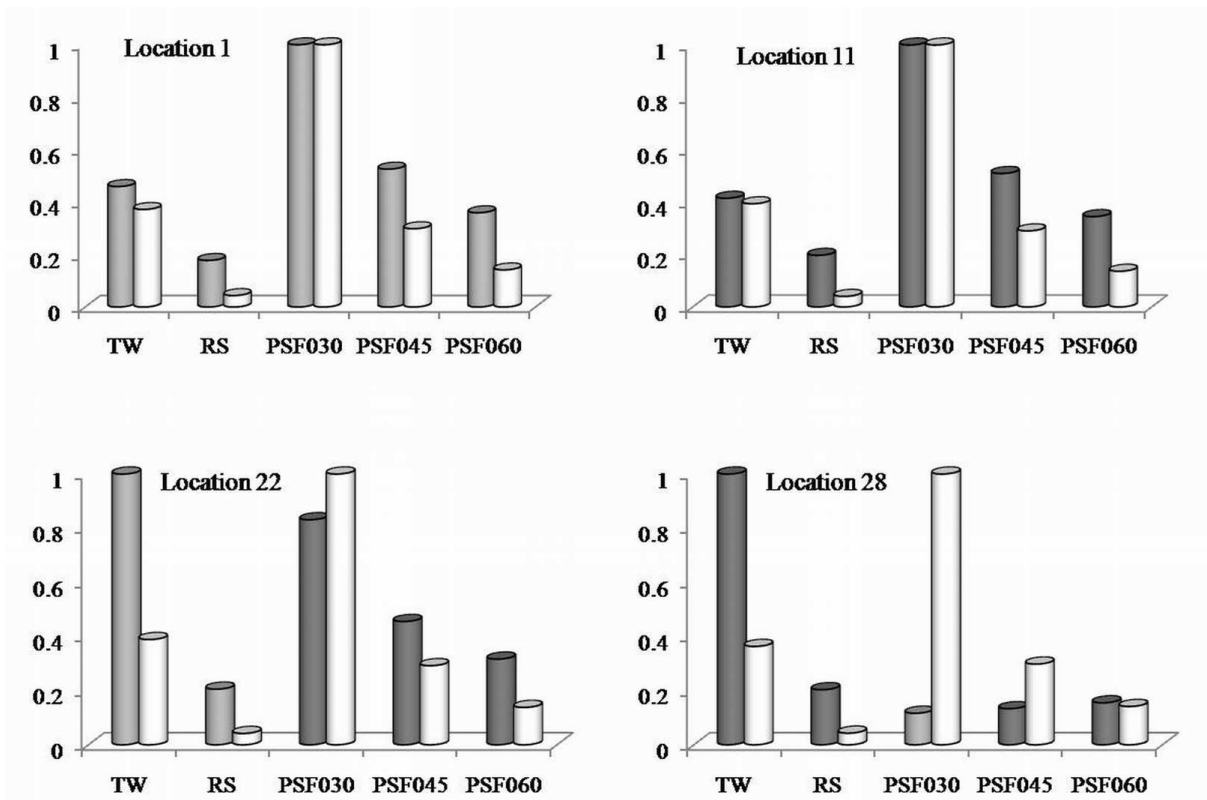


Figure 6: The errors and the kriging variance normalized values for some among the most significant locations (1, 11, 22, 28) and for each fractal model. The results are for high water contents. The clear gray histograms represent overestimation of the fractal dimension; the dark gray histograms indicate an underestimation of the variable. The variance values are represented by white histograms.

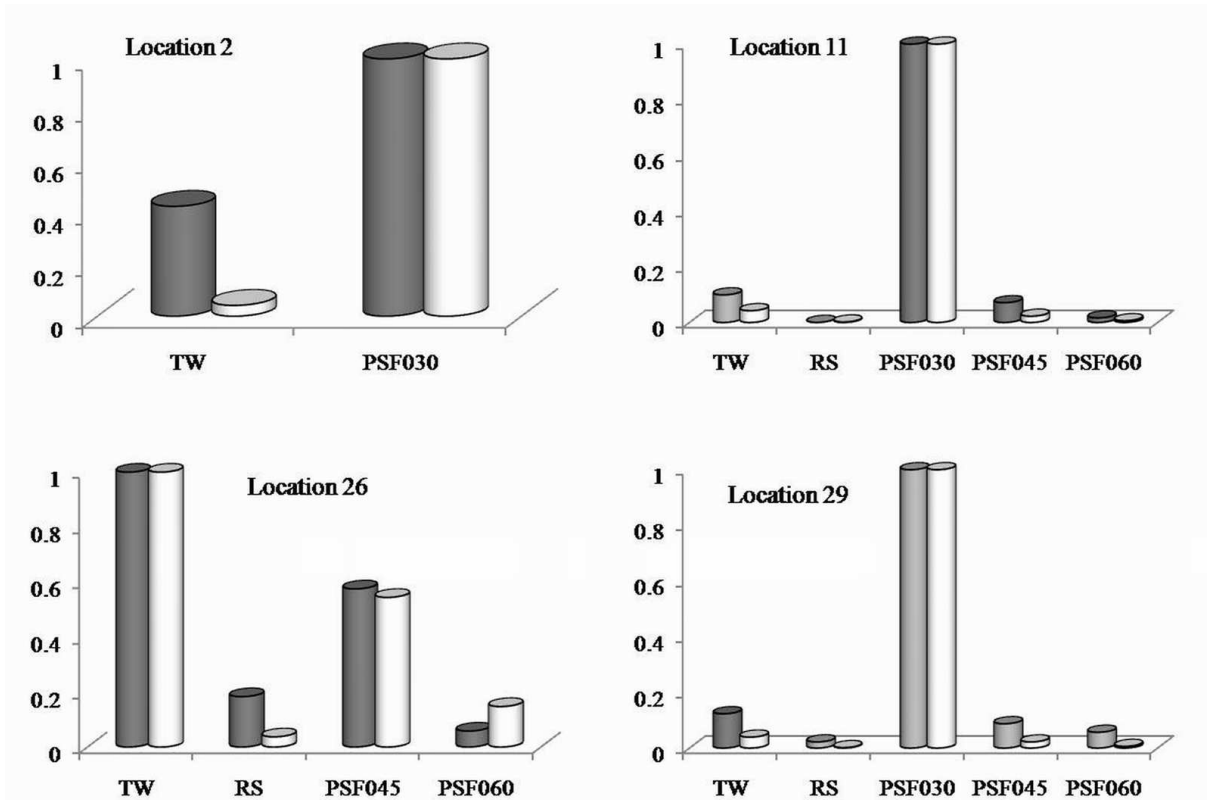


Figure 7: The errors and the kriging variance normalized values for some among the most significant locations (2, 11, 26, 29) and for each fractal model. The results are for low water contents. The clear gray histograms represents an overestimation of the fractal dimension; the dark gray histograms indicate the underestimation of the variable. The variance values are represented by white histograms.

tion 2, the results concern the TW and PSF with  $A=0.30$  fractal models, respectively, because for the other models at the same location the fractal dimension proves to be an outlier value. For the same reason, at location 26 analogous considerations were made for the PSF with  $A=0.30$  model. Examining these results it is possible to see that the RS model shows the lower error value for all the locations whereas the highest errors concern above all the PSF model with  $A=0.30$ , except for locations 22, 23, 26 for which the TW fractal model is the least reliable.

These results show that there are important differences between high and low water contents. Examining all the fractal models for the first case, at each location, there is often a similar condition of overestimation and/or underestimation of the fractal dimension. This condition does not exist for the low water contents, because there are locations in which the estimate value is greater than the measured value for a single fractal model whereas for the others it is contemporarily smaller.

### Conclusions

The application of geostatistical methods to the fractal dimension, obtained with the scaling of some fractal models to predict WRC, permitted quantification of the value of this variable on all the area of the experimental site without the measure. The results can be used in various applications, particularly in flow predictions and transport processes on the field scale. Each WRC can be divided into two scaling ranges of scaling, lower and upper, respectively for low and high water contents [25]. There were ten data sets used, five samples are related to the low scaling range and the others to the high scaling range. These data sets can be described with a normal and log-normal distribution. Geostatistical analysis was applied to each sample to evaluate the behavior of fractal dimension in an experimental site of the Turbolo basin (a tributary of the Crati River) located in Calabria, Italy.

The spatial distribution of the fractal dimension on this area was obtained with ordinary kriging that is an exact interpolation technique, which assumes the local stationarity of the mean. A strong equality of the spatial distribution of the variable was verified for high water contents, because the maps show many similarities between all the fractal models, whereas there is a great inequality for low water contents, because the maps of the models present different features. This difference depends on the number of experimental points regarding the low water content range of scaling that proves to be very limited.

The RS model shows the best fitting of the measured values for the first and second range of cut-off scaling, because it often presents the smallest error value and the kriging variance related assumes lesser values at many locations. Compared to the previous study of Fallico

et al. [25], this work shows a more detailed geostatistical analysis performing the evaluation of possible anisotropies. However, the results of this study confirm the conclusions of the previous work [25], because the RS proves to be the best fractal model to interpret the true values for both high and low water contents.

### References

- [1] Anderson, A. N.; McBratney, A. B. 1995. "Soil aggregates as mass fractals". *Australian Journal of Soil Research*, 33 (5): 757-772.
- [2] Tyler, S. W.; Wheatcraft, S. W. 1989. "Application of fractal mathematics to soil water retention estimation". *Soil Society of American Journal*, 53 (4): 987-996.
- [3] Perfect, E.; Kay, B. D. 1991. "Fractal theory applied to soil aggregation". *Soil Science Society of American Journal*, 55 (6): 1552-1558.
- [4] Crawford, J. W.; Sleeman, B. D.; Young, I. M. 1993. "On the relation between number-size distribution and the fractal dimension of aggregates". *Journal of Soil Science*, 44 (4): 555-565.
- [5] Toledo, G.; Novy, R. A.; Davis, H. T.; Scriven, L. E. 1990. "Hydraulic conductivity of porous media at low water content". *Soil Science Society of American Journal*, 54 (3): 673-679.
- [6] Katz, A. J.; Thompson, A. H. 1985. "Fractal sandstone pores: implications for conductivity and pore formation". *Physical Review Letters*, 54 (12): 1325-1327.
- [7] Bird, N.; Bartoli, F.; Dexter, A. R. 1996. "Water retention models for fractal soil structure". *European Journal of Soil Science*, 47 (1): 1-6.
- [8] Rieu, M.; Sposito, G. 1991a. "Fractal fragmentation, soil porosity and soil water properties: I. Theory". *Soil Science Society of American Journal*, 55 (5): 1231-1238.
- [9] Rieu, M.; Sposito, G. 1991b. "Fractal fragmentation, soil porosity and soil water properties: II. Applications". *Soil Science Society of America Journal*, 55 (5): 1239-1244.
- [10] Crawford, J. W.; Ritz, K.; Young, I. M. 1995. "The relation between the moisture-release curve and the structure of soil". *European Journal of Soil Science*, 46 (3): 369-375.
- [11] Perrier, E.; Rieu, M.; Sposito, G.; Marsily, G. 1996. "Models of the water retention curve for soils with a fractal pore size distribution". *Water Resources Research*, 32 (10): 3025-3031.
- [12] Bird, N.; Perrier, E.; Rieu, M. 2000. "The water retention function for a model of soil structure with pore and solid fractal distributions". *European Journal of Soil Science*, 51 (1): 55-63.
- [13] Matheron, G. 1971. "The theory of regionalized variables and its applications". *Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique, Fascicule 5. Centre de Géostatistique, Fontainebleau, France*, 212.

- [14] Journel, A. G.; Huijbregts, C. J. 1978. "Mining Geostatistics". London, ENGLAND: Academic Press.
- [15] Deutsch, C. V.; Journel, A. G. 1998. "GSLIB Geostatistical Software Library and User's Guide". New York, USA: Oxford University Press.
- [16] Isaaks, E. H.; Srivastava, M. 1989. "An Introduction to Applied Geostatistics". New York, USA: Oxford University Press.
- [17] Hunt, A. G. 2004. "Continuum percolation theory for pressure-saturation characteristics of fractal soils: extension to non-equilibrium". *Advances in Water Resources*, 27 (3): 245-257.
- [18] Perfect, E. 2005. "Modeling the primary drainage curve of prefractal porous media". *Vadose Zone Journal*, 4 (4): 959-966.
- [19] Perfect, E.; Kenst, A. B.; Diaz-Zorita, M.; Grove, J. H. 2004. "Fractal analysis of soil water desorption data collected on disturbed samples with water activity meters". *Soil Science Society of America Journal*, 68 (4): 1177-1184.
- [20] Tyler, S. W.; Wheatcraft, S. W. 1990. "Fractal processes in soil water retention". *Water Resources Research*, 26 (5): 1047-1054.
- [21] Danielson, R. E.; Sutherland, P. L. 1986. "Porosity. In: Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods". *American Society of Agronomy*: 443-461.
- [22] Perrier, E.; Bird, N.; Rieu, M. 1999. "Generalizing the fractal model of soil structure: the PSF approach". *Geoderma*, 88 (3-4): 137-164.
- [23] Wang, K.; Zhang, R.; Wang, F. 2005. "Testing the pore-solid fractal model for the soil water retention function". *Soil Science Society of America Journal*, 69 (3): 776-782.
- [24] Millàn, H.; Gonzàles-Posada, M. 2005. "Modelling soil water retention scaling. Comparison of a classical fractal model with a piecewise approach". *Geoderma*, 125 (1-2): 25-38.
- [25] Fallico, C.; Tarquis, A. M.; De Bartolo, S.; Veltri, M. 2010. "Scaling analysis of water retention curves for unsaturated sandy loam soils by using fractal geometry". *European Journal of Soil Science*, 61 (3): 425-436.
- [26] Meakin, P. 1998. "Fractals, Scaling and Growth Far From Equilibrium". Cambridge, ENGLAND: Cambridge University Press.
- [27] Matheron, G. 1963. "Principles of geostatistics". *Economic Geology*, 58 (8): 1246-1266.
- [28] Tobler, W. 1970. "A computer movie simulating urban growth in the Detroit region". *Economic Geography*, 46 (2): 234-240.
- [29] Barnett, V.; Lewis, T. 1978. "Outliers in Statistical Data". New York, USA: John Wiley and Sons.
- [30] Dixon, W. J. 1953. "Processing Data for Outliers". *Biometrics*, 9 (1): 74-89.
- [31] Davis, C. J. 1973. "Statistics and Data Analysis in Geology". New York, USA: John Wiley & Sons.
- [32] Kolmogorov, A. N. 1933. "Foundations of the Theory of Probability". New York, USA: Chelsea Publishing Company.
- [33] Anderson, T. W.; Darling, D. A. 1952. "Asymptotic theory of certain goodness of fit criteria based on stochastic processes". *Annals of Mathematical Statistics*, 23 (2): 193-212.
- [34] Kitanidis, P.; Vomvoris, E. 1983. "A geostatistical approach to the inverse problem in ground water modeling (steady state) and one dimensional simulations". *Water Resource Research*, 19 (3): 677-690.
- [35] Armstrong, M. 1998. "Basic Linear Geostatistics". Berlin, GERMANY: Springer Verlag.

## Análisis y estudio de los efectos de la interferencia de co-canal sobre la tasa de error de bit media para sistemas con multiplexación espacial

Juan Minango<sup>1\*</sup>, Celso de Almeida<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Estatal de Campinas, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Computación - Av. Albert Einstein, 400, Barão Geraldo, Campinas, S.P, Brasil.

<sup>2</sup>Universidad Estatal de Campinas, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Computación, Campinas, S.P, Brasil.

\*Autor principal/Corresponding author; e-mail: juan\_k\_a20@hotmail.com

Editado por/Edited by: Cesar Zambrano, Ph.D.

Recibido/Received: 2015/04/04. Aceptado/Accepted: 2015/06/24.

Publicado en línea/Published on Web: 2015/12/30. Impreso/Printed: 2015/12/30.

### Co-channel Interference Effects on the Bit Error Rate of Spatial Multiplexing Systems

#### Abstract

In this paper, the performance of spatial multiplexing (SM) system is investigated in a Rayleigh fading channel limited by co-channel interference (CCI). At first, an expression of the mean bit error rate (BER) for SM system with BPSK and QPSK modulation as a function of the signal-to-noise per bit ratio ( $E_b/N_0$ ), and the signal-to-interference power ratio (SIR) is obtained, by considering one prevailing co-channel interference. Validation of the analytical expressions is done by Monte Carlo simulation. The results show that CCI causes a significant degradation on the BER, which vary according to the SIR. The results obtained in this paper, can be applied to a SM cellular network with different number of transmit antennas.

**Keywords.** Bit Error Rate, Co-Channel Interference, Rayleigh Fading, Spatial Multiplexing.

#### Resumen

En este artículo, el desempeño de un sistema con multiplexación espacial (SM, por sus siglas en inglés, *Spatial Multiplexing*) es investigado, teniendo en consideración un canal con desvanecimiento Rayleigh y la presencia de interferencia de co-canal (ICC). Primeramente, expresiones para evaluar la tasa de error de bit media (BER, por sus siglas en inglés, *Bit Error Rate*) para sistemas con SM que hacen uso de modulaciones BPSK y QPSK son obtenidas, dichas expresiones se encuentran en función de la relación señal-ruido ( $E_b/N_0$ ), y de la relación señal-interferencia (SIR, por sus siglas en inglés, *Signal-to-Interference power Ratio*), considerando la presencia de un interferente de co-canal dominante. Validaciones de las expresiones analíticas son realizadas a través de simulaciones de Monte-Carlo. Los resultados muestran que la ICC causa una degradación notable en la BER, la cual varía de acuerdo a la SIR. Los resultados obtenidos en este artículo, pueden ser aplicados para redes celulares con SM para diferente número de antenas transmisoras.

**Palabras Clave.** Tasa de Error de Bit, Interferencia de Co-Canal, Desvanecimiento Rayleigh, Multiplexación Espacial.

## 1 Introducción

Para alcanzar las altas tasas de transmisión de datos que demandan los sistemas de comunicaciones móviles de próxima generación, respetando las limitaciones de ancho de banda y potencia de transmisión, el uso de múltiples antenas transmisoras, también conocido como multiplexación espacial, fue propuesto en [1].

Básicamente, multiplexación espacial, divide los datos de entrada en varias secuencias paralelas y las envía al mismo tiempo y en la misma banda de frecuencia a tra-

vés de las diferentes antenas de transmisión que conforman el sistema, aumentando así, la tasa de transmisión de datos.

En una red celular, múltiples antenas transmisoras para el uso de la técnica de multiplexación espacial, generalmente, son colocadas en la estación radio base (ERB), pues altas tasas de transmisión de datos son particularmente interesantes en el enlace directo o también llamado *downlink* de una red celular [2]. Así, podemos suponer que el número de antenas transmisoras sea mayor que el número de antenas receptoras.

En la literatura existen diversos estudios que analizan la tasa de error de bit media (BER) de sistemas de transmisión digital con multiplexación espacial en una comunicación punto a punto [3–5], es decir, es ignorada la presencia de interferencia de co-canal (ICC), o sea, solamente son considerados los efectos del desvanecimiento. En una red celular, la interferencia de co-canal entre las células deteriora severamente el desempeño, y puede hasta interrumpir el servicio de los usuarios. Es por tal motivo, que el análisis de los efectos de la interferencia de co-canal en una red celular con multiplexación espacial es necesario.

Por otro lado, algunos trabajos que evalúan el desempeño en términos de la tasa de error de bit o de símbolo media de sistemas de transmisión digital con múltiples antenas transmisoras en una red celular, realizan un modelaje de la ICC utilizando aproximación gaussiana [6–8].

A pesar de que, en una red celular puedan existir varios interferentes, generalmente, uno de ellos predomina sobre todos los demás, de manera que la ICC no es gaussiana [9]. La hipótesis de un interferente de co-canal dominante es razonable en redes celulares de Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA, por sus siglas en inglés, *Time Division Multiple Access*) o Acceso Múltiple por División de Frecuencia (FDMA, por sus siglas en inglés, *Frequency Division Multiple Access*) especialmente, cuando la sectorización es utilizada [10], ya que el número de interferentes es reducido para uno.

Estas consideraciones muestran énfasis en la importancia de tener un método eficiente para evaluar el desempeño de sistemas de transmisión digital con multiplexación espacial en una red celular, teniendo en consideración la presencia de interferencia de co-canal. Así, en este artículo, presentaremos expresiones analíticas para evaluar el desempeño de sistemas de transmisión digital con multiplexación espacial en una red celular, en términos de la BER media, considerando canales con desvanecimiento plano y lento de tipo Rayleigh y en la presencia de un interferente de co-canal dominante.

En este análisis, apenas serán consideradas las modulaciones BPSK y QPSK. La elección de estas modulaciones para el sistema de transmisión digital con multiplexación espacial en una red celular, es por el hecho de que permiten una complejidad manejable al utilizarse el detector de Máxima Verosimilitud (MLD, por sus siglas en inglés, de *Maximum Likelihood Detector*) en la recepción [11].

Este artículo está organizado de la siguiente manera. La Sección 2 describe el modelo de sistema de transmisión digital con multiplexación espacial en una red celular. En la Sección 3, expresiones de la BER media para el sistema con multiplexación espacial utilizando los esquemas de modulación BPSK y QPSK son presentadas. La Sección 4 presenta los resultados. Finalmente, las conclusiones son presentadas en la Sección 5.

## 2 Descripción del Sistema

Considere un sistema de transmisión digital con multiplexación espacial en un ambiente celular con desvanecimiento plano y lento de tipo Rayleigh y en la presencia de un interferente de co-canal dominante como el mostrado en la Figura 1.

La estación radio base central (ERB<sub>0</sub>) y la estación radio base interferente (ERB<sub>ICC</sub>), están conformadas por el mismo número de antenas de transmisión,  $N_t$ . Así, existirán  $N_t$  señales interferentes llegando a la antena receptora de la estación móvil (EM). Por otro lado, considerando que las  $N_t$  señales interferentes son sincronas a las  $N_t$  señales de interés, lo cual representa el peor caso [8], considerando, estimación perfecta de la fase, la muestra recibida en la antena receptora de la EM es dada por:

$$y = \sum_{k=1}^{N_t} \alpha_k A_k x_k + \Omega \sum_{l=1}^{N_t} \alpha_l A_l x_l + n \quad (1)$$

El primer término de la expresión (1), representa las  $N_t$  señales de interés transmitidas por la ERB<sub>0</sub>, donde  $A_k$  es la amplitud y  $x_k$  es el símbolo enviado por la  $k$ -ésima antena de transmisión escogido de la modulación digital BPSK o QPSK, mientras que  $\alpha_k$  es la amplitud del desvanecimiento plano y lento de tipo Rayleigh entre la  $k$ -ésima antena de transmisión y la antena receptora de la EM. El segundo término de (1) representa las  $N_t$  señales interferentes transmitidas por la ERB<sub>ICC</sub>, donde  $A_l$  es la amplitud,  $x_l$  es el símbolo enviado por la  $l$ -ésima antena de transmisión interferente,  $\alpha_l$  representa la amplitud del desvanecimiento plano y lento de tipo Rayleigh entre la  $l$ -ésima antena de transmisión interferente y la antena receptora de la EM. Además, es considerado que  $\alpha_k$  y  $\alpha_l$  son variables aleatorias (VAs) independientes. El parámetro  $\Omega$  es la amplitud de la pérdida de propagación de la interferencia relativa a la señal, lo

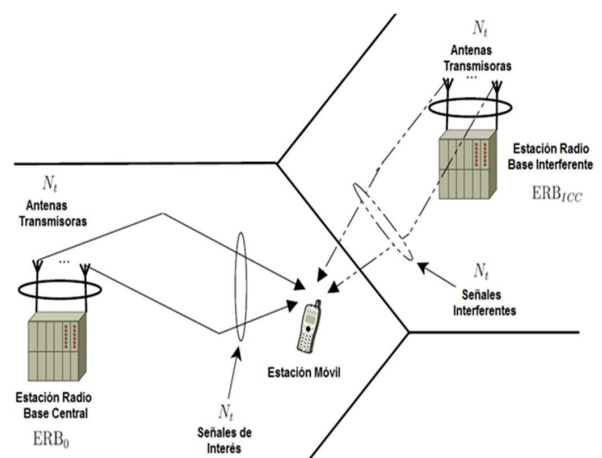


Figura 1: Sistema de transmisión digital con multiplexación espacial en un ambiente celular con desvanecimiento plano y lento de tipo Rayleigh y en la presencia de un interferente de co-canal dominante.



que nos permitirá variar la relación señal-interferencia (SIR, por sus siglas en inglés, de *Signal-to-Interference Ratio*). Finalmente, el tercer término de (1) es el ruido aditivo gaussiano blanco (AWGN, por sus siglas en inglés, de *Additive White Gaussian Noise*) en la antena de recepción de la EM.

La SIR de la señal recibida puede ser escrita como el cociente entre la potencia media de las  $N_t$  señales de interés,  $\overline{P_0}$ , y la potencia media de las  $N_t$  señales interferentes,  $\overline{P_{ICC}}$ , o sea:

$$SIR = \frac{\overline{P_0}}{\overline{P_{ICC}}} \quad (2)$$

Por otro lado, las potencias medias de las  $N_t$  señales de interés y de las  $N_t$  señales interferentes son, respectivamente, dadas por:

$$\overline{P_0} = \sum_{k=1}^{N_t} \overline{\alpha_k^2 A_k^2 x_k^2}, \quad (3)$$

$$\overline{P_{ICC}} = \sum_{l=1}^{N_t} \overline{\alpha_l^2 A_l^2 x_l^2} \quad (4)$$

Sustituyendo las expresiones (3) y (4) en (2), y considerando que tanto las  $N_t$  señales de interés e interferentes son afectadas por el mismo desvanecimiento, es decir que  $\sum_{k=1}^{N_t} \overline{\alpha_k^2} = \sum_{l=1}^{N_t} \overline{\alpha_l^2} = N_t \overline{\alpha^2}$  donde  $\overline{\alpha^2} = \overline{\alpha_k^2} = \overline{\alpha_l^2}$  para  $k = l = 1, 2, \dots, N_t$ , representan el segundo momento de una variable aleatoria Rayleigh. Por otro lado, podemos establecer que  $\overline{P_x} = \sum_{k=1}^{N_t} \overline{A_k^2 x_k^2} = \sum_{l=1}^{N_t} \overline{A_l^2 x_l^2}$ , representan la potencia media de transmisión de la constelación BPSK o QPSK, según sea el caso. De este modo, la SIR puede ser reescrita como:

$$SIR = \frac{N_t \overline{\alpha^2} \cdot \overline{P_x}}{\Omega^2 N_t \overline{\alpha^2} \cdot \overline{P_x}} = \frac{1}{\Omega^2} \quad (5)$$

## 2.1 Análisis de la tasa de error de bit media (BER)

En un sistema de transmisión digital con multiplexación espacial y modulación arbitraria, la probabilidad de error de símbolo (PES) en un canal AWGN para la  $k$ -ésima antena de transmisión de la  $ERB_0$ , puede ser escrita en función de la relación señal-ruido por bit ( $E_b/N_0$ ) como  $P_{s_k}(E_b/N_0)$ .

En la presencia de un canal con desvanecimiento, la relación señal-ruido por bit, se torna una VA, pues  $\gamma_{b_k} = \alpha_k E_b/N_0$ , que representa la relación señal-ruido por bit instantánea de la  $k$ -ésima antena de transmisión, siendo

$\alpha_k$  la VA Rayleigh, con función densidad de probabilidad (FDP) dada por [10]:

$$f(\alpha_k) = \frac{\alpha_k}{\sigma_{\alpha_k}^2} e^{-\alpha_k/2\sigma_{\alpha_k}^2}, \alpha_k \geq 0. \quad (6)$$

A partir de (6) y realizando transformación de variables, podemos mostrar que la FDP de la VA  $\gamma_{b_k}$  es dada por [10]:

$$f(\gamma_{b_k}) = \frac{1}{\overline{\gamma_{b_k}}} e^{-\gamma_{b_k}/\overline{\gamma_{b_k}}}, \overline{\gamma_{b_k}} \geq 0, \quad (7)$$

donde  $\overline{\gamma_{b_k}} = \overline{\alpha_k^2} E_b/N_0$ , es el valor medio de la relación señal-ruido por bit de la  $k$ -ésima antena de transmisión del sistema con multiplexación espacial. Nótese que,  $\overline{\alpha_k^2} = 2\sigma_{\alpha_k}^2$ , que representa el segundo momento de una VA Rayleigh.

Así, la PES en un canal con desvanecimiento Rayleigh para un sistema de transmisión digital con multiplexación espacial con  $N_t$  antenas de transmisión, puede ser obtenida simplemente por el cálculo de la media de la PES obtenida para un canal AWGN, sobre las estadísticas de las  $N_t$  señales de interés con desvanecimiento Rayleigh, o sea:

$$\overline{P_s} = \frac{1}{N_t} \sum_{k=1}^{N_t} \int_0^{\infty} P_{s_k}(\gamma_{b_k}) f(\gamma_{b_k}) d\gamma_{b_k}. \quad (8)$$

Finalmente, considerando mapeamiento de bits con codificación de Gray, la probabilidad de error de bit media o BER puede ser expresada como:

$$\overline{P_b} = \frac{\overline{P_s}}{\log_2 M}, \quad (9)$$

donde  $\log_2 M$  es el número de bits por símbolo.

## 2.2 Interferencia de Co-Canal

Considerando el sistema de transmisión digital con multiplexación espacial con  $N_t$  antenas transmisoras utilizando un esquema de modulación arbitrario en un ambiente celular con desvanecimiento plano y lento de tipo Rayleigh y en la presencia de un interferente de co-canal dominante con la misma cantidad de antenas de transmisión, el limitante superior de la PES media utilizando (8), puede ser expresada por:

$$\overline{P_s} = \frac{1}{N_t} \sum_{k=1}^{N_t} \sum_{l=1}^{N_t} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} P_{s_{k,l}}(\gamma_{b_k}, \gamma_{b_l}) \cdot a \cdot b \cdot d\gamma_{b_k} d\gamma_{b_l}, \quad (10)$$

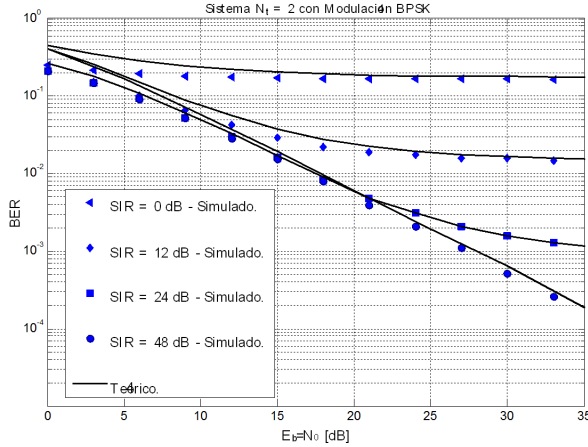


Figura 2: BER media en función de la relación  $E_b/N_0$  y de la SIR para un sistema con  $N_t=2$  y modulación BPSK, comparándose las curvas simuladas y teóricas.

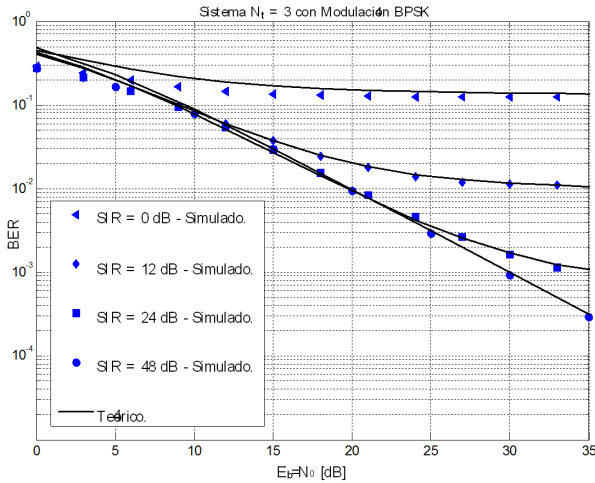


Figura 3: BER media en función de la relación  $E_b/N_0$  y de la SIR para un sistema con  $N_t=3$  y modulación BPSK, comparándose las curvas simuladas y teóricas.

donde  $P_{s_{k,l}}(\gamma_{b_k}, \gamma_{b_l})$  es la PES instantánea, en que  $\gamma_{b_k}$  es la relación señal-ruido por bit de la  $k$ -ésima antena de transmisión de la ERB<sub>0</sub>, y  $\gamma_{b_l}$  es la relación señal-ruido por bit de la  $l$ -ésima antena de transmisión interferente de la ERB<sub>ICC</sub>. Mientras que,  $a = f(\gamma_{b_k})$  y  $b = f(\gamma_{b_l})$  son las FDPs de  $\gamma_{b_k}$  y  $\gamma_{b_l}$ , respectivamente, dadas en (7). Podemos observar que (10) no tiene una forma cerrada, por tanto, las integrales deben ser evaluadas numéricamente.

**2.2.1 Modulación BPSK** En un sistema de transmisión digital con multiplexación espacial utilizando modulación BPSK y en la presencia de un interferente de co-canal dominante, la probabilidad de error de bit instantánea es dada por [9]:

$$P_{b_{k,l}}(\gamma_{b_k}, \gamma_{b_l}) = \frac{1}{2}Q\left(\sqrt{2\gamma_{b_k}} + \Omega\sqrt{2\gamma_{b_l}}\right) + \frac{1}{2}Q\left(\sqrt{2\gamma_{b_k}} - \Omega\sqrt{2\gamma_{b_l}}\right). \quad (11)$$

**2.2.2 Modulación QPSK** Utilizando modulación QPSK en un sistema con multiplexación espacial, y teniendo en consideración que la modulación QPSK puede ser obtenida a partir de dos modulaciones BPSK, una siendo transmitida en fase y la otra en cuadratura, la PES media en la presencia de un interferente de co-canal es dada por:

$$P_{s_{k,l}}(\gamma_{b_k}, \gamma_{b_l}) = 1 - [1 - P_{b_{k,l}}(\gamma_{b_k}, \gamma_{b_l})]^2, \quad (12)$$

donde  $P_{b_{k,l}}(\gamma_{b_k}, \gamma_{b_l})$  es la probabilidad de error de bit instantánea de la modulación BPSK dada en (11).

### 3 Resultados Numéricos

En esta sección, a través del software de simulación Matlab, evaluaremos por medio de simulaciones de Monte Carlo, los efectos de la interferencia de co-canal en la BER media de redes celulares que hacen uso de múltiples antenas transmisoras, multiplexación espacial. Los resultados obtenidos por medio de las simulaciones, son comparados con las expresiones analíticas presentadas en la sección 2. Debido a las limitaciones de costo y tamaño de la EM, será asumido que el número de antenas receptoras será igual a uno, o sea,  $N_r = 1$ .

En la Figura 2 es presentada la BER media tanto simulada como teórica para un sistema con multiplexación espacial con dos antenas transmisoras,  $N_t = 2$ , que hace uso de la modulación BPSK. Nótese que la BER media está en función de la relación  $E_b/N_0$  para diferentes valores de la SIR. De la figura podemos observar que existe una buena aproximación entre los resultados simulados y teóricos, especialmente para altos valores de la  $E_b/N_0$ .

Además, en la figura observamos que debido al desvanecimiento y a la interferencia de co-canal existen BERs

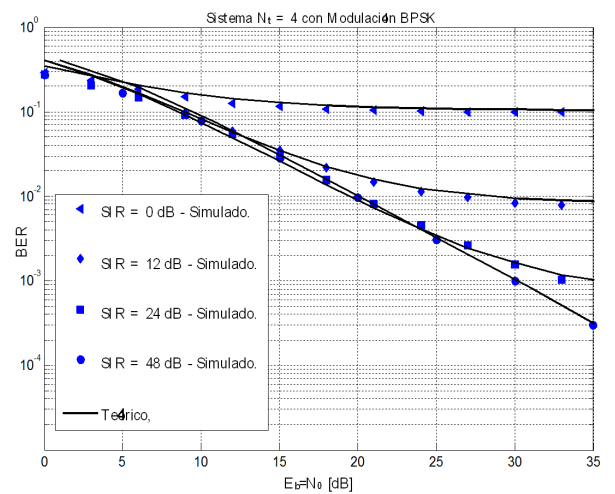
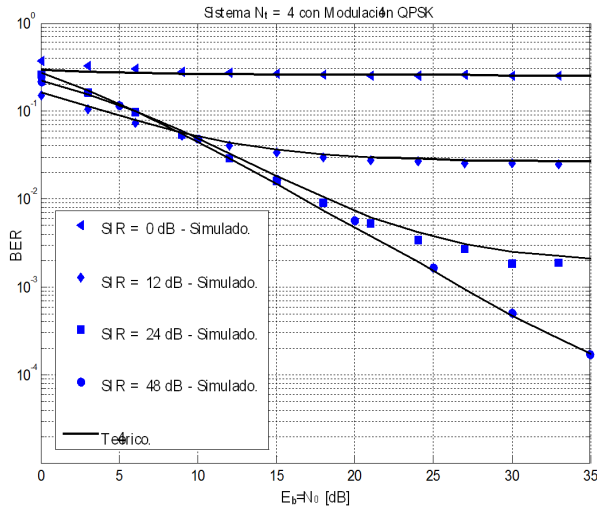


Figura 4: BER media en función de la relación  $E_b/N_0$  y de la SIR para un sistema con  $N_t=4$  y modulación BPSK, comparándose las curvas simuladas y teóricas.



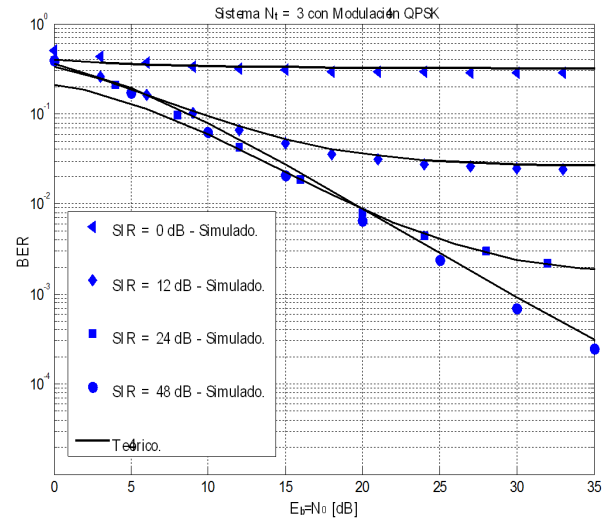
**Figura 5:** BER media en función de la relación  $E_b/N_0$  y de la SIR para un sistema con  $N_t=2$  y modulación QPSK, comparándose las curvas simuladas y teóricas.

medias constantes. Para una SIR igual a 0 dB, la potencia media de las dos señales interferentes es igual a la potencia media de las dos señales de intereses produciendo así una BER media constante de  $1.75 \times 10^{-1}$ . Para SIRs en el intervalo de 12 a 48 dB, notamos una mejora en la BER media en comparación al caso anterior. El caso en que la SIR es igual a 48 dB podemos considerar al sistema libre de la ICC, ya que el sistema aún no presenta las limitaciones de la ICC. En cuanto, para una SIR de 12 y 24 dB, se observa una BER media constante de  $1.5 \times 10^{-2}$  y  $1.06 \times 10^{-3}$ , respectivamente.

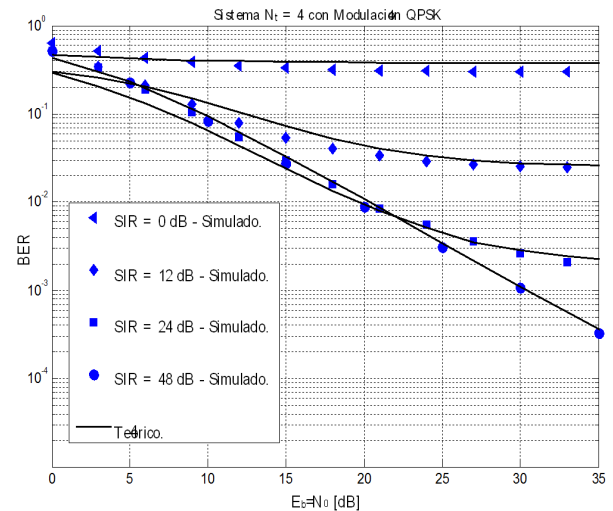
Las Figuras 3 y 4 presentan la BER media para un sistema con multiplexación espacial con  $N_t = 3$  y  $N_t = 4$ , respectivamente, para la modulación BPSK. Las curvas y conclusiones son muy semejantes al sistema anterior.

La Figura 5 muestra la BER media tanto simulada como teórica, en función de la relación  $E_b/N_0$  para el sistema con multiplexación espacial con  $N_t = 2$ , que hace uso de la modulación QPSK, para relaciones de la SIR = 0, 12, 24 y 48 dB. El caso en que la SIR es igual a 48 dB corresponde al desempeño de la BER media en un ambiente únicamente con desvanecimiento Rayleigh, sin interferencia. Mientras tanto, para valores de la SIR en el intervalo de 0 hasta 24 dB, podemos observar una degradación significativa en la BER media, debido a los efectos de la interferencia de co-canal. Así, en este intervalo, la BER media es constante, independientemente de cualquier incremento en la  $E_b/N_0$ , además, en este intervalo, observamos BERs medias altas, mayores a  $10^{-4}$ . Así, para SIR igual a 0, 12 y 24 dB, podemos notar una BER media constante de  $2.53 \times 10^{-1}$ ,  $2.64 \times 10^{-2}$  y  $1.84 \times 10^{-3}$ , respectivamente. Observamos también, que tanto las curvas simuladas y teóricas presentan una buena aproximación.

Las Figuras 6 y 7 muestran la BER media para un sistema con  $N_t = 3$  y  $N_t = 4$ , respectivamente, con modulación QPSK. Los resultados obtenidos en estas figuras son similares a los obtenidos en la Figura 5.



**Figura 6:** BER media en función de la relación  $E_b/N_0$  y de la SIR para un sistema con  $N_t=3$  y modulación QPSK, comparándose las curvas simuladas y teóricas.



**Figura 7:** BER media en función de la relación  $E_b/N_0$  y de la SIR para un sistema con  $N_t=4$  y modulación QPSK, comparándose las curvas simuladas y teóricas.

De los resultados obtenidos, podemos observar que, conforme se aumenta el número de antenas transmisoras, tanto en la modulación BPSK o QPSK, el sistema es más susceptible a los efectos de la interferencia de co-canal.

#### 4 Conclusiones

En este trabajo fueron obtenidas expresiones analíticas de la BER media para un sistema de transmisión digital con multiplexación espacial en un ambiente celular con desvanecimiento plano y lento de tipo Rayleigh y en la presencia de un interferente de co-canal dominante.

La interferencia de co-canal causa una degradación notable en el desempeño de los sistemas considerados, presentando BERs medias constantes. En estas circunstancias, el desempeño de los sistemas no puede ser mejorado a través de un incremento indefinido en la relación

$E_b/N_0$ . Por otro lado, el desempeño de los sistemas mejora con el incremento de la SIR. Así, para valores muy altos, el desempeño corresponde a la BER media en un ambiente celular libre de los efectos de la interferencia de co-canal.

Finalmente, las expresiones analíticas y las curvas obtenidas por medio de simulaciones de la BER media, se constituyen en una herramienta de referencia para evaluar los efectos de la interferencia de co-canal en un sistema de transmisión digital con multiplexación espacial en una red celular.

### Referencias

- [1] Paulraj, A.; Kailath, T. 1992. "Increasing Capacity in Wireless Broadcast Systems using Distributed Transmission/Directional Reception". *U.S. Patente*, 5(345): 599.
- [2] Feng, W.; Li, Y.; Zhou, S.; Wang, J.; Xia, M. 2009. "Downlink Capacity of Distributed Antenna Systems in a Multi-Cell Environment". *Wireless Communications and Networking Conference WCNC 2009 IEEE*, 1(5): 5-8. doi: 10.1109/WCNC.2009.4917683.
- [3] Clerckx, B.; Vanhoenacker-Janvier, D.; Oestges, C.; Vandendorpe, L. 2003. "Robust Signal Constellations for Spatial Multiplexing in the Presence of Real Fading Propagation Channels". *Communications, 2003. ICC '03. IEEE International Conference on*: 11-15. doi: 10.1109/ICC.2003.1204419.
- [4] Lim, A.; Lau, V. 2006. "On the Fundamental Tradeoff of Spatial Diversity and Spatial Multiplexing of MISO/SIMO Links with Imperfect CSIT". *Communications, 2006. ICC '06. IEEE International Conference on*, 9: 4186-4190. doi: 10.1109/ICC.2006.255737.
- [5] Mary, P.; Dohler, M.; Gorce, J.; Villemaud, G. 2009. "Symbol Error Outage for Spatial Multiplexing Systems in Rayleigh Fading Channel and Lognormal Shadowing". *Signal Processing Advances in Wireless Communications, SPAWC '09, IEEE 10th Workshop on*: 21-24. doi: 10.1109/SPAWC.2009.5161805.
- [6] Romero, J.; Pena, G.; Aguilera, G.; Goldsmith, A. 2006. "Performance of MIMO MRC Systems with Co-Channel Interference". *Communications, 2006. ICC '06. IEEE International Conference on*, 3: 1343-1349. doi: 10.1109/ICC.2006.254935.
- [7] Figueiredo, D.; Lin, Z.; Sorensen, T. 2007. "Average Error Probability of MIMO Diversity Systems in the Presence of Multiple Interferers". *Wireless Communication Systems, 2007. ISWCS 2007. 4th International Symposium on*, 66(69): 17-19. doi: 10.1109/ISWCS.2007.4392303.
- [8] Basri, A. 2010. "Exact Bit Error Rate of MIMO MRC Systems with Cochannel Interference and Rayleigh Fading". *Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall)*, 1(5): 6-9. doi: 10.1109/VETECF.2010.5594073.
- [9] Altamirano, D.; De Almeida, C. 2010. "Evaluation of the Effects of Co-Channel Interference on the Bit Error Rate of Cellular Systems for BPSK Modulation". *International Telecommunications Symposium, ITS Proc. 7th*.
- [10] Rappaport, T. 2002. "Wireless Communications Principles Practice". *Prentice Hall*.
- [11] Andrews, J.; Ghosh, A.; Muhamed, R. 2007. "Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking". *Prentice Hall*.

## Beyond main effects assumption in Conjoint Analysis: Comparison of Conjoint Value Analysis vs. Choice-based Conjoint. Statistical approach and construction of designs applied to New Product Development

Andrés Paredes<sup>1</sup>, Alvaro Enríquez<sup>1</sup>, Danny Navarrete<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Universidad San Francisco de Quito, Colegio de Ciencias e Ingeniería -El Politécnico- Ingeniería Industrial, Calle Diego de Robles y Vía Interoceánica, Campus Cumbayá, Quito, Ecuador.

\*Autor principal/Corresponding author; e-mail: dnavarrete@usfq.edu.ec

Editado por/Edited by: Cesar Zambrano, Ph.D.

Recibido/Received: 2015/07/21. Aceptado/Accepted: 2015/09/27.

Publicado en línea/Published on Web: 2015/12/30. Impreso/Printed: 2015/12/30.

### Abstract

The assumption of only main effects in Conjoint Analysis methods has created a debate whether to focus or not on the impact of interactions in determining the most preferred combination of attributes of a product. In this research a comparison of Conjoint Value Analysis CVA and Choice-Based Conjoint CBC surveys were undertaken to contrast them through utility scores, importance values of attributes and goodness-of-fit using ready to drink beverages as the subject. The main effects assumption in the CVA composition rule was compared to the interaction terms in the CBC one. Two scenarios were developed; the first one considered inner characteristics of the subject and a sample size of 250 respondents. The second one considered the presentation characteristics of the subject and a sample size of 150 respondents. The two higher total utility scores were obtained in the CBC using an interactive composition rule. In Scenario 1 a higher goodness-of-fit was found in the CBC, including significant interactions, in contrast with Scenario 2, where no interactions were found, and CVA had a higher goodness-of-fit.

**Keywords.** Conjoint Analysis, New Product Design, Fractional Factorial Design, Hierarchical Bayes Estimation, Design of Experiments.

### Más Allá de la Suposición de Efectos Principales en Análisis Conjunto: Comparación Entre Análisis Conjunto Tradicional Vs. Análisis Conjunto Basado en Elección. Enfoque Estadístico y Construcción de Diseños Aplicado al Desarrollo de Nuevos Productos

### Resumen

El supuesto de considerar solo efectos principales en el Análisis Conjunto ha creado un debate si enfocarse o no en el impacto de las interacciones para determinar la combinación con mayor preferencia en los atributos del producto. La comparación se realizó entre las encuestas del Análisis Conjunto Tradicional CVA y el Análisis Conjunto Basado en la Elección CBC para contrastarlas a través de los valores de utilidad, valores de importancia de los atributos y bondad de ajuste en ambas metodologías, usando una bebida lista para tomar como sujeto de prueba. La suposición de efectos principales en la regla de composición del CVA fue comparada con la inclusión de términos de interacción significativos en el CBC. Se desarrollaron dos escenarios; en el primero se consideró características internas del sujeto de prueba y se utilizó un tamaño de muestra de 250 encuestados. En el segundo escenario consideró características de presentación del sujeto de prueba y un tamaño de muestra de 150 encuestados. Los dos valores de utilidad más altos se obtuvieron del CBC, usando una regla de composición con interacciones, acabó considerando a la Cerveza, en cambio en el CVA este nivel reportó una utilidad negativa. En el Escenario 1 se encontró una bondad de ajuste más alta para el CBC, incluyendo interacciones significativas, en contraste con el Escenario 2, donde no se encontraron interacciones significativas y en ese caso el CVA tuvo una bondad de ajuste mayor.

**Palabras Clave.** Análisis Conjunto, Diseño de nuevos productos, Diseño factorial fraccionado, Estimación Jerárquica Bayes, Diseño de experimentos.

### Introduction

Conducting business decisions is critical, and the use of resources has to be efficient. Some examples of these decisions are: product/service design, product line and portfolio optimization, capacity planning, customer sup-

port management, as well as volume and mix flexibility decisions [1].

To respond to those critical decisions efficiently and effectively, CA has been used as a technique that allows researchers to translate and predict customers' needs and

ISSN 1390-5384





expectations into product characteristics [2–4]. In this way, industries can use this technique to launch successful products/services in a competitive market [5]. In this manner, conjoint analysis has allowed different areas like statistics, probability, and experimental design as well as econometric modeling to predict more realistic behaviors of the marketplace [6].

CA has been around for about 40 years, and since then a lot of improvements have come in hand with technology that has eased the calculations and made possible to test with more representative samples and improve the estimation of the data collected [7, 8].

There are essentially four methodologies of CA mentioned in detail in Rao [9], briefly explained next. The first one is CVA, and it is the traditional conjoint methodology that uses Rb stated preferences or ranking combinations [1, 9].

The second one is CBC; this CA uses stated Cb to select a combination from a set presented; the ways preferences are obtained are partly deterministic and random [1].

The third methodology is ACA in which, first, a self-explicated elicitation task considers attribute importance values and desirability levels using ranking and subsequent rating in order to tailor partial profiles for each respondent; these profiles are followed by a paired presentation of those choices in a graded comparison scale.

The fourth CA methodology is called self-explicated, where respondents are asked to evaluate the desirability of each level of all the attributes as well as the relative importance values assigned to them.

Rao [9] also mentioned that there are two different kinds of models in which the four methodologies are classified: decompositional and compositional. The first three methodologies mentioned earlier are decompositional because the data are decomposed to obtain partial utility scores of each attribute level of a combination; this is in contrast with the compositional approach, where utility scores are composed from the data obtained of each of the attribute levels.

Karniouchina [8] expressed that from more than 150 publications in top journals about CA, only 5 studies have compared the elicitation methods used before in CVA and CBC as Rb and Cb, and no concrete results were obtained, but they concluded that CBC performed better at the individual-level.

There are some benefits from using Rb or Cb elicitation methods. For example, Rb simplifies market decisions, whereas Cb is easier for respondents to adapt and give information about their preference, but in terms of design, Rb is easier than Cb [1, 2].

Now, CBC is becoming more important due to the realism in the way respondents make trade-offs, simulating what happens in the market place; this is in contrast to

CVA where respondents can either rate or rank a specific combination [9, 11]. Also, choosing a combination is a simple and more natural task that everyone can understand [10].

One of the main reasons that CVA was first used was the utility estimation through OLS for Rb or monotone regression for ranking that permitted individual utility estimation, unlike CBC, where the Multinomial Logit Model (MNL) only permitted to estimate aggregate utilities. However, recent powerful estimation methods like HB have allowed to obtain information from respondents with fewer questions and to calculate individual utility estimations; this process has led to enhance the information quality, reducing significantly the chances of getting noisy data [12].

Moreover, the strength of the methodologies that estimate individual-level utilities, considering only main effects like CVA, are obtained at the cost of denying the presence of interactions, considering their values to be negligible. Therefore, if significant interactions are found, the conclusions reached by a traditional CA may be invalid, unlike CBC that offers the capability to estimate interactions between attribute levels [13].

The interaction analysis in a CA study can proportionate valuable information to find a model that could be more accurate [3, 4, 7]. Differentiated two distinct composition rules, one considering main effects and other considering interaction terms. The first one is called Simple Additive Model, where the partial utility of attribute levels in a combination are summed up, and the second one is called Interactive Model, where the interaction terms can be added to obtain the total utility or combination preference. However, in the latter model, despite portraying a more realistic situation, it implies more complex calculations [7].

Using individual level estimation approaches has reduced the need for modeling interactions, but this does not directly take for granted the changes that significant interactions can have on the respondents' preferences, so their effects should not be considered negligible [6]. Also significant interactions can be crucial information that needs to be included in the analysis and are often ignored by researchers due to time or resources [11].

### Practical Applications

Conjoint Analysis is a widespread statistical research technique that can be applied to New Product Development by determining the preference (utility) of a specified product/service through its components and finds an optimal combination of their attributes. There are different Conjoint Analysis methodologies, and a dispute has come along about which methodologies can be more appropriate to use. The traditional full profile Conjoint Analysis or Conjoint Value Analysis (CVA) was the first methodology developed and the most frequently used due to its simplicity in calculations. However, Choice-Based Conjoint (CBC) is gaining popular-

ity due to its way of presenting combinations that simulates what happens in the marketplace more accurately.

Little research has been made in comparing different Conjoint Analysis in an effort to conclude or recommend the utilization of a particular methodology of this technique. Several authors have given guidelines to researchers to know which methodology to choose, basing their recommendations only on the capabilities of each one. There are no conclusive results about which of the methodologies could lead to better results.

Main effects only assumption and the election of one of the elicitation methods have brought interest in using more complex and accurate estimation methods that can include more crucial information for the modeling of consumer's preference for a new product.

## Materials and Methods

### Objectives of the CA research

The objective of the research was to find which conjoint analysis methodology CVA or CBC got better results taking into account the advantages and disadvantages that each of them have. Specifically, if the advantage of considering interactions terms in the CBC can contribute to the share of preference model explained by the CA, due to the fact that CVA cannot include interaction between the factor that are being explored. Therefore a CVA vs. CBC was conducted and compared to determine which conjoint methodology got better results using an additive composition rule for CVA where only main effects could be considered in contrast with an interactive composition rule in CBC where interaction terms were included. The results were analyzed by goodness of fit, attribute importance values and utility scores.

The theoretical problem is whether to be able to use a more sophisticated and more in use methodology to achieve better results in conjoint analysis through the develop of surveys based on choices (CBC) and then analyze the results; compared against a more straight forward methodology, nowadays less often used where rating specific combinations are used (CVA).

The type of data in the results obtained by each methodology is different. In CBC the data type is nominal so the statistical analysis is completely different from the data obtained in CVA which is ratio data, where traditional statistical basis can be used to approach and obtain results. This distinction is crucial for the theoretical problem established and the use of a a complex resolution method such as Hierarchical Bayes in CBC is putted to test against using common statistical knowledge in CVA to obtain people preferences and a model that could predict more accurately these preferences.

With the CBC the theory involved is much more complex as mentioned before than with CVA, so the results in this investigation could provide a guide to whether

use a CBC or a CVA based on analytic and technical criteria to discard one of them and not merely discard the CBC for its complexity. The implication of using robust statistical criteria to discard one of the methodologies is a strong fundament of the study in order to make conjectures.

To do so, a study subject was needed in order to generate data to compare both methodologies. Hence the practical problem was to generate a conjoint analysis that allowed combining different levels and factors to apply a share of preference model. Therefore the creation of new mixes of beverages was selected to comply this requirement due to its recent elevated local consumption [14–16].

Next, using a market research, RTD were crafted and those findings were adapted to each conjoint methodology, according to the rules to create unbiased combinations and avoid possible problems due to presentation order.

After limiting the population based on local statistical information found, the surveys were crafted with the help of Sawtooth Software and the experimental designs were carefully selected in order to meet all the technical requirements to get the best possible results in each conjoint methodology.

### Market Analysis

Over the years, the consumption of alcoholic beverages has changed in a way that cocktails are now taking more market than before, due to their flavor mixes involved and their low alcoholic content [17]. Also [14] indicated that the propaganda and marketing towards this new trend in consumption of low alcoholic level beverages is directed to the young population, and the core characteristics of these products are: new flavors, quality of ingredients in the mix, and the presentation with the package ready to drink.

The growth in volume of this RTD can be seen in countries like New Zealand, where from early 1990s to 2007, the consumption went from 3% to 14% and assures that this growth will continue in part because of the marketing made and people's consumption habits [14].

Data from the World Health Organization recorded consumption on average values in liters per capita; these values have increased between the periods of 2003-2005 (3.8L) to 2008-2010 (4.2L), which also confirms the growing consumerism of these products [18].

### Target Population

The research was conducted in the city of Quito, Ecuador due to high consumption rates per capita [15, 16].

Groups of ages between 18-44 years old were selected to conduct the study because this age group is found to consume more than the others [16]. The socioeconomic population status targeted was high (AB) and mid high

(C+) due to their more frequent consumption [16]. Finally, in order to obtain reliable results, only respondents that have drunk at least once in the last month were targeted, considering consumption frequencies [16].

Considering the parameters mentioned earlier 132,797 people composed the target population [15].

**Design of the CA**

A comparison for conducting a CVA with Rb elicitation method and a CBC with Cb, are shown in Figure 1 with modifications according to the performed research (the modifications are shown in color).

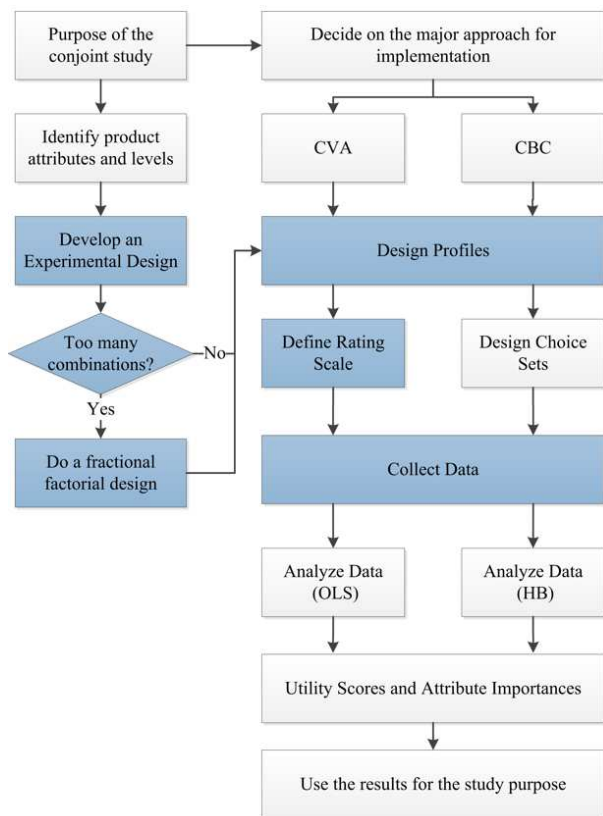


Figure 1: Conducting a Conjoint Analysis RB vs. CB adapted from [9].

**Identify product attributes and levels, and Factorial Design Development**

Three focus groups were conducted, as well as market research of places where cocktails were sold in order to identify which ingredients were going to be included in the experimental design as attributes and their respective levels.

Each focus group conducted had the purpose of extracting important alcohol consumption information from the participants. The information was about the types of alcohol they used to drink and the preference about each of them. The participants also provided the information about the mixes they preferred to make or buy, and the ingredients and flavors they liked or dislike in a mix. In order to obtain more information about cocktail recipes,

many of them were consulted in the market with different bartenders.

The resultant attributes and levels for this study are presented in Table 1.

Attributes		Levels	
Type A Liquor	Whisky	Rum	Beer
Type B Liquor	Tequila	Gin	Vodka
Touch of Flavor	Mentha Spicata	Grenadine	Energy Drinks
Solvent	Lemon Juice	Tonic Water	Lemon Flavored Soda

Table 1: Attributes and levels for CA Scenario 1.

Beer was considered as an attribute in this study due to the high percentage of consumption (79.2%) [15].

All attributes have the same number of levels, representing a symmetric design [9]; these types of designs are the most common ones and have been studied the most. Also they have obtained more representative results than their counterpart asymmetric designs, where the attributes may have different number of levels each. This study was labeled as Scenario 1.

Thus, the resulting factorial design was a 3<sup>4</sup>, which generated 81 possible combinations [19]. However respondents often lack the energy or patience to answer many questions in a CA, thus this quantity of combinations can burn the respondents [10].

Typically, the amount of tasks respondents can answer for a CVA is between 20 and 30 [8]. As a guide of the number of questions that could be asked to obtain stabilization in the results, [10] recommended at least two or preferably three times the number of parameters to be estimated. The parameters to be estimated are: #levels - #attributes + 1, which yielded to 9 parameters. The factor of 3 was applied, thus 27 questions had to be asked in the CVA study. With the CBC methodology there were recommendations to establish a suitable number of questions, but in order to choose the same amount of combinations presented to respondents in both CA, 9 questions with 3 combinations each was proposed for CBC.

The resulting combinations for Scenario 1 could have been difficult to conceptualize for respondents considering that these RTDs have ingredients as attributes and levels that are not typical in the local market mixes. To mitigate this possible bias on the research objectives, a second scenario with most frequent market cocktails was developed to run a complementary study, where now the attributes could be more distinguishable to respondents.

The attributes in this case had different number of levels, resulting now in an asymmetrical design [9]. The

Attribute	Levels			
Cocktail	Mojito	Cuba Libre	Submarine	Michelada
	Blue Margarita	Tequila Sunrise	Padrino	Whisky Sour
	Vodka Tonic	Screw-driver	Tom Collins	Gin Tonic
	Aluminum Can	Glass Bottle		
Container Type	Medium (330ml)	Small (220ml)		

**Table 2: Attributes and levels for CA Scenario 2.**

attributes and their levels are shown in Table 2. This study was labeled as Scenario 2.

The study was approached with these two scenarios for the comparison of both methodologies. Two surveys for each scenario were developed, one with CVA and one with CBC respectively. In each of the four surveys, respondents rated or chose among the 27 combinations presented.

Next, each methodology is described in terms of the design involved in each one.

### Conducting CVA technique

Considering the number of questions to obtain stable results and to eliminate information overload, a FF design  $3^{4-1}$  was proposed. A 3-level FF design matrix was used to obtain the most efficient fraction of the design, which considered a minimum aberration criterion in order to guarantee a maximum resolution design [20]. Noting that CVA does not consider interactions, the criterion assures not to confuse the main effects between them and with two-way interactions, obtaining a design of resolution IV.

For Scenario 1, ten versions of the design matrix were randomly generated and manually introduced into the SSI Software to avoid order and context effects in the questionnaire, which could have affected people's responses, generating a potential bias in the results [10]. For Scenario 2, the same amounts of versions of Scenario 1 were automatically generated.

A 10-point (10 categories) rating scale was used for the CVA methodology due to its advantages in reliability, validity, discriminating power, and respondents' preferences of rating scales [21].

### CVA Utility Estimation by OLS

The basic weighted additive model for CVA methodology using rating tasks can be stated as follows [22]

$$r_k = \beta_0 + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \beta_{jm} x_{jm} + e_k$$

where

$r_k$  = Response for option k.

$\beta_0$  = Intercept or constant.

$\beta_{jm}$  = Part worth utility of level m of attribute j.

$x_{jm}$  = 1 if option k has level m on attribute j (otherwise) else  $x_{jm} = 0$ .

$e_k$  = Error term.

Part worth utilities were estimated by applying multiple regressions with OLS, using a dummy variable coding in which deleting one level of each attribute from the computation was done. Otherwise, a linear dependence among the variables describing the levels of each attribute would lead to indeterminacy in the computation [23].

### Conducting CBC technique

As mentioned earlier, the condition was to test the same amount of combinations between the two CA methodologies. In order to achieve that, each choice set was composed by 3 combinations plus the "none option", obtaining a total of 9 tasks; in addition, two fixed tasks were added to improve the estimation (Sawtooth Software, 2014) giving a total of 11 tasks instead of the 27 tasks on the CVA. This was done to comply with the typical number of choice task on a CBC, which is about 8 to 12 [24].

Next, a method to construct the choice sets was selected. Several methods exist to do the construction, depending on their capabilities, exposed in Table 3.

The random method was selected to compose the CBC sets because it is the most complete design in estimating interaction effects, in spite of being the least efficient when estimating main effects [13]. For computerized interviewing, in order to gain in design efficiency, but most importantly to decrease order and context effects, 300 different version sets were automatically created [11].

Each version showed 27 different combinations among the 81 possible ones, unlike the CVA methodology where the 27 combinations were part of the same fraction but the order was randomized.

### CBC Utility Estimation by HB

The utility associated with a combination can be stated as follows [22]

$$U_{ij} = \beta x_{ij} + e_{ij}$$

where

$U_{ij}$  = The utility of respondent i associated with profile j (this could be a combination A or B).

$\beta$  = A vector of parameters to be estimated.

$x_{ij}$  = A vector of attributes of profile j presented to respondent i.

$e_{ij}$  = The stochastic portion of the utility function.

Effects	Design Method						
	FF Shift	FF Mix & Match	FF L <sup>MN</sup>	CBC Complete Enum	CBC Shortcut	CBC Random	CBC Balanced Overlap
Main Effects Only	X	X	X	X	X	X	X
Interactions		X	X	X	X	X	X
Prohibitions				X	X	X	X
Alternative Specific Effects		X	X		X	X	
Cross Effects			X			X	

Table 3: Comparison of Capabilities [4].

Respondent  $i$  would choose profile A over profile B if  $U_{Ai} > U_{iB}$  and the probability of such choice is  $P_i(A) = Prob\{\beta x_{iA} + e_{iA} \geq \beta x_{iB} + e_{iB}\}$

CBC is based on a maximum utility model MNL, which is part deterministic and part random, borrowing information from the rest of the sample to estimate the probabilistic part of the utility [25].

Using MNL, the HB estimation method performs an iterative process using Bayesian Analysis to draw the parameters of the prior distributions that the data is assumed to follow, in this case the partial utility weights of the preference model.

Using the Bayesian Analysis implies to turn the statistical estimation process around; this is done instead of assuming that the data is described by a particular model with specified parameters, and then investigate if the data is consistent with those assumptions; now the assumption about the model that describes the data remains, and computations are done to see if the data is consistent with the assumptions a priori. The difference lies in the fact that now the probability distribution of the parameters is investigated given the data [6, 25].

In Appendix A, a more detailed explanation of the Hierarchical Bayes model used to estimate the utilities is presented based on the work made by [25, 26].

In order to detect if the interactions were significant, an interaction analysis was performed using the modified 2-log likelihood test (2LL); this process has demonstrated to be very effective in finding significant interactions [11].

### Sample Size

Reducing the possible errors generated by the data in a cost-effective way is of big concern for researchers that want to implement CA and obtain representative results [10]. Current literature on the topic presents several options for determining valid sample sizes in CA. For developing hypothesis for a market, values of 30 to 60 are recommended [10]. A range of 150 to 1200 respondents is suggested for experimentation [10]. [27]

Mentions a sample size for full factorial designs between 50-100 respondents to achieve meaningful, robust, and projectable data. Other examples include the work performed by Torres, Paz & Salazar that resulted in a sample size of 246 people using a mathematical formulation. Finally, in a study with limited sample size, 250 respondents for CBC had a stable performance [2]. Based on these results, a sample size of 250 was used for Scenario 1 and 150 for scenario 2 due to the more natural and known nature of the attributes to respondents.

### Construction of the survey and data collection

SSI Web module was used to generate the questions for each scenario. One introduction page was made to guide the respondents through the survey. Then, the screening questions were presented to guarantee the respondents were in fact part of the target population.

Validated CA questions were presented afterwards. The validation process consisted of a pilot test where original questions were presented to the 25 respondents to determine if the questions were clear to answer. Results showed that respondents did not understand how to answer to different elicitation tasks presented and got confused about the amount of combinations, tending to think that they were repeated along the survey. In order to solve this issue, a description was added, indicating how to qualify the task with a notice that all of the combinations in the survey were different and at least one level made the difference among them.

All surveys were fielded through the Internet and stored in Sawtooth Software servers. However, given the low rate response of 3% for data collection using Internet [27], the use of tablets was employed to collect data on the field as well.

## Results & Discussion

### Estimating the Conjoint model and assessing overall fit

The highest incomplete surveys were from the CVA methodology due to the quantity of rates that they involved; in



contrast, in CBC choices facilitated the tasks to respondents. The total data collected across surveys are shown in Table 4.

	CBC1	CVA1	CBC2	CVA2	Total
Qualified / Complete	251	250	150	150	801
Disqualified Incomplete	101	130	106	145	482
Total	452	525	331	399	1707

Table 4: Number of fielded surveys.

In order to compare similar situations among the used conjoint methodologies, the screening questions obtained from each survey were equivalent. The results from the screening questions corroborated what several authors mentioned, which is that this product is aimed to younger group ages; thus, the inclusion of this group was more pronounced. The results table is exposed in Appendix B.

The utilities, importance values, and goodness-of-fit were obtained for each respondents using SSI web (Sawtooth Software version 8.3.6). In Appendix C, the utility scores for Scenario 1 are presented as reference. Next the results obtained will be exposed for each Scenario.

Scenario 1

Importance values were obtained for both CA and are shown in Figure 2.

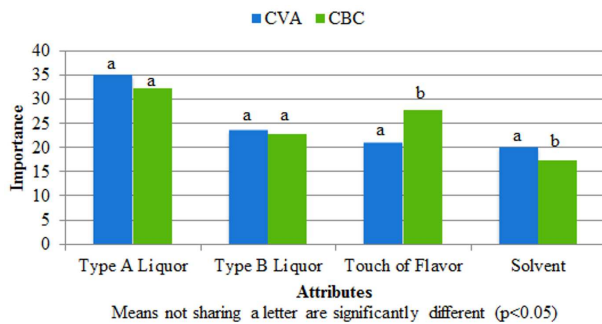


Figure 2: Importance values for Scenario 1.

As it can be seen in Figure 2, the importance values obtained by each CA were not equal. The importance values of Touch of Flavor were different at 95% significance as well as in the Solvent importance values; in addition, considering the order of high to low importance values, the second importance, Type B Liquor for CVA and Touch of Flavor for CBC, indicated that both CA estimations did not lead to similar results.

[8] Mentioned the determination coefficient as a measure of the goodness-of-fit for the estimation of the model as well as the study performed by [2]. The average determination coefficients obtained for Scenario 1 were 0.49 for CVA and 0.63 for CBC. The last value includes significant interaction, which will be expanded later, and represents a much better fitting model estimation for CBC. Overall utilities for both conjoint methodologies

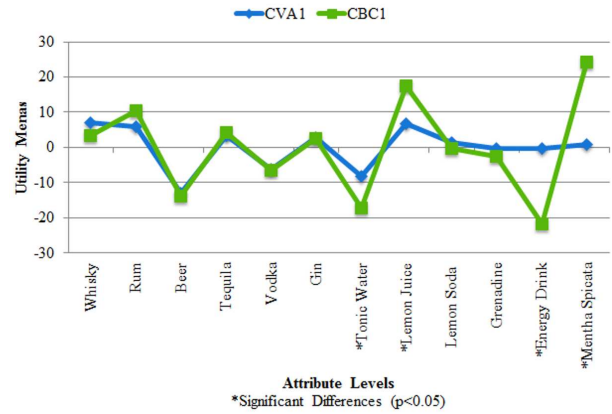


Figure 3: Zero centered average utility values for Scenario 1.

are presented in Figure 3, along with the respective comparisons.

Figure 3 shows the same utility trend; however, the analysis of significant differences at 95% confidence showed that some utility averages were different. Hence, this was another evidence that CBC and CVA did not lead to similar results.

Figure 3 also showed that for Liquor Type A, the least preferred level was Beer for both methodologies and the most preferred ones were Rum and Whisky for CBC and CVA, respectively; for Liquor Type B, the least and most preferred attribute levels were Vodka and Tequila for both CA. Similarly, for Solvent attribute, the least and more preferred levels were Tonic Water and Lemon Juice; for Touch of Flavor, the least and more preferred levels were Energy Drink and Mentha Spicata.

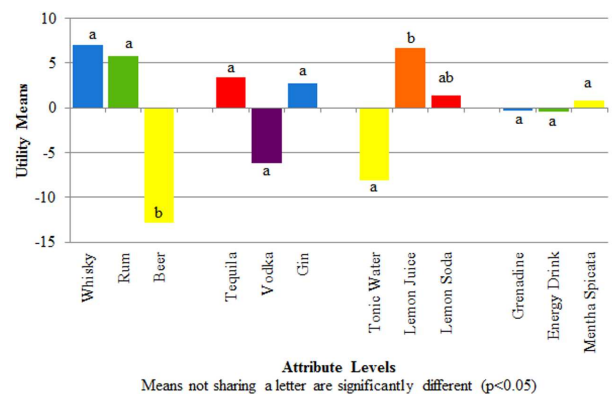


Figure 4: Zero Centered utility values per attribute levels for CVA1.

Similarly, the utility means for each CA methodology were tested to determine if each CA could find significant differences between utilities, yielding in the impact over the total preference model. The results are shown in Figures 4 and 5.

As it can be seen, despite the fact that both CA revealed the same positive and negative trends for all levels, CBC considered more significant differences between levels of the same attribute than the CVA. For example, for

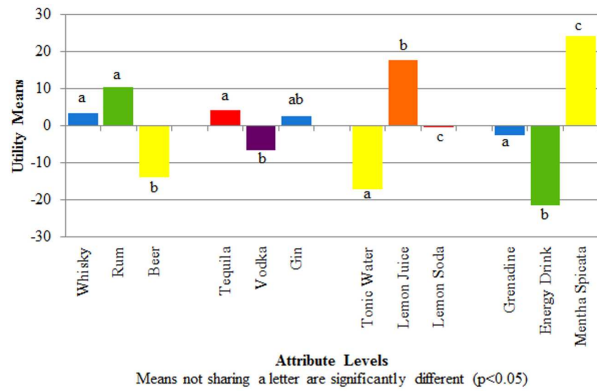


Figure 5: Zero Centered utility values per attribute levels for CBC1.

Type A Liquor, CVA found the same significant differences as CBC; however, for the rest of the attributes, the results were not the same, especially for the Touch of Flavor attribute, where CBC determined all significant differences between its levels, yet the CVA declares none.

One important milestone in the results obtained from the CBC study was to look for possible interactions that could have been affecting the preference model. An interaction plot was constructed using Minitab Software to identify possible interactions and is shown in Figure 6.

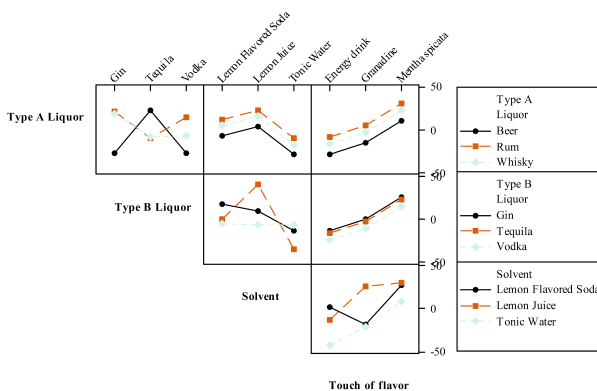


Figure 6: Interaction Plot for Scenario 1 CBC.

Figure 6 showed a potential interaction between the attributes Type A Liquor and Type B Liquor, and similarly, with Type B Liquor and Solvent, as well as Solvent and Touch of Flavor. After running the modified 2LL test, the results found in Figure 6 were corroborated, and the 3 significant interactions agreed. The modified 2LL test results are shown in Table 5 with the respective p-values considered to establish significant interactions at 95% of confidence.

**Composition rule model**

The utility scores for the significant interactions are shown in Appendix D as reference.

The 81 possible combinations were obtained considering the additive model for CVA and the interaction model

Interaction	Chi-square Value	2LL p-value
Type A Liquor * Type B Liquor	19.8055	0.0005
Type B Liquor * Solvent	17.6101	0.0015
Solvent * Touch of Flavor	11.6912	0.0198
Type A Liquor * Touch of Flavor	6.4600	0.1673
Type B Liquor * Touch of Flavor	5.2857	0.2592
Type A Liquor * Solvent	5.0089	0.2864

Table 5: Interaction Search Tool Results.

for CBC [8]. The total utility scores for each CA methodology were sorted from highest to lowest; the two highest scores are displayed in Table 6 as reference.

CA1	Ord.	Type A Liquor	Type B Liquor	Touch of Flavor	Solvent	Total utility
CVA1	1	Whisky	Tequila	Lemon Juice	Mentha Spicata	17.96
	2	Whisky	Gin	Lemon Juice	Mentha Spicata	17.34
CBC1	1	Beer	Tequila	Lemon Juice	Mentha Spicata	71.33
	2	Beer	Tequila	Lemon Juice	Grenadine	66.05

Table 6: Best two Combinations for CVA and CBC Scenario 1.

The determinant appearance of Beer in both combinations with the higher utility scores for the CBC in contrast with the total absence of this level in the CVA showed a clear interaction that explains preference more accurately in the CBC with the interaction composition rule. When considering interactions, the performance of the CBC was greater in terms of information about the respondents' preferences.

For Scenario 1, the two highest utility scores of CVA were positioned in CBC in places 6 and 15. In contrast, the highest utility scores of CBC were positioned in places 49 and 51 in CVA.

**Scenario 2**

The same analysis was conducted for Scenario 2. Importance values are shown in Figure 7.

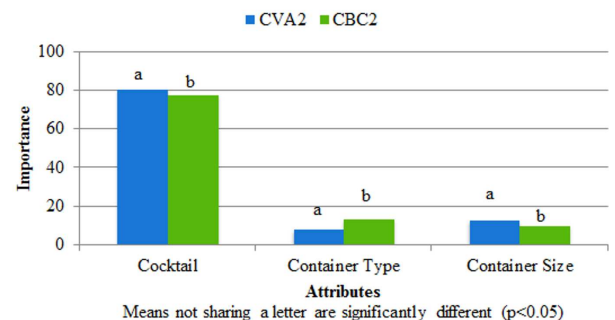


Figure 7: Importance values for Scenario 2.

Cocktail showed, that in both CA methodologies, was by far the most preferred attribute when comparing it with Container Type and Container Size. Also, the order of attribute importance in both CA was the same.

The average correlation coefficients obtained were 0.75 for CVA and 0.67 for CBC, representing a better fitting

estimation for CVA. The comparisons of the results for the utilities calculated are shown below.

One of the possible explanations to the sudden change in Scenario 2, was due to three main factors: with lower sample size, CVA performs better estimation predictions than CBC as the literature suggested; no significant interactions were found and the nature of the attributes were more known.

The same analysis of mean comparisons were performed between both CA and are shown in Figure 8 were the results presented significant differences between all utility levels, except for Tequila Sunrise, Vodka Tonic and Michelada.

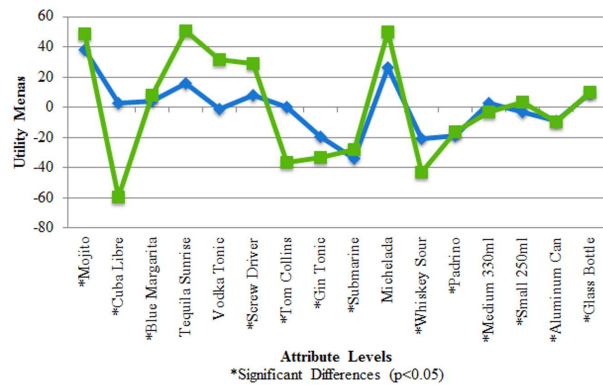


Figure 8: Zero centered average utility values for Scenario 2.

According to Figure 8, the least Cocktail level preferred was Cuba Libre and the most preferred one was Tequila Sunrise for CBC. In the CVA, the least preferred one was Submarine, and the most preferred one was Mojito. For the Container Type attribute, the most preferred level was Glass Bottle for both methodologies. Finally, for Container Size, the most and least preferred attribute levels were contrasted between the two conjoint studies performed.

Like in Scenario 1, a mean comparison between levels for each attribute was considered, revealing the same pattern for CBC being the technique that led to determine significant differences between levels. For both CA, the results were different; for example, for the attribute Cocktail in the CVA, Mojito, Tequila Sunrise, and Michelada had the highest utility scores, in contrast with the results from the CBC where only Mojito had the highest utility score. For Container Size, in CBC there was a significant difference between the values for 250ml with a higher value than for the 330 ml; on the other hand in CVA significant differences were not found between these two levels. At last, for Container Type, significant differences between these two were found for both CA.

The interaction search tool did not find any significant interaction to be included in the model. Table 7 shows the higher utility values obtained after applying the additive model with no interactions.

CA2	Ord.	Cocktail	Container Type	Container Size	Total Utility
CVA2	1	Mojito	Glass Bottle	Medium 330ml	50.04
	2	Mojito	Glass Bottle	Small 250ml	44.21
CBC2	1	Tequila Sunrise	Glass Bottle	Small 250ml	64.18
	2	Michelada	Glass Bottle	Small 250ml	63.37

Table 7: Two Higher Utility values for CA Scenario 2.

Despite the fact that an Additive model was used for both methodologies, due to the absence of significant interactions, the combinations showed in Table 7 were different between both CA.

As reference, for Scenario 2, the two highest utility scores of CVA were positioned in CBC in places 6 and 3. In contrast, the highest utility scores of CBC, were positioned in places 4 and 8 in CVA. As it can be noticed, the highest utility scores in each methodology switched places, considering that Container Size Small was present in three of the four combinations and had an individual estimation that was significantly different with a high utility score.

These results can be explained because the CBC could better represent more respondents' heterogeneity due to the significant interactions encountered within attribute levels. With this differentiation, the CBC can distinguish which attribute levels impact the respondents' preferences better than the CVA.

### Conclusions

The inclusion of significant interactions led to different combinations with higher total utility in the composition rule for CBC Scenario 1. If these interactions had been excluded from the analysis, the appearance of Beer level would have never been considered due to its negative partial utility score in both methodologies. Therefore, when considering only the main effects, information can be ignored; thus, the analysis of interactions has to be a fundamental part in a CA study.

When the NPD process involves inner characteristics, like in scenario 1, the early knowing of which attribute levels could have significant interactions with others can be a challenging task that could be biased by the researchers. Thus, in this case using a CA methodology that permits the estimation of interactions should always be considered.

In this study, CVA and CBC methodologies did not lead to similar results due to different importance orders attributes and significant differences across utility level estimations. Moreover, CBC reflected more capabilities in finding significant differences within attribute levels that definitely aided to differentiate the levels that contributed to respondent preferences. Furthermore, the goodness-of-fit when interactions were significant was

higher for CBC, obtaining a model of preference with more information.

Designing a CBC study is a more complex task that involves specialized software aid for HB estimation and extra experimental design knowledge because it does not only considerate creation of combinations but also the design of sets. Consequently, the study gains the inclusion of significant interactions to predict as accurately as possible the consumer's preferences.

The HB estimation method helped the CBC to obtain results at an individual level with less information from respondents. This led to capture more heterogeneity and significant interactions across the respondents, which is a positive fact about this method. However, the complexity involved with this estimation is high and without the help of specialized software, the estimation could be extensive, meaning that the iterative process performed is computationally extensive and trying to simulate it can take longer periods of time and effort. Thus, using complex estimation methods should be balanced with using specialized software.

The use of choices as an elicitation method instead of ratings, gives less information about the preference of the respondent due to the fact that choices represent the preference of the selected combination in the set, but it does not state how high or low that preference is, like rating tasks do. This fact can be balanced with higher sample sizes, as it can be seen in the results of scenario 2, in which a smaller sample size led to obtain a lower goodness-of-fit for CBC.

The goodness-of-fit of each methodology was compared and analyzed, and higher values were obtained when interactions were included; thus, CBC performed better due to the quantity of variance explained by the model, in contrast with the goodness-of-fit of the CVA methodology. When interactions were not found, the model explained greater variance with the CVA methodology possibly due to the random design method used for estimating the Conjoint instead of the Balance Overlap Method that is better at estimating main effects.

In the CVA methodology, the amount of categories in rating scales can affect the results obtained; thus, the selection of the categories is a variable to be considered. Also, the number of tasks that is directly correlated with the number of profiles tested could overwhelm respondents, thus the use of fractional factorial designs helps the CVA methodology in reducing drastically the number of tasks presented to respondents to obtain better results.

On the other hand, the construction of sets in CBC drastically reduces the number of tasks presented in contrast with CVA, therefore reducing a potential burden of respondents. However, it is important to mention that the cognitive effort in a choice task is greater than in a rating task; therefore, this effect has to be studied in more detail.

Design concerns for the creation of stimuli are a fundamental part of any CA study that needs to be completed to obtain the best possible results. The proper uses of experimental design tools in each of the design phases are key for the results gathered.

The results exposed in this study has led to recommend using CBC methodology, acknowledging the fact that interactions can not be foreseen, and balancing the complexity involved in HB estimation. An important result is the capture of heterogeneity in CBC, which means that the difference across respondents about their preferences was revealed; leading to know which levels in each attribute contributed more to the preference model.

The results obtained cannot be generalized and the guidelines that several authors give should be taken into consideration and analyzed deeply. Nevertheless, the decision has to be supported on quantitative data, and more investigation should be encouraged to see the benefits and drawbacks of using different CA methodologies.

### Acknowledgements

This research was submitted in partial fulfillment of the requirements for the undergraduate degree of Industrial Engineering in Universidad San Francisco de Quito (Ecuador).

Sawtooth Software Inc. provided the software as a student research grant to Alvaro Enríquez and Andrés Paredes.

The authors thank Sawtooth Software Inc. for providing the SSI Web to carry out this study.

### References

- [1] Karniouchina, E.; Moore, W.; van der Rhee, B. 2008. "Issues in the use of ratings-based versus Choice-based conjoint analysis" in *operations management research. European Journal of Operational Research*, 197(1): 340-348.
- [2] Jervis, S.; Ennis, J.; Drake, M. 2012. "Comparison of adaptive choice-based conjoint and choice-based conjoint to determine key choice attributes of sour cream with limited sample size". *Raleigh: Journal of Sensory Studies*, 27: 451-562.
- [3] Lambin, J. J.; Schulling, I. 2008. "Market-Driven Management: Supplementary web resource material". Palgrave Macmillan: 117-125.
- [4] Orme, B.; Chrzan, K. 2000. "An overview and Comparison of Design Strategies for Choice-Based Conjoint Analysis". Sawtooth Software Research Paper Series, Washington, USA. <https://www.sawtoothsoftware.com/download/techpap/desgncbc.pdf>.
- [5] Barone, S.; Lombardo, A.; Tarantino, P. 2007. "A Weighted Logistic Regression for Conjoint Analysis and Kansei Engineering". *Quality and Reliability Engineering International*, 23: 689-706.

- [6] Sawtooth Software. 2009. "The CBC/HB System for Hierarchical Bayes Estimation Version 5.0 Technical Paper". Sawtooth Software Technical Paper Series. Washington, USA. <https://www.sawtoothsoftware.com/download/techpap/hbtech.pdf>.
- [7] Green, P. E. 1990. "Conjoint Analysis in Marketing: New Developments with Implication for Research and Practice". *Journal of Marketing*, 54(4): 1-19.
- [8] Hair Jr, J. F.; Black W. C.; Babin, B. J.; Anderson, R. E. (2007). "Multivariate Data Analysis". Prentice-Hall.
- [9] Rao, V. R. 2010. "Conjoint analysis". John Wiley & Sons, USA.
- [10] Orme, B. 2010. "Getting Started with Conjoint Analysis: Strategies for Product Design and Pricing Research". Research Publishers LLC: Madison, USA.
- [11] Sawtooth Software Inc. 2014. "SSI Web Help Manual". Sawtooth Software: Orem, USA. <https://sawtoothsoftware.com/support/manuals/ssi-web-help>.
- [12] Orme, B.; Alpert, M.; Christensen, E. 1997. "Assessing the validity of conjoint analysis - continued". Sawtooth Software Research Paper Series. Washington, USA. <https://www.sawtoothsoftware.com/download/techpap/assess2.pdf>.
- [13] Sawtooth Software, Inc. 2013. "The CBC System for Choice-Based Conjoint Analysis Version 8". Utah, USA. <https://sawtoothsoftware.com/download/techpap/cbctech.pdf>.
- [14] Brown-Forman. 2011. "Ready-To-Drinks". Brown-Forman: Kentucky, USA. [http://www.ourthinkingaboutdrinking.com/uploadedfiles/PDF\\_Downloads/Read-y-to-Drinks.pdf](http://www.ourthinkingaboutdrinking.com/uploadedfiles/PDF_Downloads/Read-y-to-Drinks.pdf).
- [15] Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). 2011-2012. "Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos en hogares Urbanos y Rurales (ENIGHUR)". Ecuador en cifras: Quito, Ecuador. [http://www.inec.gob.ec/Enighur\\_/Analisis\\_ENIGHUR%202011-2012\\_rev.pdf](http://www.inec.gob.ec/Enighur_/Analisis_ENIGHUR%202011-2012_rev.pdf).
- [16] Sojo, O. C. 2012. "Patrones de consumo de alcohol en el Ecuador". FLACSO, Investigación: San José, Costa Rica.
- [17] King, E. 2012. "Regulatory Impact Statement: Alcohol Reform Bill - Policy Amendments for Inclusion in the Government Supplementary Order Paper". Ministry of Justice: New Zealand. <http://www.treasury.govt.nz/publications/informationreleases/ris/pdfs/ris-justice-arbp-aug12.pdf>.
- [18] World Health Organization (WHO). 2014. "Global Alcohol Report - Ecuador". World Health Organization: Geneva, Suiza. [http://www.who.int/substance\\_abuse/publications/global\\_alcohol\\_report/profiles/ecu.pdf?ua=1](http://www.who.int/substance_abuse/publications/global_alcohol_report/profiles/ecu.pdf?ua=1).
- [19] Addelman, S. 1962. "Symmetrical and Asymmetrical Fractional Factorial Plans". *American Society for Quality*, 4 (1): 47-58.
- [20] Xu, H. 2005. "A catalogue of three-level regular fractional factorial designs". *Metrika*, 62: 259-281.
- [21] Preston, C. C.; Colman, A. M. 2000. "Optimal number of response categories in rating scales: reliability, validity, discriminating power, and respondent preference". *Acta Psychologica*, 104(1): 1-15.
- [22] Igomereho, O. S. 2011. "Conjoint Analysis: A Strategic Tool for Product Research". *International Journal of Economic Development Research and Investment*, 2 (3): 1-9.
- [23] Sawtooth Software Inc. 2002. "Conjoint Value Analysis (CVA) Version 3.0". Sawtooth Software Technical Paper Series. Washington, USA. <https://www.sawtoothsoftware.com/download/techpap/cva3tech.pdf>.
- [24] Howell, J. 2009. "CBC/HB for beginners. Sequim: Sawtooth Software". Sawtooth Software Research Paper Series. Washington, USA. <http://www.sawtoothsoftware.com/download/techpap/CBCHBbeginners.pdf>.
- [25] Allenby, G. M.; Rossi, P. E.; McCulloch, R. E. 2005. "Hierarchical Bayes Models: A Practitioners Guide". Social Science Research Network. Ohio, USA. [http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=655541](http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=655541).
- [26] Lenk, P.; DeSarbo, W.; Green, P.; Young, M. 1996. "Hierarchical Bayes conjoint analysis: recovery of part worth heterogeneity from reduced experimental designs". *Marketing Science*, 15 (2): 173-191.
- [27] Moskowitz, H. R.; Silcher, M. 2006. "The applications of conjoint analysis and their possible uses in Sensometrics". *Food Quality and Preference*, 17: 145-165.
- [28] Chib, S.; Greenberg, E. 1995. "Understanding the Metropolis-Hastings Algorithm". *The American Statistician*, 49(4): 327-335.



## Supplementary Material

### Appendix A: Hierarchical Bayes

The use of this Bayesian statistical analysis is based on the Bayes Theorem for conditional probabilities and it gives the capability to update the estimations made a priori with information from the data. Only an intuitive explanation is given here, and for more information refer to Sawtooth Software references for Bayesian Data Analysis.

Now, the HB is called “hierarchical” because of the two levels that the estimation has where:

$D$  = A matrix of variances and covariances of the distribution of part worth across individuals.

At the lower level, once the individual’s part worth’s are given, the probabilities that a respondent chooses a particular alternative is assumed to be governed by a Multinomial Logit Model.

The probability of the  $i$ th individual choosing the  $k$ th alternative in a particular task is

$$p_k = \frac{e^{x'_k \beta_i}}{\sum_j e^{x'_j \beta_i}}$$

where

$p_k$  = The probability of and individual choosing the  $k$ th combination in a particular task.

$x'_j$  = A vector of values describing the  $j$ th alternative in that choice task.

At the higher level the individual’s part worth is assumed to be described by a multivariate normal distribution.

$$\beta_i \text{ Normal}(\alpha, D)$$

where

$\beta_i$  = A vector of part worth for the  $i$ th individual.

$\alpha$  = A vector of means of the distribution of individual’s part worth.

The estimation is an iterative process where the parameters are updated until convergence of the parameters are obtained, and it uses a Metropolis Hastings Algorithm which is based on the Markov Chain Monte Carlo methods used to simulate complex, nonstandard multivariate distributions according to [28]. As mentioned before, the introduction of such methods were not possible due to the computational intensiveness required, but in the 90’s these type of estimations were beginning to be developed with the technologic advances made and now it is used in the present research with the help of Sawtooth Software. One important aspect to point out about the HB estimation, has the capability to estimate

individual part-worth for respondents, which was not possible with MNL or latent class utility estimations by itself when conducting a CBC; and it is this capability that permits a more detailed and accurate contrast with the results obtained from the CVA surveys.

Also, through HB estimation interactions affecting the utility scores can be measured, which in the context of this research is valuable to obtain results that could add information, resulting in a more accurate model.

## Appendix B: Screening Questions Responses

11 SCREENING QUESTIONS		CBC1 (n=250) (%)	CVA1 (n=250) (%)	CBC2 (n=150) (%)	CVA2 (n=150) (%)
Male		58	44	52	38
Female		42	56	48	62
Under 18 years old		0	0	0	0
18-24 years old		60	47	69	77
25-29 years old		29	35	11	14
30-34 years old		5	14	6	6
35-39 years old		3	3	7	3
40-44 years old		0	0	6	0
45 years old and older		0	0	0	0
Indicate if you or your house has the following options:	Internet Access	98	97	97	97
	Smartphone	79	90	95	81
	Laptop	86	75	86	91
	None of the Above	0	0	0	0
Indicate what type of floor has at home	Floating floor	29	32	27	34
	Parquet	30	32	26	26
	Board	17	13	20	20
	Wooden Stave	2	1	2	0
	Ceramic	27	15	23	19
	Tile	32	15	30	31
	Vinyl	2	0	0	1
	Porcelain / Marbel	6	7	15	16
Do you drink alcoholic beverages?	Other	0	0	0	0
	Yes	100	100	100	100
If consumed, when was the last time you consumed alcohol?	No	0	0	0	0
	In the last week	69	66	61	66
	In the last two weeks	15	20	26	22
	In the last month	16	15	13	12
Would you be willing to try a new blend of alcoholic cocktail?	More than one month	0	0	0	0
	Yes	100	100	100	100
What are the places where you drink alcohol more often?	No	0	0	0	0
	Bars and discos	76	67	65	70
	At home	26	24	38	27
	Friends home	53	39	69	61
	Restaurants	21	23	23	16
Indicate where do you get alcoholic beverages more frequently	Other	0	2	0	1
	Neighborhood shops	39	24	28	34
	Supermarkets	47	40	61	50
	Friends	27	22	25	33
	Liquor stores	53	52	49	46
Do you want to be contacted for a future consumer test?	Other	2	4	3	3
	Yes	39	40	42	39
No		61	60	68	61



**Appendix D: Utility Scores for Significant Interactions**

<b>Interaction Utilities</b>		
<b>Interaction Term</b>	<b>Level Interaction</b>	<b>Average Utilities</b>
Liquor Type A    Liquor Type B	Whisky x Tequila	-11.50
	Whisky x Vodka	0.92
	Whisky x Gin	10.58
	Rum x Tequila	-20.16
	Rum x Vodka	16.41
	Rum x Gin	3.75
	Beer x Tequila	31.67
	Beer x Vodka	-17.34
	Beer x Gin	-14.33
Liquor Type B    Solvent	Tequila x Tonic Water	-17.00
	Tequila x Lemon Juice	18.25
	Tequila x Lemon Flavored Soda	-1.25
	Vodka x Tonic Water	10.73
	Vodka x Lemon Juice	-6.44
	Vodka x Lemon Flavored Soda	-4.29
	Gin x Tonic Water	6.27
Gin x Lemon Juice	-11.81	
Solvent    Touch of Flavor	Gin x Lemon Flavored Soda	5.55
	Tonic Water x Grenadine	7.47
	Tonic Water x Energizer	-13.00
	Tonic Water x Mentha Spicata	5.53
	Lemon Juice x Grenadine	10.89
	Lemon Juice x Energizer	-0.31
	Lemon Juice x Mentha Spicata	-10.58
	Lemon Flavored Soda x Grenadine	-18.36
	Lemon Flavored Soda x Energizer	13.31
Lemon Flavored Soda x Mentha Spicata	5.05	

## Métodos para homogenizar y rellenar datos de viento de la torre meteorológica del Parque Eólico Villonaco en Loja-Ecuador

Diego Jijón<sup>1\*</sup>, Jessica Constante<sup>1</sup>, Marcelo Moya<sup>1</sup>, Gonzalo Guerrón<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables, Av. 6 de diciembre N33-32 e Ignacio Bossano, Quito, Ecuador.

\* Autor principal/Corresponding author; e-mail: [juan.jijon@iner.gob.ec](mailto:juan.jijon@iner.gob.ec)

Editado por/Edited by: Cesar Zambrano, Ph.D.

Recibido/Received: 2015/02/06. Aceptado/Accepted: 2015/03/30.

Publicado en línea/Published on Web: 2015/12/30. Impreso/Printed: 2015/12/30.

### Methods to homogenize and fill the wind data from the meteorological tower of Villonaco Wind Farm in Loja-Ecuador

#### Abstract

A new methodology of wind data processing used in feasibility and optimization of wind farms is presented in this work. The wind data of the meteorological tower provided by CELEC-EP is analyzed through a quality control of suspicious values, according to wind speeds greater than 50 (m/s) and a daily statistical relationship proposed in this work for the wind measurements at 20, 40 and 60 meters high. The suspicious values are processed and filled across of the statistical relationship among the different wind speed data at the three heights of measurement as a multivariate function. On the other hand, the turbulence intensity behaves as an exponential decay function of the average and standard deviation wind speed data. This work analyzes two methodologies for missing wind speed data filled, both were compared and one is chosen for wind data processing. The wind speed data quality control and homogenization were automatized since the supervisory control and data acquisition system "SCADA" of the Villonaco Wind Farm.

**Keywords.** Wind data analysis, wind database, wind data processing, quality control and homogenization.

#### Resumen

En este trabajo se presenta una nueva metodología para procesar los datos de viento que son usados en los análisis de pre-factibilidad y optimización de parques eólicos. Los datos de la torre meteorológica de Villonaco, entregados por CELEC-EP, fueron analizados a través de un control de calidad que consistió en reconocer los valores dudosos de velocidades de viento, medidas a 20, 40 y 60 metros de altura, mayores a 50 (m/s) y los cuales no corresponden a una relación estadística diaria propuesta en este estudio. Los valores dudosos son rellenados a través de una comparación estadística entre las mediciones de velocidad de viento, y así, se logró encontrar una relación entre las mediciones para una altura, en relación de las otras como una función multivariante. Por otro lado, la intensidad de turbulencia se comporta como una función de decaimiento exponencial entre la velocidad media y desviación estándar de velocidad del viento. Se establecieron dos metodologías de relleno de datos, las cuales fueron comparadas al final de este trabajo. El análisis fue automatizado desde los archivos planos recopilados por el sistema de control y adquisición de datos "SCADA" del Parque Eólico Villonaco.

**Palabras Clave.** Análisis de viento, bases de datos de viento, control de calidad y homogenización, procesamiento de datos de viento.

#### Introducción

La torre meteorológica de Villonaco se encuentra en la provincia de Loja a 4 kilómetros de la capital con coordenadas 79° 15' 35.16" al oeste (Longitud) y 3° 59' 49.58" al sur (Latitud), instalada a una altura aproximada de 2720 metros sobre el nivel del mar, la cual permite estudiar el comportamiento del viento en el cerro de Villonaco para los estudios de potencia y energía generados

por el parque eólico [1].

El Parque Eólico Villonaco posee una potencia nominal de 16.5 MW suministrada por 11 generadores tipo GoldWind 70/1500, el cual se espera que genere aproximadamente 60 GWh al año [1, 2]. La torre meteorológica de Villonaco registra los datos de dirección del viento a 38 y 60 metros de altura, y para la velocidad de viento lo hace a 20, 40 y 60 metros de altura. Esta estación



Coordenadas -79.130578 -3.978219

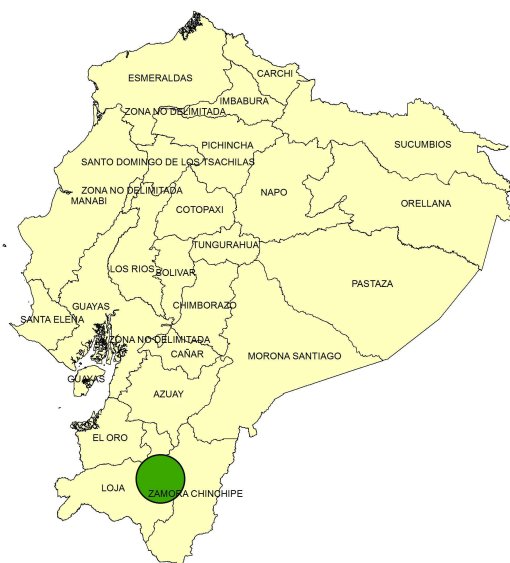


Figura 1: Coordenadas de ubicación Parque Eólico Villonaco.

cuenta con sensores de temperatura, presión atmosférica, veletas y anemómetros; por el momento los datos de temperatura y presión atmosférica no se encuentran disponibles. La velocidad del viento es medida por tres anemómetros de copa, los cuales registran los datos a un nivel temporal de diez minutos para los dos años que se encuentra en funcionamiento la estación automática [3–5]. Por esta razón los datos de la torre meteorológica deben pasar un riguroso estudio de valores atípicos y homogenización de los datos de viento para ser usados en estudios de generación de potencia y energía del Parque Eólico de Villonaco. En la literatura se citan diversos esfuerzos en los estudios de la homogenización y relleno de datos de variables meteorológicas [6–13], de los cuales se hace énfasis en la homogenización de datos de viento citados a continuación [10, 14]. El trabajo realizado por Wan et al. [10] describe la homogenización de las series de viento de 117 estaciones con datos superiores a 47 años y con una temporalidad diaria, lo cual fue usado para la caracterización del clima mediante la velocidad del viento, variabilidad y tendencias [10]. El metadato que indica el tipo de estación, los estándares de instalación y la localización son fundamentales para los procesos de homogenización. Para los valores atípicos, proponen un método de reconocimiento automático bajo los parámetros de módulo de la velocidad del viento ( $v$ ) superior a 128 (km/h), y si la condición de velocidad al tiempo ( $t$ ) cumple que,  $|v_t - v_{t-1}| > 28$  (km/h) y  $|v_t - v_{t+1}| > 28$  (km/h) [10]. Este tipo de procedimiento permite establecer una guía al momento de analizar los valores dudosos de una serie temporal obtenida por los registros de una estación automática, con una resolución temporal de diez minutos. La organización Mundial de Meteorología (WMO, por sus siglas en inglés) tiene una serie de recomendaciones al momento de realizar las mediciones para estaciones automáticas, las

cuales especifican que los valores pequeños de viento, menores o iguales a 0.2 (m/s), su equivalencia meteorológica es calma, y en general los vientos menores a 1.5 (m/s) son vientos calmados para anemómetros automáticos instalados a 10 metros de altura [15]. Para un parque eólico, las velocidades del viento menores a 3 (m/s) no son suficientes para mover las paletas de un aerogenerador tipo GoldWind 70/1500, esto según las especificaciones de fábrica [3].

En este trabajo se propone una metodología para el relleno de datos de la torre de medición de Villonaco, debido a que el anemómetro de copa a la altura de 60 metros dejó de funcionar en el mes de octubre de 2013. En este contexto, se realiza un reconocimiento de valores atípicos o dudosos de las series temporales de la velocidad de viento de las distintas alturas de la torre y se analizan dos métodos de relleno de datos.

## Métodología y Datos

El reconocimiento de valores atípicos de las series temporales de velocidad de viento se lo hizo a través del procedimiento de Wan et al. [10] mencionados anteriormente. La homogenización de las series temporales utilizó el trabajo realizado por Goulven et al. [16], el cual propone la homogenización y relleno de datos de las estaciones meteorológicas del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI), mediante el vector regional.

### Datos

Los datos entregados por CELECEP - Unidad de Negocio GENSUR (Corporación Eléctrica del Ecuador - Empresa Pública), corresponden a la torre meteorológica automática de Villonaco.

Las mediciones tomadas por la torre de medición de Villonaco correspondientes a la velocidad del viento, se realiza con 3 anemómetros de copa para las alturas de 20, 40 y 60 metros.

La velocidad del viento es registrada cada 10 minutos, y se toman los registros del promedio máximo, mínimo y desviación estándar del intervalo de tiempo.

Se realizaron los gráficos de rosa de los vientos para los datos de velocidad del viento y la dirección del viento a 60 metros de altura, y los datos de velocidad y dirección del viento para las alturas de 40 y 38 metros respectivamente. Esto se puede apreciar en la Figura 2 y Figura 3.

### Metodología

#### Valores atípicos y homogenización de datos

Los valores atípicos se refieren a la identificación de los datos sospechosos medidos por la torre meteorológica, o a su vez, determinar si un sensor de la estación dejó de

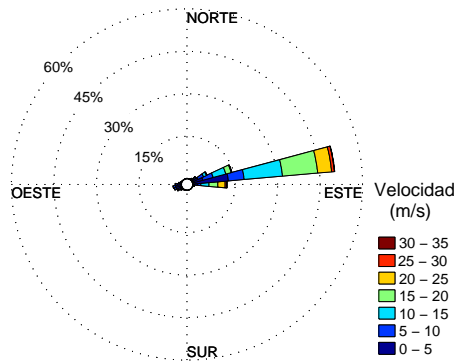


Figura 2: Rosa de los vientos para los datos de velocidad y dirección medidos a 60 metros de altura de la torre meteorológica de Villonaco.

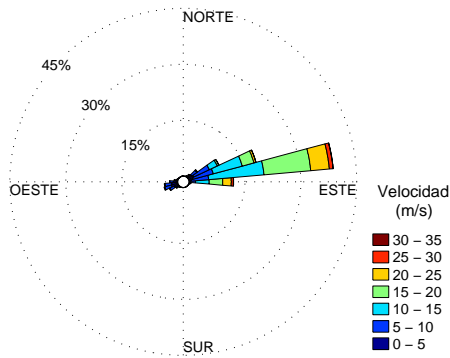


Figura 3: Rosa de los vientos para los datos de velocidad y dirección medidos a 40 y 38 metros de altura de la torre meteorológica de Villonaco.

funcionar o si su calibración cambió. Para esto, la metodología seleccionada consiste en declarar como valores sospechosos si se cumple las siguientes relaciones:

$$\begin{cases} v_t > 128 \text{ (km/h)} ; \\ |v_t - v_{t-1}| < 28 \text{ (km/h)} ; \\ |v_t - v_{t+1}| < 28 \text{ (km/h)} \end{cases} \quad (1)$$

Donde  $v$  es la velocidad del viento.

A partir de las relaciones dadas en la Ecuación (1), se identificaron los valores que cumplen la relación, y en primera instancia, se los reemplazó con el dato -999, para ser tratados y rellenados.

Por otro lado, se propone en este trabajo una identificación de valores atípicos mediante la relación de la velocidad del viento que existe entre las diferentes alturas. Para esto, se busca la correlación existente entre los datos medidos a 20, 40 y 60 metros de altura mediante una comparación a nivel diario, de tal manera que las medias

de velocidad quedan definidas de la siguiente manera:

$$M_q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_q(i), N \in \{\text{datos del día}\}, \forall i \in Z_0 \quad (2)$$

Donde  $M_q$  es la media diaria de los datos medidos a 60, 40 y 20 metros de altura.

$$R_{6040} = \frac{n \sum_{i=1}^n x_{60}(i)x_{40}(i) - \sum_{i=1}^n x_{60}(i) \sum_{i=1}^n x_{40}(i)}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_{60}(i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_{60}(i)\right)^2}} \times \frac{1}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_{40}(i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_{40}(i)\right)^2}} \quad (3)$$

En la Ecuación (3) se muestra el coeficiente de correlación entre las mediciones de la torre meteorológica de Villonaco a 60 y 40 metros de altura, esto para la velocidad de viento. Este mismo cálculo se realizó para las opciones de cálculo de los coeficientes de correlación, de tal manera que la matriz de correlaciones queda de la siguiente manera:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & R_{6040} & R_{6020} \\ R_{4060} & 1 & R_{4020} \\ R_{2060} & R_{2040} & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Para identificar si un sensor dejó de funcionar, o si su calibración cambió, se propuso considerar como un dato erróneo si cumple la condición de la Ecuación (5).

$$\text{dato}_{\text{error}} = \begin{cases} x_{60} < 0,75 x_{40} \\ x_{60} < 0,75 x_{20} \\ R_{6040} < 0,85 \\ R_{6020} < 0,85 \end{cases} \quad (5)$$

Donde, los valores se consideran dudosos si el dato difiere en 0.75 del dato de medición a 40 o 20 metros de altura. Se consideran todas las correlaciones que superen el 0.85, con lo que se garantiza una buena relación lineal entre dos variables aleatorias. La condición mostrada en la Ecuación (5) se utiliza para la velocidad del viento a 60 metros debido a que a 20 y 40 metros de altura de medición no presentaron errores de medición. En la Figura 4 y la Figura 5 se presentan los gráficos resultantes de las Ecuaciones (2) y (3).

En la Figura 5, se puede observar que para el periodo enero – septiembre de 2013, los valores de correlación de los datos de velocidad de viento varían entre 0.85 y 1. A partir del mes de octubre se nota un cambio de comportamiento en los valores de correlación los cuales varían entre 0 y 0.8. Estos valores según la metodología

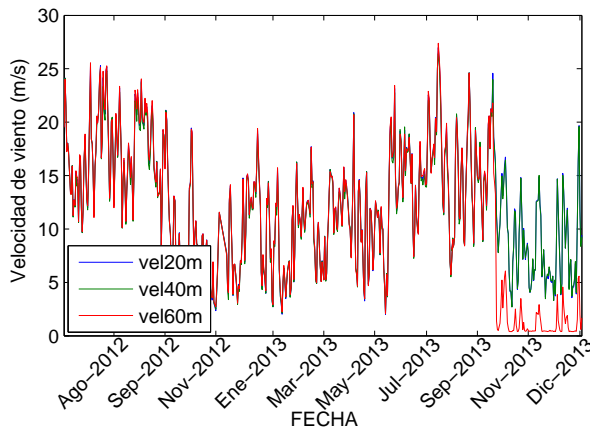


Figura 4: Velocidad del viento en (m/s) a nivel diario. Se observa que la línea roja cambia su comportamiento a partir de octubre de 2013.

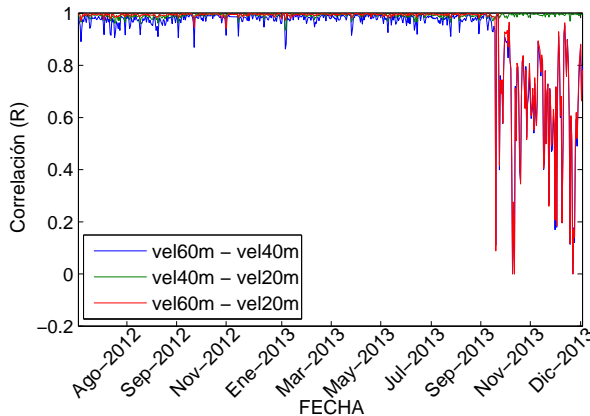


Figura 5: Correlaciones de la velocidad del viento a nivel diario, se observa que las líneas, azul y roja, cambian su comportamiento a partir de octubre de 2013.

utilizada fueron identificados como mediciones dudosas.

Una vez que se identificaron los valores dudosos de todos los datos de velocidad del viento, se realiza el mismo procedimiento para los valores máximo y mínimo de la velocidad del viento, así como para los registros de desviación estándar de las medidas diezminutales de velocidad.

Al momento de realizar mediciones de velocidad del viento para valores pequeños entre 0 y 1 (m/s) se pueden presentar errores por la precisión del instrumento, el cual para un anemómetro de copa es de 0.22 (m/s). Por esta razón, la WMO propone equivalentes de velocidad del viento, el cual para valores cercanos a 0.2 (m/s) se define como viento en calma, y según la escala de Beaufort son menores a 1 (m/s) [17, 18]. Para velocidades del viento menores a 3 (m/s) según la escala de Beaufort se define como ventolina. Estos vientos no tienen mayor trascendencia en un parque eólico debido a que no podrían mover las hélices de los aerogeneradores, por lo que en este estudio se procedió a no tomarlos en cuenta en el relleno de datos.

La desviación estándar de la velocidad del viento se en-

cuentra relacionada con la intensidad de turbulencia de la siguiente manera:

$$IT = \frac{\sigma_v}{v} \tag{6}$$

La Ecuación (6) expresa que a mayor dispersión en la medida de la velocidad del viento, la intensidad de turbulencia será mayor. En la Figura 6 se muestra la intensidad de turbulencia vs la velocidad del viento medido a 40 metros de altura.

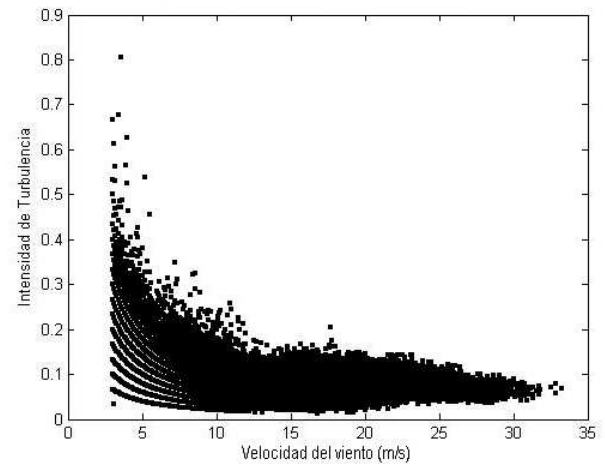


Figura 6: Intensidad de turbulencia vs la velocidad del viento a una altura de medición de 40 metros de la torre meteorológica de Villonaco.

Como se puede apreciar en la Figura 6, a medida que la velocidad del viento incrementa, la intensidad de turbulencia disminuye. Esto se debe a que la desviación estándar de las mediciones de la velocidad del viento no aumenta o disminuye. Esto es importante para establecer alarmas en un parque eólico.

En este estudio se encontró una relación de decaimiento exponencial entre la intensidad de turbulencia y la velocidad del viento, esta relación se la muestra en la Ecuación (7).

$$IT(v) = b1 + b2 \cdot \exp(b3 \cdot v) \tag{7}$$

En la Ecuación (7),  $b1, b2, b3$  son constantes, y se determinan mediante una regresión no lineal entre la intensidad de turbulencia ( $IT$ ) y la velocidad del viento ( $v$ ). Reemplazando la intensidad de turbulencia de la Ecuación (6) en la Ecuación (7) se puede determinar la desviación estándar de la velocidad del viento.

$$\sigma_v = v(b1 + b2 \cdot \exp(b3 \cdot v)) \tag{8}$$

**Relleno de datos sospechosos**

El relleno de datos se refiere al reemplazo de los valores dudosos por datos calculados o artificiales que dan un sentido físico a una serie temporal. Por esta razón, es fundamental cumplir con las condiciones mencionadas

en las Ecuaciones (1) y (5). Una vez encontrados todos los datos sospechosos se proponen dos metodologías de relleno para la velocidad del viento media.

La primera metodología consiste en construir una función multivariada entre las variables de velocidad del viento para las diferentes alturas de medición, tomando en cuenta la restricción de la correlación máxima de la Ecuación (4), considerando la variable a ser rellena. En nuestro caso se busca rellenar los datos erróneos para la velocidad del viento medido a 60 metros de altura. Para la velocidad del viento a 40 y 20 metros de altura, las mediciones se encuentran estables y pasaron el control de calidad de los datos mencionados en las condiciones de las Ecuaciones (1) y (5).

De esta forma se construye la función de regresión en función de la máxima correlación de los datos de velocidad del viento medidos a 40 o 20 metros de altura. La función de regresión a construirse se muestra en la Ecuación (9).

$$x_{60}(i) = m x_q(i) + b_q, \quad i = \{1, 2, 3, \dots, N\} \quad (9)$$

Donde  $m$  y  $b_q$  son las constantes obtenidas en la regresión lineal,  $x_q$  corresponde a la variable de velocidad del viento cuya correlación es máxima. Debido a que la matriz de correlaciones es una matriz simétrica

$$(R^T = R),$$

la máxima correlación viene dado por la

$$\begin{cases} R_{60 \text{ máx}} = \max \{R\} = \max \left\{ \begin{bmatrix} 1 & R_{6040} & R_{6020} \\ R_{4060} & 1 & R_{4020} \\ R_{2060} & R_{2040} & 1 \end{bmatrix} \right\}, \\ R_{60 \text{ máx}} \in R \notin Tr(R) \end{cases} \quad (10)$$

Donde  $R_{60 \text{ máx}}$  es la correlación máxima entre las variables de velocidad del viento para diferentes alturas de medición y  $R_{60 \text{ máx}}$  no puede ser igual a los valores de la diagonal principal o los elementos de la traza de  $R(Tr(R))$ . Debido a que  $R$  es simétrica, y bajo las condiciones de  $R_{60 \text{ máx}}$ , la Ecuación (10) se simplifica de la siguiente manera.

$$\begin{cases} R_{60 \text{ máx}} = \max \{R_{6040}, R_{6020}\}, \\ \forall R_{60i} \in [0, 1], \quad i = \{20, 40\} \end{cases} \quad (11)$$

El segundo método viene dado por una regresión múltiple entre las variables de velocidad del viento medidas a 20 y 40 metros de altura. Esta función se encuentra en la Ecuación (12).

$$x_{60}(i) = m_1 x_{40}(i) + m_2 x_{20}(i) + C_0, \quad i = \{1, 2, 3, \dots, N\} \quad (12)$$

Donde  $m_1, m_2, C_0$  son constantes estimadas a partir de mínimos cuadrados o mediante el método de máxima verosimilitud [19].

El relleno para la velocidad del viento diezminutal máxima y mínima tiene la misma metodología que se expuso anteriormente para la velocidad media. Para el relleno de la desviación estándar se utilizó la relación que se encontró en la Ecuación (8), debido a que la intensidad de turbulencia y la velocidad del viento tienen un comportamiento de la forma de un decaimiento exponencial.

Los datos atípicos reconocidos por las Ecuaciones (1) y (5) no son aptos para la desviación estándar de la velocidad del viento diezminutal, por este motivo se consideraron como valores dudosos de la desviación de estándar, o de la intensidad de turbulencia, a los valores que no pasaron el control de calidad mencionados en las Ecuaciones (1) y (5).

### Resultados y Discusión

En esta sección se presentan los resultados de homogeneización y relleno de las observaciones de viento de la torre meteorológica de Villonaco.

Con la metodología propuesta se logró identificar el o los anemómetros que tuvieron valores dudosos. En este contexto, el anemómetro instalado a 60 metros de altura dejó de funcionar el 24 de septiembre de 2013.

El número de días que el anemómetro dejó de registrar datos son 168, ya sean por fallas o por la calibración del instrumento. Los datos correspondientes a estos días se encontraron como dudosos debido a la pobre relación y por la cantidad de datos atípicos que se registraron al momento de realizar el control de calidad.

La metodología de relleno permitió crear los datos de velocidad del viento media, máxima, mínima y desviación estándar. El resultado de los dos métodos propuestos se muestra en la Figura 7 y Figura 8.

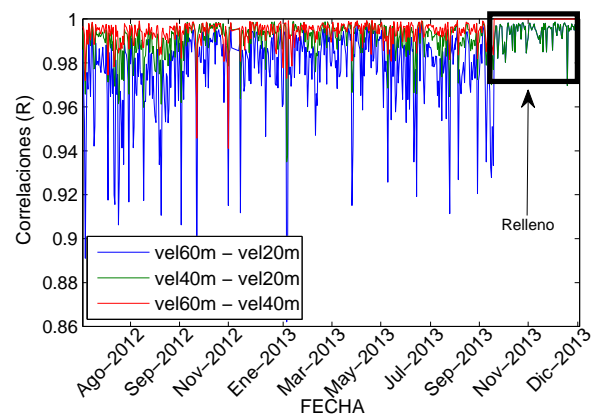


Figura 7: Correlación de los datos rellenados a partir del primer método para la velocidad del viento medida a 60 metros de altura.

Es posible observar en la Figura 7 que los coeficientes de correlación correspondientes a las velocidades de viento relleno a 60 metros, en relación a los 40 metros

de altura medición son igual a 1. Esto se debe a que el primer método escoge la máxima correlación entre las variables analizadas mediante la Ecuación (11). Los coeficientes de correlación entre las variables de velocidad de viento a 60 y 20 metros de altura convergen a los coeficientes de correlación de las variables observadas a 40 y 20 metros, debido a la relación que tienen las variables de velocidad a 60 metros con las de 40 metros.

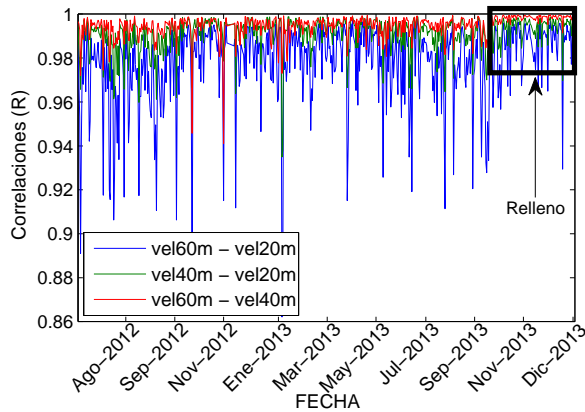


Figura 8: Correlación de los datos rellenados a partir del segundo método para la velocidad del viento medida a 60 metros de altura.

Como se puede apreciar en la Figura 8, la velocidad del viento relleno a 60 metros conserva un comportamiento similar a las observaciones de velocidad medidas a 40 y 20 metros de altura. Los coeficientes de correlación son cercanos a uno, lo cual nos indica una relación muy buena entre todas las variables. A diferencia del primer método, el segundo método optimiza la relación entre las variables medidas a 20 y 40 metros, pero la correlación entre las mediciones a 60 y 40 metros de altura es la más alta. Esto se debe a que la correlación de los observables considerados para construir la función de multi-regresión es mayor con el observable medido a 40 metros, como fue demostrado en el primer método.

La comparación de ambos métodos se lo realiza a partir del gráfico de correlaciones y velocidad del viento, rellenados para ambas variables. En primera instancia, se muestra en la Figura 9 la comparación de los rellenos de velocidad del viento media para la altura de medición de 60 metros. Es posible observar que el relleno por el primer método supone que la velocidad del viento a 60 metros siempre es mayor a la de las mediciones a 40 metros. Esto no sucede siempre debido a que se presentan ráfagas que pueden alterar ese comportamiento, o a su vez, por la turbulencia debido a torbellinos o velocidad en el eje z del vector viento. Para el segundo método, este comportamiento no es un problema debido a que considera el comportamiento de las series de temporales de las mediciones de la velocidad a 20 y 40 metros de altura.

En la Figura 10 se puede observar el gráfico de dispersión entre los datos relleno mediante los dos métodos

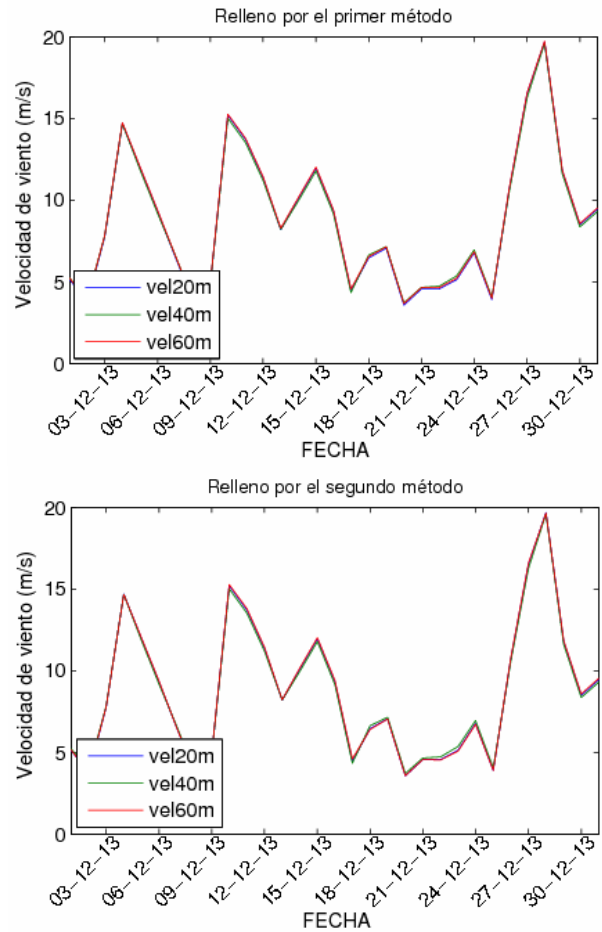


Figura 9: Comparación de los datos relleno de velocidad del viento para las diferentes alturas de medición. En el gráfico superior se presenta el relleno por el primer método, el inferior corresponde al relleno por el segundo método.

explicados en la metodología. Para los valores de velocidad del viento cercanos a cero es posible observar una dispersión mayor que para los datos para la velocidad mayor a 20 (m/s). Los dos métodos de relleno tienen una correlación de 0.9994, lo cual nos indica que su comportamiento es muy similar. Las medias para los dos rellenos se muestran a continuación.

$$\begin{aligned} \bar{v}_{OPCION1} &= 8,7 (m/s); \\ \bar{v}_{OPCION2} &= 8,6 (m/s); \end{aligned} \tag{13}$$

Es fácil apreciar que los dos métodos se asemejan, tanto en su media como en su relación. La diferencia entre ambos es la suposición que se mencionó anteriormente, la cual implica que el relleno a 60 metros siempre debe ser mayor a la velocidad del viento a 40 metros, y esto no siempre sucede.

Una vez realizado el relleno para la velocidad del viento, se procedió el tratamiento de datos de velocidad del viento máxima y mínima diezminutal. Los procedimientos fueron los mismos, pero el comportamiento para la velocidad del viento mínimo obtuvo unos coeficientes de correlación mucho más bajos que los obtenidos para



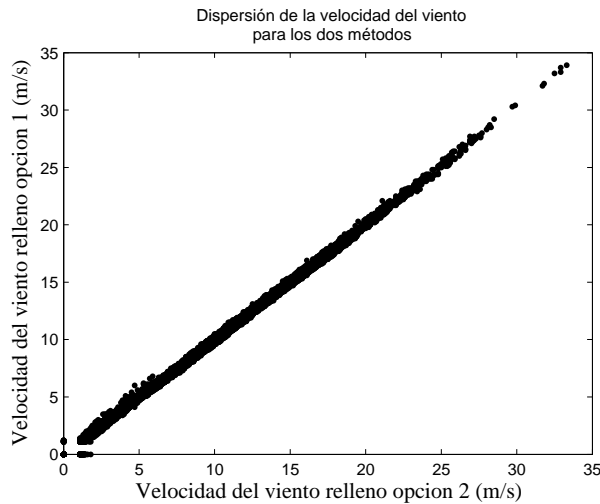


Figura 10: Gráfico de dispersión para los rellenos de con los dos métodos.

las comparaciones entre las velocidad del viento máxima y media.

Una vez escogido el método de relleno para la velocidad del viento, se procede a completar los datos de la desviación estándar mediante la intensidad de turbulencia.

Para el relleno de la desviación estándar de la velocidad del viento, se procede a calcular los coeficientes de la Ecuación (7), con la restricción de la velocidad del viento siempre mayor o igual a 3 (m/s), debido a las restricciones de viento para el funcionamiento de aerogeneradores. Por otro lado, se rellenaron los valores de desviación estándar con la Ecuación (8) a partir de la estimación de las constantes en los intervalos de velocidad del viento para  $[1, 2[ (m/s)$  y  $[2, 3[ (m/s)$ . Esto se lo hizo por la relación de la intensidad de turbulencia con la velocidad del viento, la cual aumenta considerablemente al disminuir la velocidad. Todos los valores de velocidad del viento menor a 1 (m/s) se consideraron como cero, así como su desviación estándar, ya que se los considera como viento en calma y ventolinas, y por tanto no tienen gran trascendencia en el parque eólico.

Los coeficientes de la Ecuación (8), a partir de la regresión mostrada en la Figura 11, quedan de la siguiente manera.

$$\sigma_v = v (0,06 + 0,30 \exp(-0,38v)), \quad \forall v \geq 3 (m/s) \tag{14}$$

A partir de la Ecuación (14) se procedió a realizar el relleno para la variable de la desviación estándar de la velocidad del viento, para los datos de velocidad mayores o igual a 3 (m/s). Las ecuaciones para las restricciones de velocidad del viento  $[1, 2[ (m/s)$  y  $[2, 3[ (m/s)$  se muestran a continuación.

$$\begin{aligned} \sigma_v &= v (0,06 + 0,78 \exp(-0,65v)), \quad \forall v \in [1, 2[ (m/s); \\ \sigma_v &= v (0,06 + 0,40 \exp(-0,44v)), \quad \forall v \in [2, 3[ (m/s) \end{aligned} \tag{15}$$

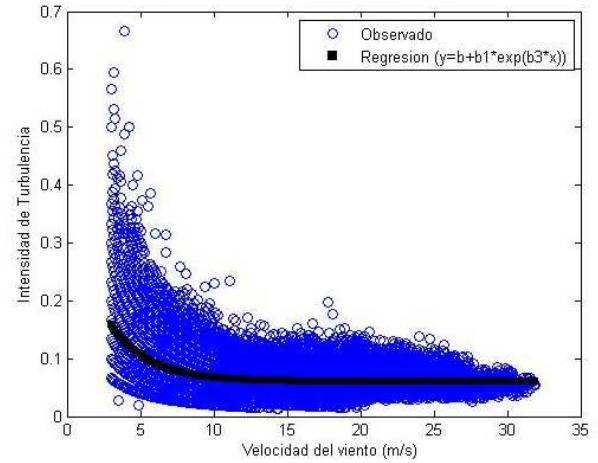


Figura 11: Intensidad de turbulencia estimada a partir de las Ecuaciones (6) y (7).

La Ecuación (15) es utilizada para el relleno de la desviación estándar de la velocidad del viento, la intensidad de turbulencia aumenta cuando la velocidad del viento es pequeña. La desviación estándar de la velocidad es cero para valores menores a 1 (m/s).

Al final se construyó una base de datos tipo Access, usando el control de conectividad libre OBD de Windows, la cual consiste en los valores analizados por los procedimientos mencionados en este artículo. Por último, se presenta el gráfico de la rosa de los vientos de la base de datos relleno para todos los datos diezminutales observados y rellenos a 60 metros de altura de medición (Figura 12).

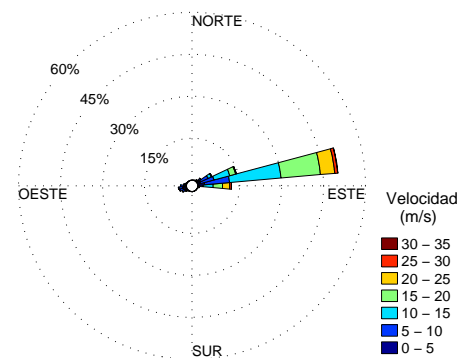


Figura 12: Rosa de los vientos para la variable de velocidad del viento medida a 60 metros de altura.

### Conclusiones y Recomendaciones

En este estudio se realizó satisfactoriamente un análisis de valores atípicos que permite identificar todas las mediciones de velocidad del viento consideradas como valores dudosos. Se establecieron parámetros para un control de calidad de los datos que permiten dar un sentido real a una serie temporal de velocidad del viento.

Los métodos de relleno para la velocidad del viento media, máxima y mínima son muy similares en su comportamiento como serie de datos, los valores medios no se diferencian en más del 0.01 (m/s). La suposición del primer método, es decir que la velocidad del viento a 60 metros siempre debe ser mayor a la medida en 40 metros, se pudo comprobar que no siempre es correcta. Por este motivo se escogió el segundo método como procedimiento para rellenar datos dudosos.

Por último, la desviación estándar mediante la ecuación empírica de la intensidad de turbulencia, demostró un comportamiento de decaimiento exponencial. Un dato interesante es el cambio de las constantes de la curva de decaimiento exponencial para los diferentes intervalos de velocidad analizados, los cuales para velocidades del viento pequeñas, las constantes de decaimiento exponencial aumentan.

Una base de datos con el análisis de este trabajo fue creada en Access, la cual contiene el metadato de las variables de la torre meteorológica de Villonaco. Esto ayudará a las simulaciones de producción energética del parque eólico al proyecto de "Análisis del comportamiento de un parque eólico en condiciones extremas" desarrollado por INER.

El siguiente paso será el de homogenizar los datos de viento de cada uno de los aerogeneradores con el estándar de la torre meteorológica de Villonaco, de esta manera el análisis del comportamiento de las turbinas, referente al rendimiento, producción y alarmas, no se verá afectado por valores perdidos o anómalos.

### Agradecimientos

Un agradecimiento muy especial para el grupo de eólica del Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables. A la Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC-EP) por facilitar toda la información meteorológica. A la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación por financiar este proyecto

### Referencias

- [1] Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC-EP) y Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER). 2012. "Parque Eólico Villonaco": 3-34. [https://www.celec.gob.ec/index.php?option=com\\_content&view=article&id=189:eolico](https://www.celec.gob.ec/index.php?option=com_content&view=article&id=189:eolico).
- [2] Xinjiang Goldwind Science and Technology Co. Ltd China. 2011. "Goldwind 1.5MW Permanent Magnet Direct-Drive (PMDD) Wind Turbine". 1: 1-6.
- [3] Coppin, P. A; Taylor, K. J. 1983. "A three-component sonic anemometer/thermometer system for general micrometeorological research". *Boundary-Layer Meteorology*. 27(1): 27-42. (10.1007/BF00119970)
- [4] Wilczak, J. M.; Steven, P. Oncley and Stage, S. A. 2000. "Sonic Anemometer Tilt Correction Algorithms". *Boundary-Layer Meteorology*. 99(1): 127-150. (10.1023/A:1018966204465)
- [5] Yufeng, Z.; Yan, W. 2011. "To Measure Wind Speed using the theory of One-dimensional Ultrasonic Anemometer". Bachelor's Thesis in Electronics, University of G. vlc: 1-40.
- [6] Boulanger, P. P.; Aizpuru, J.; Leggieri, L.; Marino, M. 2010. "A procedure for automated quality control and homogenization of historical daily temperature and precipitation data (APACH): part 1: quality control and application to the Argentine weather service stations". *Climatic Change*. 98: 471-491. (10.1007/s10584-009-9741-9)
- [7] Štěpánek, P.; Zahradníček, P.; Farda, A. 2013. "Experiences with data quality control and homogenization of daily records of various meteorological elements in the Czech Republic in the period 1961-2010". *Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*. 117(1): 123-141.
- [8] Aguilar, E.; Auer, I; Brunet, M.; Peterson, T. C.; Wiering, J. 2003 "Guidelines on Climate Metadata and Homogenization". *World Meteorological Organization*, (1186): 1-50.
- [9] Domonkos, P. 2011. "Homogenising time series: beliefs, dogmas and facts". *Adv. Sci. Res.* 6: 167-172. (10.5194/asr-6-167-2011)
- [10] Wan, H.; Wang, X. L.; Swail, V. R. 2010. "Homogenization and Trend Analysis of Canadian Near-Surface Wind Speeds". *Journal of Climate / American Meteorological Society*. 23: 1209-1225. (10.1175/2009JCLI3200.1)
- [11] Menne, M. J.; Williams Jr., C. N. 2009 "Homogenization of Temperature Series via Pairwise Comparisons". *Journal of Climate / American Meteorological Society*. 22: 1700-1717. (10.1175/2008JCLI2263.1)
- [12] Haimberger, L. 2007, "Homogenization of Radiosonde Temperature Time Series Using Innovation Statistics". *American Meteorological Society*. 20: 1377-1403. (10.1175/JCLI4050.1)
- [13] Kuglitsch, F. G.; Toreti, A.; Xoplaki, E.; Della-Marta, P. M.; Luterbacher, J.; Wanner, H. 2009. "Homogenization of daily maximum temperature series in the Mediterranean". *Journal of Geophysical Research*. 114: 1-16. (10.1029/2008JD011606)
- [14] Thomas, B. R.; Kent, E. C.; Swail, V. R. 2005, "Methods to Homogenize Wind Speeds from Ships and Buoys". *Int. J. Climatol* 25: 979-995. (10.1002/joc.1176)
- [15] WMO. 2008. "Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation / Measurement of Surface Wind". *CIMO-Guide*, 1: 5-14.
- [16] Goulven, p.; Aleman, M. A.; Osorno, I. 1988. "Homogenización y Regionalización Pluviométrica por el Método del Vector Regional". V Congreso de Hidráulica - AEHID/CICP: 1-118. <https://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/CIMO-Guide.html>.

- [17] WMO. 2012. "Manual on Marine Meteorological Services". *Annex VI to WMO Technical Regulations*. I(5 ) [http://library.wmo.int/pmb\\_ged/wmo\\_558\\_en-v1.pdf](http://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_558_en-v1.pdf).
- [18] Met Office. 2011. "The Beaufort Scale". *National Meteorological Library and Archive Fact sheet I(6)* [www.metoffice.gov.uk/corporate/library](http://www.metoffice.gov.uk/corporate/library).
- [19] Peña, D. 2002. "Análisis de Datos Multivariantes", McGraw-Hill Interamericana de España: España.

## Modelado matemático del equilibrio líquido vapor de mostos de *Agave cocui*

Mayra Carolina Leal de Pérez<sup>1\*</sup>, Edgar Enrique Pérez Camacho<sup>2</sup>, Héctor Andrés Morán Guillén<sup>3</sup>,  
Wilmer José Barrera Petit<sup>3</sup>, Osney Pérez Ones<sup>4</sup>, América García López<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Energética - Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda, Coro 4101, Venezuela.

<sup>2</sup>Departamento de Física y Matemática - Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda, Coro 4101, Venezuela.

<sup>3</sup>Laboratorio de Análisis Químico - Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda, Coro 4101, Venezuela.

<sup>4</sup>Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Ave 114 No. 11901 e/ 119 y 127. Marianao, Ciudad Habana-Cuba.

<sup>5</sup>Universidad de Oriente, CP 90500, Cuba.

\*Autor principal/Corresponding author, e-mail: deperezmayra@gmail.com

Editado por/Edited by: Cesar Zambrano, Ph.D.

Recibido/Received: 2015/02/08. Aceptado/Accepted: 2015/10/30.

Publicado en línea/Published on Web: 2015/12/30. Impreso/Printed: 2015/12/30.

### Mathematical modeling of vapor liquid equilibrium for must of *Agave cocui*

#### Abstract

One of the more interesting tools is currently available to analyze and predict the behavior of a system is the construction and subsequent simulation of a mathematical model. The cocuy, is an alcoholic beverage produced by hand from the distillation of fermented mash of *Agave cocui*. The aim of this study was the experimental model mathematically constant pressure of the concentrations obtained by chromatography *Agave cocui* musts representing vapor-liquid equilibrium in the distillation of said wort data. In the particular case of ELV must *Agave cocui* empirical, quantitative, stochastic and descriptive for adjusting the experimental data obtained mathematical models are used. The Centurion XV StatGraphics software was used to fit the data to the mathematical model and validated statistically. The mathematical models were fitted to the experimental data at constant pressure ELV describing and / or predicting the behavior of the components analyzed, serving as basis for the determination of the compositions of the ELV, which is important to model and simulate the process artisanal distillation of musts *Agave cocui* allowing contribute to improving the quality of alcoholic beverage obtained.

**Keywords.** liquid-vapor equilibrium, musts fermented *Agave cocui*, Mathematical models.

#### Resumen

Una de las herramientas más interesantes que actualmente se tiene disponible para analizar y predecir el comportamiento de un sistema es la construcción y posterior simulación de un modelo matemático. El cocuy, es una bebida alcohólica producida artesanalmente de la destilación de mostos fermentados de *Agave cocui*. El objetivo de este estudio fue modelar matemáticamente los datos experimentales a presión constante de las concentraciones obtenidas por cromatografía de los mostos de *Agave cocui* que representan el equilibrio líquido-vapor en la destilación de dicho mosto. En el caso particular del ELV de mostos de *Agave cocui* se emplean modelos matemáticos empíricos, cuantitativos, estocásticos y descriptivos para el ajuste de los datos experimentales obtenidos. Se empleó el software StatGraphics Centurion XV para ajustar los datos al modelo matemático y validarlos estadísticamente. Los modelos matemáticos que se ajustaron a los datos experimentales del ELV a presión constante permiten describir y/o predecir el comportamiento de los componentes analizados, sirviendo como base a la determinación de las composiciones del ELV, lo cual es importante para modelar y simular el proceso de destilación artesanal de mostos de *Agave cocui* permitiendo así contribuir con el mejoramiento de la calidad de la bebida alcohólica obtenida.

**Palabras Clave.** Equilibrio líquido-vapor, Mostos fermentados, *Agave cocui*, Modelos matemáticos.

#### Introducción

El Cocuy Pecayero, es una bebida alcohólica que se obtiene por destilación y rectificación artesanal de mostos preparados a partir de las cabezas maduras (cormo

central) de la planta *Agave cocui* Trealese previamente hidrolizados o cocidos y sometidos a fermentación alcohólica con levaduras naturales o cultivadas [1]. La producción del mosto fermentado de cocuy se cono-

ce desde la época precolombina y, desde el siglo XVII [2, 3] se elabora el producto destilado que en la actualidad se produce de manera artesanal en la población de Pecaya, Municipio Sucre del Estado Falcón, Venezuela.

Esta bebida se encuentra en proceso de legalización y recientemente se aprobó otorgar la denominación de origen al “Cocuy Pecayero” [4]. Dicha bebida, es elaborada en varias etapas; la primera etapa incluye el corte de la planta el cual se realiza durante la maduración, antes de producirse la inflorescencia, cuando la planta tiene entre 7 y 10 años. Seguidamente, el corno central o piña de la planta es cocido en un horno de piedra construido en el suelo, durante 72 a 120 horas. Una vez horneadas, las piñas son trituradas en cubas de madera que posteriormente son lavadas, prensadas y filtradas. El jugo obtenido se fermenta durante 4 ó 5 días en toneles de plástico o de metal para finalmente ser destilado en un alambique artesanal [5].

Los compuestos volátiles producidos en la fermentación influyen en la calidad final del producto. Así, los esteres son constituyentes volátiles responsables del aroma de la bebida. Los alcoholes superiores no son considerados como un factor de calidad de licores debido a su olor desagradable. Los esteres etílicos de los ácidos orgánicos superiores otorgan a la bebida sabores y olores a fruta y flores con excepción del acetato de etilo el cual proporciona un aroma a solvente similar al acetato de etilo. Adicionalmente, altas concentraciones de metanol y furfural pueden conferirle propiedades tóxicas a la bebida [6, 7].

La calidad de las bebidas alcohólicas se establece de acuerdo a las concentraciones de los principales compuestos químicos que conforman la misma, de allí la necesidad de llevar un seguimiento de las fracciones vaporizadas durante la destilación para determinar su evolución y de acuerdo a ello y a las propiedades químicas de estas sustancias en la bebida alcohólica, definir los cortes del destilado, tomando en cuenta los límites establecidos por la Comisión Venezolana de Normas Industriales (COVENIN), para de esta manera lograr un mayor control del proceso que permita establecer un equilibrio entre la calidad del producto y el rendimiento del proceso [6].

En la elaboración artesanal del cocuy de Pecaya, la definición de los cortes del destilado (cabeza, destilado medio y cola) se realiza empíricamente, de forma tal que no se garantiza que el producto cumpla con las especificaciones de grado alcohólico, concentración de metanol, furfural y total de congénicos establecidos en la Norma COVENIN 3340 [8], que establece los requisitos que deben cumplir las bebidas alcohólicas tanto de fabricación nacional como importada.

En relación al proceso de destilación, que llevado a cabo en alambiques artesanales transforma el mosto fermentado en Cocuy Pecayero, existe diversidad de criterios relacionados al valor o valores que uno o más parámetros han de adoptar al momento idóneo de concluir la

destilación, o de realizar los cortes de separación entre las fracciones comúnmente llamadas cabeza, destilado medio, y cola, es por esto que se hace necesario estudiar la evolución que a lo largo de una destilación de este tipo experimentan tanto las cantidades como las concentraciones de la mezcla alcohólica en el “ollón” (calderín) de destilación, y el destilado obtenido ya que dicho proceso ocurre bajo los supuestos de que todo vapor que abandona el líquido en la ollón lo hace en condiciones de equilibrio con este, que la condensación toma lugar única y exclusivamente en el condensador, y que en el caso que nos ocupa, el sistema a destilar puede considerarse fundamentalmente como una mezcla de etanol y agua [9].

Actualmente en la población de Pecaya, Municipio Sucre del Estado Falcón se estima una producción de 200mil litros de cocuy pecayero anual [10] a través de un proceso completamente artesanal. La obtención de la Denominación de Origen del producto y el proceso de legalización de la bebida que aún se encuentra en proceso, conllevaron al diseño, construcción e instalación de una planta piloto para elaboración de Cocuy Pecayero, como parte del proyecto de la Red Socialista de Innovación Productiva de Agave Cocui del Ministerio del Poder Popular para Ciencia, Tecnología e Industrias Intermedias (MCTI) a través de Fundacite Falcón, con la finalidad de beneficiar a los productores de Agave cocui, quienes pueden mejorar sustancialmente los procedimientos artesanales al implementar buenas prácticas de manufactura que garanticen la calidad e inocuidad de los productos, así como la higiene, seguridad y confort de los trabajadores [10].

El objetivo de este estudio fue modelar matemáticamente los datos experimentales a presión constante de las concentraciones obtenidas por cromatografía de los mostos de *Agave cocui* que representan el equilibrio líquido-vapor en la destilación de dicho mosto, para su posterior uso en la determinación de las composiciones del ELV que servirá como base para mejorar la calidad de esta bebida artesanal.

### Generalidades del Equilibrio Líquido Vapor en Sistemas Multicomponentes

Para determinar el equilibrio líquido-vapor (ELV) es necesario conocer las condiciones de presión y temperatura en ambas fases y las variables restantes  $(x, y)$  son definidas por el balance de materiales y la ecuación fundamental del equilibrio de fase. En el caso de los mostos de *Agave cocui*, la destilación ocurre a presión atmosférica, por lo que se hace necesario determinar la temperatura de equilibrio, así como también, las composiciones correspondientes en cada fase, lo cual permitirá establecer el modelo termodinámico que mejor describa al proceso de destilación artesanal y simularlo para establecer recomendaciones operacionales que garanticen la calidad del producto final.



El equilibrio es una condición estática en el cual no ocurren cambios con respecto al tiempo en las propiedades macroscópicas [11]. En el proceso de destilación de mostos de *Agave cocui* se asume en todo momento que existe un equilibrio entre la fase líquida y de vapor.

El problema de equilibrio entre fases consiste en el cálculo de algunas variables del conjunto (T, P, x, y), cuando se conocen algunas de ellas. Para una mezcla dada, el número de variables F que debe ser fijado para que el sistema quede completamente definido es determinado por la Regla de las Fases de Gibbs. Para una mezcla líquido-vapor en equilibrio, la temperatura y la presión son las mismas en ambas fases y las restantes variables son definidas por el balance de materia y la *ecuación fundamental del equilibrio entre fases*; la cual puede ser expresada como la igualdad de fugacidades de cada componente de la mezcla en ambas fases.

$$\bar{f}_i^V = \bar{f}_i^L \quad (1)$$

La fugacidad de un componente en la fase vapor es usualmente expresada a través del coeficiente de fugacidad  $\varphi_i^V$ , mientras que la fugacidad de un componente en la fase líquida es expresada a través del coeficiente de actividad ( $\gamma_i$ ) o del coeficiente de fugacidad ( $\varphi_i^L$ ).

Si se utiliza el coeficiente de fugacidad  $\varphi$  en ambas fases, el método de solución del problema de equilibrio entre fases es conocido como *método de la Ecuación de Estado (EdE)*. Si el coeficiente de fugacidad ( $\varphi$ ) es utilizado para la fase vapor y el coeficiente de actividad ( $\gamma$ ) es utilizado para la fase líquida se conoce como *método gama-fi* ( $\varphi$ - $\gamma$ ). Los métodos modernos para la correlación del equilibrio entre fases incluyen la energía libre de Gibbs de exceso  $g^E$  en las reglas de mezcla de la EdE.

La mayoría de los modelos disponibles en la literatura son del tipo de *correlación*, lo que significa que los datos experimentales son necesarios para calcular ciertos parámetros empíricos, generalmente usando datos de equilibrio líquido-vapor para sistemas binarios.

Los datos necesarios para el modelado utilizando los diferentes métodos son algunas de las propiedades de las sustancias puras, tales como temperatura crítica, la presión crítica, la temperatura de ebullición normal, factor acéntrico, presión de vapor, y la masa molecular [12].

La mayoría de los modelos utilizados actualmente requieren algunos datos de la mezcla para estimar ciertos parámetros, dichos datos no están disponibles para todos los componentes puros, sin embargo, pueden determinarse con precisión empleando diferentes métodos disponibles en la literatura [12]. Para el caso de las sustancias presentes en los mostos de *Agave cocui* no existen datos del equilibrio líquido-vapor, ya que no han sido estudiados experimentalmente, lo cual hace difícil una buena correlación y modelado de los datos a ser utilizados en la simulación del proceso de destilación y el diseño de los equipos.

Al seleccionar los modelos se debe considerar una serie de especificaciones, fundamentalmente, el método de manejo de la fase vapor. Para todos, con exclusión de Margules y Van Laar [13], esa elección se restringe a las opciones siguientes:

- Ideal, se aplica en casos donde se opera a presiones bajas o moderadas y donde, en la fase vapor, existe poca interacción molecular entre los compuestos. Es la opción por defecto.
- R-K puede aplicarse a todos los gases. Lo usual es reemplazarla por PSRK.
- Virial, modela con buenos resultados las fugacidades de la fase vapor de sistemas con fuertes interacciones en dicha fase. Esto ocurre cuando están presentes ácidos carboxílicos u otros compuestos que tienen tendencia a formar puentes de hidrógeno estables.

Otra elección es la temperatura que será usada para estimar los parámetros de interacción del método UNIFAC. Hay un valor por defecto, pero, para obtener mejores resultados conviene seleccionar la temperatura más cercana a las condiciones de operación.

Para mezclas multicomponentes de destilación alcohólica se hace imprescindible conocer los datos del equilibrio de fases para un buen modelado del proceso de destilación, por lo que muchas veces para poder conseguir datos confiables que puedan ser utilizados en el estudio de estos sistemas es indispensable analizar la estimación de la constante de equilibrio para mezclas multicomponentes, o lo que vale decir también, las propiedades directamente relacionadas para su cálculo, como son coeficientes de actividad, coeficientes de fugacidad y presiones de vapor, o cuando las composiciones de la mezcla son desconocidas se evalúan las propiedades parciales de los componentes de la mezcla, lo que permite caracterizar el equilibrio de fases.

### Modelado Matemático en ELV de Mostos Fermentados

Una de las herramientas más interesantes que actualmente se tiene disponible para analizar y predecir el comportamiento de un sistema es la construcción y posterior simulación de un modelo matemático.

Con frecuencia la palabra modelo tiene distintas interpretaciones, para este artículo nos centraremos en la definición de Ríos (1995) “*un modelo es un objeto, concepto o conjunto de relaciones, que se utiliza para representar y estudiar de forma simple y comprensible una porción de la realidad empírica*”.

Un modelo es una representación simplificada de un sistema que permite mejorar nuestra capacidad de entender, describir, predecir y/o controlar su comportamiento. Los modelos matemáticos son un tipo de modelo

científico que emplea algún tipo de formulismo matemático para expresar relaciones, proposiciones sustantivas de hechos, variables, parámetros, entidades y, relaciones entre variables y/o entidades u operaciones, para estudiar el comportamiento de sistemas complejos ante situaciones difíciles de observar en la realidad.

Los modelos matemáticos pueden clasificarse en:

1. Según la información de entrada los modelos pueden ser heurísticos, basados en las explicaciones sobre las causas o mecanismos naturales que dan lugar al fenómeno estudiado y, empíricos, utilizan las observaciones directas o los resultados de experimentos del fenómeno estudiado.
2. Según el tipo de representación pueden ser: Cualitativos o conceptuales, estos pueden usar figuras, gráficos o descripciones causales, en general, predicen si el estado del sistema irá en determinada dirección o si aumentará o disminuirá alguna magnitud, sin importar exactamente la magnitud concreta de la mayoría de aspectos. Cuantitativos o numéricos, usan números para representar aspectos del sistema a modelar, y generalmente incluyen fórmulas y algoritmos matemáticos más o menos complejos que relacionan los valores numéricos. El cálculo con los mismos permite representar el proceso físico o los cambios cuantitativos del sistema modelado.
3. Según la aleatoriedad, se clasifican en: Determinista, se conoce de manera puntual la forma del resultado ya que no hay incertidumbre. Además, los datos utilizados para alimentar el modelo son completamente conocidos y determinados. Estocástico, es probabilístico, ya que no se conoce el resultado esperado, sino su probabilidad y existe por tanto incertidumbre.
4. Según su aplicación u objetivo pueden ser: De simulación o descriptivo, de situaciones medibles de manera precisa o aleatoria, por ejemplo con aspectos de programación lineal cuando es de manera precisa, y probabilística o heurística cuando es aleatorio. Este tipo de modelos pretende predecir qué sucede en una situación concreta dada. De optimización, determina el punto exacto para resolver alguna problemática administrativa, de producción, o cualquier otra situación. Este tipo de modelos requiere comparar diversas condiciones, casos o posibles valores de un parámetro y ver cuál de ellos resulta óptimo según el criterio elegido. De control, para saber con precisión como está algo en una organización, investigación, área de operación, etc. Este modelo pretende ayudar a decidir qué nuevas medidas, variables o qué parámetros deben ajustarse para lograr un resultado o estado concreto del sistema modelado.

En el caso particular del ELV de mostos de *Agave cocui* se emplean modelos matemáticos empíricos, cuantitativos, estocásticos y descriptivos para el ajuste de los datos experimentales obtenidos.

## Materiales y Métodos

### Equipos para determinación del ELV

- El equipo experimental usado para la determinación del equilibrio líquido-vapor isobárico de mostos de *Agave cocui* consistió en un kit de destilación simple conformado por un balón de destilación con tres bocas de 1L de capacidad y, un condensador de tubo liso. El matraz destilador se llenó con 800 mL de mosto de *Agave cocui* y se calentó con una electromante de 200 Watts y 1000 mL de capacidad, para ser llevado a ebullición. El vapor formado llena el resto del espacio que queda en el balón por encima del líquido. El vapor fluye hacia el condensador de donde una vez completada la condensación se recoge en el cilindro graduado de  $10 \pm 0.1$  mL.
- Para el registro de la temperatura de la fase líquida se empleó un termómetro de mercurio de  $150 \pm 1^\circ\text{C}$ , mientras que para la fase de vapor se empleó un termómetro digital DeltaTRAK de  $-50$  a  $200 \pm 0.1^\circ\text{C}$ .
- Es importante señalar que la destilación a escala de laboratorio se hizo de forma isobárica (presión atmosférica), al igual que en el proceso productivo original.

Una vez alcanzado el equilibrio se extrajeron muestras de la fase líquida y de la fase de vapor, una vez condensada. Las composiciones de ambas fases se determinaron empleando la técnica analítica de cromatografía de gases.

- El equipo usado, fue un Cromatógrafo de gases marca Agilent Technologies modelo 6890N, con una columna capilar HP-INNOWAX y con detector de ionización a la llama (FID). El gas de arrastre utilizado fue nitrógeno con una velocidad de flujo de 20 mL/min, la temperatura del inyector fue de  $250^\circ\text{C}$  al igual que para el detector. Cada una de las fracciones fue analizada por inyección directa de  $1 \mu\text{L}$  de muestra.

### Metodología experimental

Una vez armado el equipo para el estudio experimental del ELV, se inicia el calentamiento, y al alcanzar el equilibrio, se registra el valor de la temperatura simultáneamente con la toma de las muestras de las fases líquido y vapor. Se estableció la toma de muestra cada 3 mL de destilado para las primeras 5 fracciones con su respectiva muestra de fase líquida y, posteriormente cada

10 mL hasta completar la destilación con un volumen total recogido de 165 mL. Las muestras de ambas fases fueron analizadas en el cromatógrafo para determinar su composición.

Para iniciar el análisis cromatográfico fue necesario calibrar el equipo a través de patrones para las sustancias a determinar. Las mediciones se hicieron en dos grupos, el primero sólo para etanol debido a su elevada concentración en la mezcla y, la segunda para todos los congéneres reportados en la bibliografía para mostos y bebida de *Agave cocui*. Para determinar el etanol se prepararon tres patrones de 25, 50 y 75 mg/L respectivamente a partir de una madre de 2500 mg/L de etanol preparada con 32  $\mu$ L de etanol en 10 mL de agua y, para los congéneres se prepararon tres patrones de diferentes concentraciones para cada uno de los 9 congéneres que se calibraron de manera simultánea en el equipo. En ambos casos se hizo uso del 2-butanol como estándar interno, para el etanol se usó con una concentración de 64 mg/L, mientras que, para los congéneres su concentración fue de 100,2375 mg/L.

El uso del estándar interno permitió reducir la incertidumbre originada por la inyección manual con microjeringas; más aún, cuando el detector del equipo Agilent Technologies 6890N es un detector de llama ionizada (FID), el cual más que ser un sistema sensible a concentraciones, responde al número de átomos de carbono que entran al detector por unidad de tiempo y producen iones y electrones, capaces de conducir electricidad a través de la llama, por lo cual es un detector sensible a las masas y cambios en el volumen de inyección que puede conllevar a errores que se compensan al establecer la relación Área del analito / Área del estándar interno [14].

El análisis cromatográfico para determinación de etanol en la fase de vapor requirió en general, de una dilución de 10 veces para cada muestra de la fase vapor analizada, debido a las altas concentraciones que presenta el etanol en el destilado. Para ambas fases se empleó una preparación de 20  $\mu$ L de muestra más 200  $\mu$ L del estándar interno aforadas a 10 mL con agua destilada, de los cuales se inyectó 1  $\mu$ L al cromatógrafo.

Para la determinación de congéneres en la fase líquida, es decir, en las muestras de fondo no hubo dilución, las muestras se prepararon agregando 25  $\mu$ L de estándar interno a 500  $\mu$ L de la muestra a analizar, mientras que, para la fase vapor (muestras de tope) se preparó una dilución de 10 veces, a partir de 100  $\mu$ L de muestra, 25  $\mu$ L de estándar interno y se completó con 875  $\mu$ L de agua para completar un volumen de 1 mL. Para ambas muestras se inyectó 1  $\mu$ L al cromatógrafo.

#### Tratamiento de datos experimentales

Una vez obtenidas las concentraciones del etanol y congéneres presentes en las muestras de las fases líquida y vapor para mosto de *Agave cocui*, se empleó el software StatGraphics Centurion XV para un análisis de varianza simple de los datos (ANOVA), con el fin de determinar

Compuesto	Fase Líquida		Fase Vapor	
	Razón-F	Valor-P	Razón-F	Valor-P
Acetaldehído	1.26	0.2919	0.04	0.9584
Acetato de etilo	0.79	0.4585	0.03	0.9711
Metanol	0.10	0.9016	0.17	0.8467
Etanol	0.05	0.9554	0.05	0.9554
Alcohol isobutílico	0.46	0.6333	0.00006	0.9999
Alcohol isoamílico	0.42	0.6574	0.01	0.9891
Furfural	0.01	0.9923	0.004	0.9962

Tabla 1: ANOVA Simple para las concentraciones medidas en cada fase.

si existen o no diferencias significativas entre los tres conjuntos de datos y así establecer si es posible trabajar con los valores promedios de las tres mediciones para cada compuesto evaluado. Posteriormente, se empleó el software CurveExpertPro 2.0.4 para ajustar los datos al modelo matemático que mejor los represente con la finalidad de minimizar los diferentes errores involucrados en los resultados. Finalmente, se validan los modelos matemáticos con el StatGraphics para determinar si los datos experimentales son estadísticamente representados por dichos modelos matemáticos.

## Resultados y Discusión

Los análisis de varianza simple (ANOVA) para las concentraciones determinadas de etanol y congéneres (acetaldehído, acetato de etilo, metanol, alcohol isobutílico, alcohol isoamílico y furfural) presentes en el mosto de *Agave cocui* se reportan en la Tabla 1.

La intención principal del análisis de varianza de un factor es la de comparar las medias de los diferentes niveles (grupos de medida). Para el caso de estudio se compararon las medias de los tres grupos de mediciones realizadas de las concentraciones de los diferentes componentes de los mostos de *Agave cocui*. Los resultados del análisis muestran un componente entre-grupos (razón-F) y, un componente dentro-de-grupos (valor-P). La razón-F, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la razón-F en todos los componentes es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de los componentes analizados entre un grupo de medición y otro, con un nivel del 95.0 % de confianza.

Por otra parte, se aplicó un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. No hay diferencias estadísticamente significativas entre cualquier par de medias, con un nivel del 95.0 % de confianza, por lo que no existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos los grupos de medidas comparados. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5.0 % al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

Modelo matemático ajustado	R <sup>2</sup> (%)
$C_{1L} = 34,288214 + 0,151847 V_{muestra} - 6,221057 \cdot 10^{-3} V_{muestra}^2 + 6,425015 \cdot 10^{-5} V_{muestra}^3 - 1,975995 \cdot 10^{-7} V_{muestra}^4$	90.45
$C_{1V} = \frac{2,63655 \cdot 10^8 + 2,06315 \cdot 10^8 V_{muestra}}{1 + 4,71804 \cdot 10^5 V_{muestra} + 1,59 \cdot 10^4 V_{muestra}^2}$	93.94
$C_{2L} = \frac{22,9406 \times 1,44766 + 6,04521 V_{muestra}^{0,787397}}{1,44766 + V_{muestra}^{0,787397}}$	90.94
$C_{2V} = \frac{-9,67898 \times 4,99070 \cdot 10^5 + 1,98509 \cdot 10^9 V_{muestra}^{-0,913939}}{4,99070 \cdot 10^5 + V_{muestra}^{-0,913939}}$	97.23
$C_{3L} = 5,55805 + 0,160498 V_{muestra} - 4,698774 \cdot 10^{-3} V_{muestra}^2 + 5,013318 \cdot 10^{-5} V_{muestra}^3 - 1,609418 \cdot 10^{-7} V_{muestra}^4$	92.88
$C_{3V} = 12,557918 + 2,29419 V_{muestra} - 4,032368 \cdot 10^{-2} V_{muestra}^2 + 2,20395 \cdot 10^{-4} V_{muestra}^3 - 2,050791 \cdot 10^{-7} V_{muestra}^4$	83.54
$C_{4L} = \frac{9,86868 \times 3,2291 \cdot 10^7 + 0,678163 V_{muestra}^{3,99535}}{3,2291 \cdot 10^7 V_{muestra}^{3,99535}}$	97.87
$C_{4V} = \frac{88,015150}{1 + \left(\frac{V_{muestra}}{91,208062}\right)^{2,85754}}$	95.74
$C_{5L} = \frac{7,25317 \times 1,97164 \cdot 10^4 + 0,949992 V_{muestra}^{2,66446}}{1,97164 \cdot 10^4 + V_{muestra}^{2,66446}}$	90.04
$C_{5V} = \frac{660,973 - 2,47063 V_{muestra}}{1 + 0,0561685 V_{muestra} + 2,47375 \cdot 10^{-4} V_{muestra}^2}$	97.46
$C_{6L} = \frac{30,7046 \times 2289,77 + 3,25938 V_{muestra}^{2,11403}}{2289,77 V_{muestra}^{2,11403}}$	96.78
$C_{6V} = \frac{1865,47 - 11,815 V_{muestra}}{1 + 8,8383 \cdot 10^{-3} V_{muestra} + 3,20765 \cdot 10^{-4} V_{muestra}^2}$	96.84
$C_{7L} = \frac{45,2489 + 3,4774 V_{muestra}}{1 + 0,0417548 V_{muestra} - 1,99232 \cdot 10^{-4} V_{muestra}^2}$	98.43
$C_{7V} = \frac{5,72509 + 2,30237 V_{muestra}}{1 + 0,0483482 V_{muestra} - 2,00543 \cdot 10^{-4} V_{muestra}^2}$	98.68

Tabla 2: Modelos matemáticos ajustados.

Debido a que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las tres mediciones realizadas para cada las concentraciones de cada uno de los componentes de los mostos de *Agave cocui*, se emplearon las dos primeras mediciones determinar el modelo matemático que mejor ajusta a dichos datos y la tercera para validar dichos modelos.

En la Tabla 2 se muestran para cada componente en ca-

da fase, la ecuación del modelo matemático que mejor representa los datos experimentales para determinar la concentración de cada componente (Ci) en función del volumen de muestra (Vmuestra en mL) en cada punto de ELV, así como el R<sup>2</sup> del modelo ajustado al realizar un análisis de regresión no lineal para verificar que los modelos determinados ajustan, para lo cual emplea mínimos cuadrados no lineales. El ajuste matemático y estadístico de los datos se hace mediante un proceso de

Fase	Componente	Error absoluto (mg/L)			Error relativo (%)		
		Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo
Líquido	1	0.021	1.26	3.88	0.067	3.72	12.60
	2	0.046	0.31	1.42	0.65	4.17	15.70
	3	0.030	0.51	2.01	0.32	5.41	19.52
	4	0.005	0.24	0.53	0.046	6.25	26.10
	5	0.006	0.43	1.26	0.53	13.06	33.81
	6	0.250	2.80	5.29	0.89	21.89	47.02
	7	0.056	3.59	7.81	0.033	4.15	10.96
Vapor	1	0.34	9.77	39.11	0.42	5.28	13.55
	2	0.97	21.32	84.89	2.10	18.53	45.72
	3	0.083	5.64	23.86	0.22	9.55	35.99
	4	0.22	2.94	7.85	0.26	7.23	37.11
	5	1.67	16.32	34.75	0.45	22.69	52.41
	6	1.78	38.37	166.39	0.35	24.73	138.35
	7	0.0097	3.02	6.96	0.052	6.00	11.13

Tabla 3: Errores para las concentraciones calculadas a partir de los modelos matemáticos ajustados.

estimación que termina luego de varias iteraciones, punto en el cual la suma de cuadrados residual se aproxima al mínimo.

Todos los modelos ajustados que se presentan para cada fase son válidos para mostos de *Agave cocui* en el intervalo de temperaturas de ebullición de la mezcla multi-componentes durante la destilación (94-102°C).

El estadígrafo  $R^2$  ajustado por grados de libertad indica que el modelo, así ajustado, explica en términos de porcentaje la variabilidad en las concentraciones de cada uno de los componentes. Los resultados mostrados muestran los intervalos asintóticos para un nivel de confianza del 95.0 %.

Para todos los compuestos se puede observar una  $R^2 > 90$  % lo cual indica que en todos los casos el modelo ajustado proporciona una buena variabilidad de las concentraciones de los componentes estudiados en función del volumen de la destilación; excepto para el metanol en la fase de vapor donde la  $R^2$  es 83,54 %, debido a que la variación en las concentraciones de este compuesto en el destilado obedecen a la no uniformidad del calentamiento durante el proceso de destilación, lo que conlleva a la producción de un cocuy de una bebida de baja calidad.

Los modelos matemáticos ajustados, se validaron para un conjunto de datos experimentales de volumen y concentración arrojando errores absolutos promedio menores que 5 mg/L para la fase líquida, mientras que, en la fase de vapor se obtuvieron errores absolutos promedio mayores que 15 mg/L para algunos componentes analizados.

Los errores absolutos y relativos promedio calculados para cada uno de los componentes tanto en fase líquida como de vapor, correspondientes a los modelos matemáticos ajustados se muestran en la Tabla 3.

En general, para las primeras fracciones de la destilación se presentan menores errores en la fase de vapor,

mientras que, en la fase de líquida las primeras fracciones presentan un mayor alejamiento de los modelos propuestos. En el intervalo de temperatura estudiado (94-102°C). Todos los modelos ajustados permiten predecir las concentraciones de los componentes estudiados en los mostos de *Agave cocui* a partir de los volúmenes de muestra que se tomen durante el proceso de destilación.

Los errores promedio en las estimaciones de los modelos para la fase líquida, son menores al 5 % y pueden emplearse para estimar las concentraciones de los componentes de los mostos de *Agave cocui* con buena precisión, ya que las desviaciones de dichos valores con respecto a los experimentales, se encuentran dentro del intervalo permisible de error para este tipo de trabajo. Los modelos para la fase de vapor que presentan errores mayores del 5 % pueden ser usados para predecir las concentraciones, considerando el error que se introduce en la determinación.

### Conclusiones

Los modelos matemáticos que ajustan los datos experimentales del equilibrio líquido vapor a presión constante para mostos de *Agave cocui* proporcionan una buena variabilidad de las concentraciones de los componentes estudiados en función del volumen de la destilación; excepto el metanol en la fase de vapor. Todos los modelos ajustados, se validaron para un conjunto de datos experimentales de volumen y concentración arrojando errores absolutos promedio menores que 5 mg/L para la fase líquida, mientras que, en la fase de vapor se obtuvieron errores absolutos promedio mayores que 15 mg/L para algunos componentes analizados. En general, los modelos para la fase líquida pueden emplearse para estimar las concentraciones de los componentes de los mostos de *Agave cocui* con buena precisión, ya que las desviaciones de dichos valores con respecto a los experimentales, se encuentran dentro del intervalo permisible de error para este tipo de trabajo, mientras que, los modelos para la fase de vapor pueden ser usados para predecir las concentraciones, considerando el error que se introduce



en la determinación; lo cual es importante para modelar y simular el proceso de destilación artesanal de mostos de *Agave cocui* permitiendo así contribuir con el mejoramiento de la calidad de la bebida alcohólica obtenida.

### Agradecimientos

Los autores agradecen al Sr. Yoel Medina (productor de cocuy) y Asociación Falconiana de Cocuy (ASOFSCOCUY) su gran disposición para colaborar con la realización de este trabajo.

### Referencias

- [1] Yegres, F.; Fernández, G.; Padin, C.; Rovero, L.; Richard, N. 2003. "Saccharomyces cerevisiae en la fabricación del licor de Cocuy". *Revista de la Sociedad Venezolana de Microbiología*, 23: 51-54.
- [2] González, C. 2001. "Noticia histórica sobre el Cocuy (Agave cocui)". *Croizatia*, 2(3): 173-176.
- [3] López, J.; Morales, R. 2000. "Evaluación química analítica de la calidad de la bebida alcohólica obtenida de la planta agave cocuy, a los fines de garantizar su consumo humano y su posible correlación con algunos parámetros de producción". Informe final para Fundacite Falcón, Coro, Venezuela: 57-68.
- [4] Servicio Autónomo de la Propiedad Intelectual. 2001. "Boletín de la Propiedad Industrial". No.445 Resolución 0287, Venezuela.
- [5] Ventura, J. 2001. "Caracterización del proceso de producción artesanal del Cocuy Pecayero", Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda, Tesis de Ingeniería Industrial, Venezuela.
- [6] Leal, I.; Moran, H.; Medina, J.; Jaimes, L. 2011. "Evaluación de la diferencia en la composición de volátiles mayoritarios entre cocuy de agave y licor fraudulento comercializado como cocuy". *Multiciencias*, 11(4): 339-344.
- [7] Valderrama, J. O.; Faúndez, C. A.; Toselli, L. A. 2012. "Advances on modeling and simulation of alcoholic distillation. Part 1: Thermodynamic modeling". *Food and Bioproducts Processing*. 90(4): 819-831. doi: 10.1016/j.fbp.2012.04.004
- [8] COVENIN. 2001. "Cocuy pecayero". Norma 3662, Fondonorma. Caracas - Venezuela: 9.
- [9] Iñiguez, J. 2010. "Algunas consideraciones teórico-prácticas sobre la destilación intermitente en alambique simple de mostos fermentados y ordinarios. Parte I: Algunas Definiciones y Conceptos fundamentales". *Revista Electrónica Ingeniería Primero*, 17: 31-51.
- [10] Ministerio del Poder Popular para la Ciencia, Tecnología e Innovación. 2010. "Inaugurada unidad piloto para procesamiento de Agave Cocui": 1-2 <http://www.mcti.gob.ve/actualidad/noticias/inaugurada-unidad-piloto-para-procesamiento-de-agave-cocui>.
- [11] Smith, J.; Van Ness, H.; Abbott, M. 2007. "Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química". McGraw Hill Interamericana, México.
- [12] Prausnitz, J.; Lichtenthaler, R.; Comes, E. 2001. "Termodinámica molecular de los equilibrios de fase líquida". Prentice Hall, Madrid.
- [13] Scanavini, H.; Ceriani, A.; Cassini, C.; Souza, E.; Maugeri, F.; Meirelles, A. 2010. "Cachaca una producción a escala de laboratorio en un alambique: modelado y simulación computacional". *Food Process Eng*, 33(1): 226-252.
- [14] Skoog, D.; Leary, J. 1994. "Análisis Instrumental". McGraw Hill Interamericana, España.

## NLOS Mitigation for Mobile Subscriber Positioning Systems By Weighting measures and Geometrical Restrictions

René Játiva E.<sup>1\*</sup>, David Sánchez<sup>1</sup>, Josep Vidal<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Colegio de Ciencias e Ingeniería - Universidad San Francisco de Quito. Diego de Robles y Vía Interoceánica, Quito, Ecuador.

<sup>2</sup>Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones - Universidad Politécnica de Cataluña

\*Autor principal/Corresponding author, e-mail: rjativa@usfq.edu.ec

Editado por/Edited by: Cesar Zambrano, Ph.D.

Recibido/Received: 2015/04/09. Aceptado/Accepted: 2015/05/10.

Publicado en línea/Published on Web: 2015/12/30. Impreso/Printed: 2015/12/30.

### Abstract

This paper studies the Non-Line-Of-Sight condition mitigation issue in mobile subscriber positioning systems by weighting Time-Of-Arrival measures and applying geometrical restrictions. Particularly, this work departs from a more exact characterization of the signal statistics to achieve weighting factors able to reach a more effective mitigation, and consequently a more accurate mobile subscriber positioning. In addition, restrictions based on the cell geometry are incorporated as a complementary refinement method. Therefore, three new methods with better properties than those taken from the literature and used as reference are introduced. These approaches are evaluated within a realistic simulation scenario.

**Keywords.** NLOS mitigation, TOA based positioning systems, WLLS, geometrical restrictions, wireless sensor networks.

### Mitigación de la Condición NLOS para Sistemas de Posicionamiento de Suscriptor Móvil usando Ponderación de Medidas y Restricciones Geométricas

### Resumen

Este artículo estudia el problema de la mitigación de la condición de ausencia de Línea de Visión en sistemas de posicionamiento de suscriptor móvil utilizando la ponderación de medidas de Tiempo de Arribo y la aplicación de restricciones geométricas. En particular, este trabajo parte de una caracterización más exacta de la estadística de la señal, para conseguir factores de ponderación con capacidad de alcanzar una mitigación más efectiva, y consecuentemente un posicionamiento más preciso del suscriptor móvil. Adicionalmente, se incorporan restricciones basadas en la geometría de la celda como método de refinamiento complementario. Se presentan en consecuencia tres nuevos métodos de posicionamiento con mejores propiedades que los tomados de la literatura y usados como referencia. Estas técnicas se evalúan dentro de un escenario de simulación realista.

**Palabras Clave.** Mitigación NLOS, sistemas de posicionamiento basados en Tiempo de Arribo (TOA), WLLS, restricciones geométricas, redes de sensores inalámbricos.

### Introduction

Positioning of a mobile subscriber is a complex task with the capability of adding value to services and applications. The knowledge of the positioning of a certain device is important, but the applications and services to be provisioned from the awareness of that position will probably be more useful from the perspective of the user, and consequently more impacting to our society. Therefore a close relationship and dynamism are associated to: a) wireless communications that provide user ubiquity, b) positioning technologies that refer to the ways in which the measured signals from network

and/or a mobile subscriber are treated to compute its position, and c) Location Based Services (LBS). In fact, LBS are a key piece of this dynamism, not just because LBS are hunger of more resources from network devices but also because they take advantage of the virtues of new communication technologies to construct new possibilities of relation among users, between users and service providers, and also between providers and third parties such as contents' providers. Neither it is strange that all these systems' elements are object of permanent research and keep in permanent revision [1–14].

This paper focuses in network based positioning technologies and particularly in the mitigation of an important issue, which strongly degrades the accuracy of the subscriber due to the specific propagation conditions of the wireless signals, known as Non Line Of Sight (NLOS) condition. Furthermore, enabling positioning technologies based on Time Of Arrival (TOA) measures will be used along this document to illustrate the problem and the means employed to mitigate it, within a simulation environment developed to reproduce realistic wireless propagation conditions.

### The Positioning Problem

Torrieri [15] established the statistical principles for passive location systems, and generalized this problem assuming the measurements vector  $\mathbf{m}$ , may be view as a function of the position vector  $\mathbf{x}$ , plus additive noise  $\mathbf{n}$ , as in (1):

$$\mathbf{m} = f(\mathbf{x}) + \mathbf{n} \quad (1)$$

The actual nature of  $f(\mathbf{x})$  depends of the type of the measurements' set used for computing the positioning, and in the case of range-based methods such as TOA, TDOA and RSSI, it is a nonlinear function related to the range among the subscriber position and those BS's participating in the positioning. The expression for TOA is exhibited in (2); where  $L$  refers to the number of BSs,  $\mathbf{x}=(x,y)$  to the true coordinates of the subscriber position, and  $\mathbf{r}_i=(x_i,y_i)$  denotes to the position of BS<sub>*i*</sub> used as reference.

$$f_{TOA_i}(\mathbf{x}) = \|\mathbf{x} - \mathbf{r}_i\|; \quad \forall i = 1, 2, \dots, L \quad (2)$$

The general nonlinear solution corresponds to the minimization of the noise in (1) by using Maximum Likelihood (ML), Nonlinear Least Squares (NLS) or the Weighted Nonlinear Squares (WNLS) approach [18]. The WNLS solution requires minimization of a cost function, where the actual function  $J_{WNLS}$  depends of the type of measurements employed and its general form is shown in (3).

$$J_{WNLS}(\mathbf{x}) = [\mathbf{m} - f(\mathbf{x})]^T \mathbf{C}_n^{-1} [\mathbf{m} - f(\mathbf{x})] \quad (3)$$

with  $\mathbf{C}_n = E\{\mathbf{nn}^T\}$

Performing a ML solution for this estimation problem requires noise statistics, and when the measurement noise  $\mathbf{n}$  in (1) is zero-mean and Gaussian distributed with covariance matrix  $\mathbf{C}_n$ , it may be easily shown as ML scheme reduces to the WNLS solution, and finally to NLS when measurement noise is statistically independent and identically distributed. The ML approach requires a high complexity when grid search is achieved, and therefore global solution may not be guaranteed, but in general

its accuracy is the highest, especially when  $\mathbf{C}_n$  is also a function of subscriber position because if it is the case, the cost function includes the term  $\ln[\det(\mathbf{C}_n)]$  that avoids the selection of positions with large uncertainty [16]. On the other hand, NLS does not require noise statistics but also involves the same issues as ML.

The vector function  $f(\mathbf{x})$  in (1), which relates the position in the real world  $\mathbf{x}$ , to the measurement space  $\mathbf{m}$  is nonlinear in general, but it becomes linear through a Taylor series expansion around an arbitrary point  $\mathbf{x}_0$  located near the subscriber position, and it requires the Jacobian matrix for  $f(\mathbf{x})$  evaluated in  $\mathbf{x}_0$ , for the  $L$  measurements [15–17].

Assuming a zero mean Gaussian distribution for the noise vector  $\mathbf{n}$ , a Linearized Least Squares position Estimator was proposed by Torrieri [15]. This solution uses the iterative algorithm known as Gauss-Newton method for reaching the cost function minimum, but others methods such as Newton-Raphson or Steepest Descent may be used instead [16, 17].

It is also possible to convert the nonlinear formulation in (1) into a set of linear equations with the form in (4) under the assumption that measurements errors are small enough. The actual form of matrix  $\mathbf{A}$  and vector  $\mathbf{b}$  depends of the kind of measurements chosen by the enabling technology. Expressions (5) and (6) exhibit the corresponding structures for the case of TOA based positioning systems when the controlling BS is assumed to be at the origin, and where  $c$  refers to the light speed. Linear procedures include to Linear Least Squares (LLS), Weighted LLS (WLLS) and the subspace estimators [18]. LLS and WLLS are the linear counterparts of NLS and WNLS respectively.

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (4)$$

$$\mathbf{A}_{TOA} = \begin{bmatrix} x_2 & y_2 \\ x_3 & y_3 \\ \vdots & \vdots \\ x_L & y_L \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{b}_{TOA} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} r_2^2 - m_2^2 + m_1^2 \\ r_3^2 - m_3^2 + m_1^2 \\ \vdots \\ r_L^2 - m_L^2 + m_1^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

with  $r_i^2 = x_i^2 + y_i^2; \quad \forall i = 1, \dots, L$   
and  $m_i = c \cdot t_i; \quad \forall i = 1, 2, \dots, L$

The LLS solution is shown in (7), and this procedure may also be applied to TDOA with certain modifications [17].

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b} \quad (7)$$

In addition, it is worth to note as all of these LLS procedures dismiss the noise statistics and therefore will achieve their most performance in case of low noise patterns.

The WLLS approach emerges from including a weighting matrix  $\mathbf{W}$ , within the cost function as it is shown in (8). This assessment matrix is precisely the inverse of the covariance noise matrix, and after cost function minimization, the WLLS estimator is achieved as in (9):

$$J_{WLLS} = E \left\{ (\mathbf{Ax} - \mathbf{b})^T \mathbf{W} (\mathbf{Ax} - \mathbf{b}) \right\} \quad (8)$$

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{WA})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{Wb} \quad (9)$$

The particular weighting matrix  $\mathbf{W}$  depends of the type of measurements, and it is usually dependent of the distances between subscriber and BSs due to transformations performed during formulation of the linear system. Expression (10) exhibits this matrix for the case of TOA based positioning. In this case, the set of required distances  $d_i$  may be replaced for the set of measurements  $m_i$ , but in case of TDOA or AOA, a LLS procedure should be firstly performed to estimate subscriber position to properly figure out the distances required within  $\mathbf{W}$ , and a second step is also required to achieve the refined WLLS position estimation. In case of TDOA, the weighting matrix in (11) may also be also used as first step when a WLLS initialization is preferred. Furthermore, an iterative process may be performed in order to minimize the function cost in (8) and achieve the maximum accuracy, and consequently the Best Linear Unbiased Estimator (BLUE) algorithm, but in general a two-step LS algorithm is adequate. Alternative formulations for the positioning problem are possible, but results in terms of accuracy are not important [22].

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_{TOA} &= [E \{ \mathbf{ee}^T \}]^{-1} \\ &= \frac{1}{4} \text{diag} \left( \frac{1}{\sigma_{TOA,2}^2 d_2^2}, \dots, \frac{1}{\sigma_{TOA,L}^2 d_L^2} \right) \quad (10) \\ \text{with } d_i^2 &= \|\mathbf{x} - \mathbf{r}_i\|^2; \quad \forall i = 2, 3, \dots, L \end{aligned}$$

$$\mathbf{W}_{TDOA}^{-1} = C_{TDOA} = \begin{bmatrix} 2 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 2 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \dots & 2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Whichever would be the positioning technique employed, it should be kept in mind that every set of measurements performed by a sensor reduces the positioning to a region shaped in a way related to the nature of the measurements, a feasible region. A TOA based positioning corresponds to a circular-circular system, whilst a hyperbolic-hyperbolic system is characteristic of a TDOA

based positioning. Furthermore, it must be noted as hybrid techniques exhibit a better behavior than homogeneous ones since it is a well-known principle that errors achieved from a particular positioning technique may be overcome with the application of another one [23]. Positioning accuracy may also take advantage of spatial diversity and mobile system's dynamic [19, 20, 30]. In fact, Kalman Filter [21, 29] and its variants [25, 28] have been probed their efficacy by using the mobility dynamics.

### The signal model and the NLOS issue in the mobile subscriber positioning problem

Due to the presence of obstacles between emitter and transmitter, received signal is scattered in space and time, and the LOS component may be strongly degraded or even completely shadowed. However, receiver generally uses the most powerful arriving components and therefore, in case of shadowing, LOS component is eventually discarded, and measures are achieved under a NLOS condition. This NLOS multipath signal travels a longer distance than the LOS component to reach the receiver and consequently the measures are biased as it is shown in (12), where  $\mathbf{q}$  is precisely the vector which contains biases due to NLOS.

$$\begin{aligned} \mathbf{m} &= f(\mathbf{x}) + \mathbf{n} + \mathbf{q} \\ \text{with } \mathbf{q} &= [q_1, q_2, \dots, q_L]^T \quad (12) \end{aligned}$$

These biases are positive random variables. When  $q_i=0$ , it refers to a LOS condition, and when  $q_i \gg |n_i|$ , it refers to a strong NLOS condition, being the latter the case commented along this paper. Bias nature is associated to propagation conditions, and in case of TOA based systems, it may be related directly to the Excess Delay through the Power Delay Profile (PDP). Furthermore, the Greenstein model [9] has been considered to perform this characterization, since it adjusts to several measurement - based models and incorporates their information into a small number of parameters to characterize the path-gain/delay spread propagation channel, and even this model has been incorporated to COST-231 and eventually to the COST-259 Directional Channel Model [12, 25].

NLOS environments are modeled using an exponential distribution for the excess delay for a particular location as it is shown in (13), and the Greenstein model characterizes the required RMS Delay Spread  $\tau_{rms}$  in (14) as a random variable and also as a function of the distance between emitter and receiver, where  $\xi$  is a lognormal random variable. Hence,  $\Xi = 10 \log(\xi)$ , is a zero mean Gaussian variable over the terrain, with a standard deviation  $\sigma_\xi$  that lies between 2 and 6 [dB]. Furthermore,  $T_1$  corresponds to the median value of  $\tau_{rms}$  at  $d=1$  [km], and  $\varepsilon$  is an exponent that lies between 0.5-1.0. It has

been set to 0.5 for the simulations exhibited in this document.

$$f_{\tau}(\tau) = \frac{1}{\tau_{rms}} \exp\left[-\frac{\tau}{\tau_{rms}}\right] u(\tau) \quad (13)$$

$$\tau_{rms} = T_1 d^{\epsilon} \xi \quad (14)$$

The Greenstein model also includes the gain path  $g$ . This gain is computed with the use of the expression in (15), where  $d$  is the distance in kilometers,  $G_1$  is the median value of  $g$  at  $d=1$  [km],  $\beta$  is the loss path propagation factor which lies between 3 and 4, and  $\mathbf{x}$  is a lognormal random variable. Therefore,  $\mathbf{X}=10\log(\mathbf{x})$  is a zero mean Gaussian with a standard deviation  $\sigma_x$  between 6 and 12 [dB]. And finally, the correlation factor among  $\mathbf{X}$  and  $\Xi$  has been set as  $\rho=-0.7$  [9]. Therefore  $E\{\mathbf{X}\cdot\Xi\} = \rho\cdot\sigma_x\cdot\sigma_{\xi}$ .

$$\mathbf{g} = \frac{G_1}{d^{\beta}} \mathbf{x} \quad (15)$$

The mean and the standard deviation for the RMS Delay Spread modeled as in (14) are presented as a function of distance within (16) and (17) respectively, being  $m_z$  and  $\sigma_z$  the mean and standard deviation of the scaled random variable  $\mathbf{Z}=\Xi\cdot\ln(10)/10$ . These expressions are derived in the Annex.

$$E\{\tau_{rms}\} = T_1 d^{\epsilon} e^{m_z + \sigma_z^2/2} \quad (16)$$

$$\sigma_{\tau_{rms}} = \sqrt{\text{var}\{\tau_{rms}\}} = k T_1 d^{\epsilon} \quad (17)$$

Since the standard deviation for Delay Spread in (17) increases proportionally to  $T_1 d^{\epsilon}$ , it is reasonable to modify the weights in the WLLS algorithm in (10) as in (18) to include this information as a mean for NLOS mitigation. This new version of the WLLS algorithm will be called NLOS WLLS in this document.

$$\mathbf{W}_{NLOS} = \text{diag}\left(\frac{1}{T_1^2 d_2^{2(1+\epsilon)}}, \dots, \frac{1}{T_1^2 d_L^{2(1+\epsilon)}}\right) \quad (18)$$

In addition, and due the set of TOA measures are biased, a geometric mitigation will also be tested. This Geometric based mitigation will simply estimate subscriber position as the centroid of the resulting triangle from the intersection of the Circular Lines Of Position described by the measures achieved from the three nearest BS's.

Finally, two new algorithms resulting from the incorporation of Geometric restrictions to our proposed NLOS WLLS are also evaluated in the next section.

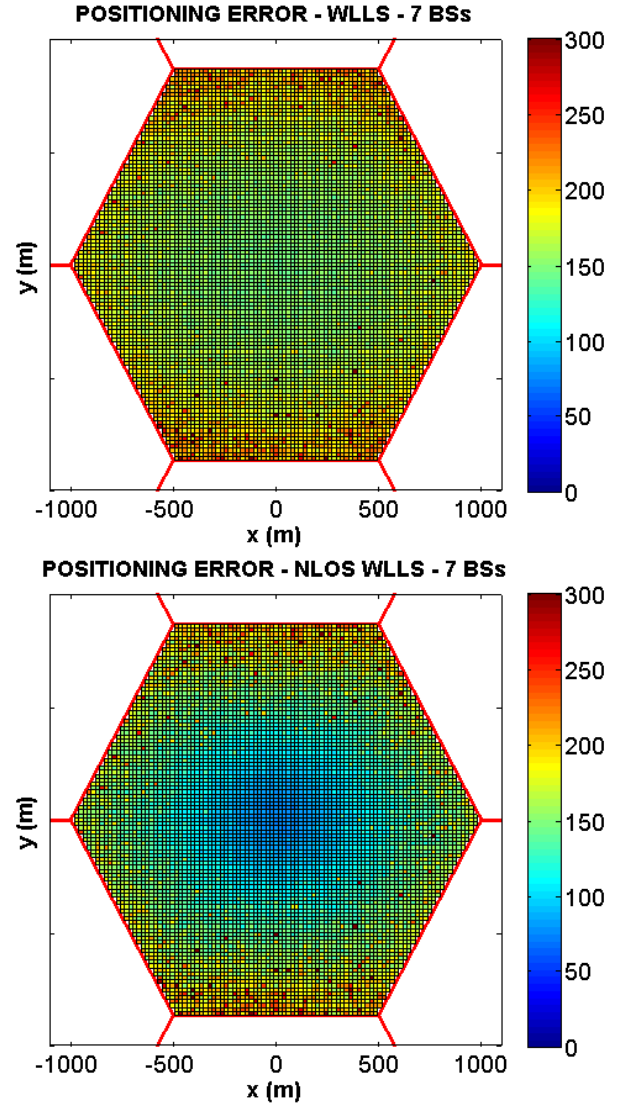


Figure 1: Subscriber Average Positioning Error for a dispersive NLOS environment,  $T_1=0.4[\mu s]$  and 7 BS's. A) Top: original WLLS algorithm. B) Bottom: NLOS WLLS method with  $\epsilon=1$ .

### Algorithms' Performance Evaluation

This section includes some simulations provided to evaluate several positioning algorithms and their capabilities to mitigate the NLOS condition.

To perform positioning evaluation, a simulation platform compounded for a seven hexagonal cell cluster has been considered. The control site is located at the coordinate system origin, and a rectangular grid has been constructed within the control cell to evaluate subscriber positioning algorithms' behavior for each point within the cell.

A realistic scenario is considered. It assumes that NLOS condition is present in the seven BS's. However, NLOS is assumed to be more moderated for the communications between the subscriber and the control site. For this latter BS, the Greenstein model is used as in the rest of sites with the only difference that the propagation losses factor  $\beta$  is reduced from 3.7 to 2.5. However



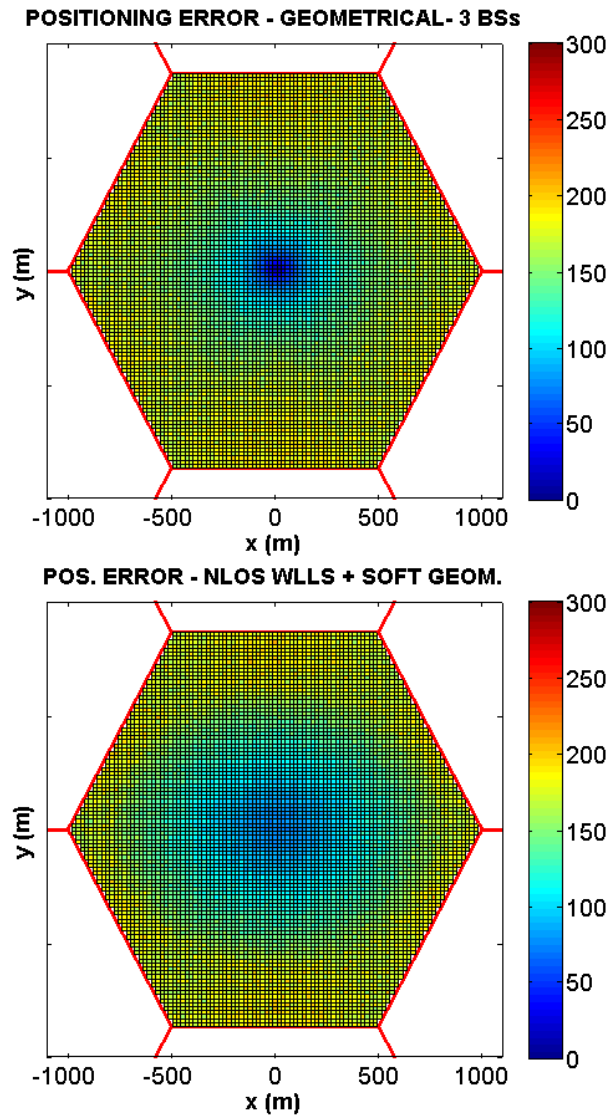


Figure 2: Subscriber Average Positioning Error for a dispersive NLOS environment. A) Top: Based on Geometrical Restrictions and 3 BS's. B) Bottom: 7 BS's - NLOS WLLS with  $\epsilon=1$  and Soft Geometrical Restrictions.

signal strength information is not relevant for results in this paper.

Particularly, the required parameters for the Greenstein model take the following values suitable for the urban case [9]:  $T_1=0.4$  [us],  $\epsilon=0.5$ ,  $\sigma_x=8.0$  [dB],  $\sigma_\xi=2.0$  [dB], and  $\rho=-0.75$ .  $T_1$  has been set in agree to the GTU COST 259 model [12, 26] and it may be considered a moderate dispersive environment.

Figure 1 and Figure 2 exhibit the average positioning errors for subscribers within a cell with radius  $R=1000$  [m] for several of the methods considered in this study. Particularly, Figure 1 shows the behavior from the application of both the original WLLS method described by (9) and (10), and the proposed NLOS WLLS algorithm with modified weights as in (18). Clearly the proposed method achieves a better NLOS mitigation especially near the control site, but it also exhibits accuracy degra-

ation in the boundaries.

Figure 2 on the other hand, shows the behavior of the considered Geometrical Positioning and the positive benefit of adding certain geometrical restrictions to the NLOS WLLS algorithm. In fact, the Geometrical Positioning exhibits a better behavior near the cell boundaries when it is compared with methods in Figure 1. Furthermore, when this information is added to the NLOS WLLS method, the new algorithm provides the best mitigation of them all.

To incorporate the information provided by the geometrical restriction, positioning is performed for the both basic algorithms; then, when NLOS WLLS procedure estimates that subscriber is located in the outer 30% portion of the cell, the positioning based on Geometrical restrictions is used to provide the subscriber position. If a hard fusion is performed, this latter position is used instead of the first. On the other hand, a soft decision implies to take the average of both estimations.

This second technique is the employed in simulation at the bottom of Figure 2.

Figure 3 compares the CDF's for the positioning error from various mitigation techniques commented along this paper. It includes the original WLLS algorithm, the proposed NLOS WLLS method, the positioning based on Geometrical restrictions, the Geometric Assisted Location Estimator (GALE) approach in [24], the Yi-Long algorithm in [27], and the two algorithms that introduce geometrical restrictions to the proposed NLOS WLLS method. All this algorithms use measures provided by the seven BS's with the exception of the algorithm based on Geometrical restrictions that use just the three nearest stations. These results confirms NLOS WLLS plus soft geometrical restrictions algorithm as the best among the whole set of implemented methods. In fact, this algorithm exhibits average positioning errors below 162[m] in 70% of the cases, and below 191 [m] in 95% of the cases. NLOS WLLS plus hard geometrical restrictions algorithms also makes a good job and registers average positioning errors below 172 [m] in 70% of the cases and below 188 [m] in the 95% of the cases. These latter values are slightly better than those provided by the Geometric algorithm which exhibits average positioning errors below 175 [m] in the 70% of the cases and below

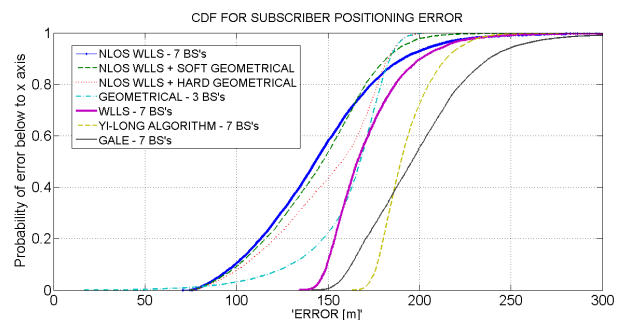


Figure 3: Cumulative Distribution Function for subscriber positioning error and different methods.

188 [m] in the 95% of the cases although a good portion of its data registers up to 25 [m] of additional error. In addition, the original NLOS WLLS algorithm achieves an average positioning error below 162 [m] in the 70% of the cases and below 208 [m] in the 95% of the cases, whilst the traditional WLLS algorithm reaches an average positioning error below 179 [m] for the 70% of the cases and below 215 [m] for the 95% of the cases. It means that NLOS WLLS plus soft Geometrical restrictions provides an additional mitigation of around of 15-45 [m] when it is compared with the traditional WLLS method in this moderate dispersive environment. Simulations performed within a more dispersive environment have shown as positioning degrades for all methods but also as these gains enhance. In addition, Yi-Long approach [27] and particularly GALE method [24] exhibited a poor performance within our NLOS simulation scenery where Gaussian measurement noise has not been included. In fact, our best approach provides an additional mitigation of around 35-70[m] respect to Yi-Long approach and around 50-70[m] respect to GALE. These two algorithms worked even worse than the positioning based on a simple Geometrical restriction in our simulations.

### Summary

Non Line Of Sight (NLOS) condition strongly degrades the performance of subscriber positioning in wireless communication systems. Robust traditional algorithms, originally developed to use Line Of Sight (LOS) signal, fail in current dispersive scenarios. Several mitigation techniques have been proposed. Some of them consider the weighting of the available measures in order to get the better of each one. Others use geometrical restrictions to improve accuracy, and another group includes some lateral information to properly evaluate the quality of the measure and hence incorporate this data in the positioning process.

The most relevant approaches for positioning and NLOS mitigation have been simulated within realistic environments along this document for small sized cells. A new mitigation algorithm that considers both the weighting of measures and soft geometrical restrictions has been proposed for positioning based on TOA. This new algorithm makes a better work than those provided by the literature and used as reference. In fact, this new algorithm achieves a positioning error below 162 [m] for the 70% of the cases and below 191[m] for the 95% of the cases within a moderate dispersive environment ( $T_1=0.4$  [us]). These values are at least 10% lower than those provided by the reference WLLS algorithm. Therefore average positioning error decreases between 15 [m] and 45 [m] for this new method, around 35-70 [m] in comparison with Yi-Long approach, and around 50-70 [m] when it is compared with GALE. However, 163[m] is still high when it is compared with the 100 [m] required by the E911 regulation, and therefore new methods that better exploit the system characteristics to take

advantage of its dynamics and signal diversity will be the object of further research.

### References

- [1] Karimi, H. A. 2013. "Advanced Location-Based Technologies and Services". CRC Press: 3-54. ISBN: 9781466518186.
- [2] Qiu, p.; Zhang, J.; Zeng, J. 2012. "Study on the Mobile LBS Development Model". *International Conference on Computer Science and Service Systems*: 1070-1074. doi:10.1109/CSSS.2012.271.
- [3] Chung-Ming, H.; Shang-Chun, L. 2011. "DEH: A ubiquitous Heritage Exploring System using the LBS Mechanism". *International Conference on Network-Based Information Systems*: 310-317. doi:10.1109/NBiS.2011.54.
- [4] Guoshi, W.; Fang, Z.; Rui, W. 2012. "Design and Implementation of an LBS Application Server Software Based on the PUB/SUB Paradigm". *International Conference on Business Computing and Global Informatization*: 637-640. doi:10.1109/BCGIN.2012.171.
- [5] Barnes, R.; Rosen, B. 2014. "911 for the 21st century". *IEEE Spectrum*, 51(4). doi:10.1109/MSPEC.2014.6776307.
- [6] 3<sup>RD</sup> Generation Partnership Project. 2004. "Technical Specification Group Radio Access Network; Stage 2 functional specification on User Equipment (UE) positioning in UTRAN (Release 6) - 3GPP TS 25.305 V6.1.0 (2004-06)". <http://www.qtc.jp/3GPP/Specs/25305-610.pdf>.
- [7] 3<sup>RD</sup> Generation Partnership Project. 2004. "Technical Specification Group Services and System Aspects; Functional stage 2 description of Location Services (LCS) (Release 4) - 3GPP TS 23.271 V4.13.0 (2004-12)". <http://www.qtc.jp/3GPP/Specs/23271-4d0.pdf>.
- [8] Ertel, R. B.; Cardieri, P.; Sowerby, K. W.; Rappaport, T. S.; Reed, J. H. 1998. "Overview of Spatial Channel Models for Antenna Array Communication Systems". *IEEE Personal Communications Magazine*, 5(1): 10-22.
- [9] Greenstein, L. J.; Erceg, V.; Yeh, Y. S.; Clark, M. V. 1998. "A New Path-Gain/Delay-Spread Propagation Model for Digital Cellular Channels". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 46(2): 477-485.
- [10] Lusina, P.; Kohandani, F.; Ali, S. M. 2008. "Antenna parameter effects on spatial channel models". *The Institution of Engineering and Technology Communication*, 3(9). doi:10.1049/iet-com.2008.0414.
- [11] Gentile, C.; Martínez, S.; Kik, A. 2010. "A Comprehensive Spatial-Temporal Channel Propagation Model for the Ultrawideband Spectrum 2-8 GHz". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 58(6). doi:10.1109/TAP.2010.2046834.

- [12] Asplund, H.; Alayón, A.; Molisch, A. F.; Pedersen, K. I.; Steinbauer, M. 2006. "The COST 259 Directional Channel Model - Part II: Macrocells". *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 5(12). doi:10.1109/TWC.2006.256967.
- [13] Prócel, P.; Prócel, L.; Játiva, R.; Arauz, J. 2009. "Desarrollo de una Aplicación de Servicios Basados en Localización para Redes de tipo Global System for Mobile (GSM) y Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) usando el emulador Mobile Positioning System 6.0.1 provisto por la empresa ERICSSON". *Revista Avances en Ciencias e Ingenierías*, 1(1): 17-21.
- [14] Tam, S.; Lee, H. 2009. "MSF whitepaper on Location Services in LTE Networks - MSF-TR-SERVICES-005-FINAL". Multiservice Forum.
- [15] Torrieri, D. J. 1984. "Statistical Theory of Passive Location Systems". *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-20(2): 183-198.
- [16] Gustafsson, F.; Gunnarsson, F. 2005. "Mobile Positioning using Wireless Networks - Possibilities and fundamental limitations based on available wireless network measurements". *IEEE Signal Processing Magazine*, 22(4). doi:10.1109/MSP.2005.1458284.
- [17] Sayed, A. H.; Tarighat, A.; Khajehnouri, N. 2005. "Network-Based Wireless Location". *IEEE Signal Processing Magazine*, 22(4). doi:10.1109/MSP.2005.1458275.
- [18] Zekavat, S. A.; Buehrer, R. M. 2012. "Handbook of Position Location - Theory, Practice and Advances". IEEE Press - John Wiley and Sons: New Jersey.
- [19] Vidal, J.; Nájar, M. et al. 2001. "Positioning Accuracy when Tracking UMTS mobiles in delay and angular dispersive channels". IEEE Conference on Vehicular Technology.
- [20] Játiva, R.; Vidal, J. 2009. "Estimación del Tiempo de Llegada en un canal Rayleigh desde una perspectiva de la Cota Inferior de Cramer-Rao". *Revista Avances en Ciencias e Ingenierías*, 1(1): 5-10.
- [21] Silva, S.; Játiva, R. 2009. "Seguimiento de Dispositivos Móviles en un Sistema de Comunicaciones Móviles Celulares". *Revista Avances en Ciencias e Ingenierías*, 1(1): 23-27.
- [22] Chan, F. K. W.; So, H. C.; Zheng, J.; Lui, K. W. K. 2008. "Best Linear Unbiased Estimator Approach for Time-Of-Arrival Based Localisation". *The Institution of Engineering and Technology Signal Processing*, 2(2). doi:10.1049/iet-spr:200070190.
- [23] Cong, L.; Zhuang, W. 2005. "Nonline-of-Sight Error Mitigation in Mobile Location". *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 4(2). doi:10.1109/TWC.2004.843040.
- [24] Kai-Ten, F.; Chao-Lin, C.; Chien-Hua, C. 2008. "GALE: An Enhanced Geometry-Assisted Location Estimation Algorithm for NLOS Environments". *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 7(2). doi:10.1109/TMC. 2007.70721.
- [25] Deng, Z.; Yu, Y.; Guan, W.; He, L. 2010. "NLOS Error Mitigation Based on Modified Kalman Filter for Mobile Location in Cellular Networks". *IEEE International Conference on Wireless Communications and Signal Processing*: 1-5. doi:10.1109/WCSP.2010.5633466.
- [26] Guan, W.; Deng, Z.; Yu, Y.; Ge, Y. 2010. "A NLOS Mitigation Method for CDMA2000 Mobile Location". *Second IEEE International Conference on Network Infrastructure and Digital Content*: 668-672. doi:10.1109/ICNIDC.2010.5657865.
- [27] Long, Y.; Huang, J.; Pan, Y.; Du, J. 2013. "Novel TOA Location Algorithms based on MLE and MMSEE for NLOS Environments". *IEEE International Conference on Communications, Circuits and Systems*, 2. doi:10.1109/ICCCAS.2013.6765283.
- [28] Huerta, J. M.; Vidal, J.; Giremus, A.; Tourneret, J. Y. 2009. "Joint Particle Filter and UKF Position Tracking in Severe Non-Line-of-Sight Situations". *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 3(5). doi:10.1109/JSTSP.2009.2027804.
- [29] Cheng-Tse, C.; Po-Hsuan, T.; Kai-Ten, F. 2010. "Hybrid TOA/TDOA based unified Kalman tracking algorithm for wireless networks". *IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications*: 1707-1712. doi:10.1109/PIMRC.2010.
- [30] Játiva, R.; Vidal, J. 2012. "Cota Inferior de Crámer-Rao en la Estimación del Tiempo de Llegada en un Canal Rice". *Revista Avances en Ciencias e Ingenierías*, 4(1): C14-C21. ISSN 1390-5384.

**Annex. Derivation of the first two moments for the RMS Delay Spread defined as the Greenstein Model**

The derivation of these moments is eased by the fact that  $\xi$  in (14) is lognormal and therefore, it is related to  $\Xi$  as it is shown in (19), and admits to be expressed in relation to a new scaled variable  $\mathbf{z}$  with mean  $m_z$  and standard deviation  $\sigma_z$  as it is shown in (20):

$$\begin{aligned} \xi &= e^{\Xi \cdot \ln 10/10} = e^z \\ \text{with } \mathbf{z} &= \frac{\ln 10}{10} \Xi \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} m_z &= E\{\mathbf{z}\} = \frac{\ln 10}{10} m_\xi \\ \sigma_z &= \sqrt{\text{var}\{\mathbf{z}\}} = \frac{\ln 10}{10} \sigma_\xi \end{aligned} \quad (20)$$

The computation of  $\xi$  may be related to the characteristic function  $\Phi_z(s)=E\{e^{zs}\}$  as follows:

$$\begin{aligned} E\{\xi\} &= E\{e^z\} = \Phi_z(s=1) \\ &= e^{s \cdot m_z + s^2 \cdot \sigma_z^2/2} \Big|_{s=1} = e^{m_z + \sigma_z^2/2} \end{aligned} \quad (21)$$

Similarly, the second moment may be performed as it is shown in (22):

$$\begin{aligned} E\{\xi^2\} &= E\{e^{2z}\} = \Phi_z(s=2) \\ &= e^{s \cdot m_z + s^2 \cdot \sigma_z^2/2} \Big|_{s=2} = e^{2m_z + 2\sigma_z^2} \end{aligned} \quad (22)$$

And the variance may be achieved as in (23):

$$\begin{aligned} \text{var}\{\xi\} &= E\{\xi^2\} - E^2\{\xi\} \\ &= e^{2m_z + \sigma_z^2} \left( e^{\sigma_z^2} - 1 \right) \end{aligned} \quad (23)$$

Furthermore, the statistics for the RMS delay spread are finally derived within (24) and (25):

$$E\{\tau_{rms}\} = T_1 d^\epsilon e^{m_z + \sigma_z^2/2} \quad (24)$$

$$\sigma_{\tau_{rms}} = E\{\tau_{rms}\} \sqrt{e^{\sigma_z^2} - 1} = k T_1 d^\epsilon \quad (25)$$

## Relaciones Proceso, Microestructura, Propiedades del Cromado Duro a Escala de Laboratorio

Juan D. Ordóñez Barriga<sup>1\*</sup>, Alfredo Valarezo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad San Francisco de Quito - Colegio de Ciencias e Ingenierías. Diego de Robles y Vía Interoceánica, Cumbayá-Ecuador.

\*Autor principal/Corresponding author; e-mail: [juan\\_ord@live.com](mailto:juan_ord@live.com)

Editado por/Edited by: Cesar Zambrano, Ph.D.

Recibido/Received: 2015/04/19. Aceptado/Accepted: 2015/09/27.

Publicado en línea/Published on Web: 2015/12/30. Impreso/Printed: 2015/12/30.

### Relationships Process, Microstructure, Properties of Hard Chromium Plating in Laboratory Scale

#### Abstract

In this work hard chromium electroplating process is developed on small test specimens on AISI A36 steel. This paper includes the development of hard chrome plating process at laboratory scale and provide a simplified procedure for industrial applications. By applying a differential power over the A36 steel submerged in an electrolytic bath of chromic acid, a thin coat of 30 to 80 microns of chrome is deposited over the specimen. The hard chrome deposition is achieved by a combination of multiple variables such as: chromic acid concentration, substrate metal, anodes, current density, solution temperature and time. From the abovementioned parameters, the time and the current density are the working parameters to be manipulated while the others remain unchanged. For these experiment, a linear simplified model is theoretically and experimentally derived from Faraday's electro-deposition law for hard chrome plating. The thickness variation, micro-hardness and cracking network of the combination of the working parameters are included and discussed in this work. The chrome deposit obtained is microscopically and gravimetrically measured. The results obtained by combining the working parameters show hardness values within the range provided of 66 to 70 HRC. This paper studies and analyzes the possible causes that influence hardness with the microstructure (number of surface cracks, density) and processing parameters such as time and current density.

**Keywords.** Hard Chrome Plating, Faraday law, microhardness, microcracks, time, current density.

#### Resumen

En el presente trabajo se desarrolla experimentalmente el proceso de cromado duro sobre probetas de acero AISI A36. El trabajo incluye el desarrollo del proceso de cromo duro a nivel de laboratorio para brindar un procedimiento simplificado en la aplicación industrial. La electro-deposición es el principio fundamental de depósito del cromo duro, mediante la aplicación de un diferencial de potencial eléctrico, sobre el acero A36 sumergido en un baño electrolítico de ácido crómico, se deposita una capa de cromo entre 30 - 80 micrómetros. El depósito de cromo se logra mediante la combinación de variables; tales como: concentración de la solución electrolítica de ácido crómico, material base, ánodos, densidad de corriente, temperatura de la solución y tiempo. De las anteriores, el tiempo y la densidad de corriente son los parámetros de trabajo que serán manipulados mientras los otros permanecerán constantes. Un modelo simplificado lineal derivado de la ley de electro-deposición de Faraday es desarrollado. Se presenta la variación del espesor de material depositado, micro-dureza y agrietamiento del depósito de cromo duro según la combinación de parámetros de tiempo y densidad de corriente empleados. El espesor del Cr depositado es medido gravimétricamente y microscópicamente. Los resultados obtenidos al combinar dichos parámetros muestran una estabilización de valores de dureza dentro del rango de 66 a 70 HRC. Esta investigación estudia y analiza las posibles causas que influyen la dureza relacionada al número de grietas superficiales, tiempo y densidad de corriente en el proceso de cromado duro.

**Palabras Clave.** Recubrimiento de Cromo Duro, ley de Faraday, microdureza, microgrietas, tiempo, densidad de corriente.



## Introducción

Durante las últimas décadas, los recubrimientos de cromo duro han sido empleados en grandes industrias a nivel mundial gracias a sus destacadas propiedades. Sus aplicaciones son diversas debido a los beneficios que este ofrece. Su principal ventaja es alta dureza superficial, variable entre 65 - 70 en escala Rockwell C [1]. La dureza es esencial para prolongar el tiempo de vida de las partes mecánicas móviles que se encuentran sometidas en un ambiente con constantes tensiones y altos esfuerzos. Por ello el recubrimiento es empleado por ejemplo en: anillos de pistón de motor, amortiguadores, ejes, barras hidráulicas, cilindros entre otros.

El recubrimiento de cromo duro consiste en el depósito electro químico de una capa de cromo sobre un material sustrato con propiedades ferromagnéticas. Las características de dicha capa depositada posee propiedades de alta dureza, anti-corrosiva y una apariencia brillante agradable a la vista. Las aplicaciones del cromado duro son extensas, según la Sociedad Americana de Metales (ASM por sus siglas en inglés) el cromo duro busca aumentar el tiempo de servicio de partes funcionales agregando un recubrimiento superficial con bajo coeficiente de fricción resistente al desgaste y adicionalmente, busca restaurar dimensiones de partes que fueron reducidas en tamaño por el deterioro con alta dureza como complemento [2]. Resistencia a la corrosión es la segunda característica importante que brinda el recubrimiento superficial de cromo duro. La resistencia a la corrosión es obtenida a partir el depósito ordenado de conjuntos de moléculas de cromo alineados de forma cristalina y que a su vez es depositada uniformemente. Sin embargo, estos conjuntos de moléculas son delimitados por grietas creadas por átomos de hidrógeno generados durante la electrolisis; se filtran en el material entre los enlaces químicos del depósito y conllevan a la creación de puentes falsos entre la unión de átomos de cromo, puntos de baja resistencia, y concentradores de esfuerzo propensos a fractura [3].

El éxito alcanzado en el proceso de electro-deposición de cromo duro sobre el material sustrato se dio gracias a la manipulación controlada de dos variables principales: corriente y tiempo. Se trabajó con una fuente de poder de alta precisión con una ondulación de voltaje continuo bajo el 5 % al trabajar con un amperaje fijo. La aplicación de energía eléctrica sobre el área de la pieza de ensayo produjo una densidad de corriente que se rige por la ley de Faraday y correlaciona la carga suministrada con la cantidad de masa depositada; mientras que el espesor del depósito varió de acuerdo al tiempo de encendido de la fuente conectada con la pieza dentro del baño electrolítico.

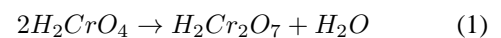
Dada la importancia del rol que juegan las variables de corriente y tiempo, el objetivo principal de esta investigación es desarrollar las relaciones proceso, microestructura, propiedades del cromado duro a escala de laboratorio para obtener una mejor estabilidad y control

sobre el proceso. Se tiene como meta evaluar los efectos de la corriente y tiempo de exposición en el proceso de cromado, caracterizar la microestructura basada en los posibles efectos del procesamiento mediante análisis del espesor, inspección metalográfica, densidad de grietas y evaluar la correlación teórica-experimental de los resultados de carga eléctrica, espesor del depósito y la eficiencia del cromado duro.

## Métodos

La energía eléctrica, base requerida para efectuar el proceso de cromo duro, fue utilizada primordialmente para la separación de los enlaces químicos de moléculas que componen el ácido crómico, obtener cromo y lograr el depósito sobre acero A36. La aplicación de energía dentro del baño electrolítico generó reacciones electroquímicas y calor. El cromo hexavalente, presente en el ácido crómico, separado del hidrogeno y del oxígeno debe ser reducido y adherido a la superficie a recubrir. Para lograr la reducción se requiere la presencia de gran cantidad de electrones, romper su previo enlace, reducir y adherir el cromo sobre la pieza a recubrir. Con el fin de explicar de mejor manera lo anteriormente mencionado se resuelve las ecuaciones de reducción.

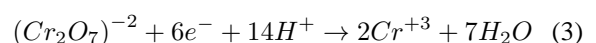
La fórmula molecular en estado estable del ácido crómico está dada por:

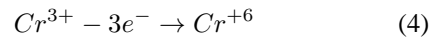


El primer término se refiere al ácido crómico en su estado estable mientras que el segundo y tercer término representa el mismo ácido expandido para una mejor explicación. Si se observa el segundo término y si a este se le introducen doce (12) electrones se logra romper el enlace de formulación estable y obtener cromo metal ( $Cr^0$ ) a partir de la reducción del cromo hexavalente ( $Cr^{6+}$ ). Cabe recalcar que esta reacción sucede sobre la superficie del sustrato que es cargada negativamente y el cromo es adherido a la misma. Se desarrolla lo anteriormente mencionado para una mejor visualización de lo ocurrido:



Sin embargo, no siempre se logra reducir instantáneamente el cromo hexavalente con doce electrones y causar su adhesión sobre la superficie del sustrato, sino que se reduce únicamente con tres (3) electrones y se presenta la formación del ion cromo trivalente ( $Cr^{3+}$ ); sólido que precipita que no se adhiere al material. A pesar de ello, si el cromo trivalente logra alcanzar el nodo positivo, transfiere nuevamente los electrones y conduce a la formación de cromo hexavalente tal como se muestra a continuación:





Ambos iones: cromo trivalente y hexavalente ( $Cr^{3+}$ ,  $Cr^{6+}$ ) son sumamente tóxicos y cancerígenos para la salud humana [4]. Por lo que siempre se sugiere una adecuada manipulación y buen manejo de las emisiones durante el procesamiento del cromado.

Es fundamental resaltar que al reducir el ácido crómico con doce (12) electrones, del segundo término de la ecuación (1), se desprenden dos iones de hidrogeno que en combinación a dos electrones genera gas hidrogeno. La reacción mencionada se resuelve a continuación:



La formación de átomos de hidrógeno durante la electro-deposición resulta peligroso debido a que dichos átomos se posicionan entre los enlaces químicos causando fragilización por hidrógeno. Esto hace que la unión de los átomos se debilite causando puntos de baja resistencia y concentradores de esfuerzo propensos a fractura [3]. Para prevenir que exista falla debido a fragilización por hidrógeno se recomienda primero, prevenir con inhibidores químicos la absorción de hidrógeno, segundo, se puede eliminar esfuerzos residuales antes de la electro-deposición, y tercero, se recomienda remover átomos de hidrógeno mediante tratamiento térmico luego del proceso de electro-deposición [5].

### Materiales y equipos

La selección del material base, la solución electrolítica de ácido crómico, ánodos y temperatura de la solución fueron constantes, mientras que la densidad de corriente y tiempo fueron variados controladamente. Los equipos de trabajo de laboratorio fueron: calentador y agitador magnético, fuente de potencial eléctrico, cables eléctricos y equipo de medición de dureza.

El material sustrato fue elaborado a partir de acero A36, probetas rectangulares de 35x20x3[mm]. Su dureza teórica es de 149 Brinell Hardness equivalente a 80 Rockwell B [6]. Se perforó un agujero en la parte superior de la probeta para sujeción.

La solución de ácido crómico es categorizada como baño de catalizadores mixtos, compuesta por ácido crómico y tres aditivos catalizadores especiales: CRA, CRB y CRC [7].

Se utilizó un calentador automático y agitador magnético de laboratorio marca Nuova para mantener la temperatura uniforme de la solución. Además, se empleó una fuente de poder marca Agilent para suministrar energía eléctrica. El diámetro de los cables se determinó a partir de la tabla de dimensionamiento de cables de American Wire Gauge (AWG por sus siglas en inglés) con un área

transversal de 2.61 [mm<sup>2</sup>] para el amperaje de siete (7) amperios.

Los micro-durómetros: marca Wilson Tukon y Buehler fueron empleados para realizar el análisis de micro-dureza superficial y transversal respectivamente. El micro-durómetro Wilson Tukon trabajó con punta de diamante tipo Knoop y 500g de carga. Mientras que el micro durómetro Buehler trabajó con punta de diamante piramidal Vickers y 300g de carga. El cálculo de micro-dureza Knoop fue realizado mediante la determinación de la longitud mayor de la indentación de la punta de diamante sobre el metal; mientras que el cálculo de micro dureza Vickers fue realizado mediante la suma de ambas diagonales y obtener el promedio de la incisión piramidal realizado sobre el recubrimiento de cromo. La fórmula para la obtención de la micro dureza para ambos casos se obtuvo a partir de la normativa ASTM E 384 "STANDARD TEST METHOD FOR MICRO-INDENTATION HARDNESS OF MATERIALS", aplicando el factor de corrección ocular propia del equipo [8].

### Desarrollo

Las probetas fueron preparadas y pulidas mecanográficamente con lijas de granulación 80, 180, 600, 1000, 1200 y 1500 por pulgada cuadrada según la numeración estándar de la American National Standard Institute (ANSI por sus siglas en inglés). Posteriormente, las probetas fueron desengrasadas y limpiadas superficialmente con la solución desengrasante comercial CT-10.

### Depósito de Cromo

El armado de conexiones para el proceso de cromado inició con la conexión de la probeta hacia la fuente eléctrica de manera catódica debido a que fue requerido electrones (carga negativa) sobre la superficie de la probeta. La temperatura de la solución se mantuvo constante a cincuenta y cinco grados centígrados (55°C) y se manipuló controladamente el tiempo (30, 60, 90 minutos) junto con la densidad de corriente (39, 48 y 57

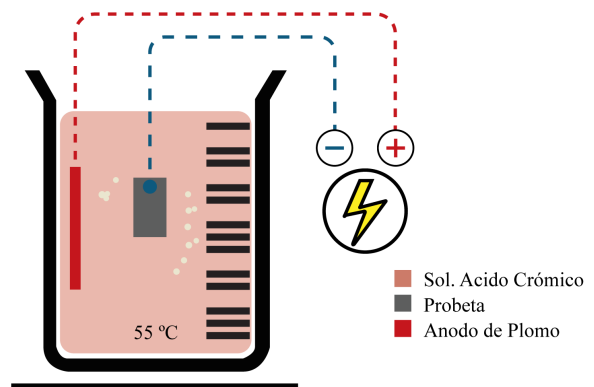


Figura 1: Conexiones y armado de equipo para baño electrolítico de Acido Crómico.

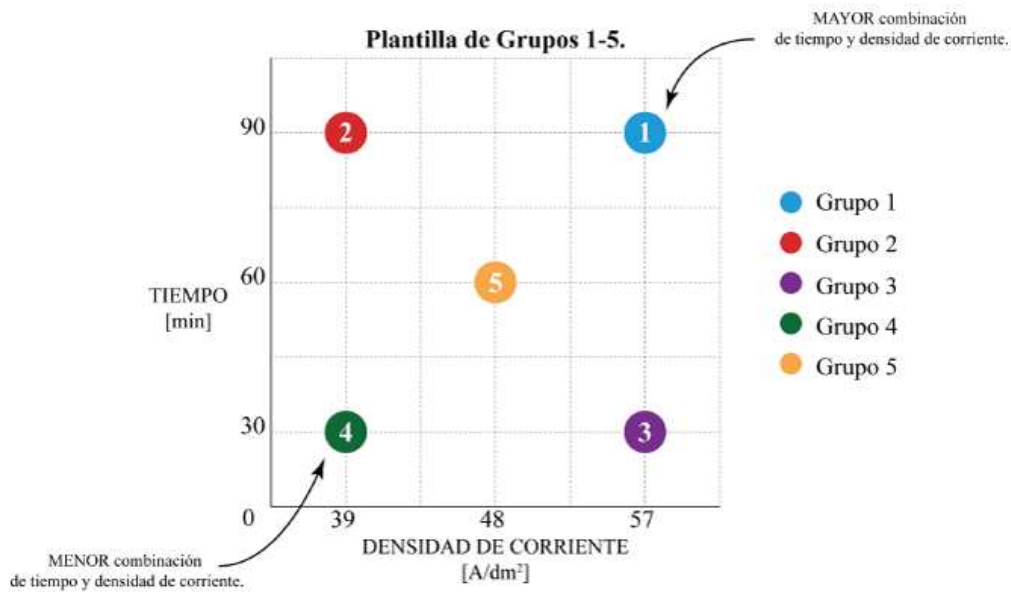


Figura 2: Diseño de experimentos, plantilla de condición central y condiciones-frontera. Combinaciones de tiempo y densidad de corriente acopladas en grupos 1-5.

A/dm<sup>2</sup>). La conexión realizada se muestra en la Figura 1.

Para una visión clara de los resultados al manipular los parámetros de tiempo y densidad de corriente se diseñó una matriz que limitó las condiciones de ensayo. Cinco (5) combinaciones de parámetros fueron creados a los cuales se los denominó grupos. Cada grupo fue conformado por tres (3) probetas ensayadas con los mismos parámetros. La matriz de combinación de parámetros se muestra en la Figura 2 y los parámetros utilizados para cada grupo se muestra en la Tabla 1.

Grupo N°.	Densidad de Corriente [Amp/dm <sup>2</sup> ]	Tiempo [min]
1	57	90
2	39	90
3	57	30
4	39	30
5	48	60

Tabla 1: Parámetros de caracterización, tiempo y densidad de corriente, para los grupos 1-5.

### Análisis metalográfico y de micro-dureza

Para hacer por un lado las mediciones de dureza eficientes y aprovechar por otro lado la determinación de grietas creadas según los diferentes parámetros, se requiere análisis destructivo y ataque químico de las probetas. Entonces, para el análisis metalográfico fue plasmado el mismo procedimiento de ensayo destructivo para cada grupo de probetas. El procedimiento de corte, desbaste y pulido probetas se realizó de acuerdo a la normativa ASTM E3-01 "GUIDE FOR PREPARATION OF METALLOGRAPHIC SPECIMENS" [9]. Se efectuó un corte transversal a tres (3) milímetros sobre la parte inferior de la probeta. Luego se utilizó un banco de pulido grueso para desbaste de probetas con lijas de

granulación ANSI: 600, 1000, 1200 y 1500. La probeta fue lijada según la Tabla 5 de la normativa ASTM E3-01 durante 45 segundos por cada numeración de tamaño de grano ANSI. Posteriormente se empleó el banco de pulido fino, con paño medio y pasta de diamante según especificado dentro de dicha norma.

Para la determinación de grietas y una mejor observación bajo el microscopio, las probetas ensayadas fueron atacadas químicamente con una solución de ácido nítrico con 95 % de pureza, y ácido clorhídrico con 37 % de pureza. El ataque químico se realizó durante 5 segundos bajo los parámetros de trabajo detallados en la norma ASTM E407 "PRACTICE FOR MICROETCHING METALS AND ALLOYS" [10].

### Resultados

A partir de los parámetros de tiempo y densidad de corriente combinados se presentan los resultados de la inspección visual, medición gravimétrica del depósito de cromo, comportamiento del depósito según la ley de Faraday junto con la eficiencia del proceso, análisis metalográfico que comprende de análisis de espesor, microdureza y agrietamiento del cromo depositado.

### Inspección Visual

El acabado superficial intervino significativamente en el depósito de cromo sobre las probetas de acero A36. Para demostrar este hecho la Figura 3 muestra las probetas No. 12 y No. 19. Lo particular de éstas es que se utilizó diferente grado de desbaste para el acabado superficial pero se empleó los mismos parámetros en ambas. La Figura 3 tiene una ampliación de 10x y degrada el color base para resaltar depósitos nodulares creados debido a la superficie rugosa.



Figura 3: Depósito nodular sobre las probetas #12 y #19. Se aplica degradado gráfico de color base (hacia abajo) para una mejor observación de la cantidad de depósitos nodulares sobre la superficie.

Se observa en la parte inferior de la Figura 3 que el degrade de color actúa completamente, el depósito nodular sobre la superficie de la probeta No. 12 es de fácil visualización y resultó 6.7 veces mayor (medido por análisis de imagen) que el depósito nodular de la probeta No. 19. Las esquinas y picos creados por la rugosidad del acabado superficial actuaron como concentradores de electrones que facilitaron la separación del enlace de cromo y se depositó el material más frecuentemente sobre estos puntos [2].

### Medición gravimétrica

El espesor de cromo duro depositado varió dependiendo del tiempo y de la densidad de corriente aplicada. El cálculo del espesor, en micras, se obtuvo a partir de la evaluación del volumen del depósito; aquel se determina con el peso de las probetas antes y después del proceso de cromado duro, restando el primer peso del segundo y dividiendo este resultado por la densidad del cromo junto al área superficial calculada, de la siguiente manera:

$$Espesor = \left( \frac{\Delta Masa}{area \cdot \rho Cr} \right) \quad (6)$$

A continuación se muestra en la Figura 4 el espesor alcanzado a partir de la evaluación del volumen de depósito para los grupos 1, 2, 3, 4 y 5.

La combinación de parámetros combinados reflejó un mayor volumen depositado para el grupo 1, con espesor

de 82.61 [ $\mu\text{m}$ ]. Esto se debe a que el grupo 1 fue sometido a la máxima densidad de corriente y al mayor tiempo empleado dentro de este experimento. Como se observa en la tabla 2, el grupo 1 está seguido del grupo 2, grupo 3 seguido del grupo 5, y finalmente el grupo 4. Es importante observar que el espesor del grupo 3 superó la mitad del espesor del espesor del grupo 2 en tan solo un tercio del tiempo empleado únicamente por una mayor densidad de corriente.

Grupo	Densidad de Corriente [ $\text{Amp}/\text{dm}^2$ ]	Tiempo [min]	Espesor [ $\mu\text{m}$ ]
1	57	90	82.6
2	39	90	56.8
3	57	30	28.9
4	39	30	15.9
5	48	60	43.1

Tabla 2: Espesor de Cr según los parámetros de caracterización, tiempo y densidad de corriente, para las probetas en grupos 1-5.

El incremento de la densidad de corriente aumenta el espesor del depósito de Cr en el mismo periodo de tiempo. Una mayor densidad de corriente logró depositar mayor espesor de cromo en menor tiempo [2]. Por lo tanto la velocidad del proceso de cromado aumenta al incrementar la densidad de corriente.

### Comportamiento del depósito según la ley de Faraday

Resulta evidente que la teoría de la electrodeposición se deriva a partir de la ley de Faraday. Dado que este es un proceso experimental, es posible determinar la eficiencia del proceso a partir de la ecuación de Faraday. Para ello, se determinó la carga suministrada de los grupos y se graficó de acuerdo a su espesor de cromo obtenido, así se obtuvo una regresión lineal tal como se muestra en la Figura 5.

A partir de la regresión lineal de la figura anterior se obtuvo la ecuación 7 que relaciona el espesor experimental obtenido con la densidad de carga. Cabe recalcar que el segundo término fue separado ya que si no existe densidad de carga no existe electro deposición.

$$E_{\text{exp}} = 2,60 \cdot 10^6 \times Q \quad (7)$$

Al resolver la ecuación de Faraday y reemplazar valores se obtuvo la siguiente ecuación:

$$E_{\text{teorico}} = 1,296 \cdot 10^7 \times Q \quad (8)$$

La división de estas dos ecuaciones, experimental para teórica determina la eficiencia del experimento bajo los parámetros establecidos de temperatura, ánodos, solución ácida y material base. La eficiencia calculada fue del 20 %. Según el manual de ASM, la eficiencia del

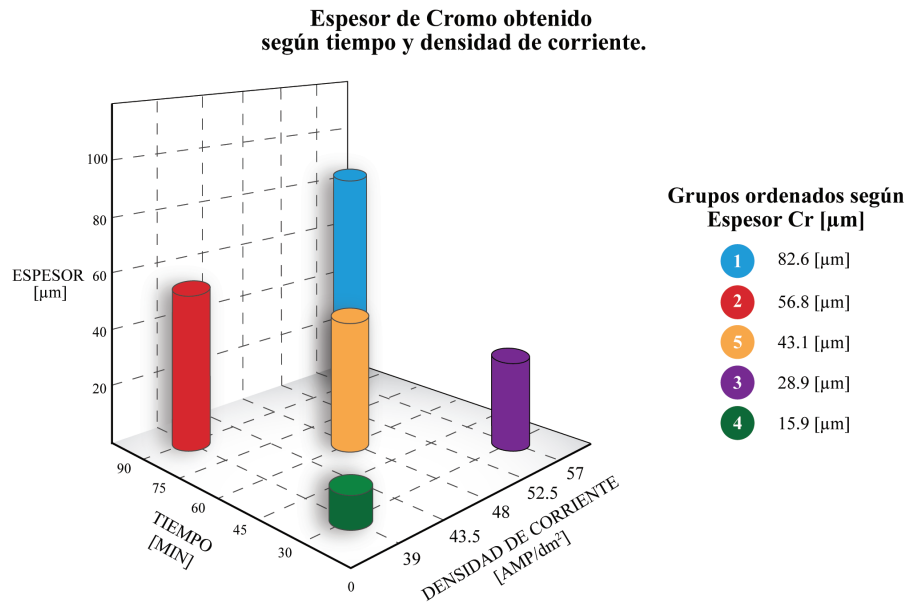


Figura 4: Esesor de Cr con distinta combinación de tiempo y densidad de corriente.

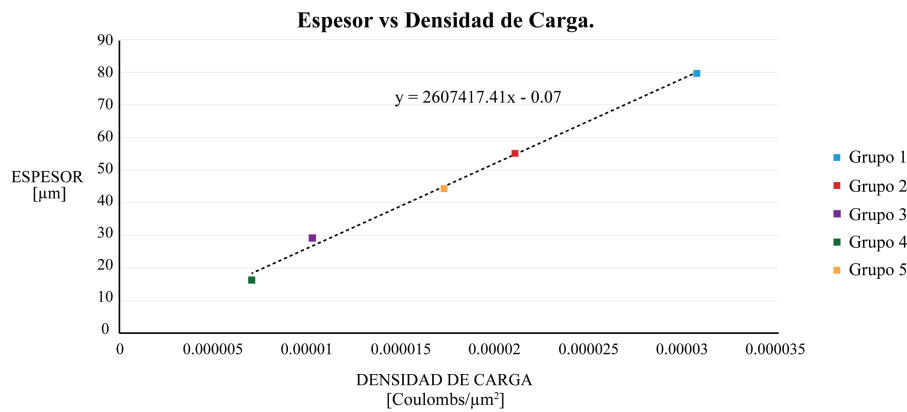


Figura 5: Esesor de Cr depositado vs densidad de carga / micrómetro cuadrado.

proceso de cromo duro varía dependiendo de la densidad de corriente y la temperatura de la solución. La eficiencia aumenta significativamente al aumentar la densidad de corriente [2]. La obtención del 20 % de eficiencia se encuentra dentro del rango obtenible ya que el proceso de cromado involucra otras reacciones químicas dentro del proceso de electrolisis [11].

**Análisis Metalográfico**

Análisis de esesor, micro dureza y agrietamiento del cromo depositado fueron los parámetros examinados dentro del análisis metalográfico.

**Análisis de esesor**

La determinación del esesor de material depositado se comprobó al usar microscopía óptica con magnificación de 200x. El esesor de Cr fue de apariencia brillante en relación al material base de acero A36. Al final de la electro deposición se obtiene el depósito de cromo sobre el material base de acero A36 como se muestra en

la Figura 6; la tabla 3 resume los resultados obtenidos y compara el esesor que fue obtenido mediante gravimetría.

Grupo	Densidad de Corriente [Amp/dm <sup>2</sup> ]	Tiempo [min]	Esesor medido por microscopía [μm]	Esesor medido por gravimetría [μm]
1	57	90	81.9	82.61
2	39	90	52.1	56.82
3	57	30	27.0	28.89
4	39	30	14.4	15.93
5	48	60	41.3	43.12

Tabla 3: Esesor de Cr medidos por microscopía y gravimetría para las probetas que representan los grupos 1-5.

La medición del esesor de cromo fue realizado en el centro de cada probeta. Las mediciones efectuadas fueron representadas en la tabla 3. Dichas, presentaron ciertas diferencias en relación a la tabla 2 (esepesores obtenidos mediante gravimetría). La diferencia que se obtuvo fue mínima, sin embargo esto se debió a que existe una mayor cantidad de cromo depositado en las esquinas de



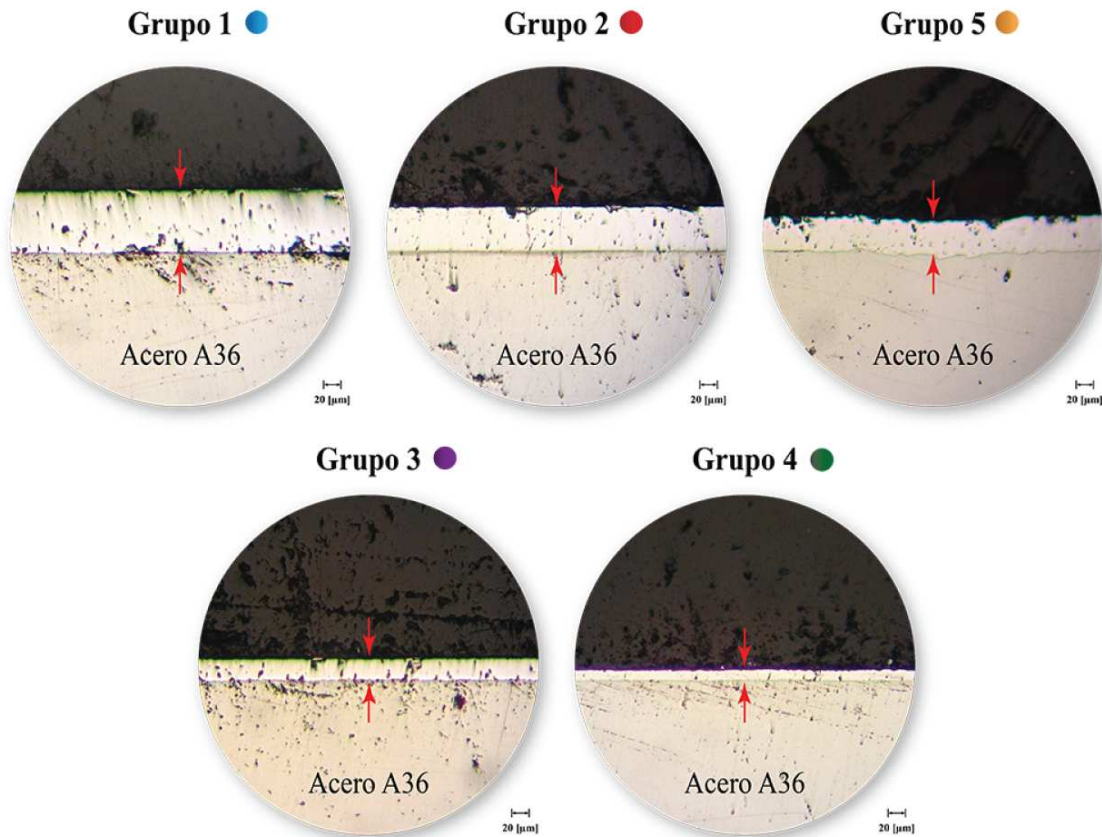


Figura 6: Sección Transversal del Cr depositado sobre material base acero AISI A36. Los grupos son alineados según la cantidad de cromo depositado para una mejor visualización. Las flechas rojas indican el espesor de cromo sobre acero A36.

la probeta ya que éstas actuaron como puntos concentradores de carga eléctrica durante el proceso de electrolisis. Se comprueba este hecho al haber examinado las esquinas de la probeta con el soporte del manual de la ASM que menciona que las esquinas y los picos existentes en el material base actúan como concentradores de carga eléctrica depositando mayor cantidad de material sobre dichos puntos [2].

#### Análisis de micro-dureza

El ensayo de micro-dureza se efectuó sobre cada grupo. La indentación se realizó sobre la superficie de cada probeta en la parte central de la misma. El resultado se obtuvo a partir de la medición de la longitud mayor de la indentación sobre la superficie del recubrimiento de cromo. Como muestra de lo mencionado, se observa en la Figura 7 la penetración de la punta Knoop sobre el recubrimiento de cromo.

La tabla 4 muestra los resultados que fueron obtenidos de la medición de dureza para cada uno de los grupos, los valores de dureza se representan en escala Knoop y Rockwell C.

El espesor depositado sobre los grupos dependió de la combinación de parámetros de densidad de corriente y tiempo aplicado. Los resultados de micro-dureza presentaron una alta dureza para el grupo 1; posteriormente

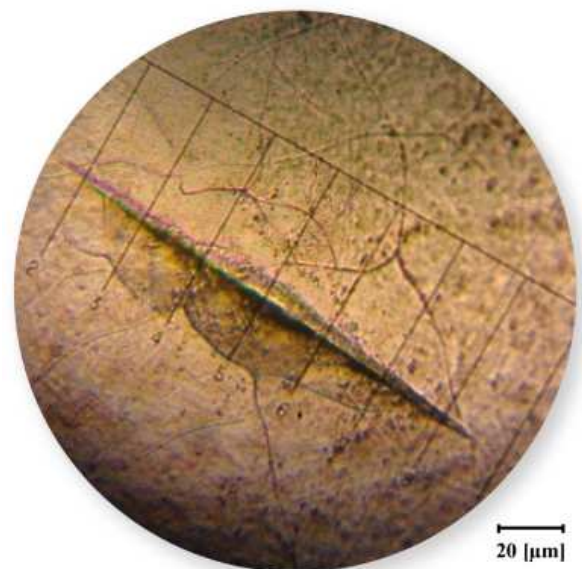


Figura 7: Indentación sobre la probeta representante al grupo 4 con una ampliación de 400x. Dureza Knoop 256 KHN.

para el grupo 2, grupo 3, grupo 5 y finalmente el grupo 4.

La micro dureza obtenida en el grupo 4 fue de 21 HRC, este valor es apartado del rango de micro-durezas del cromo (60 - 70 HRC). La baja densidad de corriente y

Grupo	Longitud indentación [ $\mu\text{m}$ ]	Knoop Hardness	Rockwell C Hardness
1	85.2	981.0	70.2
2	88.6	924.7	68.2
3	92.4	833.3	66.0
4	166.5	256.7	21.0
5	90.5	868.0	65.9

**Tabla 4:** Dureza Knoop y su equivalencia en escala Rockwell C presente en grupos 1-5.

el corto período de tiempo implicó la formación de una delgada capa de cromo sobre el material sustrato, lo cual al momento de la indentación, la punta sensibilizó el material sustrato y contrastó una baja medición [8].

En complementación de este análisis y observar una posible tendencia de variación de dureza según la densidad de corriente aplicada y tiempo suministrado, se realizó mediciones de micro dureza en la sección transversal del recubrimiento de cromo, la tabla 5 muestra los resultados obtenidos.

Grupo	Longitud indentación [ $\mu\text{m}$ ]	Dureza Vickers	Dureza Rockwell C
1	22.4	1112.2	72.3
2	24.5	926.6	67.7
3	23.9	971.4	68.8
5	24.8	904.8	67.1

**Tabla 5:** Dureza transversal en Vickers y Rockwell C presente en grupos 1, 2, 3 y 5.

Se determinó mediante los resultados que el grupo 1 presenta mayor dureza, luego se encuentra el grupo 3, el grupo 2 y finalmente el grupo 5. No se obtuvo un resultado para el grupo 4 debido a que el espesor de cromo depositado sobre la probeta es: 14.47 micrómetros, demasiado delgado para la punta del indentador Vickers. Los resultados anteriores muestran que la dureza disminuye a medida que la densidad de corriente cae. Es decir, para los grupos 1 y 3 se empleó una densidad de corriente equivalente a 57 [A/dm<sup>2</sup>], mientras que el grupo 2, 39 [A/dm<sup>2</sup>] y para el grupo 5, 48 [A/dm<sup>2</sup>].

Las mediciones de micro-dureza que fueron realizadas en sentido superficial y transversal, presentaron variaciones de orden mínimo entre grupos. Se destaca que estadísticamente los valores individuales de cada medida son válidos. Las mediciones realizadas de forma transversal mostraron un ligero aumento respecto a las mediciones realizadas de forma superficial. La variación entre los valores correspondió a la presencia de grietas en la superficie del depósito orientadas en sentido de aplicación de la carga. Se comprueba posibles tendencias de densidad de grietas por área cuadrada según la variación de parámetros que influyeron sobre cada grupo. Este estudio es descrito en la siguiente sección "Agrietamiento del cromo depositado".

## Agrietamiento del cromo depositado

El proceso de combinación de tiempo y densidad de corriente afectó el depósito del cromo sobre la superficie del acero A36. La formación de grietas sucedió durante el proceso de cromado al momento en el que la tensión interna fue mayor que la resistencia a la fractura del cromo. La tensión interna aumentó debido a la filtración de átomos de hidrógeno entre átomos de cromo; los átomos de hidrógeno tienden a alinearse con otros átomos de hidrógeno y al momento en el que se difunden crean tensiones internas entre los átomos de cromo, hasta que la sumatoria de varias tensiones superan la resistencia a la tracción de cromo y este cede produciendo grietas aliviando tensiones [11].

Se realizó el siguiente análisis donde la superficie de las probetas es ampliada a 230x y 400x para observar la cantidad de grietas presentes según los parámetros empleados sobre cada grupo. Dichos conjuntos de moléculas de cromo depositados en forma cristalina delimitados por grietas son denominados clústeres. Se contabilizó el número de clústeres presentes dentro de un círculo de 200 micrones de diámetro. Fueron señalados, con color verde, los clústeres que se encuentran dentro del círculo y, con color morado los que se encuentran en la frontera del círculo. La Figura 8 presenta dichos clústeres para cada grupo mientras que el resultado de esta contabilización fue almacenado en la tabla 6.

Grupo	Número de clústeres dentro del círculo	Número de clústeres en frontera del círculo	Cantidad de clúster por [mm <sup>2</sup> ]
1	6	14	413.8
2	10	14	541.1
3	16	18	795.8
4	27	20	1177.8
5	18	17	843.5

**Tabla 6:** Cantidad de clústeres medidos ópticamente para las probetas que representan los grupos 1-5.

La menor cantidad de grietas se encuentra presente en el grupo 1, luego el grupo 2, grupo 3, grupo 5 y finalmente el grupo 4. El orden de dureza que ha sido obtenida para cada grupo según la tabla 4, es inversamente proporcional a la cantidad de grietas existentes en la probeta. Las mediciones realizadas de dureza sobre las probetas de manera superficial (indentación perpendicular a la superficie), refleja una menor cantidad de grietas sobre la superficie y una alta densidad de corriente empleada [2]. Una tendencia similar se observa para las mediciones de micro dureza que fueron realizadas transversalmente, sin embargo la densidad de corriente y el tiempo son las únicas variables de incidencia ya que las grietas únicamente alteran la medición para la medición superficial. Según los resultados que fueron obtenidos de este estudio, la cantidad de grietas disminuye según aumenta la densidad de corriente en combinación con el tiempo, la Figura 9 grafica claramente este hecho.

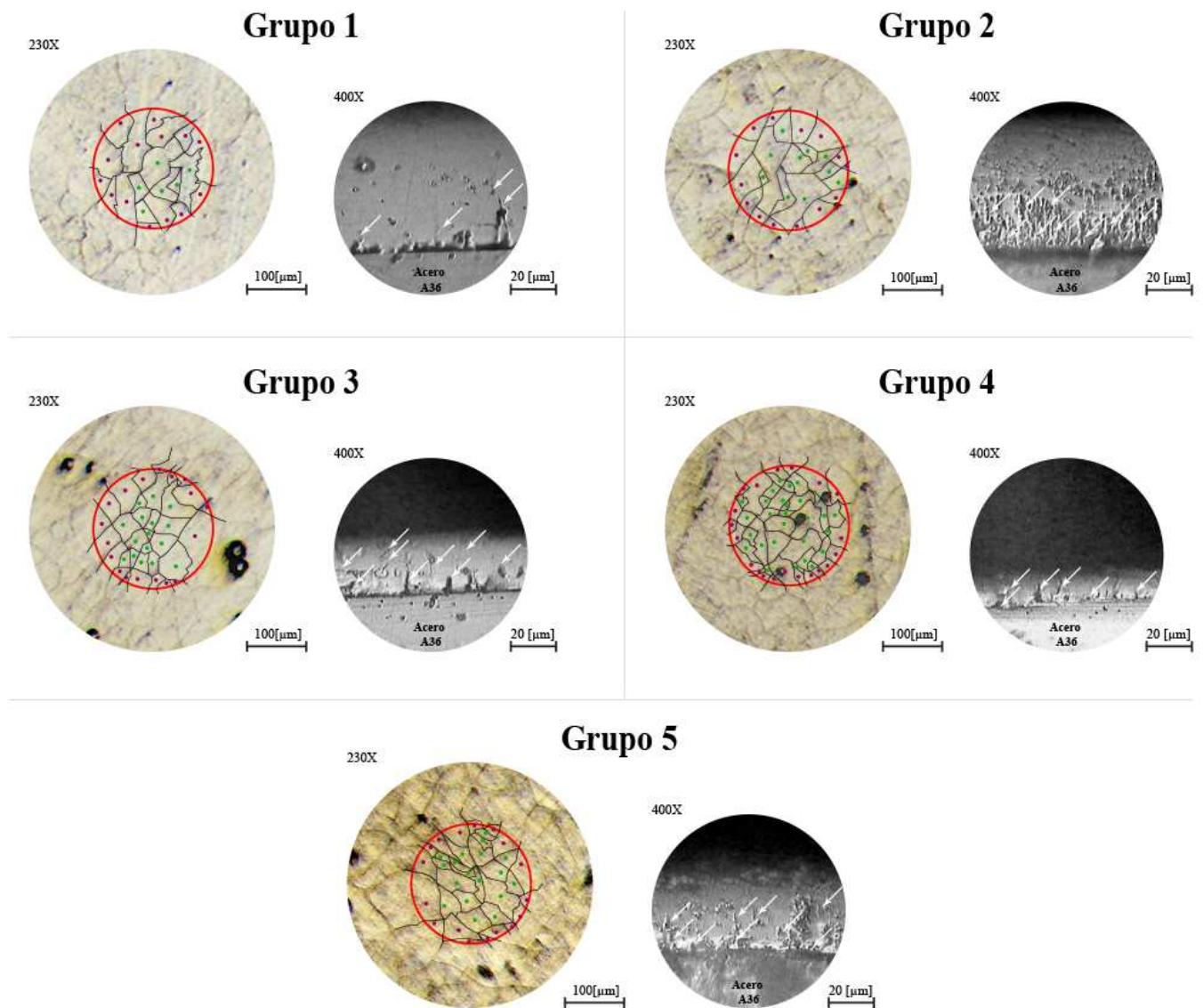


Figura 8: Grietas laterales y clústeres de Cr enmarcados para las probetas pertenecientes a los grupos 1-5.

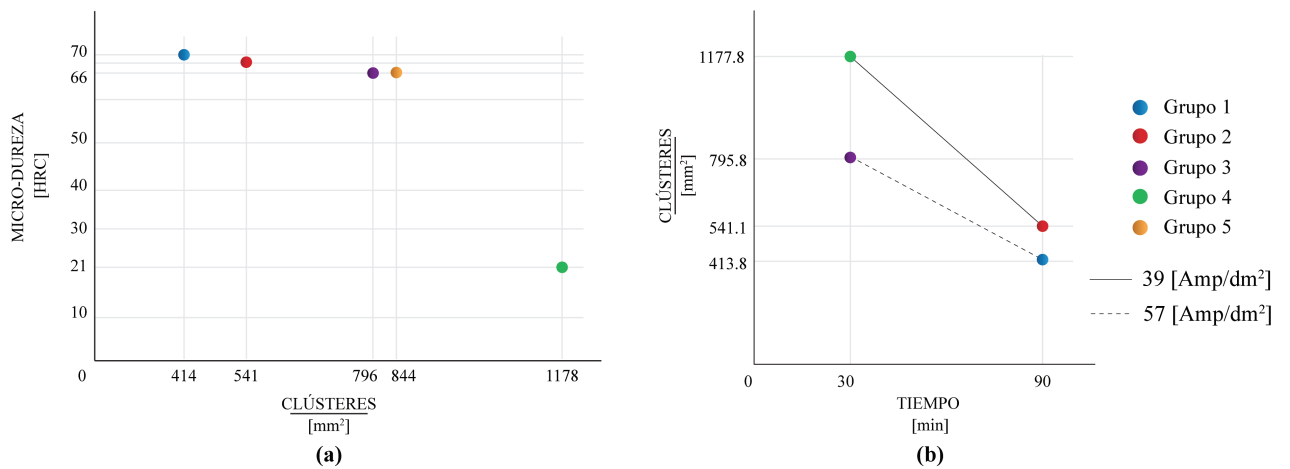


Figura 9: (a) Micro-dureza superficial (indentación perpendicular a la superficie) vs Cantidad de Clústeres superficiales. (b) Cantidad de Clústeres superficiales vs tiempo suministrado a diferentes densidades de corriente.

Al emplear una menor densidad de corriente, se presentó una mayor cantidad de grietas y, como consecuencia una menor micro-dureza superficial. Sin embargo, la aplicación de una mayor cantidad de tiempo, afectó en la reducción del número de grietas superficiales, ya que al emplear una misma densidad de corriente durante un período de tiempo prolongado, la cantidad de grietas se vio reducida. Debido a ello se toma a consideración que la exposición prolongada de tiempo dentro del baño electrolítico depositó una fase de cromo más uniforme que la anterior, con ello las grietas anteriores son cubiertas y el número de las mismas fueron reducidas en cuanto se aproxima a la superficie del depósito de cromo.

En la Figura 8, se muestra con una magnificación de 400X, las secciones transversales de las probetas, clasificadas según sus agrupaciones. Se observa que el grupo 1 y el grupo 3 fueron conectados con la misma densidad de corriente, pero a medida que la cantidad de depósito de Cr aumenta, el número de grietas disminuye.

La Figura 9(b) muestra la comparación entre el tiempo suministrado y la reducción de clústeres superficiales según se incrementa el tiempo para las densidades de corriente equivalentes a: 39 y 57 [Amp/dm<sup>2</sup>]. El tiempo, representó un cambio significativo en cuanto a la obtención de clústeres superficiales en ambas comparaciones. En ambos casos, la cantidad de clústeres obtenida es reducida casi por la mitad al triplicar el período de tiempo de electro-deposición. Es importante mencionar que a una menor cantidad de grietas la micro-dureza superficial aumenta. Por tanto, la relación que existe entre tiempo y micro-dureza superficial se debe a la cantidad de clústeres formados y existe menor cantidad de clústeres mientras mayor sea la densidad de corriente empleada. Entonces, se verificó con la Figura 9(a) que la dureza superficial del depósito de cromo aumentó a medida que la densidad de corriente y el tiempo se incrementaron. La dureza transversal no es considerada debido a que la orientación de las grietas y la magnitud de la carga no presentaron necesariamente una relación entre el campo de deformación y las grietas.

### Conclusiones

En el presente artículo se describe los pasos preliminares del proceso de cromo duro para 5 condiciones de combinación de parámetros de densidad de corriente y tiempo. Se obtuvo 4 mediciones de micro-dureza dentro del rango 65 - 70 Hard Rockwell C previsto; estos fueron los grupos 1, 2, 3 y 5. La medición de micro-dureza del grupo 4 es de 21 HRC, medición apartada del rango de micro-durezas. Los factores que influyeron en la obtención de este resultado fueron la baja densidad de corriente empleada y el corto período de tiempo suministrado concibiendo como resultado la formación de una delgada capa de cromo depositada sobre el material sustrato. Se logró además encontrar la eficiencia

experimental y la ecuación empírica de depósito de masa según la carga aplicada a partir de la ley de electro-deposición de Faraday para los parámetros de trabajo local.

La eficiencia encontrada muestra la versatilidad que ofrece este procedimiento al combinar el tiempo y densidad de corriente. Sin embargo, los resultados obtenidos mostraron un mejor desempeño al momento de utilizar altas densidades de corriente durante períodos prolongados de tiempo. Al utilizar alta densidad de corriente y mayor tiempo, la cantidad de grietas superficiales fue reducida, al reducir la cantidad de grietas se presentó un incremento de dureza superficial del recubrimiento de cromo. Las mediciones de micro-dureza transversal presentaron una tendencia similar al emplear una elevada densidad de corriente, a medida que se incrementó la densidad de corriente la dureza transversal paralela a la superficie incrementó.

### Agradecimientos

Los autores agradecen a Cesar Zambrano, director del colegio de ciencias e ingeniería de la Universidad San Francisco de Quito por su apoyo desinteresado durante esta investigación. Se agradece a los miembros del laboratorio de la Escuela Politécnica del Ejército por su soporte en implementos de laboratorio. El presente estudio tiene la base y el soporte en la Universidad San Francisco de Quito a través de sus fondos de financiamiento del Chancellor Grant-USFQ 2013, utilizado para esta investigación.

### Referencias

- [1] Kostylev, A.; Pokrovsky, Y.; Lumpov, A. 2012. "Advanced Chromium Carbide Coatings on Piston Rings by CVD: A Highly Adaptable new method with relatively low cost". Cengage Learning: 2-26.
- [2] American Society for Metals. 1994. "Handbook of Surface Engineering". ASM International.
- [3] Birnbaum, H. K. 1986. "Hydrogen Embrittlement". Pergamon Press.
- [4] U.S. Environmental Protection Agency. 1998. "Toxicological Review of Hexavalent Chromium". Washington, DC., United States: National Center for Environmental Assessment, Office of Research and Development.
- [5] Jewett, R. P.; Walter, R. J.; Chandler, W. T.; Frohberg, R. P. 1973. "Hydrogen environment embrittlement of metals". Canoga Park, CA: NASA United States.
- [6] Ellor, J.; Young, W. 2004. "Thermally Sprayed Metal Coatings to Protect Steel Pilings: Final Report and Guide". Washington DC: Transportation Research Board (528).
- [7] Industria Metalquímica Galvano. 2011. "Boletín técnico Sistema de Cromo Di-Co". Quito: 1-2.

- [8] American Society for Testing and Materials. 2005. "Guide for Preparation of Metallographic Specimens" ASTM E3-01: 1-12.
- [9] American Society for Testing and Materials. 2005. "Practice for Microetching Metals and Alloys". ASTM E407: 1-21.
- [10] Such, T. E.; Dennis, J. K. 1993. "Nickel and Chromium Plating", Third Edition ed. Ohio, United States: Woodhead Publishing Ltd & ASM International.
- [11] American Society for Testing and Materials. 2005. "Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials". ASTM E384: 1-24.



## Factor de emisión de CO<sub>2</sub> debido a la generación de electricidad en el Ecuador durante el periodo 2001 - 2014

René Parra<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Universidad San Francisco de Quito, Colegio de Ciencias e Ingeniería. Instituto de Investigaciones Atmosféricas. Pampite y Diego de Robles, Campus Cumbayá, Quito, Ecuador.

\*Autor principal/Corresponding author, e-mail: rrparr@usfq.edu.ec

Editado por/Edited by: Cesar Zambrano, Ph.D.

Recibido/Received: 2015/08/25. Aceptado/Accepted: 2015/08/27.

Publicado en línea/Published on Web: 2015/12/30. Impreso/Printed: 2015/12/30.

### CO<sub>2</sub> emission factor for electricity generation in Ecuador during the period 2001 - 2014

#### Abstract

Electricity is a key energetic component to socio-economic development. Its production is based on the consumption of non-renewable resources (fossil fuels), renewable sources and nuclear energy. The generation by fossil fuels produces the emission of air pollutants and greenhouse gases, whose magnitude directly depends on the configuration of the matrix or mix of power generation from a country or region. Globally the percentage of CO<sub>2</sub> emissions attributed to electricity and heat generation reaches 41 %. The CO<sub>2</sub> emission factors for electricity generation in Ecuador were estimated for the period 2001-2014. The results vary between 241.0 and 397.5 g CO<sub>2</sub> kWh<sup>-1</sup>. The highest value corresponds to 2010, the year with the highest participation of non-renewable resources (52.2 %). The lower value corresponds to 2003, year with lowest participation of non-renewable resources (34.5 %). The most recent value, for the year 2014, is 342.6 g CO<sub>2</sub> kWh<sup>-1</sup>. This emission factor serves to establish indicators of sustainability, as the carbon or the ecological footprint. It is a basic parameter in energy planning and in estimation of greenhouse gases emissions.

**Keywords.** ecological footprint, carbon footprint, mix of generation, sustainability, energy performance.

#### Resumen

La electricidad constituye un elemento energético clave para el desarrollo socioeconómico. Su producción se basa en el consumo de recursos no renovables (combustibles fósiles) y el uso de fuentes renovables y energía nuclear. La generación mediante combustibles fósiles produce la emisión de contaminantes del aire y de gases de efecto invernadero, cuya magnitud depende directamente de la configuración de la matriz o mix de generación eléctrica de un país o región. A nivel mundial, el porcentaje de las emisiones de CO<sub>2</sub> que se atribuye a la electricidad y la generación de calor alcanza el 41 %. Se estimaron los factores de emisión de CO<sub>2</sub> por generación eléctrica en el Ecuador durante el periodo 2001 - 2014. Los resultados varían entre 241.0 y 397.5 g CO<sub>2</sub> kWh<sup>-1</sup>. El mayor valor corresponde al 2010, año con la mayor participación de fuentes no renovables (52.2 %). El menor valor corresponde al 2003, año con la menor participación de fuentes no renovables (34.5 %). El valor más reciente, para el año 2014, es 342.6 g CO<sub>2</sub> kWh<sup>-1</sup>. Este factor de emisión sirve para establecer indicadores de sustentabilidad, como la huella de carbono o la huella ecológica. Es un parámetro básico en la planificación energética y en la estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero.

**Palabras Clave.** huella ecológica, huella de carbono, mix de generación, sustentabilidad, rendimiento energético.

#### Introducción

La electricidad constituye un elemento energético clave para el desarrollo socioeconómico. Durante el año 2014 en el Ecuador se generaron 24 307.2 GWh de electricidad y se importaron 836.7 GWh; totalizando 25 143.9 GWh. De este valor, el 85.5 % se destinó al consumo

público; y el restante 14.5 % para procesos productivos y de explotación [1].

La electricidad se genera en parte por la combustión de recursos no renovables, como los combustibles fósiles (carbón, diesel, bunker, gasolina, gas natural, gas licuado de petróleo, otros); que se utilizan típicamen-

ISSN 1390-5384



te en calderos, turbinas o motores de combustión interna. Los rendimientos energéticos (electricidad producida/calor liberado de combustión) con tecnologías convencionales son bajos, y suelen variar entre 0.3 y 0.35. Nuevas tecnologías, como la cogeneración (generación de electricidad y aprovechamiento del calor de los gases de combustión) o de ciclo combinado (generación de electricidad y aprovechamiento del calor de los gases de combustión para generar una cantidad adicional de electricidad) presentan mejores rendimientos, con valores entre 0.4 y 0.55. El uso de combustibles fósiles para la generación de electricidad, implica la emisión de contaminantes del aire y de Gases de Efecto Invernadero (GEI). En la generación de una cantidad específica de electricidad, y por sus bajos rendimientos, las tecnologías convencionales generan mayores emisiones en comparación con las nuevas tecnologías.

A nivel mundial, la generación eléctrica es responsable de un porcentaje importante de las emisiones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), uno de los principales GEI. En el año 2008 se generaron 19.1 PWh de electricidad, de los cuales el 67.2 % fue producido mediante combustibles líquidos, gas natural y carbón; el 19.3 % fue generado con fuentes renovables, y el 13.5 % en centrales nucleares. Para el año 2035 se proyecta que la participación de combustibles líquidos, gas natural y carbón sea del 60.2 % [2]. Para el año 2010, se estimó la emisión mundial de  $\text{CO}_2$  en 30.3 Gt; de las cuales, el 41 % corresponde a la generación eléctrica y de calor [3]. Por otra parte, las fuentes renovables (como las hidroeléctricas, biomasa, parques eólicos y fotovoltaicos) y de energía nuclear, generan electricidad con una emisión mínima o nula de GEI, aunque presentan otros impactos o riesgos ambientales.

Se conoce como matriz o mix de generación, a la infraestructura de un país o región para la producción eléctrica. Según el caso el mix presenta porcentajes variados de participación de fuentes renovables y no renovables, y por ello define el nivel de emisiones de contaminantes del aire y de GEI. Cuando existe una participación importante de infraestructuras que consumen combustibles fósiles, las emisiones son también importantes.

Como paso previo al control de las emisiones de GEI asociadas al consumo eléctrico, tanto a nivel nacional, local, institucional o personal inclusive, se requiere cuantificar previamente el factor de emisión eléctrico, que corresponde a cantidad de  $\text{CO}_2$  que se emite a la atmósfera, por cada unidad de electricidad generada. Este artículo presenta la estimación del factor de emisión de  $\text{CO}_2$ , debido a la generación eléctrica en el Ecuador, durante el periodo 2001 - 2014.

### Método

Se recopiló información del Consejo Nacional de Electrificación (CONELEC) y de la Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL), en relación al

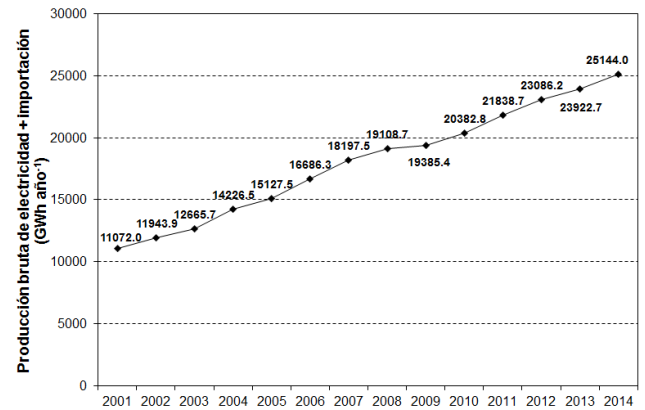


Figura 1: Producción bruta de electricidad en el Ecuador más energía importada ( $\text{GWh año}^{-1}$ ) durante el periodo 2001 - 2014 [1, 4, 5].

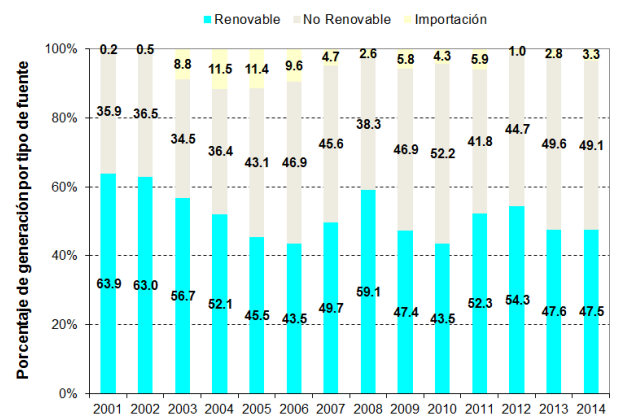


Figura 2: Composición en porcentaje de la generación de electricidad en el Ecuador durante el periodo 2001 - 2014 por tipo de fuente [1, 4, 5, 9-17].

consumo de combustibles para producción bruta de electricidad en el periodo 2001 - 2014 (Tabla 1). La producción bruta corresponde a la cantidad de electricidad generada mediante la infraestructura existente en el país, destinada tanto para servicio público y no público. Para los combustibles de la Tabla 1, se recopiló información del poder calorífico, el factor de emisión de  $\text{CO}_2$  y la densidad (Tabla 2).

Adicionalmente se recopiló la información sobre la producción bruta de electricidad y de la cantidad de energía importada (Figura 1), y de la composición en porcentaje por tipo de fuente (Figura 2). Las fuentes se agrupan en renovables (hidráulica principalmente; en menor grado, térmicas que usan bagazo de caña de azúcar; y eólica - fotovoltaica con participaciones marginales), no renovables (aprovechamiento energético de los combustibles fósiles en térmicas que funcionan con motores de combustión interna, turbinas de gas y turbinas de vapor) y las importaciones internacionales.

Combustible	Unidad (millones)	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Fuel oil	Galones	184.3	190.1	180.1	169.4	201.3	210.6	220.9	191.9	225.0	235.4	265.9	312.7	343.5	368.8
Diesel 2	Galones	88.5	78.7	55.1	91.8	120.6	172.0	166.8	124.6	207.8	315.2	172.3	139.2	176.9	185.6
Nafta	Galones	9.8	7.1	2.3	5.8	26.5	34.4	4.0	7.9	10.0	14.6	14.7	0.1	2.7	0.0
Gas natural	Miles de pies cúbicos		5.1	8.9	11.3	13.2	15.7	18.4	16.1	19.3	20.0	17.7	23.2	25.9	26.7
Residuo	Galones					10.7	15.7	29.4	30.8	39.0	38.4	34.1	32.9	32.1	36.2
Crudo	Galones				3.7	15.1	22.5	50.9	55.0	57.0	60.5	62.8	67.2	75.6	77.1
Gas licuado de petróleo	Galones						7.6	8.3	8.6	7.6	7.8	7.1	6.3	5.9	6.3
Bagazo de caña	Toneladas	184.3	190.1	180.1	169.4	201.3	210.6	220.9	191.9	225.0	235.4	265.9	312.7	343.5	368.8

Nota: La referencia [1] actualiza algunos datos estadísticos de los años 2005, 2006, 2007, 2008 y 2011.

Tabla 1: Consumo de combustibles para la producción bruta de electricidad en el Ecuador, durante el periodo 2001 - 2014.

Combustible	Poder calorífico			Factor de emisión de CO <sub>2</sub>			Densidad			Observaciones
	Valor	Unidad	Fuente	Valor	Unidad	Fuente	Valor	Unidad	Fuente	
Fuel oil	40.4	TJ Gg <sup>-1</sup>	[6]	77 400	kg TJ <sup>-1</sup>	[4]	944	kg m <sup>-3</sup>	[7]	Se asume la densidad de la gasolina
Diesel 2	43	TJ Gg <sup>-1</sup>	[6]	74 100	kg TJ <sup>-1</sup>	[4]	845	kg m <sup>-3</sup>	[7]	
Nafta	44.5	TJ Gg <sup>-1</sup>	[6]	73 300	kg TJ <sup>-1</sup>	[4]	739	kg m <sup>-3</sup>	[7]	
Gas natural	48	TJ Gg <sup>-1</sup>	[6]	56 100	kg TJ <sup>-1</sup>	[4]	0.042	Lb pie <sup>-3</sup>	[7]	
Residuo	40.4	TJ Gg <sup>-1</sup>	[6]	77 400	kg TJ <sup>-1</sup>	[4]	944	kg m <sup>-3</sup>	[7]	
Crudo	42.3	TJ Gg <sup>-1</sup>	[6]	73 300	kg TJ <sup>-1</sup>	[4]	874	kg m <sup>-3</sup>	[7]	
Gas licuado de petróleo	47.3	TJ Gg <sup>-1</sup>	[6]	63 100	kg TJ <sup>-1</sup>	[4]	528.6	kg m <sup>-3</sup>	[7]	
Bagazo de caña	2220	kcal kg <sup>-1</sup>	[8]	780	kg Mg <sup>-1</sup>	[6]				

Tabla 2: Propiedades de los combustibles utilizados para la producción bruta de electricidad en el Ecuador, durante el periodo 2001 - 2014.

Combustible	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Fuel oil	2059.3	2124.3	2012.3	1892.7	2249.0	2353.1	2467.5	2144.1	2514.0	2630.3	2970.8	3493.4	3838.0	4120.3
Diesel 2	901.5	801.5	561.5	935.3	1229.4	1753.0	1699.7	1270.1	2117.7	3212.1	1755.6	1418.2	1802.3	1891.0
Nafta	89.5	65.1	20.8	52.7	241.8	314.2	36.5	72.4	90.8	133.6	134.2	0.8	24.7	0.0
Gas natural	0.0	262.2	457.7	580.9	674.8	806.7	942.7	825.1	990.4	1028.3	908.8	1192.0	1327.5	1367.5
Residuo	0.0	0.0	0.0	0.0	119.1	175.0	328.8	343.6	435.2	429.4	381.3	367.0	358.8	404.9
Crudo	0.0	0.0	0.0	37.7	154.5	231.2	522.0	564.0	585.1	620.9	644.2	688.9	775.5	790.7
Gas licuado de petróleo	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	45.3	49.4	51.2	45.3	46.3	42.2	37.6	35.0	37.9
Bagazo de caña	0.0	0.0	0.0	0.0	1599.0	1037.4	1513.2	1021.8	670.8	709.8	826.8	873.6	850.2	1037.4
Emissiones totales netas	3050.2	3253.1	3052.4	3499.3	4668.5	5678.5	6046.6	5270.5	6778.3	8100.9	6837.2	7197.9	8161.8	8612.3

Tabla 3: Emisiones de CO<sub>2</sub> (kt año<sup>-1</sup>) debido a la generación bruta de electricidad en el Ecuador durante el periodo 2001 - 2014.

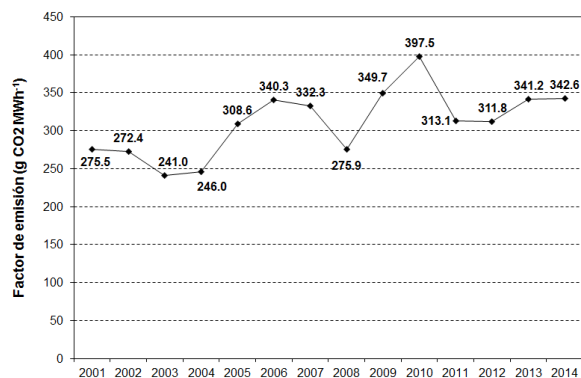


Figura 3: Factor de emisión de CO<sub>2</sub> (g kWh<sup>-1</sup>) para la generación de electricidad en el Ecuador durante el periodo 2001 - 2014.

### Resultados y Discusión

Con los datos de las Tablas 1 y 2, se calculan las emisiones de CO<sub>2</sub> debido a la generación bruta de electricidad (Tabla 3). Las emisiones totales netas no incluyen los valores de la caña de azúcar, considerando que al ser biomasa, su combustión no genera emisiones netas de CO<sub>2</sub>.

El factor de emisión de CO<sub>2</sub> por cada unidad de electricidad disponible para consumo se establece dividiendo las emisiones totales netas de la Tabla 3, para los valores de producción bruta de electricidad más energía importada de la Figura 2. Los resultados se indican en la Figura 3. Los resultados indican que las emisiones anuales de CO<sub>2</sub> debido a la generación bruta de electricidad en el Ecuador, en el periodo 2001 - 2014, variaron entre 3050.2 y 8612.3 Gt CO<sub>2</sub> año<sup>-1</sup>.

El factor de emisión de CO<sub>2</sub> por cada unidad de electricidad disponible para consumo, varió entre 241.0 y 397.5 g CO<sub>2</sub> kWh<sup>-1</sup>. El mayor valor del factor de emisión corresponde al año 2010, año con el mayor porcentaje de participación de fuentes no renovables (52.2 %). El menor valor (241.0 g CO<sub>2</sub> kWh<sup>-1</sup>) corresponde al 2003, año con la menor participación de fuentes no renovables (34.5 %). La Agencia Internacional de la Energía [3] reporta el valor medio del factor de emisión para el Ecuador, para el periodo 2008 - 2010, igual a 319.3 g CO<sub>2</sub> kWh<sup>-1</sup>. El valor medio del periodo 2008 - 2010 de la Figura 3, es igual a 329.5 g CO<sub>2</sub> kWh<sup>-1</sup>. Estos valores medios son congruentes, ya que presentan una diferencia de 3.2 %.

Algunos países con el promedio 2008 - 2010 del factor de emisión mayores al Ecuador son: Estonia (1059), India (936), China (790), Grecia (730), Estados Unidos (528), México (447), Chile (398), Argentina (365) [3].

Algunos países con el promedio 2008 - 2010 del factor de emisión menores al Ecuador son: Canadá (183), Colombia (153), Brasil (81), Suecia (22), Noruega (10) [3].

El valor más reciente que se puede deducir en base a la información publicada por la ARCONEL corresponde

al 2014, que presenta un factor de emisión de 342.5 g CO<sub>2</sub> kWh<sup>-1</sup>. En este año los porcentajes de participación fueron del 47.5 %, 49.1 % y 3.3 % para las fuentes renovables, no renovables e importación, respectivamente.

El factor de emisión de CO<sub>2</sub> por el consumo unitario de electricidad es utilizado en varios ámbitos: nacional, regional, local, institucional, familiar, personal; en evaluaciones de indicadores de sustentabilidad, como la huella de carbono, la huella ecológica. Es un parámetro básico en la planificación energética para evaluar el cambio de las emisiones con nuevas configuraciones de la matriz o mix energético.

Para reducir las emisiones por la generación de electricidad, se deben trabajar de manera prioritaria en ahorro y eficiencia energética; así como en la reducción del factor de emisión. Para el segundo punto, se pueden analizar la viabilidad del cambio a tecnológicas más eficientes, como las centrales de ciclo combinado; y el incremento de la generación de fuentes renovables, eligiendo opciones con el mínimo impacto y riesgo ambiental.

### Referencias

- [1] Arconel. 2015. "Estadística del Sector Eléctrico Ecuatoriano 2014. Agencia de Regulación y Control de Electricidad. Ministerio de Electricidad y Energía Renovable". Borrador. Quito, Ecuador: 134.
- [2] EIA. 2011. "International Energy Outlook 2011". U.S. Energy Information Administration. Washington - USA: 292.
- [3] IEA. 2013. "IEA Statistics. 2012 Edition. CO2 Emissions From Fuel Combustion. Highlights". International Energy Agency. Paris - France: 125.
- [4] Conelec. 2002. "Estadísticas del Sector Eléctrico Ecuatoriano. Año 2001". Versión Preliminar. Quito - Ecuador.
- [5] Conelec. 2012. "2011 Estadísticas del Sector Eléctrico Ecuatoriano". Folleto Multianual. Quito - Ecuador.
- [6] IPCC. 2006. "2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme". Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan.
- [7] USEPA. 1985. "Miscellaneous Data & Conversion Factors". Appendix A.
- [8] USEPA. 1996. "Bagasse combustion in sugar mills". US Environmental Protection Agency. AP 42, Fifth Edition, Volume I. Chapter 1: External Combustion Sources.
- [9] Conelec. 2003. "Estadística del Sector Eléctrico Ecuatoriano. Año 2002". Primera Revisión. Quito - Ecuador: 350.
- [10] Conelec. "Estadística del Sector Eléctrico Ecuatoriano. Año 2003". Quito - Ecuador: 394.



- [11] Conelec. "Estadística del Sector Eléctrico Ecuatoriano. Año 2004". Quito - Ecuador: 425.
- [12] Conelec. "Estadísticas del Sector Eléctrico Ecuatoriano. Año 2005".
- [13] Conelec. 2007. "Estadística del Sector Eléctrico Ecuatoriano. Año 2006". Quito - Ecuador: 310.
- [14] Conelec. 2008. "Estadística del Sector Eléctrico Ecuatoriano. Año 2007". Quito - Ecuador: 367.
- [15] Conelec. 2009. "Estadística del Sector Eléctrico Ecuatoriano. Año 2008". Quito - Ecuador: 362.
- [16] Conelec. 2010. "Estadística del Sector Eléctrico Ecuatoriano. Año 2009". Quito - Ecuador: 388.
- [17] Conelec. 2011. "2010. Boletín Estadístico del Sector Eléctrico Ecuatoriano". Quito - Ecuador: 204.

## Inventario de emisiones atmosféricas del tráfico vehicular en el Distrito Metropolitano de Quito. Año base 2012

Dayana Vega<sup>1</sup>, Lorena Ocaña<sup>1</sup>, René Parra<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Colegio de Ciencias e Ingeniería - Universidad San Francisco de Quito, Diego de Robles y Vía Interoceánica, Quito - Ecuador

\*Autor principal/Corresponding author, e-mail: rparra@usfq.edu.ec

Editado por/Edited by: Cesar Zambrano, Ph.D.

Recibido/Received: 2015/08/26. Aceptado/Accepted: 2015/08/28.

Publicado en línea/Published on Web: 2015/12/30. Impreso/Printed: 2015/12/30.

### On-road traffic air pollutants emission inventory in the Distrito Metropolitano de Quito. Base year 2012

#### Abstract

On-road traffic is an important source of air pollutants in the Distrito Metropolitano de Quito (DMQ). Until today the emissions from this sector in the DMQ were performed mainly using emission factors from the international literature. This paper updates the atmospheric emission inventory from the on-road traffic in the DMQ, taking 2012 as the base year. The best available information of sales statistics and properties of fuels, the composition of the vehicular park, and traffic intensity were used. The emission factors were deduced using the emission records of the Vehicular Technical Control (VTC) from the DMQ. The on-road traffic emits 102.7 kt/y of CO, 20.9 kt/y of NO<sub>x</sub>, 13.2 kt/y of NMVOC, 1.7 kt/y of PM<sub>10</sub>, 1.2 kt/y of PM<sub>2.5</sub> and 0.5 kt/y of SO<sub>2</sub>. It was estimated that during 2012, in the DMQ circulated 519 111 vehicles, of which 94.4 % correspond to gasoline vehicles and 5.6 % to diesel vehicles. The analyses of the VTC's database shown that 390 326 vehicles were controlled during 2012. The difference in comparison with the estimated vehicle park that actually circulated in the DMQ, indicates that 25 % of vehicles not fulfilled the VTC. The gasoline vehicles emit 86.3 % of CO, 77.0 % of NMVOC and 75.3 % of SO<sub>2</sub>. The diesel vehicles emit 82.5 % of PM<sub>2.5</sub>, 76.4 % of PM<sub>10</sub> and 60.6 % of NO<sub>x</sub>. The information used for this emission inventory implies a reduction in the level of uncertainty in relation to previous emission inventories. Hourly emission maps obtained from this inventory can be used to perform air pollutants chemical transportation studies, using last-generation numerical models.

**Keywords.** Vehicular Technical Control, emission factors, DMQ, gasoline vehicles, diesel vehicles.

#### Resumen

El tráfico vehicular es una fuente relevante de emisiones atmosféricas en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ). Hasta la fecha, la estimación de las emisiones de este sector en el DMQ ha sido elaborada principalmente en base de factores de emisión de la literatura internacional. Este artículo presenta una actualización del inventario de emisiones atmosféricas del tráfico vehicular en el DMQ, tomando como base el año 2012. Se utilizó la mejor información disponible sobre las estadísticas de venta y propiedades de los combustibles, la composición del parque vehicular y de la intensidad de tráfico. Se utilizaron factores de emisión deducidos en base de los registros de emisiones de la Revisión Técnica Vehicular (RTV) en el DMQ. El tráfico vehicular presenta un aporte de: 102.7 kt/año de CO, 20.9 kt/año de NO<sub>x</sub>, 13.2 t/año de COVNM, 1.7 kt/año de MP<sub>10</sub>, 1.2 kt/año de MP<sub>2.5</sub> y 0.5 kt/año de SO<sub>2</sub>. Se estimó que en el DMQ durante el año 2012 circularon 519 111 vehículos, de los cuales 94.4 % corresponden a vehículos a gasolina y 5.6 % a vehículos a diésel. Del análisis de la base de datos de la RTV 2012 se deduce que 390 326 vehículos se sometieron al control de emisiones. La diferencia con la cantidad estimada de vehículos que efectivamente circularon en el DMQ, indica que un 25 % de los vehículos no se sometieron a la RTV. Los vehículos a gasolina emiten el 86.3 % de CO, 77.0 % de COVNM y 75.3 % de SO<sub>2</sub>. Los vehículos a diésel emiten el 82.5 % de MP<sub>2.5</sub>, 76.4 % de MP<sub>10</sub> y 60.6 % de NO<sub>x</sub>. La información utilizada para la elaboración de este inventario implica un menor nivel de incertidumbre de los resultados, en relación a inventarios de emisiones anteriores. Los mapas horarios que se obtengan a partir de este inventario pueden ser utilizados para estudios de transporte químico de los contaminantes del aire, por medio de modelos numéricos de última generación.

**Palabras Clave.** Revisión Técnica Vehicular, factores de emisión, DMQ, vehículos a gasolina, vehículos a diésel.

## Introducción

La contaminación del aire constituye una de las amenazas más importantes para la salud pública [1]. En el año 2012 la contaminación atmosférica causó la muerte prematura de aproximadamente 3.7 millones de personas a nivel mundial [2].

Los inventarios de emisiones son elementos clave para la gestión y control de la calidad del aire [3]. Se definen como la estimación de la cantidad de contaminantes emitidos al aire, desde una o varias fuentes, en una región específica y en un tiempo determinado [4]. Los inventarios de emisiones se utilizan tanto para fines científicos y como instrumentos de gestión ambiental [4, 5]. En el ámbito científico, los inventarios proporcionan información detallada sobre la configuración de las emisiones, como información imprescindible para estudios de transporte químico de contaminantes del aire. Como instrumentos de gestión ambiental, los inventarios sirven para comprobar el cumplimiento de objetivos en términos de reducción de emisiones. Los inventarios de emisiones que se usan en estudios de dispersión atmosférica, presentan las siguientes características: 1) se establecen para un dominio rectangular conformado con una malla de celdas georeferenciadas, 2) presentan alta resolución espacial (mapas en celdas de 1 km) y alta resolución temporal (mapas de emisión horarios) [5].

Los inventarios de emisiones deben ser actualizados periódicamente, en razón del crecimiento poblacional, la variación del número de fuentes, los cambios en la operación de las fuentes emisoras, la vigencia de nuevas regulaciones, cambios en la calidad de los combustibles, así como por la mejora de los métodos de cálculo y factores de emisión [6]; teniendo presente como objetivo la reducción con el tiempo de los niveles de incertidumbre.

Las emisiones del tráfico vehicular comprenden las siguientes categorías [7]:

- Emisiones del tubo de escape, que a su vez se clasifican en emisiones en frío y caliente. Las emisiones en frío se producen antes de que el líquido de refrigeración alcance los 70°C, en tanto que las emisiones en caliente se presentan una vez que líquido refrigerante alcanzó y estabilizó su temperatura a los 70°C [8].
- Emisiones evaporativas, corresponden a compuestos orgánicos volátiles diferentes el metano (COVNM) que se emiten desde dispositivos como el tanque de gasolina y el carburador.
- Emisiones por abrasión, corresponden a material particulado que se genera por el desgaste de los neumáticos, frenos y de la superficie del pavimento.

Actualmente el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) cuenta con inventarios oficiales para los años 2003, 2005,

2007 y 2011 [9–12]. De acuerdo con los resultados del inventario del año 2007 [11] (el inventario más reciente y que diferencia las emisiones del tubo de escape, evaporativas y por abrasión) el tráfico vehicular aporta el 97.3 % del monóxido de carbono (CO) total emitido en el DMQ, el 52.3 % de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), el 45.6 % del material particulado con diámetro aerodinámico menor de 2.5 micras (MP<sub>2.5</sub>), el 39.4 % de COVNM, el 26.2 % del material particulado con diámetro aerodinámico menor de 10 micras (MP<sub>10</sub>), y el 11.9 % del dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>).

Estos resultados sustentan la aplicación de la Revisión Técnica Vehicular (RTV) en el DMQ, como medida para controlar las emisiones de una de las fuentes más importantes de contaminación. Desde el año 1993, todos los vehículos que circulan en el DMQ deben someterse anualmente a un control de las condiciones mecánicas y de las emisiones del escape, a fin de garantizar condiciones mínimas de seguridad y comprobar el cumplimiento de las normas de emisión (CO e hidrocarburos para vehículos a gasolina, opacidad para vehículos a diésel). Cada vez que el propietario lleva su vehículo a este control los registros de las emisiones se almacenan en bases de datos anuales, cuyo procesamiento y análisis permite caracterizar el parque vehicular y los niveles de emisión, diferenciando el tipo de vehículo, el tamaño del motor y el año de fabricación.

Los factores de emisión de tráfico vehicular (cantidad de contaminante emitido por unidad de distancia recorrida por un vehículo) que se han utilizado hasta la fecha en el DMQ, provienen principalmente de inventarios de emisiones de México D.F. [11, 12]. Por ello, y con el fin de reducir los niveles de incertidumbre, es necesario promover el uso de factores de emisión locales.

Este artículo presenta los resultados de la actualización del inventario de emisiones atmosféricas del tráfico vehicular para el DMQ, tomando como base el año 2012. Para este propósito se utilizó la mejor información disponible sobre las estadísticas de venta y propiedades de los combustibles, composición del parque vehicular, intensidad de tráfico y factores de emisión deducidos de la RTV.

## Método

### Contaminantes y Gases de Efecto Invernadero

Se incluyeron los siguientes contaminantes primarios: CO, NO<sub>x</sub>, COVNM, SO<sub>2</sub>, MP<sub>10</sub>, MP<sub>2.5</sub>. Además se incluyeron los siguientes GEI: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O).

### Malla de emisiones

Se utilizó una malla de emisiones cuadrada (1.6 grados geográficos por lado), en la que se inscribe el DMQ (Fig. 1). La malla se compone de 200 celdas horizontales y 200 celdas verticales. Cada celda tiene una longitud de 30" geográficos (≈ 0.9 km). Aunque el inventario

se focaliza en las emisiones del DMQ, debido a la cercanía e interacción directa, también se cuantificaron las emisiones para el Cantón Rumiñahui.

### Modelo de emisiones

Las emisiones atmosféricas totales se calcularon mediante los modelos propuestos en las guías de la Agencia Ambiental Europea (AAE) [7, 13, 14], y del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) [15], de acuerdo con los componentes de la Ecuación 1:

$$\text{Emisiones}_{\text{totales}} = \text{Emisiones}_{\text{tubodeescape}} + \text{Emisiones}_{\text{evaporativas}} + \text{Emisiones}_{\text{abrasion}} \quad (1)$$

La Tabla 1 indica los modelos utilizados para las emisiones del tubo de escape, evaporativas y de abrasión.

La distancia anual recorrida por tipo de vehículo constituye un parámetro básico en la estimación de las emisiones del tráfico vehicular. Para este inventario, la distancia recorrida se actualizó, a partir de las compilaciones y encuestas anteriores realizadas por la Corporación para el Mejoramiento del Aire de Quito (Corpaire) [11]. Para estimar la cantidad de vehículos que circularon en el año 2012, se asumió que la cantidad total de combustible vendido en las gasolineras [16], es igual a la cantidad del combustible efectivamente consumido por los vehículos que circularon en el DMQ. En función del recorrido anual, de la composición porcentual del parque vehicular [17] y la distancia recorrida por unidad de combustible consumido, se iteraron los valores del parque vehicular, hasta que los resultados calculados del consumo de combustible sean similares a los valores de las estadísticas de venta de gasolina y diésel.

Los factores de emisión de  $\text{NO}_x$ , CO y COVNM, se definieron a partir de los coeficientes propuestos por Ocaña [17] y de los factores de emisión obtenidos por el Centro de Transferencia Tecnológica para la Capacitación e Investigación en Control de Emisiones Vehiculares [18].

## Resultados y Discusión

### Parque vehicular del año 2012

Se estimó que durante el año 2012, en el DMQ circularon 519 111 vehículos (Tabla 2), de los cuales 490 027 (94.4 %) corresponden a vehículos a gasolina, y 29 084 (5.6 %) a vehículos a diésel. Entre los vehículos a gasolina, las categorías más numerosas corresponden a los automóviles (73.6 %) y camionetas (14.5 %). Entre los vehículos a diésel las categorías más numerosas corresponden a los vehículos de carga (50.5 %), buses (16 %) y furgonetas (15.3 %). El número de vehículos que se presentaron a la RTV en el mismo año fue de 390 326 [17], que corresponde a un 25 % del número estimado del parque vehicular que circuló en el año 2012.

### Factores de emisión

Hay diferencias entre los factores de emisión deducidos para este inventario, en relación a los factores de emisión utilizados en inventarios anteriores (Fig. 2). Para los automóviles a gasolina fabricados hasta el año 2000, los factores de  $\text{NO}_x$  y CO del presente inventario son mayores (relación entre 1.6 y 3.6), y menores (relación entre 0.3 y 1) para modelos recientes (2007 en adelante). No obstante, los factores de emisión de COVNM del presente inventario (excepto para vehículos del año 1999), son menores o iguales (relación entre 0.3 y 1). En razón de que los factores de emisión de este inventario, provienen del análisis de los registros de la RTV en Quito, la presente estimación implica un menor nivel de incertidumbre en relación a los inventarios anteriores.

### Emisiones del tráfico vehicular

Las mayores emisiones de contaminantes primarios corresponden al CO (102.7 kt/año, 73.3 %)(Tabla 3),  $\text{NO}_x$  (20.8 kt/año, 14.9 %) y COVNM (13.2 kt/año, 9.4 %). Estos porcentajes son comparables con lo indicados en los inventarios anteriores (CO: 70.9 - 72.4 %;  $\text{NO}_x$ : 11.7 - 13.2 %; COVNM: 11.4 - 13.0 %) [9-11]. Las emisiones de  $\text{SO}_2$  representan el 0.3 %; menor al aporte indicado en los inventarios anteriores (0.9 - 2.5 %), en razón al menor contenido de azufre de los combustibles comercializados en el año 2012 (185.6 ppm para las gasolinas y 317.9 ppm para el diésel [19]), en relación a los años anteriores. La Tabla 3 indica adicionalmente las emisiones del DMQ y Cantón Rumiñahui.

Desde el tubo de escape se producen el 100 % de las emisiones de  $\text{NO}_x$ , CO y  $\text{SO}_2$ , el 80 % de  $\text{MP}_{2.5}$ , el 72.7 % de  $\text{MP}_{10}$  y el 68.8 % de COVNM (Tabla 4). Estos porcentajes son coherentes con la literatura (un 55 % de los COVNM y casi la totalidad de CO y  $\text{NO}_x$  provienen del tubo de escape [8]). El principal aporte de las emisiones en frío corresponden al CO (13.9 %) y a los COVNM (8.2 %). Según Ntziachristos and Samaras [7], aunque las emisiones en frío ocurren en un periodo de tiempo limitado (entre 180 a 240 s), su aporte es significativo debido a que en este periodo la mezcla aire-combustible esta enriquecida (hay mayores emisiones de CO y COVNM) y el catalizador no funciona adecuadamente, al no haber alcanzado todavía su temperatura óptima de operación. Las emisiones evaporativas aportan con el 31.2 % de las emisiones de COVNM. Las emisiones por abrasión generan el 27.4 % y 20 % de las emisiones de  $\text{MP}_{10}$  y  $\text{MP}_{2.5}$ , respectivamente.

Los vehículos a gasolina, que representan el 94.4 % del parque vehicular del DMQ, son la principal fuente de CO (86.3 %), COVNM (77.0 %) y  $\text{SO}_2$  (75.3 %). Los vehículos a diésel, que conforman el 5.6 % del parque vehicular, son los principales contribuyentes de  $\text{MP}_{2.5}$  (82.5 %),  $\text{MP}_{10}$  (76.4 %) y  $\text{NO}_x$  (60.6 %) (Fig. 3). Estos porcentajes se explican al considerar que los motores a diésel trabajan comúnmente con mezclas pobres, que

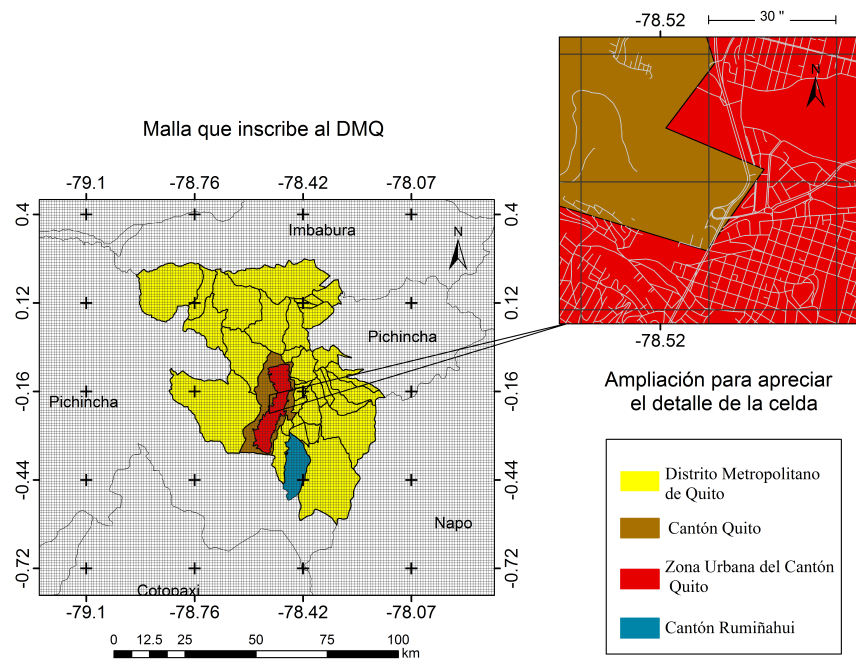


Figura 1: Malla para el inventario de emisiones atmosféricas del Distrito Metropolitano de Quito. Año base 2012.

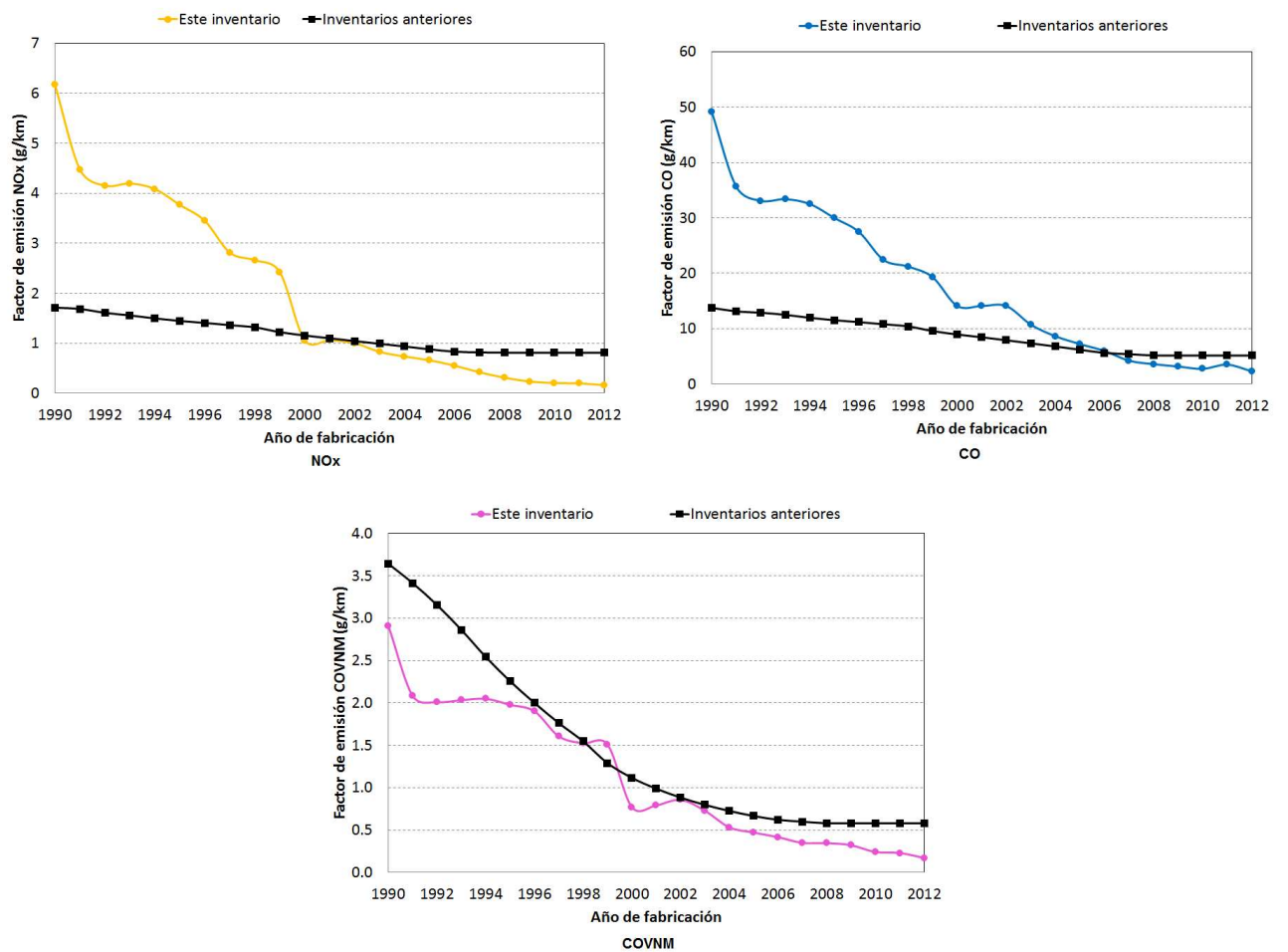


Figura 2: Comparación de factores de emisión de NO<sub>x</sub>, CO y COVNM utilizados en el presente inventario en relación a los utilizados en inventarios anteriores. Automóviles livianos a gasolina.



Tipo de emisión		Compuestos emitidos	Modelos de emisiones
Emisiones del tubo de escape escape	En caliente	NO <sub>x</sub> , CO, COVNM, MP <sub>10</sub> y MP <sub>2.5</sub>	$E_{caliente,r}^i = N_{veh\ r} \times D_{rec,r} \times FE_r^i$
	En frío	NO <sub>x</sub> , CO, COVNM, MP <sub>10</sub> y MP <sub>2.5</sub>	$E_{frío,r}^i = \beta_{i,r,k} \times N_{veh\ r} \times D_{rec,r} \times e_{caliente;r,i,k} \times \left( e^{frío} / e^{caliente} \Big _{i,r,k} - 1 \right)$
Emisiones evaporativas		COVNM	$E_{evap,r}^i = D \times N_{veh-gas\ r} \times (e_{dr} + HS_r + RL_r)$
Emisiones de abrasión	Desgaste de neumáticos y frenos	MP <sub>10</sub> y MP <sub>2.5</sub>	$E_{abrasion\ r,j}^i = N_{veh\ r} \times D_{rec,r} \times FE_{i,r} \times f_{r,i} \times S_j(V)$
	Abrasión de superficie	MP <sub>10</sub> y MP <sub>2.5</sub>	$E_{super\ fr}^i = N_{veh\ r} \times D_{rec,r} \times FE_{i,r} \times f_{r,i}$
Emisiones de GEI		CO <sub>2</sub> CH <sub>4</sub> y N <sub>2</sub> O	$E_r^1 = FE_r^{CO_2} \times Vol_{r,m}$ $E_r^i = D_{rec,r} \times N_{veh\ r} \times FE_r^i$

i: contaminante o GEI.

r: categoría de vehículo.

$N_{veh\ r}$ : número de vehículos de categoría r (vehículos/año).

$D_{rec,r}$ : distancia anual recorrida por el vehículo de categoría r (km/vehículo/año).

$FE_r^i$ : factor de emisión en caliente de i, emitido por el vehículo de categoría r (t/km/vehículo).

m: tipo de combustible: gasolina o diésel.

$k_{s,m}$ : contenido de azufre en el combustible m (t/m<sup>3</sup>)

$Vol_{r,m}$ : volumen de combustible m consumido en un año por el vehículo r (m<sup>3</sup>/año).

k: tecnología vehicular, que depende del año de fabricación (modelo).

$\beta_{i,r,k}$ : fracción de la distancia que el vehículo de categoría r y tecnología k, recorre con el motor en frío. Este parámetro depende de la temperatura ambiente ( $t_a$ ) y de la longitud promedio de viaje ( $l_{viaje}$ ).

$e_{caliente;r,i,k}$ : emisiones en caliente el contaminante i emitidas por el vehículo r de tecnología k (t/km).

$e^{frío} / e^{caliente} \Big|_{i,r,k}$ : fracción entre las emisiones en frío y caliente de i emitidas por el vehículo r de tecnología k.

Este parámetro depende de  $t_a$  y de la velocidad promedio de viaje.

D: número de días en los cuales se producen las emisiones evaporativas.

$N_{veh-gas\ r}$ : número de vehículos a gasolina de categoría r (vehículos/año).

$e_{dr}$ : emisiones diurnas para el vehículo de categoría r (t/día\*vehículo).

HSr: emisiones por retención en caliente para el vehículo de categoría r (t/día\*vehículo).

RLr: emisiones por funcionamiento para el vehículo de categoría r (t/día\*vehículo).

j: emisiones por desgaste de neumáticos o desgaste de frenos.

$f_{r,i}$ : fracción de la masa de material particulado que corresponde a i.

$S_j(V)$ : factor de corrección en función de la velocidad media de viaje.

$FE_r^{CO_2}$ : factor de emisión de CO<sub>2</sub> del vehículo de categoría r (t/TJ).

Tabla 1: Modelos de emisiones atmosféricas del tráfico vehicular utilizados para el Distrito Metropolitano de Quito.

generan menores emisiones de CO y COVNM con respecto a los vehículos a gasolina. Sin embargo, las emisiones de NO<sub>x</sub> en los vehículos a diésel son elevadas, debido a las altas temperaturas y presión a las que trabajan [20, 21]. Además, la composición química del diésel promueve la formación de material particulado [20]. Por ello, aunque los vehículos a diésel representan sólo el 5.6 % del parque vehicular, su contribución en las emisiones de NO<sub>x</sub> y material particulado es relevante.

### Comparación con inventarios anteriores

Los resultados del presente inventario son coherentes respecto a los inventarios anteriores que presentan los mismos componentes de emisión para el tráfico vehicular (Tabla 5). Se observa una tendencia ascendente para la mayoría de los contaminantes (NO<sub>x</sub>, CO, MP<sub>10</sub> y MP<sub>2.5</sub>), que en parte corresponde al incremento del parque vehicular con el tiempo. En comparación con el inventario del año 2007, las emisiones de COVNM fue-

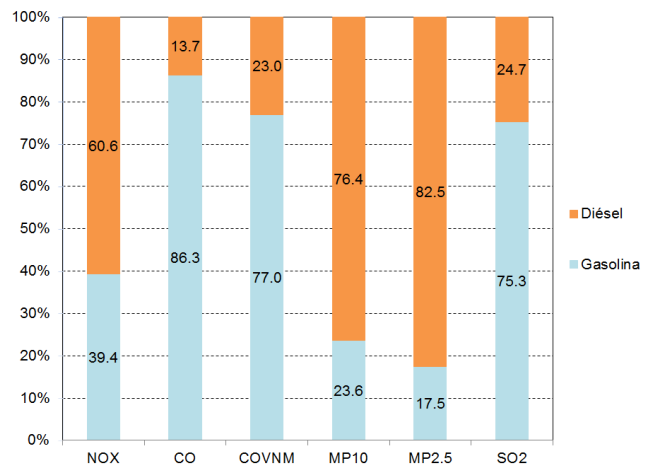


Figura 3: Porcentaje de emisiones de contaminantes primarios por tipo de combustible.

Categoría	Vehículos a gasolina		Vehículos a diésel		Vehículos a gasolina y diésel	
	Cantidad	Porcentaje	Cantidad	Porcentaje	Cantidad	Porcentaje
Automóviles	360 833	73.6	1622	5.6	362 455	69.8
Camionetas	70 947	14.5	2448	8.4	73 395	14.1
Motocicletas	31 671	6.5	-	-	31 671	6.1
Carga	15 059	3.1	14 685	50.5	29 744	5.7
Furgonetas	6988	1.4	4441	15.3	11 429	2.2
Buses	2524	0.5	4656	16.0	7180	1.4
Híbridos	1517	0.3	-	-	1517	0.3
Microbuses	488	0.1	1232	4.2	1720	0.3
Totales	490 027	100.0	29 084	100.0	519 111	100.0

Tabla 2: Composición del parque vehicular que circuló durante el año 2012 en el Distrito Metropolitano de Quito.

Compuestos	Distrito Metropolitano de Quito		Cantón Rumiñahui		Distrito Metropolitano de Quito y Cantón Rumiñahui		
	Total (t/año)	Porcentaje	Total (t/año)	Porcentaje	Total (t/año)	Porcentaje	
Contaminantes Primarios	NO <sub>x</sub>	20 808.1	14.9	2 382.2	20.3	23 190.3	15.3
	CO	102 667.4	73.3	7 842.1	66.8	110 509.5	72.8
	COVNM	13 185.6	9.4	1 107.2	9.4	14 292.8	9.4
	MP <sub>10</sub>	1656.5	1.2	210.9	1.8	1 867.4	1.2
	MP <sub>2.5</sub>	1211.2	0.9	160.2	1.4	1 371.4	0.9
	SO <sub>2</sub>	451.1	0.3	38.3	0.3	489.4	0.3
<b>Total</b>	<b>139 979.9</b>	<b>100.0</b>	<b>11 740.9</b>	<b>100.0</b>	<b>151 720.8</b>	<b>100.0</b>	
GEI	CO <sub>2</sub>	2 572 892.1	100.0	234 983.6	100.0	2 807 875.7	100.0
	CH <sub>4</sub>	680.9	0.0	44.9	0.0	725.8	0.0
	N <sub>2</sub> O	163.3	0.0	11.0	0.0	174.3	0.0
	<b>Total</b>	<b>2 573 736.3</b>	<b>100.0</b>	<b>235 039.6</b>	<b>100.0</b>	<b>2 808 775.9</b>	<b>100.0</b>

Tabla 3: Emisiones del tráfico vehicular en el Distrito Metropolitano de Quito y Cantón Rumiñahui, durante el año 2012.

Tipo de emisión	NO <sub>x</sub>		CO		COVNM		MP <sub>10</sub>		MP <sub>2.5</sub>		SO <sub>2</sub>	
	(t/año)	%	(t/año)	%	(t/año)	%	(t/año)	%	(t/año)	%	(t/año)	%
Tubo de escape Caliente	20 492.3	98.5	88 397.5	86.1	7990.3	60.6	1201.9	72.6	967.5	79.9	451.1	100.0
Evaporativa Frío	315.7	1.5	14 269.9	13.9	1077.5	8.2	1.5	0.1	1.4	0.1	0.0	0.0
Abrasión					4117.9	31.2		0.0		0.0		
<b>Total</b>	<b>20 808.1</b>	<b>100</b>	<b>102 667.4</b>	<b>100</b>	<b>13 185.6</b>	<b>100</b>	<b>1656.5</b>	<b>100</b>	<b>1211.2</b>	<b>100</b>	<b>451.1</b>	<b>100</b>

Tabla 4: Emisiones del tráfico vehicular en el Distrito Metropolitano de Quito durante el año 2012. Desglose por tipo de emisión.

ron menores, debido al uso de factores de emisión de menor magnitud para el presente inventario.

### Mapas de emisión de contaminantes

Las emisiones anuales (Tabla 3) se repartieron espacialmente en la malla de la Figura 1, en base del mapa de intensidad de tráfico del año 2012 [22], que fue elaborado previamente a la actualización de este inventario de emisiones. Las emisiones se repartieron considerando además las longitudes de los ejes viales, y según su ubicación en las celdas de la malla de emisiones. Las Figuras 4, 5 y 6 presentan los mapas de emisión anual de CO, NO<sub>x</sub> y MP<sub>2.5</sub>, respectivamente.

### Análisis de incertidumbre

El análisis de incertidumbre permite caracterizar la calidad de la información utilizada y los resultados de un inventario de emisiones [6]. Para el presente inventario se elaboró un análisis de la incertidumbre, aplicando un sistema cualitativo adaptado del método *Data Attribute*

*Rating System* (DARS), desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos [23]. Este enfoque ya ha sido aplicado en los inventarios anteriores [9–12], y califica tanto la información de los niveles de actividad y los factores de emisión, mediante una escala alfabética, que va desde la A (la información más fiable que se puede obtener, y por ende con la menor incertidumbre) hasta la E (la información menos fiable, y por ende con mayores niveles de incertidumbre). Las Tablas 6 y 7 indican la evaluación de incertidumbre para el presente inventario. Los niveles de actividad, relacionados con la distancia anual recorrida por los vehículos, fueron calificados como B. Los factores de emisión fueron calificados en categorías entre B, C y D. Las calificaciones globales de la incertidumbre de las emisiones fueron B y C.

### Conclusiones

Se actualizó el inventario de emisiones atmosféricas del tráfico vehicular del DMQ, tomando el año 2012 como

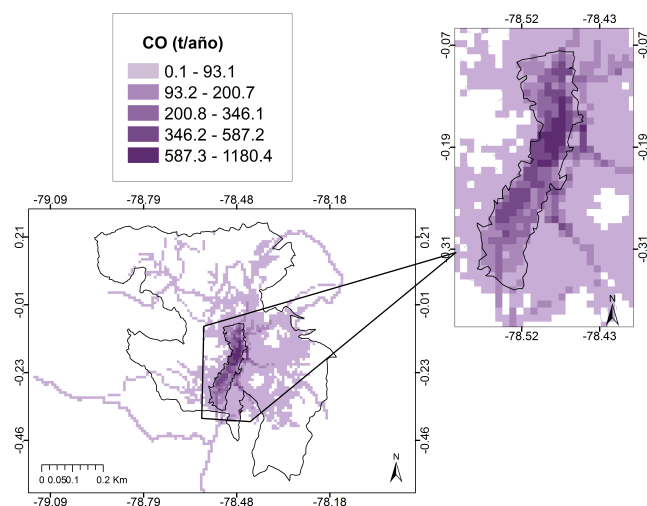


Figura 4: Distribución espacial de las emisiones de CO (t/año) en el Distrito Metropolitano de Quito producidas por el tráfico vehicular. Año base 2012.

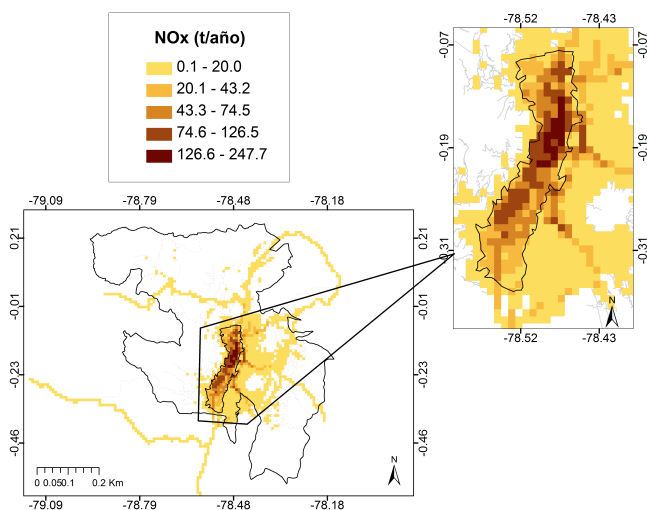


Figura 5: Distribución espacial de las emisiones de NO<sub>x</sub> (t/año) en el Distrito Metropolitano de Quito producidas por el tráfico vehicular. Año base 2012.

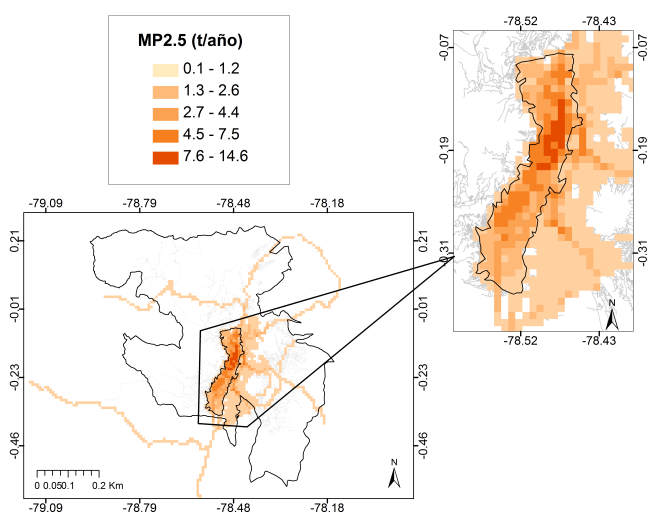


Figura 6: Distribución espacial de las emisiones de MP<sub>2.5</sub> (t/año) en el Distrito Metropolitano de Quito producidas por el tráfico vehicular. Año base 2012.

		Inventario 2003 (t/año) [9]	Inventario 2005 (t/año) [10]	Inventario 2007 (t/año) [11]	Este Inventario (t/año) 2012	
Contaminantes	Primarios	NO <sub>x</sub>	16 973	14 994	17 960	20 808
		CO	91 330	91 387	101 174	102 667
		COVNM	12 447	12 363	14 220	13 186
		MP <sub>10</sub>	1546	1867	859	1656.5
		MP <sub>2.5</sub>	1093	1298	634	1211.2
		SO <sub>2</sub>	3173	2693	1218	451
GEI	CO <sub>2</sub>	1 696 803	1 927 388	2 198 932	2 572 892	
	CH <sub>4</sub>	749	745	655	681	
	N <sub>2</sub> O	71	100	144	163	

Tabla 5: Comparación de resultados con anteriores inventarios de emisiones del tráfico vehicular en el Distrito Metropolitano de Quito.

Tipo de vehículo	Actividad	NO <sub>x</sub>			CO			COVNM			
		%	Factor de emisión	Estimación	%	Factor de emisión	Estimación	%	Factor de emisión	Estimación	
Livianos	Automóvil	B	23.6	C	B	57.1	C	B	54.9	D	C
	Camioneta	B	12.8	C	B	15.1	C	B	13.7	D	C
	Furgoneta	B	1.2	C	B	3.0	C	B	2.3	D	C
Híbridos	B	0.0	D	C	0.0	D	C	0.1	D	C	
Motos	B	0.5	D	C	6.8	D	C	5.5	D	C	
Pesados	Bus	B	27.9	D	C	6.7	D	C	10.3	D	C
	Carga	B	31.0	D	C	10.4	D	C	12.1	D	C
	Furgoneta	B	0.4	D	C	0.1	D	C	0.2	D	C
Microbús	B	2.6	D	C	0.7	D	C	0.9	D	C	
<b>Total</b>			100.0			100.0			100.0		

Tabla 6: Análisis de incertidumbre para las emisiones del tráfico vehicular en el Distrito Metropolitano de Quito. Año base 2012. NO<sub>x</sub>, CO y COVNM.

Tipo de vehículo	Actividad	MP <sub>10</sub>			MP <sub>2.5</sub>			SO <sub>2</sub>			
		%	Factor de emisión	Estimación	%	Factor de emisión	Estimación	%	Factor de emisión	Estimación	
Livianos	Automóvil	B	17.6	D	C	12.8	D	C	60.9	B	B
	Camioneta	B	3.8	D	C	3.5	D	C	11.8	B	B
	Furgoneta	B	1.9	D	C	2.2	D	C	2.3	B	B
Híbridos	B	0.0	D	C	0.0	D	C	0.2	B	B	
Motos	B	0.8	D	C	0.6	D	C	3.0	B	B	
Pesados	Bus	B	20.2	D	C	21.6	D	C	5.4	B	B
	Carga	B	50.7	D	C	53.9	D	C	15.1	B	B
	Furgoneta	B	0.7	D	C	0.8	D	C	0.2	B	B
Microbús	B	4.3	D	C	4.6	D	C	1.2	B	B	
<b>Total</b>			100.0			100.0			100.0		

Tabla 7: Análisis de incertidumbre para las emisiones del tráfico vehicular en el Distrito Metropolitano de Quito. Año base 2012. MP<sub>10</sub>, MP<sub>2.5</sub> y SO<sub>2</sub>.

base. La actualización se desarrolló utilizando la mejor información disponible sobre el consumo y contenido de azufre de los combustibles, la conformación del parque vehicular, información local de los registros de emisiones de la RTV y de la configuración espacial de la intensidad de tráfico. Por ello se puede afirmar que este inventario presenta menor incertidumbre con respecto a inventarios anteriores. La caracterización de los factores de emisión para este inventario, en base a los registros locales de la RTV, permitió una mejor asignación emisiones, en función del año de fabricación de los vehículos.

Se estimó que un 25 % de los vehículos que circularon en el DMQ durante el año 2012, no se sometieron al control de la RTV.

Del análisis de incertidumbre se concluye que para futuros inventarios, es prioritario mejorar la estimación de las emisiones de MP<sub>2.5</sub>, MP<sub>10</sub> y NO<sub>x</sub> de los vehículos pesados a diésel, en razón de que esta categoría emite el 76.3 %, 71.6 % y 59.3 % respectivamente, de estos contaminantes; y la calificación global de las respectivas emisiones es D. De la misma forma, se debe priorizar las

emisiones de COVNM de los automóviles livianos a gasolina, ya que esta categoría es responsable del 54.9 % de las emisiones de estos compuestos, y la calificación de la estimación es C.

Los mapas horarios que se obtengan a partir de los mapas anuales de este inventario pueden ser utilizados para estudios de transporte químico de los contaminantes del aire en el DMQ, por medio de modelos numéricos de última generación.

### Agradecimientos

A la Secretaría de Movilidad del Municipio de Quito, por facilitar la base de datos de la RTV del año 2012.

### Referencias

- [1] PNUMA. 2014. "UNEP Year Book 2014 emerging issues update". *Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente*.
- [2] OMS. 2014. "Calidad del aire exterior y salud. Nota descriptiva N°313". Organización Mundial de la Salud.

- <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>.
- [3] Webber, E. 1982. "Air Pollution. Assessment Methodology and Modeling". *Springer Science+Business Media*, 2: New York.
- [4] Van Aardenne, J. 2002. "Uncertainties in emission inventories", Wageniniger University - PhD thesis.
- [5] Pacyna, J.; Graedel, T. 1995. "Inventories: Status and Prospects". *Annual Review of Energy and Environment. Environment and Resources*, 20: 265-300.
- [6] US-EPA. 1997. "Introduction to the Emission Inventory Improvement Program". *Emission Inventory Improvement Program*: 122.
- [7] Ntziachristos, L.; Samaras, Z. 2014. "Exhaust emission from road transport". EMEP/EEA emission inventory guidebook 2013: 158.
- [8] Ntziachristos, L.; Samaras, Z. 2000. "COPERT II. Computer programme to calculate emissions from transport - Methodology and emission reactors//". Technical Report No 6. European Environmental Agency: 55.
- [9] CORPAIRE. 2006. "Inventario de Emisiones del Distrito Metropolitano de Quito. Año 2003". *Corporación Municipal para el Mejoramiento del Aire de Quito*: Quito.
- [10] CORPAIRE. 2008. "Inventario de Emisiones del Distrito Metropolitano de Quito. Año 2005". *Corporación Municipal para el Mejoramiento del Aire de Quito*: Quito.
- [11] CORPAIRE. 2009. "Inventario de Emisiones del Distrito Metropolitano de Quito". Año 2007. *Corporación Municipal para el Mejoramiento del Aire de Quito*: Quito.
- [12] Secretaría de Ambiente. 2014. "Informe Final Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio, DMQ 2011". *Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito*: Quito.
- [13] Ntziachristos, L.; Boulter, P. 2009. "Road, tyre and brake wear - Road surface wear". EMEP/EEA emission inventory guidebook 2009: 32.
- [14] Mellios, G.; Ntziachristos, L. 2013. "Gasoline Evaporation from vehicles". EMEP/EEA emission inventory guidebook 2013: 12.
- [15] IPCC. 2006. "Directrices del IPCC de 2006 para los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero". *Panel Intergubernamental de Cambio Climático*.
- [16] ARCH. 2014. "Volumen de Venta de Combustibles en el año 2012, en la Provincia de Pichincha y sus Cantones". *Agencia de Regulación y Control Hidrocarbúrico*: Quito
- [17] Ocaña, L. 2014. "Cálculo de factores de emisión vehicular para el Distrito Metropolitano de Quito en base al análisis estadístico de los registros de la Revisión Técnica Vehicular del año 2012 y una ruta de campo establecida", Universidad San Francisco de Quito, Tesis de Ingeniería Ambiental. Quito: 97.
- [18] CICCEV; CAF; MAE. 2012. "Determinación de la línea base de factores de emisiones contaminantes en motores de combustión interna con el combustible de actual venta en el país". *Centro de Transferencia Tecnológica para la Capacitación e Investigación en Control de Emisiones Vehiculares*: Quito.
- [19] Secretaría de Ambiente. 2012. "Análisis de combustibles del Distrito Metropolitano de Quito: Campaña Septiembre 2012". Informe Técnico 2178-GCA-REC-12. Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito: 26.
- [20] Sher, E. 1998. "Handbook of Air Pollution from Internal Combustion Engines. Pollutant formation and Control". Academic Press, 663: San Diego.
- [21] De Nevers, N. 1998. "Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire". McGraw-Hill. 546: México.
- [22] Vega, D., Parra, R. 2014. "Caracterización de la intensidad media diaria y de los perfiles horarios del tráfico vehicular". *Avances en Ciencias e Ingenierías*, 6(2): C40-C45.
- [23] US-EPA. 1996. "Evaluating the Uncertainty of Emission Estimates - Final Report". *Emission inventory Improvement Program*: 55.



## Determinación de elementos mayores en sedimentos provenientes de zonas afectadas por actividades petroleras en Ecuador

Cristina Gabriela Pérez Naranjo<sup>1</sup>, Laurence Maurice<sup>2,3\*</sup>, Valeria Ochoa-Herrera<sup>1</sup>, Fausto López<sup>2,4</sup>, David A. Egas<sup>1</sup>, Christelle Lagane<sup>2,3</sup>, Philippe Besson<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad San Francisco de Quito, Colegio de Ciencias e Ingeniería, Diego de Robles y Vía Interoceánica, 17-1200-841. Quito, Ecuador.

<sup>2</sup>OMP-GET, Géosciences Environnement Toulouse, Université de Toulouse III-CNRS-IRD 14 av. E. Belin, 31400 Toulouse, France.

<sup>3</sup>IRD, GET, F-31400 Toulouse.

<sup>4</sup>Université de Toulouse, GET, F-31400 Toulouse.

\*Autor principal/Corresponding author, e-mail: laurence.maurice@ird.fr

Editado por/Edited by: Cesar Zambrano, Ph.D.

Recibido/Received: 2015/10/15. Aceptado/Accepted: 2015/11/10.

Publicado en línea/Published on Web: 2015/12/30. Impreso/Printed: 2015/12/30.

### Analysis of major cations in bottom sediments from oil impacted Rivers, in the Ecuadorian Amazon

#### Abstract

Heavy metal pollution is one of the biggest problems of great concern at the global, regional and local levels due to mining and oil activities, because those elements constitute a threat to aquatic biota and human health. The major elements and heavy metals tend to accumulate in sediments, which act as secondary sources of contamination, and this process is closely related to the redox conditions, the particle size distribution of the sediments and the amount of sedimentary organic matter. Therefore, the aim of this work conducted in the frame of the MONOIL Research Program between France and Ecuador, is to determine the concentration of major elements (K, Mg, Na, Fe, Mn and Al) in the fine fraction of sediments, particles <4  $\mu\text{m}$ , collected in the basins of the Aguarico, Napo and Esmeraldas Rivers, which are areas affected by the oil industry in Ecuador. Concentrations of major elements in the fine fraction are then compared to concentrations in the bulk, which was determined in the same sampling points in a previous work. Environmental parameters in surface waters such as temperature, dissolved oxygen (DO), pH, conductivity and oxide reduction potential (ORP) were determined *in situ* in each sampling point. The isolation of the fine fraction was carried out based on Stokes' law after a homogenization, quartering and dissolution of the sediment in distilled water. Mineralization in sediments was performed by a triacid attack with HCl, HNO<sub>3</sub> and HF. The major elements were determined by atomic absorption spectrophotometry (AAS). The ranges of major elements in the fine fraction of sediments were: Fe: 18-49, Al: 26-59, K: 3-15, Mg: 3-13, Na: 1-11 and Mn: 0.38-0.89 mg g<sup>-1</sup>; while concentrations in the bulk sediment concentrations were: Fe: 25-49, Al: 45-82, K: 5-20, Mg: 4-16, Na: 3-24 and Mn: 0.43-1.28 mg g<sup>-1</sup>. In the sediment samples of the Northern Ecuadorian Amazon rivers, 43 % Na, 93 % Fe, 70 % Mg, 62 % Mn and 94 % K are associated with the fine fraction. The concentrations of Mg, Na and Mn in bottom sediments are influenced by oil activities, while Fe, K and Al concentrations depend on the natural origin of sediments. However, downstream up to the border with Peru, no significant increase in the concentrations of major elements in relation to the control points, upstream of the ZIL, the Local Area of influence of oil activities, was observed.

**Keywords.** Sediments, grain size, major elements, Amazonia, Ecuador, oil activities.

#### Resumen

La contaminación por metales pesados debido a la actividad petrolera es uno de los problemas de mayor preocupación a nivel mundial, regional y local, porque constituyen un peligro para la biota acuática y la salud humana. Los elementos mayores y metales pesados tienden a acumularse en los sedimentos, los cuales actúan como recursos secundarios de contaminación. Estos están íntimamente relacionados con las condiciones redox, la distribución del tamaño de las partículas en los sedimentos y la cantidad de materia orgánica sedimentaria. Por tanto, el objetivo de este proyecto realizado dentro del marco del programa de Investigación Franco-Ecuatoriano MONOIL, es determinar la concentración de los elementos mayores (K, Mg, Na, Fe, Mn y Al) en la fracción fina de sedimentos colectados en las cuencas de los ríos Aguarico, Napo y Esmeraldas, que constituyen áreas de influencia de la zona petrolera en el Ecuador, y compararlos con las concentraciones analizadas en el *bulk* de cada muestra en estudios anteriores. Los parámetros ambientales *in situ* que se determinaron en cada punto de muestreo fueron temperatura, oxígeno disuelto, pH, conductividad y potencial de óxido reducción. La separación de la fracción fina, partículas <4  $\mu\text{m}$ , de los sedimentos se realizó en base a la ley de Stokes tras un proceso de homogenización, cuarteo y disolución en agua destilada. La mineralización de los sedimentos se realizó por un ataque triácido con HCl, HNO<sub>3</sub> y HF. Los elementos mayores se determinaron por Espectrometría de Absorción Atómica (AAS). Los rangos de los elementos mayores encontrados en la fracción fina de sedimentos fueron Fe: 18-49, Al: 26-59, K: 3-15, Mg: 3-13, Na: 1-11 y Mn: 0.38-0.89 mg g<sup>-1</sup>. Mientras que las concentraciones en el *bulk* de los sedimentos fueron Fe: 25-49, Al: 45-82, K: 5-20, Mg: 4-16, Na: 3-24 y Mn: 0.43-1.28 mg g<sup>-1</sup>. En las muestras analizadas, el 43 % del Na, el 93 % del Fe, el 70 % de Mg, el 62 % de Mn y el 94 % de K están asociados con la fracción fina de los sedimentos. Las concentraciones de Mg, Na y Mn están influenciadas por las actividades petroleras mientras que el contenido de Fe, K y Al está relacionado con el origen natural de los sedimentos. Sin embargo, aguas abajo, hasta la frontera con Perú, no se observa un incremento significativo en las concentraciones de elementos mayores en relación a los puntos de control, aguas arriba de la ZIL, Zona de Influencia Local de las actividades petroleras.

**Palabras Clave.** Sedimentos, granulometría, elementos mayores, Amazonía, actividades petroleras, Ecuador.

## Introducción

En las últimas décadas, la contaminación de cuerpos de agua dulce con metales pesados es un tema de preocupación debido a la amenaza que representan en la vida acuática y en la salud humana [1, 2]. En sistemas hídricos, los sedimentos son grandes reservorios de todos los contaminantes incluyendo los metales pesados [3–5]. Estos elementos contribuyen significativamente a la contaminación del agua, aire y suelo [2, 6] debido a su toxicidad, persistencia, bioacumulación, biomagnificación, ciclos biogeoquímicos y el riesgo ecológico que representan [1, 5, 7–10].

En sistemas acuáticos, los metales pesados no son biodegradables [9] y se pueden acumular en las partículas suspendidas por procesos físicos (sorción, adsorción), químicos (precipitación, coprecipitación y formación de complejos orgánicos) y biológicos (organismos planctónicos). Dichas partículas, posteriormente precipitan y se incorporan en los sedimentos [4, 7, 8, 11]. Más del 90 % de los metales pesados están asociados con el material particulado suspendido [3], por su gran área superficial disponible para procesos de adsorción [12], por su afinidad por los contaminantes orgánicos [13] y por la capacidad de intercambio catiónico que presentan [14].

Los oxihidróxidos de Fe y Mn, la materia orgánica y las arcillas, particularmente abundantes en sedimentos y suelos de la cuenca Amazónica son los principales soportes de contaminantes ya que funcionan como un recubrimiento de las partículas minerales [8, 14–17]. Los metales pesados se transfieren del agua a los sedimentos o viceversa bajo ciertas condiciones físico-químicas y por diferentes procesos como intercambio iónico, sustitución de un metal, adsorción y disolución [18]. Así, cambios en el pH, temperatura y potencial redox pueden ocasionar la liberación de los contaminantes de una fase sólida a una fase líquida, provocando la contaminación de los sistemas acuáticos [4, 8] o el ingreso de los contaminantes a la cadena trófica [2, 13].

Los metales pesados provienen de fuentes naturales y antropogénicas situadas a lo largo de los sistemas acuáticos. Entre las fuentes naturales están la lixiviación de las rocas, la erosión de los suelos y las actividades volcánicas [19]. Por otro lado, las fuentes antrópicas constituyen la descarga de aguas residuales industriales, aguas servidas, combustión de combustibles fósiles, escorrentía proveniente de la agricultura, deposición atmosférica e industria petrolera [3, 8, 20]. Las actividades petroleras generan grandes impactos ambientales en la biodiversidad tanto a nivel local como global en las etapas de exploración, perforación, explotación o producción, transporte, industrialización petrolera y refinación [21].

En los últimos 40 años la actividad extractiva en la Amazonía Ecuatoriana ha sido la mayor fuente de ingresos económicos del país [22]. Las actividades petroleras han provocado la deforestación de aproximadamente 2 millones de hectáreas; el derrame de más de 65 000 ba-

riles de crudo en bosques, ríos y esteros y la contaminación de la matriz ambiental con metales pesados provenientes de aguas de formación [23]. Además, debido a prácticas poco amigables con el medio ambiente se han generado una gran cantidad de pasivos ambientales (piscinas de desechos, derrames de petróleo, fosas) como resultado de fugas desde los pozos, rupturas del oleoducto y combustión de gas [22].

Los contaminantes asociados con las actividades petroleras pueden ser orgánicos como compuestos derivados de hidrocarburos, inorgánicos como las sales de las aguas de formación ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{+}$  y  $\text{Na}^{+}$ ) y elementos trazas [21]. Los lodos de producción y las aguas de formación contienen altos contenidos de sales y metales pesados como Cd, Pb, Hg, As, Co, Cu, Fe, Se, Mn, Mo, Sb, Ba, Mg, Ag, Tl, Ti, Sn, Zn, Cr y V. Estos pueden originar distintas enfermedades como problemas digestivos, renales, cardíacos, respiratorios, dérmicos y cerebrales. De la misma manera, puede causar problemas reproductivos como mal formaciones, abortos y cáncer.

Algunos metales como el Mn y Cu son micronutrientes esenciales y cumplen una serie de funciones bioquímicas en todos los organismos vivos; sin embargo, si estos elementos exceden ciertos límites de concentración tanto en agua como en sedimentos pueden afectar negativamente al ecosistema y a la salud humana [24, 25]. Así también, elementos como el Cu, Zn, Co y Fe no se consideran peligrosos a menos de que sobrepasen los límites permisibles, pues estos son esenciales para la vida animal. Por el contrario, elementos como el Cd, Cr, As, Hg y Pb son elementos tóxicos para los organismos vivos [5].

La exposición del petróleo no se limita al área cercana de contaminación, pues los componentes más pesados tienden a depositarse en sedimentos por su afinidad con la materia orgánica asociada a las arcillas y de esta forma contaminar las fuentes de agua o ingresar a la cadena trófica aguas abajo [23]. Los metales pesados se encuentran libres, o en formas coloidales, asociados a compuestos orgánicos. Por tanto, es importante analizar los metales pesados en sedimentos, en la biota y en los seres humanos [26]. En los últimos años, el análisis de sedimentos ha constituido una excelente herramienta para estudiar la contaminación por metales pesados en hidrosistemas [27], debido a que los sedimentos permiten evaluar a largo plazo los cambios ocurridos en la cuenca de drenaje [28]. Sin embargo, en Ecuador los estudios realizados sobre el análisis de la calidad de los sedimentos son escasos con unas pocas excepciones como en la región Litoral o Costa, donde se han analizado metales pesados en sedimentos en los ríos de la zona costera como el estero el Salado (Guayas), y el río Cañas (Manta), entre otros [10].

La mayoría de estudios se han realizado en el *bulk* de los sedimentos sin considerar que el factor principal que controla la acumulación de metales pesados es la granulometría [29]. Por lo tanto, en el presente estudio se bus-



ca determinar las concentraciones de elementos mayores en la fracción fina de sedimentos, partículas  $<4\mu\text{m}$ , en muestras provenientes de la cuenca Amazónica petrolera y de zonas de influencia de la refinera de Esmeraldas y compararlas con las concentraciones totales en el *bulk*. Los objetivos específicos son: i) determinar las concentraciones de elementos mayores (K, Mg, Na, Fe, Mn y Al) en la fracción fina de sedimentos; ii) comparar las concentraciones de elementos mayores en la fracción fina de sedimentos con análisis previos realizados en el *bulk* de los sedimentos, iii) determinar si las concentraciones de elementos mayores se encuentran dentro de los límites máximos permisibles establecidos en la normativa ambiental internacional, ya que el país aún no cuenta con normativa ambiental para sedimentos y iv) determinar si la zona de influencia de actividades petroleras en la Amazonía ecuatoriana tiene un efecto sobre las concentraciones en elementos mayores en los sedimentos.

Este estudio se desarrolla en el marco del Programa franco-ecuatoriano MONOIL "Monitoreo ambiental, Salud, Sociedad y Petróleo en el Ecuador" auspiciado por la Agencia Nacional Francesa de Investigación, ANR-2013-SENV-0002 (2014-2017).

### Área de estudio

#### Geología, Hidrología y Meteorología

La cuenca amazónica es el mayor sistema hidrográfico a nivel mundial, por tanto es la reserva más grande de agua dulce en el planeta [30]. Esta se caracteriza por una gran llanura central rodeada por montañas y se extiende desde los Andes hasta el océano Atlántico [31]. Este sistema drena un área extensa, aproximadamente de 6 112 000 km<sup>2</sup>, con un caudal promedio del Río Amazonas de 200 000 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> [32]. Esta cuenca es diversa en el clima y en el tipo de rocas y debido a la extensa llanura de inundación recibe a varios tributarios. La cuenca del Amazonas por su extensión geográfica presenta una fuerte variabilidad espacial en las lluvias y en los regímenes climáticos e hidrológicos, dando lugar a severas inundaciones y fuertes sequías que son perjudiciales para las comunidades que habitan cerca de los cuerpos de agua [33].

La cuenca oriental ecuatoriana se ubica entre las latitudes N 0° 20' y S 4° 30' y las longitudes W 78° y W 75°. Esta cuenca ocupa un área de 135 600 km<sup>2</sup>, correspondiente a tan sólo el 2.2 % de la cuenca amazónica total, y está constituida por la vertiente oriental de los Andes y por la planicie amazónica. La cordillera oriental ecuatoriana presenta un fuerte relieve y desciende de 6 000 m hasta 500 m en tan sólo 100 km. En las pendientes se pueden encontrar rocas eruptivas y capas de cenizas volcánicas, mientras que en el piedemonte existen formaciones aluviales cuaternarias, areniscas y calizas de la edad paleozoica o mesozoica. Las precipitaciones se incrementan desde la cordillera hasta la planicie amazónica alcanzando valores promedio de 3 000 mm año<sup>-1</sup>,

cuyos regímenes son más regulares que en los Andes [34].

En Ecuador las principales cuencas hidrográficas orientales son Napo, Santiago y Pastaza. El río Napo es la cuenca más grande e importante en la región Amazónica, con un caudal promedio de 2 100 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>. Esta cuenca tiene una exportación anual de 63x10<sup>9</sup>m<sup>3</sup> de flujo hídrico y 24x10<sup>3</sup> toneladas de flujo sólido proveniente de la remoción de sedimentos fluviales finos situados en las llanuras del pie de monte [34]. La cuenca del Napo tiene su origen en las vertientes de los volcanes Cotopaxi y Antisana y en los ríos que nacen en las montañas del Chalupas, Llanganates y en la cordillera de los Guacamayos [35]. Los principales afluentes del río Napo son los ríos Aguarico, Misahuallí, Suno, Payamino, Coca, Jivino, Tiputini y Yasuní. Esta cuenca tiene una superficie de drenaje de 26 900 km<sup>2</sup>, una extensión de aproximadamente 450 km desde su fuente hasta la frontera con Perú y una superficie de 31 410 km<sup>2</sup>; cubriendo más del 20 % del Oriente ecuatoriano [36]. Este cuerpo de agua se caracteriza por un régimen turbulento y la presencia de altas pendientes y velocidades [36] y de llanuras de inundación.

Los ríos amazónicos de acuerdo a las características físico-químicas se clasifican en tres categorías que son ríos de aguas blancas, aguas negras y aguas claras [37]. Los ríos de aguas blancas son aquellos que transportan grandes cantidades de partículas arcillosas y sedimentos desde los Andes (60-200 mg L<sup>-1</sup>), tienen pH neutros, altos contenidos de nutrientes y cationes mayores [31, 38-40]. Por otro lado, los ríos de aguas negras contienen gran cantidad de materia orgánica disuelta y particulada (7-10 mg L<sup>-1</sup>) [38], bajas concentraciones de cationes mayores (<10 mg L<sup>-1</sup>), no contienen sedimentos suspendidos, son pobres en nutrientes [31, 39] y su pH es ácido (4-5). No obstante, su color se debe a la lixiviación del humus. A diferencia de ello, los ríos de aguas claras drenan los escudos y constituyen aquellos tributarios que tienen aguas transparentes, pH alcalino y drenan por áreas deficientes en nutrientes [31].

#### Localización de los puntos de muestreo

La zona de estudio comprende tres provincias Orellana, Sucumbíos (Figura 1) y Esmeraldas (Figura 2), donde las actividades petroleras son relevantes; actividades de extracción, producción y transporte en las dos primeras y de refinación en la tercera. Por lo tanto, se consideraron dos subcuencas en la región Amazónica, la cuenca del río Aguarico y la del río Napo, y una subcuenca en la provincia de Esmeraldas como se muestra en las Figuras 1 y 2 respectivamente.

En el marco del programa MONOIL se realizaron dos campañas de muestreo previas. La primera se realizó en julio de 2012 y la segunda en los meses de julio y agosto del 2013. Las dos campañas de monitoreo se centraron en puntos fuertemente contaminados como son los pozos de producción y las piscinas de residuos petroleros

y se recolectaron muestras de aguas, sedimentos, suelo y productos vegetales.

El presente estudio corresponde a la tercera campaña de monitoreo realizada del 8 al 14 de diciembre del año 2014. Durante esta campaña se colectaron muestras de aguas y sedimentos, aguas arribas y aguas abajo de áreas afectadas por actividades petroleras. Seis muestras de sedimentos fueron colectadas en la cuenca del río Aguarico, el cual recibe aguas de los Campos Libertador y Shushufindi, alcanzando hasta Nuevo Rocafuerte y desembocando en el río Napo. Asimismo, ocho muestras de sedimentos se recogieron en la cuenca del río Napo, la cual recoge aguas de los campos Sacha y Auca. Por último, se recolectaron cuatro muestras en la cuenca del río Esmeraldas, dos en el río Teaone, una en un punto de control 38 km aguas arriba de la zona de la refinería y otra aguas abajo proveniente del río Esmeraldas, en el estuario.

### Materiales y Métodos

Las muestras de sedimentos se colectaron en los márgenes de los ríos, usando guantes sin polvo y se colocaron en bolsas de polietileno cerradas herméticamente. Dichas muestras fueron congeladas a una temperatura de  $-18^{\circ}$  y posteriormente liofilizadas. En cada punto de muestreo se midieron parámetros físico-químicos del agua como pH, temperatura, conductividad, oxígeno disuelto y potencial redox con un multiparámetro YSI 556 MPS. Así mismo en el campo se tomaron las coordenadas geográficas de cada punto de muestreo con un GPS utilizando el sistema Universal Transverse de Mercator (UTM-WGS 84).

La extracción de la fracción fina y la digestión de las muestras se realizaron en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad San Francisco de Quito (LIA-USFQ). Mientras que el análisis de elementos mayores en la fracción fina de los sedimentos se realizó por Espectrometría de Absorción Atómica por Llama (AAS) en el Laboratorio de Química Analítica de la USFQ. Por su parte, el análisis de elementos mayores en el *bulk* de los sedimentos se realizó en el laboratorio de "Géosciences Environnement Toulouse" (GET) por Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES) y por Espectrometría de Masa con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS).

La limpieza del material de vidrio y de plástico se realizó con ácido clorhídrico (HCl) al 10 % por una semana a temperatura ambiente. Mientras que los envases de teflón se limpiaron con agua regia (mezcla de  $\text{HNO}_3$  68 % y HCl 37 % en una proporción de 1:2) sobre una placa caliente a una temperatura de  $120^{\circ}\text{C}$ . Dichos recipientes se emplearon para la mineralización de las muestras con el propósito de evitar la contaminación de las mismas.

La extracción de la fracción fina se realizó en función del protocolo desarrollado por Laurence Maurice y Damien Guillaume (Investigadores del GET-Toulouse). Es-

Constituyente	LKSD-3 (%)	Constituyente	LKSD-3 [ $\text{mg g}^{-1}$ ]
$\text{Al}_2\text{O}_3$	12.50	Al	66.15
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	5.70	Fe	39.87
MgO	2.00	Mg	12.06
$\text{Na}_2\text{O}$	2.30	Na	17.06
$\text{K}_2\text{O}$	2.30	K	18.26
MnO	0.20	Mn	1.55

**Tabla 1:** Concentraciones certificadas de elementos mayores expresados en porcentaje de óxidos y en [ $\text{mg g}^{-1}$ ] en el CRM (Certified Reference Material).

ta separación granulométrica consiste en la sedimentación en medio líquido (agua destilada) en base a la ley de Stokes (Ec. 1).

$$v = \frac{2r^2g\Delta(\rho)}{9\mu} \quad (1)$$

Donde:

$v$ : Velocidad ( $\text{ms}^{-1}$ ).

$r$ : Radio de la esfera (m).

$g$ : Gravedad ( $\text{ms}^{-2}$ ).

$\Delta(\rho)$ : Diferencia entre la densidad de la esfera y la densidad del líquido ( $\text{kg m}^{-3}$ ).

$\mu$ : Viscosidad del fluido (Pa s).

Para esto se dejó sedimentar una masa conocida de sedimentos (20 g) en un volumen específico de agua destilada (500 mL). Posteriormente, dicha solución fue homogenizada en el ultrasonido y en base a la ley de Stokes se determinó el volumen de la muestra de agua con sólidos en suspensión que se requería tomar para asegurar el aislamiento de partículas inferiores a  $4 \mu\text{m}$ . Previo al proceso de sedimentación los sedimentos liofilizados se sometieron a un proceso de homogenización, cuarteo y trituración. Las muestras de la fracción fina recuperada se colocaron sobre cajas Petri y para el proceso de secado se sometió a luz infrarroja por un período de 48 horas hasta que la masa de las muestras se estabilizó.

Para la mineralización, aproximadamente 100 mg de las muestras de sedimentos trituradas y homogenizadas se mineralizaron por un ataque triácido: ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$  68 %), ácido fluorhídrico (HF 40 %) y ácido clorhídrico (HCl 37 %) en una proporción de 1:3/2:9/2 respectivamente, sometidas a una temperatura de  $120^{\circ}\text{C}$  en una placa caliente bajo campana de extracción. Así también se emplearon ultrasonidos para asegurar la desagregación de las partículas. El ácido nítrico tiene un fuerte poder oxidante, se emplea para mineralizar la materia orgánica y no interfiere en el análisis de los elementos mayores. Es importante asegurarse que el HF se haya eliminado completamente, caso contrario este puede formar complejos muy estables con los iones interfiriendo en los ensayos. La mineralización se realizó varias veces dependiendo del tipo de sedimento hasta que no exista material refractario. Una vez digeridas las



Parámetros	Elementos							*N
	K	Mg	Fe	Na	Mn	Al		
Precisión	Min. (%)	0.016	0.010	0.030	0.954	0.206	0.020	3
	Máx. (%)	0.575	0.034	0.219	1.440	1.425	0.205	
	Prom. (%)	0.219	0.020	0.103	1.131	0.673	0.093	
	$\sigma$	0.003	0.0001	0.001	0.003	0.007	0.001	
Reproducibilidad	Min. (%)	23.124	14.855	-9.935	1.215	21.928	3.483	
	Máx. (%)	41.352	38.430	7.635	9.030	30.458	21.182	
	Prom. (%)	34.397	23.195	-0.497	5.516	26.511	14.113	
	$\sigma$	0.099	0.132	0.089	0.040	0.043	0.094	
Límite de detección (mg/L)	0.007	0.047	0.003	0.008	0.003	0.196		
Límite de cuantificación (mg/L)	0.025	0.158	0.009	0.026	0.010	0.653		

\*N es el número de blancos y CRMs utilizados

Tabla 2: Precisión, reproducibilidad (% mínimos, máximos, promedio y desviación estándar), límites de detección (LD) y de cuantificación (LC) de las mediciones por Espectrometría de Absorción Atómica (USFQ, Ecuador).

Parámetros	Elementos							*N
	K	Mg	Fe	Na	Mn	Al		
Precisión	Prom. (%)	4.703	1.283	2.646	1.129	2.103	2.521	5
	$\sigma$	0.039	0.036	1.029	0.060	2.919	1.542	
Reproducibilidad	Prom. (%)	-0.312	9.175	-2.485	-1.825	-3.583	-7.578	
Límite de detección (mg/L)	0.021	0.004	0.002	0.091	0.053	0.006		
Límite de cuantificación (mg/L)	0.070	0.015	0.008	0.305	0.176	0.020		

\*N es el número de blancos y CRMs utilizados

Tabla 3: Precisión, reproducibilidad, límites de detección (LD) y de cuantificación (LC) de las mediciones por ICP-OES e ICP-MS (GET, Toulouse, Francia).

muestras, el residuo se recuperó en una matriz de ácido nítrico al 2 % v/v y se realizaron dos diluciones a partir de las soluciones patrones.

La digestión se realizó en sets de nueve muestras incluyendo 1 blanco, con el propósito de descartar o verificar cualquier tipo de contaminación puntual del entorno o de los reactivos y 2 CRMs (Certified Reference Material) con el fin de calcular la precisión y la reproducibilidad de las medición (Tabla 2). El CRM empleado fue el LKSD-3, correspondiente a sedimentos de lagos Canadienses, debido a la similitud de su matriz con las muestras de sedimentos analizados en este estudio. Las concentraciones certificadas de los elementos mayores en el CRM utilizado se presentan en la Tabla 1.

Las fórmulas empleadas para determinar el límite de detección (LD), límite de cuantificación (LC), precisión, reproducibilidad y recuperación se presentan a continuación:

$$\text{Limite de deteccion} = 3 \times \sigma \text{ blancos} \quad (2)$$

$$\text{Limite de cuantificacion} = 10 \times \sigma \text{ blancos} \quad (3)$$

$$\text{Precision (\%)} = \frac{\sigma \text{ CRMs}}{\text{Promedio de la concentracion CRMs}} \times 100 \quad (4)$$

$$\text{Reproducibilidad} = \frac{\text{Concentracion media de CRM}}{\text{Concentracion certificada CRM}} - 1 \quad (5)$$

$$\text{Recuperacion} = \frac{\text{Concentracion obtenida de analisis}}{\text{Concentracion certificada}} \times 100 \quad (6)$$

En las Tablas 2 y 3 se presentan los límites de detección (LD), límites de cuantificación (LC), precisión y reproducibilidad para los seis elementos mayores analizados (K Mg, Na, Fe, Mn y Al) por Espectrometría de Absorción Atómica en la USFQ (Ecuador) y por ICP-OES (K, Mg, Na) e ICP-MS (Al, Fe, Mn) en GET (Toulouse, Francia), respectivamente.

Finalmente, los elementos mayores como Na, K, Mg, Fe, Mn y Al se determinaron por espectrometría de absorción atómica. El Espectrómetro de Absorción Atómica que se empleó para la determinación de los elementos mayores es un BUCK SCIENTIFIC 205 AAS.

Elemento	Rango dinámico [mg L <sup>-1</sup> ]
K	0.03-3
Mg	0.005-1.5
Na	0.005-1
Fe	0.05-5
Mn	0.03-2.5
Al	2.00-50

**Tabla 4:** Rango dinámico utilizado para los análisis de elementos mayores por Espectrometría de Absorción Atómica.

Todos los elementos a excepción del Al se determinaron utilizando una llama aire/acetileno. Mientras que para la determinación del Aluminio se utilizó una llama óxido nitroso/acetileno. Las soluciones madre multi-elementales se prepararon a partir de soluciones madre mono-elementales de 1000 mg L<sup>-1</sup>, en función del rango dinámico del Espectrómetro de Absorción Atómica (Tabla 4); para el potasio (0.5-3.0 mg L<sup>-1</sup>), magnesio (0.5-1.5 mg L<sup>-1</sup>), manganeso (0.5-2.5 mg L<sup>-1</sup>), hierro (0.5-5.0 mg L<sup>-1</sup>), aluminio (2.0-15.0 mg L<sup>-1</sup>) y sodio (0.5-1.0 mg L<sup>-1</sup>). El blanco correspondía a una solución de ácido nítrico al 2 %.

### Resultados y Discusión

En este trabajo de investigación se analizaron 14 muestras de sedimentos colectadas aguas arriba y aguas abajo de la Zona de Influencia Local (ZIL) de las actividades petroleras en las cuencas de los ríos Napo y Aguarico, en diciembre de 2014, en el marco del Programa MONOIL. La ZIL es el área de impacto socio-ambiental afectada por la actividad petrolera asignada por el PRAS desde 2008, en base a la localización de los pasivos sociales y ambientales en la Amazonía Ecuatoriana. Así

Referencia	% Fracción fina (Ley de Stokes)	% Fracción fina (Laser)
M14-01	5.48	7.50
M14-02	7.52	10.75
M14-03	25.25	11.63
M14-06	42.96	17.93
M14-07	28.45	12.36
M14-08	40.75	25.31
M14-09	17.43	8.74
M14-10	13.33	15.63
M14-13	10.31	10.77
M14-17	13.93	9.44
M14-18	26.54	13.45
M14-19	19.78	19.10
M14-20	20.59	15.11
M14-24	27.31	10.97
M14-25	2.04	13.12
M14-26	33.58	17.10
M14-27	13.21	9.42
M14-28	19.15	10.50

**Tabla 5:** Fracción fina recuperada en los sedimentos muestreados en la región Amazónica y en la cuenca de Esmeraldas del 8 al 14 de diciembre del 2014 (Programa MONOIL).

también, se estudiaron cuatro muestras de sedimentos tomadas aguas arriba y aguas abajo de los puntos de descarga de la Refinería de Esmeraldas (Figura 1 y Figura 2). Estas muestras fueron congeladas en el campo y luego liofilizadas para preservar sus características químicas [41].

Durante este estudio, se extrajo la fracción fina de los sedimentos correspondiente a las partículas de arcilla o partículas inferiores a 4 μm, según la caracterización realizada por Henderson [42]. En la actualidad, no existen métodos estandarizados para la extracción de la fracción fina, por tanto se empleó una metodología desarrollada por L. Maurice y colaboradores, con el propósito de obtener resultados fiables. Los análisis de Espectrometría de Absorción Atómica (AAS, en la USFQ) presentan una buena precisión, no obstante no muestran buena reproducibilidad porque esta supera el 10 % para todos los elementos a excepción del Na y Fe (Tabla 2). Esto se debe a que los porcentajes de recuperación de los elementos analizados oscilan entre el 71 % y 123 %, por tanto las concentraciones de elementos mayores medidas fueron ajustadas en función del CRM. Por el contrario, los análisis realizados por ICP-OES e ICP-MS en Francia (laboratorio GET) muestran una buena reproducibilidad porque esta es inferior al 10 %, con porcentajes de recuperación que oscilan entre el 92 % y 109 % (Tabla 3).

### Caracterización físico-química del agua

Los parámetros *in situ* que se midieron en los cuerpos de agua fueron pH, conductividad, temperatura, oxígeno disuelto y potencial de óxido reducción (Tabla 1). En las cuencas de los ríos Aguarico y Napo, las temperaturas varían entre 20 y 27°C. Estos se encuentran dentro del rango típico de temperatura para la región Amazónica, el mismo que oscila entre 16 y 28°C [43]. Sin embargo, en la cuenca del río Esmeraldas los ríos alcanzan temperaturas hasta 30°C debido a su poca profundidad en algunos sitios.

El pH de los ríos de las cuencas del Napo y Aguarico oscila entre 3.7 y 6.8 presentando valores de pH ácidos o neutros. Este parámetro se encuentra fuera del rango permisible por la Legislación Ecuatoriana, el cual varía entre 5 y 9 [44]. Valores bajos de pH permiten la movilización y la disponibilidad de compuestos tóxicos para plantas y organismos acuáticos [45]. Una disminución del pH provoca una disolución de carbonatos e hidróxidos minerales y un incremento de la desorción de cationes (Fe, Mn, Ni, Cu, Co, Zn). La acidez de los ríos se debe principalmente a la deposición atmosférica, o a las descargas de aguas residuales [45]. Sin embargo, hay que considerar que algunos ríos amazónicos, denominados “aguas negras”, como el Río Tiputini son naturalmente ácidos, debido a la solubilización de ácidos húmicos y fúlvicos provenientes de la erosión de los suelos forestales. Por tanto, un pH bajo no necesariamente significa contaminación antropogénica. Por otro lado, en la cuenca del río Esmeraldas el pH está entre

Código	Estación	Río	Temperatura (°C)	Conductividad ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )	pH	O <sub>2</sub> disuelto (mg L <sup>-1</sup> , % sat)	ORP (mV)
M14-01	Puerto Napo	Napo	20.17	147.00	6.70	-	44.70
M14-02	Coca	Napo	24.83	129.00	6.40	-	23.80
M14-03	Dayuma	Rumiyacu	25.32	107.00	4.99	6.53/79.10	94.70
M14-06	Estación USFQ	Tiputini	25.20	37.00	4.30	6.30/76.70	116.50
M14-07	Guiyero	Tiputini	25.63	41.00	4.30	5.67/70.00	89.00
M14-08	Nuevo Rocafuerte	Tiputini	25.84	23.00	4.44	5.39/65.00	115.70
M14-09	Nuevo Rocafuerte	Napo	27.34	76.00	6.41	6.38/81.00	77.70
M14-10	Nuevo Rocafuerte	Aguarico	26.74	63.00	6.05	6.08/76.00	91.00
M14-13	Coca	Coca	22.10	140.00	6.66	7.92/91.00	80.00
M14-17	Y de Herbert	Aguarico	24.68	87.00	5.95	7.10/86.50	115.00
M14-18	Dureno	Dureno	25.08	80.00	3.73	6.01/73.00	134.00
M14-19	Shushufindi	Shushufindi	25.43	53.00	5.20	4.81/58.70	112.70
M14-20	La Victoria	La Victoria	25.06	88.00	5.40	5.45/66.00	80.00
M14-24	Lumbaqui	Aguarico	21.05	115.00	6.86	8.00/91.00	63.70
M14-25	REE Esmeraldas	Canal 2 REE	30.16	1446.00	7.41	8.28/110.60	19.50
M14-26	REE Esmeraldas	Teaone	29.95	1495.00	7.26	6.70/82.00	18.90
M14-27	Carlos Concha Torres	Teaone	26.88	428.00	8.01	8.91/111.60	58.30
M14-28	Estuario	Esmeraldas	26.85	2710.00	7.40	6.70/85.00	45.60

Tabla 6: Parámetros *in-situ* medidos en los ríos muestreados en la región Amazónica y en la cuenca de Esmeraldas del 8 al 14 de diciembre del 2014 (Programa MONOIL).

Código	C-org (%)	C-inorg (%)	N-org (%)	C	N
M14-01	0.19	0.16	0.02	0.35	0.03
M14-02	1.25	0.16	0.10	1.41	0.12
M14-03	0.39	0.04	0.04	0.43	0.06
M14-06	1.83	0.16	0.15	1.99	0.17
M14-07	1.74	0.16	0.11	1.90	0.13
M14-08	1.56	0.13	0.14	1.69	0.17
M14-09	0.87	0.09	0.06	0.96	0.08
M14-10	1.56	0.19	0.12	1.76	0.14
M14-13	0.69	0.09	0.05	0.79	0.06
M14-17	0.55	0.10	0.04	0.65	0.05
M14-18	3.54	0.39	0.27	3.93	0.31
M14-19	3.08	0.22	0.24	3.30	0.26
M14-20	1.95	0.20	0.15	2.15	0.18
M14-24	0.85	0.20	0.06	1.06	0.08
M14-25	9.18	1.01	0.88	10.18	1.07
M14-26	0.85	0.00	0.08	0.85	0.10
M14-27	1.64	0.00	0.20	1.37	0.18
M14-28	1.12	0.00	0.10	0.84	0.08

Tabla 7: Porcentajes de carbono y nitrógeno orgánico en el *bulk* de los sedimentos.

7 y 8 cumpliendo con la normativa ecuatoriana. Estos valores altos de pH se deben a la presencia de elevadas concentraciones de Mg y Na.

En la cuenca del río Napo, la conductividad oscila entre 23 (M14-08) y  $147\mu\text{S cm}^{-1}$ (M14-01); en la cuenca del río Aguarico la conductividad registra valores entre 53 (M14-19) y  $115\mu\text{S cm}^{-1}$  (M14-24) y en la cuenca del río Esmeraldas la conductividad fluctúa entre 428 (M14-27), Río Teaone aguas arriba) y  $2\ 710\mu\text{S cm}^{-1}$  (M14-28) en el estuario. En el río Teaone, la conductividad se incrementa de 428 hasta  $1\ 496\mu\text{S cm}^{-1}$  (M14-26), algunos metros aguas abajo de la refinera, debido a la descarga de efluentes enriquecidos en sales. En el Río Esmeraldas, valores elevados de conductividad se debe

Código	K (mg g <sup>-1</sup> )	Mg (mg g <sup>-1</sup> )	Na (mg g <sup>-1</sup> )
M14-01	20.39±0.67	10.81±0.57	18.84±0.37
M14-02	16.81±0.09	10.12±0.09	14.31±0.06
M14-03	5.48±0.05	4.36±0.03	3.82±0.05
M14-06	7.44±0.07	5.29±0.02	4.18±0.02
M14-07	6.56±0.08	4.97±0.05	4.10±0.05
M14-08	8.43±0.04	6.19±0.09	4.01±0.03
M14-09	15.47±0.28	13.59±0.15	19.87±0.06
M14-10	15.39±0.54	14.85±0.67	18.03±0.6
M14-13	14.96±0.02	15.88±0.06	22.39±0.00
M14-17	13.96±0.07	14.51±0.18	21.78±0.17
M14-18	8.09±0.28	8.86±0.29	13.21±0.47
M14-19	5.87±0.18	4.50±0.14	6.50±0.23
M14-20	5.76±0.14	6.35±0.13	9.67±0.20
M14-24	13.33±1.02	13.79±1.30	16.85±1.24
M14-25	5.19±0.09	14.49±0.23	9.44±0.14
M14-26	6.99±0.03	12.31±0.13	21.14±0.44
M14-27	6.10±0.13	13.24±0.05	21.36±0.02
M14-28	7.69±0.08	16.86±0.07	24.12±0.26

Tabla 8: Concentración promedio de elementos mayores en el Bulk de los sedimentos determinados por ICP-OES (GET, Toulouse).

a la presencia de altas concentraciones de sales, Na y Mg, debido a la entrada de aguas marinas en el estuario. Por otro lado, las conductividades encontradas en los ríos de la Amazonía están afectadas principalmente por la geología del área a través de la cual fluye el agua. Así, el granito está compuesto por materiales inertes que no se ionizan por ende se presentan bajas conductividades. Por el contrario, cuando el agua fluye por suelos arcillosos las conductividades son mayores debido a la presencia de materiales ionizables [45]. La EPA sugiere un rango de conductividad entre  $150\text{-}500\mu\text{S cm}^{-1}$ . Por tanto, los valores de conductividad en todos los sitios muestreados son superiores o inferiores a lo sugerido.

Código	Al (mg g <sup>-1</sup> )	Fe (mg g <sup>-1</sup> )	Mn (μg g <sup>-1</sup> )
M14-01	73.55±4.51	37.46±1.31	855.76±1.71
M14-02	71.98±0.74	39.08±0.43	880.68±1.25
M14-03	45.97±0.75	25.47±0.39	431.90±1.65
M14-06	62.89±0.44	31.70±0.16	595.97±0.88
M14-07	55.34±0.13	28.74±0.46	498.51±1.94
M14-08	72.07±0.88	35.54±0.56	719.54±1.72
M14-09	72.91±0.09	38.61±0.23	785.18±0.53
M14-10	73.07±0.69	39.51±0.48	862.21±0.83
M14-13	78.73±0.96	48.06±0.46	915.19±1.69
M14-17	74.44±1.77	41.96±0.59	720.14±1.90
M14-18	76.80±1.52	40.77±0.77	1275.54±2.51
M14-19	80.83±3.48	45.76±1.73	920.66±1.97
M14-20	81.87±1.71	49.58±1.23	754.63±1.97
M14-24	70.25±0.11	39.17±0.34	698.76±0.74
M14-25	72.24±0.84	32.28±0.23	745.20±0.52
M14-26	79.48±1.06	35.80±0.29	472.05±0.64
M14-27	75.09±0.74	48.53±0.46	538.71±0.99
M14-28	82.27±1.35	45.90±0.86	672.57±1.68

**Tabla 9:** Concentraciones de elementos mayores en el bulk de los sedimentos determinados por ICP-MS (GET, Toulouse).

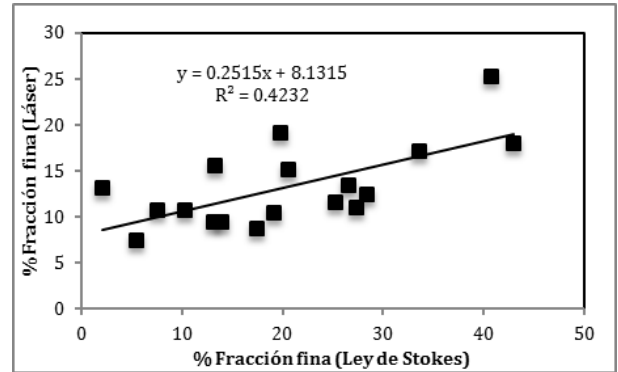
El oxígeno disuelto (OD) oscila entre 4.8 y 8.9 mg L<sup>-1</sup>, no obstante en la Legislación Ecuatoriana se establece que el OD no puede ser inferior a 6 mg L<sup>-1</sup> ni al 80 % de saturación [44]. Por tanto, únicamente para la cuenca del río Esmeraldas se cumple con la legislación ecuatoriana. El OD varía con la temperatura, a mayores temperaturas menores concentraciones de oxígeno disuelto. Sin embargo, las elevadas concentraciones de oxígeno disuelto, en el punto M14-25, a pesar de las altas temperaturas se debe a procesos de oxigenación artificial en la refinería de Esmeraldas previo a la descarga del agua industrial a cuerpos de agua, alcanzando hasta un 110 % de saturación. El OD es un excelente indicador de la cantidad de bacterias y animales acuáticos presentes en el área. El potencial de óxido reducción es inferior a 600 mV en todos los puntos de muestreo, por tanto se pueden considerar como ambientes pobres en oxígeno.

### Caracterización química y granulométrica de los sedimentos

#### Extracción de la fracción fina

El análisis de la granulometría es indispensable en el estudio de los sedimentos porque la capacidad de adsorción de elementos metálicos depende principalmente del tamaño de las partículas. Así sedimentos ricos en arcillas y materia orgánica tienden a adsorber nutrientes o cationes en su superficie [14].

La fracción fina extraída según la Ley de Stokes oscila entre el 5 y 42 %, esto concuerda con lo encontrado en otros estudios en ambientes similares donde los porcentajes de arcilla recuperados varían entre el 23 y 52 % [46]. En el proceso de extracción de la fracción fina surgieron anomalías como la formación de agregados arcillosos debido a las cargas eléctricas existentes. Estos agregados son resistentes a la dispersión porque gran parte de las sustancias húmicas se encuentran adheridas a la parte mineral de los sedimentos formando complejos órgano-minerales con las arcillas [9]. Otro factor que



**Gráfico 1:** Comparación entre la fracción fina (partículas <4μm) extraída por la ley de Stokes y la determinada por Granulometría Láser.

afecta el proceso de sedimentabilidad es la salinidad, porque esta incita a la formación de flóculos de partículas finas acelerando el proceso de sedimentación [47]. Este fenómeno se evidenció en las muestras provenientes de la Refinería de Esmeraldas. Por tanto, se requiere utilizar pre-tratamientos y agentes dispersantes, como el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> o metafosfato de sodio, con el propósito de eliminar la materia orgánica, las sales solubles y los agregados y de esta forma dispersar las partículas de arcilla. Cabe indicar que en este estudio se empleó una desagregación de las partículas vía ultra-sonidos sin ningún tipo de dispersante debido a que estos pueden interferir en la determinación de los elementos mayores, lo cual imposibilitó la completa dispersión del sedimento.

Análisis realizados por Richter y Svartz sugieren que es importante la destrucción de la materia orgánica cuando el contenido de carbono orgánico es superior al 0.3 % [48]. Pues, estudios previos demostraron que se obtiene una suficiente dispersión con el ultrasonido tras la eliminación de la materia orgánica [49]. Es por ello que el método en función de la ley de Stokes funciona únicamente para la muestra M14-01 cuyo contenido de carbono orgánico es del 0.19 % (Tabla 5). De manera general, la fracción fina extraída en base a la ley de Stokes excede en un 42 % a la fracción fina determinada por Granulometría Láser (Gráfico 1). Por tanto, la fracción fina extraída corresponde principalmente a partículas de arcilla.

Para el análisis de la granulometría con el granulómetro láser se emplea hexametafosfato de sodio como agente dispersante para obtener una pasta homogénea. Sin embargo, este análisis únicamente permite conocer la distribución de los tamaños de partículas presentes en los sedimentos, más no permite extraer la fracción fina para análisis químicos posteriores. Por tanto, la metodología en base a ley de Stokes es una buena aproximación para el análisis de partículas inferiores a 4 μm. Este método desarrollado para la extracción de la fracción fina permite determinar el porcentaje en masa de cada tamaño de partícula que está en la suspensión sedimento-agua. Una de las suposiciones es que todas las partículas son esféricas con una densidad uniforme, las cuales sedimentan libremente en un fluido no turbulento a temperatura constante. No obstante, para lograr una buena efi-

Código	K (mg g <sup>-1</sup> )	Mg (mg g <sup>-1</sup> )	Na (mg g <sup>-1</sup> )	Al (mg g <sup>-1</sup> )	Fe (mg g <sup>-1</sup> )	Mn (mg g <sup>-1</sup> )
M14-01	15.566	7.932	8.994	26.556	24.608	0.721
M14-02	12.540	7.761	4.922	40.884	32.294	0.893
M14-03	3.001	3.314	2.091	45.710	25.390	0.418
M14-06	4.036	4.045	2.899	56.340	31.520	0.534
M14-07	5.505	3.720	2.111	37.630	28.580	0.387
M14-08	5.155	3.875	1.689	34.406	35.460	0.464
M14-09	12.733	10.478	8.905	58.251	30.755	0.582
M14-10	12.891	8.953	7.217	46.185	23.485	0.744
M14-13	14.851	9.885	8.728	41.916	33.155	0.739
M14-17	12.659	13.730	9.222	59.408	31.347	0.587
M14-18	5.302	6.272	5.608	47.817	40.380	0.770
M14-19	3.125	5.322	2.189	42.264	41.920	0.748
M14-20	3.455	4.163	3.759	44.806	49.260	0.677
M14-24	9.584	8.593	9.970	47.074	25.171	0.593
M14-25	3.225	11.823	7.054	36,501	18.879	0.625
M14-26	5.180	11.295	11.806	35,197	21.097	0.378
M14-27	4.404	7.576	10.260	31,198	47.990	0.418
M14-28	5.913	13.016	10.464	34,171	45.600	0.631

**Tabla 10:** Geoquímica de los elementos mayores en la fracción fina de los sedimentos (partículas <4 $\mu$ m) determinados por AAS (USFQ, Ecuador).

ciencia del proceso la muestra de sedimento debe estar completamente dispersa en agua.

El tamaño del grano determinado por el granulómetro láser indica que la mayoría de los sedimentos analizados se encuentran dominados por partículas entre 4 y 63  $\mu$ m (promedio 54.4 %), a excepción de las muestras M14-03 y M14-17 provenientes de las cuencas de los ríos Aguarico y Napo donde predominan las partículas gruesas, mayores a 63  $\mu$ m las cuales están dominadas por cuarzos [50]. Los sedimentos analizados tienen una alta cantidad de arcilla (promedio -13.2 %) y el 32.3 % corresponden a partículas superiores a 63  $\mu$ m (Gráfico 2). La variación de la granulometría de un sitio a otro indica las diferentes fuentes de las muestras de los sedimentos [51].

#### **Carbono y Nitrógeno orgánico de los sedimentos**

Las concentraciones de C-inorgánico fueron inferiores al 10 % en la mayoría de las muestras (Tabla 7). Sin embargo, en las muestras M14-24 y M14-01 dichas concentraciones fueron del 19 y 44 %, respectivamente. Mientras que para las muestras M14-10, M14-13 y M14-17 las concentraciones oscilaron entre 11 y 15 %. Las concentraciones de N-orgánico varían entre 0.02 % y 0.88 %. En la cuenca del río Napo y del río Aguarico se encontraron áreas con concentraciones medias de componentes orgánicos (C-orgánico >1.25 % y N-orgánico >0.10 %) y zonas de bajas concentraciones de materiales orgánicos (C-orgánico <0.87 % y N-orgánico <0.10 %). Por su parte, en la cuenca del río Esmeraldas se encontraron regiones con altas concentraciones de elementos orgánicos (C-orgánico >9 % y N-orgánico >0.8 %). Así como también zonas con concentraciones medias (C-orgánico >1.12 % y N-orgánico >0.10 %) y bajas de material orgánico (C-orgánico <0.85 % y N-orgánico <0.10 %).

De manera general, las muestras con altos contenidos

de arcilla (>10 %) presentan las concentraciones más altas de componentes orgánicos (Gráfico 3 y Gráfico 4). La relación del C-orgánico con la granulometría fina o limo (<4 $\mu$ m) no es significativa con un coeficiente de correlación de 0.17 (Gráfico 3). Mientras que el  $r^2$  entre N-orgánico y la fracción fina es de 0.38.

#### **Potasio y Sodio en sedimentos**

El tamaño del grano influye en la cantidad de materiales orgánicos presentes, lo cual concuerda con estudios similares donde se encontraron que las concentraciones más altas de materia orgánica están asociadas con las partículas más finas tales como arcilla y limo [52]. Por tanto, conforme disminuye el tamaño del grano hay una mayor acumulación de material orgánico debido a su gran área superficial, gran capacidad adsorbente y gran capacidad de intercambio catiónico, funcionando como un atrapador de cationes metálicos [53]. Esto se debe a que las partículas limo-arcillosas tienden a cubrirse rápidamente con una capa de materia orgánica por las cargas negativas que tienen asociadas con sus estructuras [54]. Sin embargo, algunas muestras se comportan de forma contraria porque a pesar de tener altas concentraciones de arcilla presentan bajas concentraciones de elementos orgánicos. Esto puede estar dado por un efecto de dilución provocado por el ingreso abundante de material inorgánico (cuarzo), la baja cantidad de material orgánico que ingresa a estos cuerpos de agua o la menor producción primaria por la presencia de gran cantidad de material fino en suspensión [54].

La relación C:N de los sedimentos superficiales analizados se encontraron en un rango entre 7.6 (M14-27) y 13.6 (M14-24) (Tabla 7). Altos niveles de C:N se atribuyen a la gran influencia de los aportes fluviales de ríos locales, los cuales incrementan el aporte del sedimento



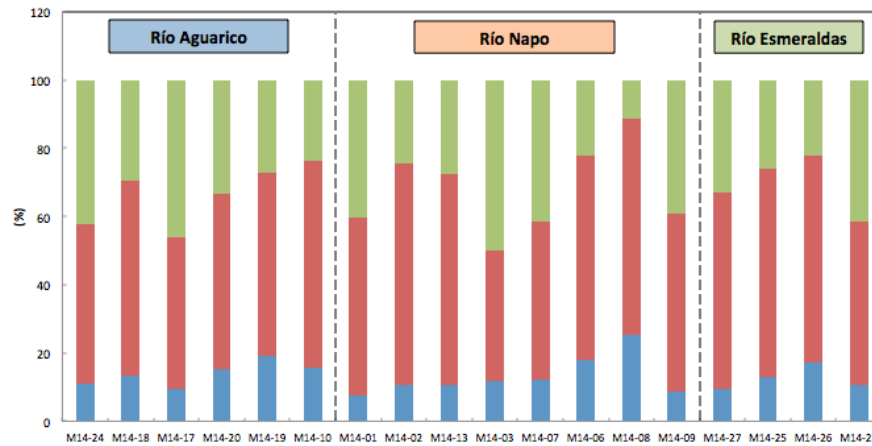


Gráfico 2: Distribución de la granulometría (por Láser) de las muestras para las fracciones superiores a 63µm (■), entre 4 y 63µm (■), e inferiores a 4µm (■).

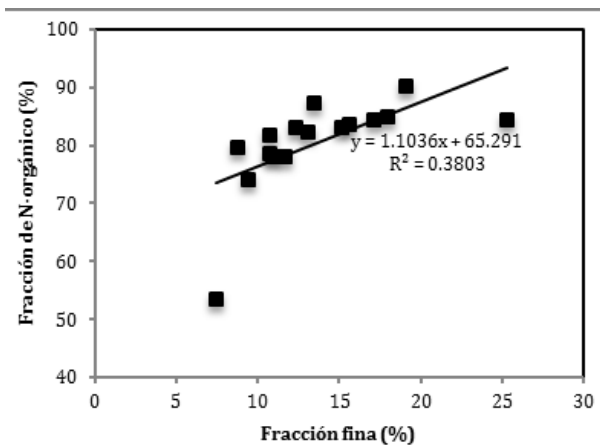


Gráfico 3: Relación de la fracción fina (<4µm) con la fracción de N-orgánico.

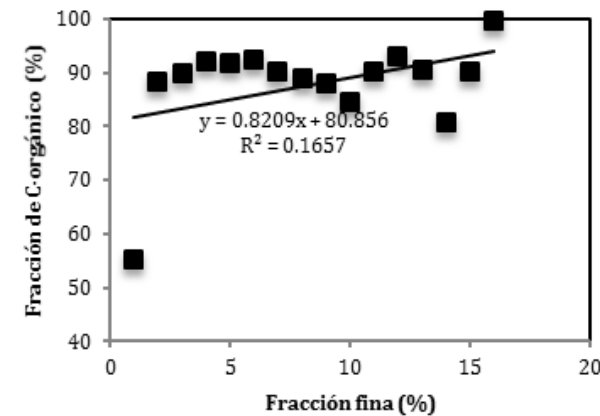


Gráfico 4: Relación de la fracción fina (<4µm) con la fracción de C-orgánico.

terígeno, la descomposición del detrito orgánico en la columna de agua o la degradación de compuestos nitrogenados. Por el contrario relaciones C:N bajas indican que existe una menor producción planctónica primaria [54].

**Elementos mayores en los sedimentos**

Las concentraciones de los elementos mayores decrecen en el orden Al >Fe >Na >K >Mg >Mn. Las mayores concentraciones de Mn, Al y Fe se encontraron en

la cuenca del río Aguarico. Mientras que en la cuenca del río Esmeraldas se encontraron altas concentraciones de Mg y Na. Por último, elevadas concentraciones de K se localizaron en la cuenca del río Napo. El Mg, K y Na se encuentran disponibles como cationes de intercambio, estos son adsorbidos en las cargas negativas de las partículas arcillosas y en la materia orgánica y se encuentran parcialmente disponibles en el medio. El Mg, Al y Fe están asociados con la estructura octahedral de las arcillas y por su baja movilidad geoquímica estos se encuentran en los sedimentos [31].

Los análisis realizados en el *bulk* muestran que en todas las muestras las concentraciones en la fracción fina son inferiores o iguales que las del *bulk* de los sedimentos. Así el 43 % del Na, el 93 % del Fe, el 70 % de Mg, el 62 % Mn y el 94 % de K están asociados con la fracción fina de los sedimentos (Gráfico 10 y Gráfico 11). Dichos porcentajes se obtuvieron a partir de los coeficientes de correlación determinados entre las concentraciones de los elementos mayores encontradas en el *bulk* en relación a las determinadas en la fracción fina.

Se puede observar que en las cabeceras de los ríos Napo, Aguarico y Teaone, las concentraciones en elementos mayores en los sedimentos son en su mayoría elevadas, en comparación a los puntos más abajo, en la llanura. Esto se debe principalmente a la erosión de las rocas que forman parte de los Andes, el piedemonte andino. Esta Sierra es bastante joven y es sometida a una intensa erosión debido a la climatología tropical local. Además, la acidez del agua lluvia favorece la lixiviación de las capas geológicas enriquecidas en elementos químicos mayores y trazas. Mientras tanto, en la llanura Amazónica, los ríos reciben aguas y sedimentos de tributarios forestales, diluyendo la señal andina.

**Aluminio y Hierro**

El Fe y el Al son los componentes químicos mayores de los sedimentos [51]. Las concentraciones de Al son casi el doble de las concentraciones de hierro para todos los casos (Gráfico 5). Esto se debe a que el Al es el segundo metal más abundante y constituye el 8.1 % de la corteza terrestre. Existe una tendencia en la distribución

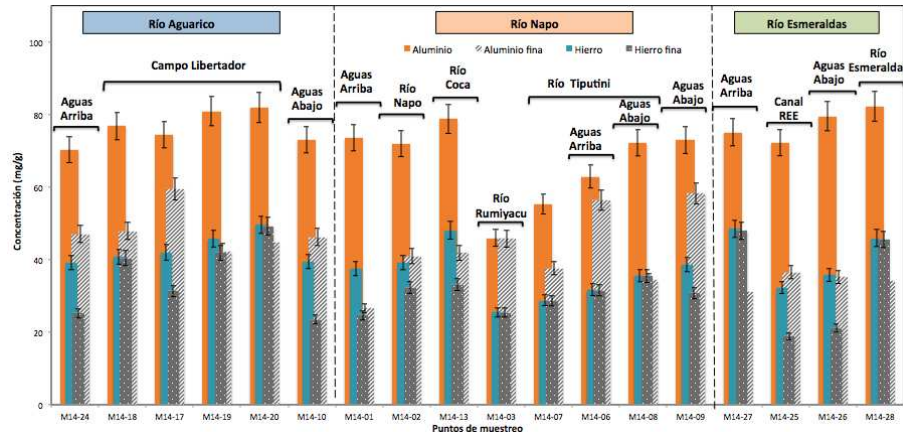


Gráfico 5: Concentraciones de Aluminio y Hierro en la fracción fina y en el bulk de sedimentos, en las cuencas de los Ríos Aguarico, Napo y Esmeraldas.

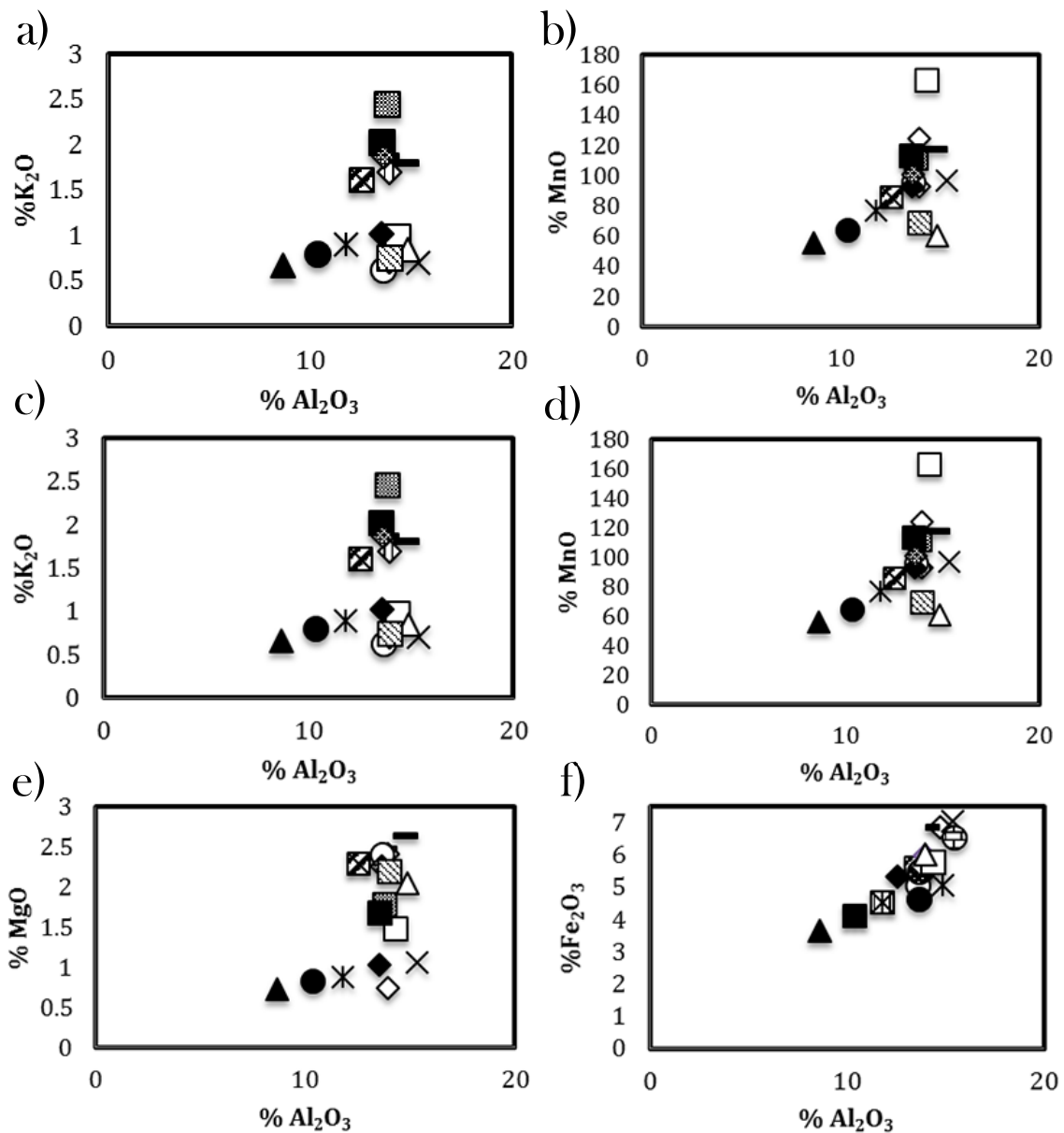


Gráfico 6: Diagramas de variación de los elementos mayores en el bulk de los sedimentos. (■) M14-01, (▣) M14-02, (▲) M14-03, (×) M14-06, (●) M14-07, (◆) M14-08, (⊙) M14-09, (○) M14-10, (—) M14-13, (◻) M14-18, (◊) M14-19, (×) M14-20, (⊗) M14-24, (◌) M14-25, (△) M14-26, (◡) M14-27, (◡) M14-28.

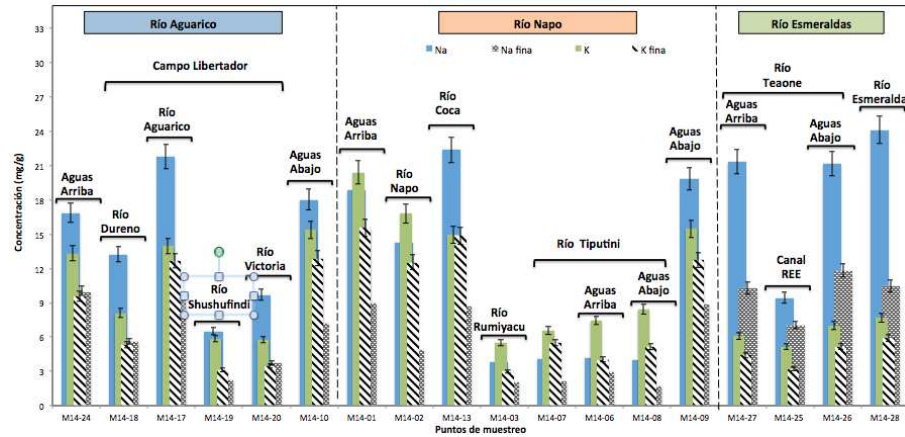


Gráfico 7: Concentraciones de Sodio y Potasio en la fracción fina y en el bulk de sedimentos, en la cuenca de los Ríos Aguarico, Napo y Esmeraldas.

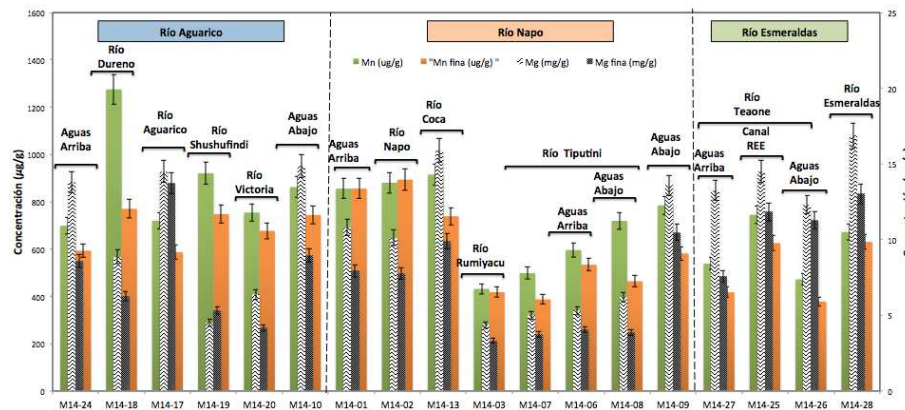


Gráfico 8: Concentraciones de Manganeso y Magnesio en la fracción fina y en el bulk de sedimentos, en la cuenca de los Ríos Aguarico, Napo y Esmeraldas.

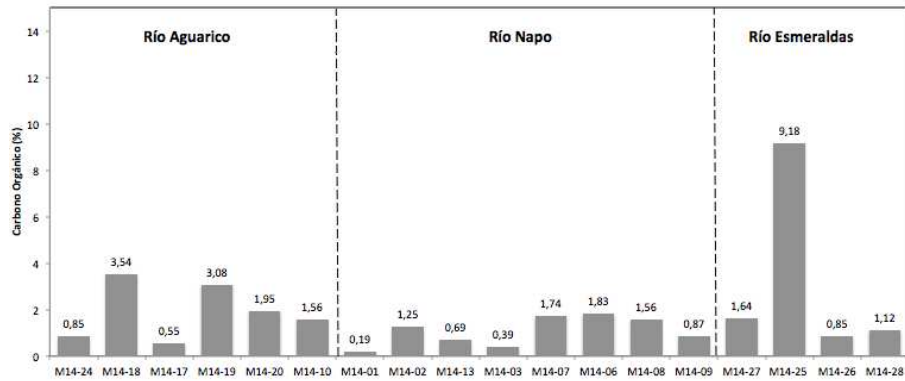


Gráfico 9: Contenido de C-orgánico en las cuencas de los ríos Aguarico, Napo y Esmeraldas.

de las concentraciones del Fe y Al, independientemente del cuerpo de agua muestreado. Esta tendencia está dada porque el Al proviene principalmente de fuentes naturales y es uno de los principales constituyentes de los silicatos que componen las arcillas minerales [55]. Así las concentraciones de Al encontradas en este estudio oscilan entre 4.58 y 8.2 %. No obstante, todavía no existen guías establecidas de los valores máximos permisibles para el Al en sedimentos para la protección de plantas y animales acuáticos. Sin embargo, la disolución del Al ocurre cuando los valores de pH son bajos, significando un riesgo en la vida acuática [50].

En la cuenca del Río Aguarico, los valores de Al y Fe aguas arriba y aguas abajo son muy similares. Las con-

centraciones de Al y Fe aguas arriba son de 70 y 39 mg g<sup>-1</sup>, respectivamente, mientras que aguas abajo estas son de 73 y 39 mg g<sup>-1</sup>. En el Campo Libertador (M14-20) se evidencian las concentraciones más altas de Al y Fe, con concentraciones de 82 y 48 mg g<sup>-1</sup>, respectivamente.

En la cuenca del Río Napo, de igual manera, hay una similitud entre las concentraciones de aluminio encontradas en el Río Napo, aguas arriba y aguas abajo. Aguas arriba se presenta una concentración de Al de 73 mg g<sup>-1</sup> y de Fe de 37 mg g<sup>-1</sup>. En el Río Coca (M14-13) se alcanzan las máximas concentraciones de Al y Fe, con valores de 78 y 48 mg g<sup>-1</sup>, respectivamente. Por el contrario, el Río Rumiayacu presenta las concentracio-

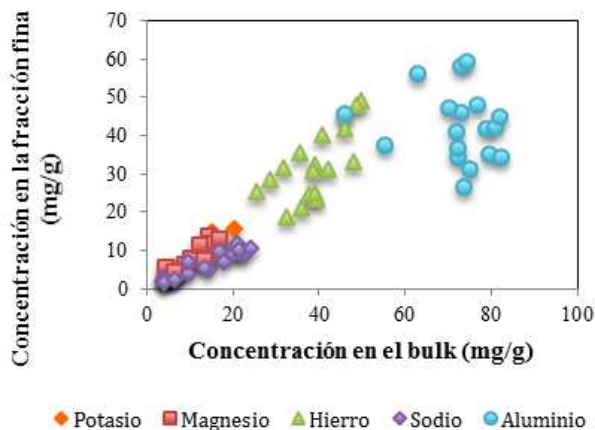


Gráfico 10: Concentración de los elementos mayores en la fracción fina vs el bulk de sedimentos.

nes más bajas de Al y Fe, con concentraciones de 45 y 25 mg g<sup>-1</sup>. Aguas abajo, las concentraciones son para el Al, 72 mg g<sup>-1</sup>, y para el Fe, 39 mg g<sup>-1</sup>.

En el caso del Río Tiputini, aguas abajo se presentan mayores concentraciones de Al y Fe que aguas arriba. Aguas arriba las concentraciones para el Al son aproximadamente de 62 mg g<sup>-1</sup> y para el Fe alrededor de 30 mg g<sup>-1</sup>. En cambio, aguas abajo, se alcanzan valores de 72 y 35 mg g<sup>-1</sup> para el Al y Fe, respectivamente. Las bajas concentraciones de Fe y Al en el río Tiputini se debe a que este es un río de aguas negras por tanto presenta bajos valores de pH y bajas concentraciones de cationes. Valores bajos de pH permiten que la solubilidad de Fe en agua se incremente y de esta manera el Fe asociado a los óxidos e hidróxidos ferrosos pase al agua, disminuyendo las concentraciones de Fe en los sedimentos. Tal es el caso de la muestra M14-03 cuyo pH es ácido (4.99) y presenta los valores más bajos de Fe.

En la cuenca del Río Esmeraldas, aguas arriba, se alcanzan concentraciones de Al y Fe de 75 y 48 mg g<sup>-1</sup>, respectivamente. Altos valores de pH (8), explican la existencia de elevadas concentraciones de Fe. Las concentraciones más altas de Al se encuentran en el río Esmeraldas con concentraciones de 82 mg g<sup>-1</sup>, mientras que la concentración de hierro es similar al de las otras muestras, 46 mg g<sup>-1</sup>. Aguas abajo las concentraciones de Al son de 79 mg g<sup>-1</sup> mientras que la concentración del Fe es de 36 mg g<sup>-1</sup>. Las concentraciones de Fe en general se mantienen en todos los casos entre 25-45 mg g<sup>-1</sup>, mientras que las de Al oscilan entre 70-80 mg g<sup>-1</sup>.

Las concentraciones de Al asociadas a la fracción fina, ley de Stokes, fueron muy bajas, esto se debe principalmente al método analítico, puesto que varios estudios sugieren que el Al está ligado directamente a la fracción fina de los sedimentos [49]. Por tanto se esperaba que las concentraciones de Al sean similares en el bulk y en la fracción fina. Después de los análisis realizados, los blancos de los reactivos presentaban altas concentraciones de Al lo cual perjudica la confiabilidad de los resultados.

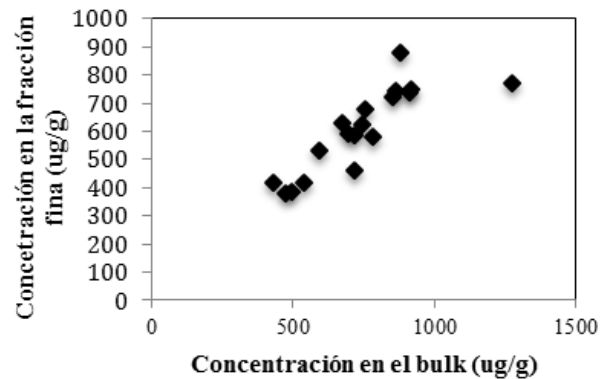


Gráfico 11: Concentración del Mn en la fracción fina vs el bulk de sedimentos.

Las concentraciones de Al están correlacionadas positivamente con otros elementos mayores como el Mg, Fe, Mn y K, lo cual concuerda con estudios previos donde se encontraron las mismas relaciones [56]. En el caso del óxido de hierro con el óxido de aluminio la relación es muy alta y positiva con un coeficiente de correlación de 0.82 y con un coeficiente de determinación del 67%. Esta fuerte correlación se debe a que los sedimentos son el resultado de la lixiviación de las rocas donde existe muy poco fraccionamiento entre los metales y el aluminio. Esto indica que el Fe y el Al están asociados a las fases minerales filosilicatadas [57]. En el caso de los óxidos de Manganeseo y de Magnesio en función del óxido de aluminio (Gráfico 6), las relaciones son moderadas con coeficientes de correlación de Pearson de 0.48 y 0.54 respectivamente. Por último, la relación del óxido de Al con el óxido de K es muy baja con un coeficiente de Pearson de 0.18 y con un coeficiente de determinación del 3%.

Las elevadas correlaciones del Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y MgO con el Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sugiere el probable origen litogénico de la mayoría de elementos mayores estudiados debido a su asociación con las fases sólidas de aluminosilicatos [58, 59]. Los óxidos de aluminio pueden retener elementos porque proveen sitios de adsorción en función del pH [50].

Las concentraciones de Fe están asociados directamente con la fracción fina (Gráfico 5), porque dichas concentraciones en la fracción fina son similares a las encontradas en el bulk de los sedimentos. El Fe es un buen indicador de fuentes de entradas naturales y antropogénicas [60]. Sin embargo, en este estudio los puntos de control (M14-24, M14-01 y M14-27) presentan concentraciones elevadas de Fe. Esto permite evidenciar claramente el origen volcánico de los sedimentos o el incremento de la erosión en la cuenca, permitiendo el aporte de la roca madre con cantidades considerables de elementos mayores a los cuerpos de agua [62]. Así, la afinidad de los óxidos de Fe por los metales son los responsables de las fuertes asociaciones entre el Fe y Mn con el Al, lo cual concuerda con estudios anteriores donde también se encontraron correlaciones positivas. Las variaciones en las concentraciones de Fe se debe principalmente a los cambios en las condiciones de pH [50].

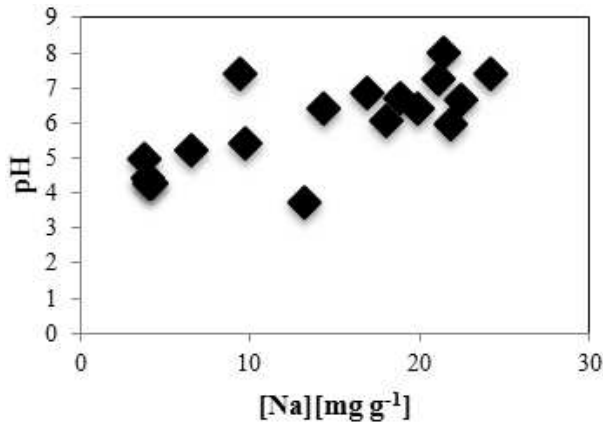


Gráfico 12: Variación del pH en función de la concentración de Sodio en la fracción fina de sedimentos.

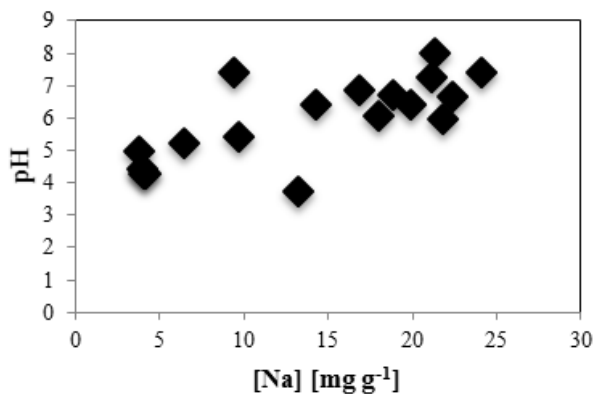


Gráfico 13: Cambio del pH con la concentración de Na en el *bulk*.

Según la NOAA, cuando las concentraciones de Fe son de 20  $[\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}]$  se presentan bajos efectos en la vida acuática y en la salud humana y cuando las concentraciones son de 40  $[\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}]$  los efectos son severos. No obstante en nuestro estudio, se encontraron concentraciones de Fe de hasta 48  $[\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}]$ , excediendo los límites establecidos en las guías de calidad de los sedimentos en un 15 % (Gráfico 16). Es así que las muestras M14-13, M14-17, M14-18, M14-19, M14-20, M14-27 y M14-28 superan las concentraciones máximas permisibles a las cuales se muestran efectos severos. Por tanto, a pesar de que el Fe es un metal esencial para los seres vivos porque interviene en las funciones biológicas y bioquímicas, en altas concentraciones puede tener efectos secundarios en el ecosistema.

De manera general, las concentraciones de Na son mayores que las de K porque las arcillas potásicas tienden a degradarse dando lugar a la sustitución del K por el Na [63]. El Potasio es un elemento alcalino [55], cuyas concentraciones porcentuales oscilan entre 0.3 y 1.56 % en la fracción fina, comparables con el *bulk* donde dichos porcentajes fluctúan entre 0.5 y 2 %. La mayor concentración de K se encuentra en la muestra M14-01 proveniente del río Napo, aguas arriba de la ZIL, en Puerto Napo. Altos contenidos de K están asociados con porcentajes elevados de filosilicatos y feldespatos [17]. La concentración más baja de K se encontró en la muestra M14-03 proveniente del río Tiputini porque este se ca-

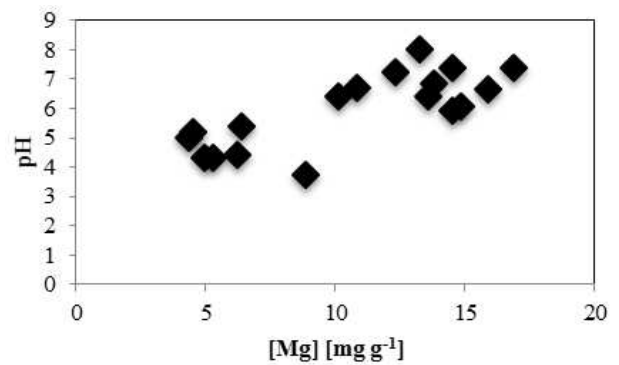


Gráfico 14: Concentración de Magnesio en función del pH en el *bulk* de los sedimentos.

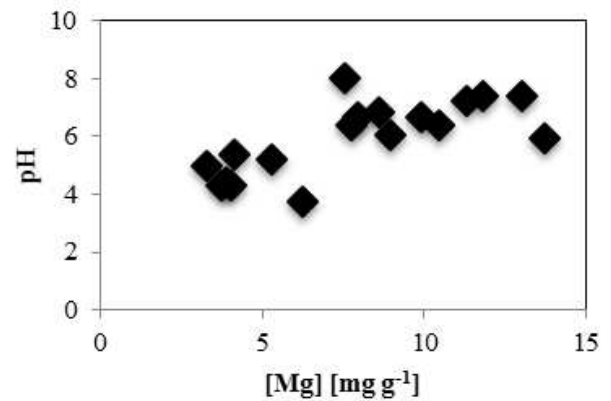


Gráfico 15: Relación de la concentración de Magnesio en la fracción fina con el pH.

racteriza por tener rocas graníticas que aportan con sedimentos de grano grueso debido a la composición cuarítica [50]. De hecho, en los análisis realizados con el granulómetro laser se encontró que en la muestra M14-03 predominan las partículas mayores a  $63\ \mu\text{m}$ . Por otro lado, los porcentajes de Na en la fracción fina fluctúan entre 0.17 y 1.19 %, mientras que en el *bulk* estos varían entre 0.38 y 2.5 %. El 43 % del Na está asociado con la fracción fina de sedimentos y este presenta una correlación positiva fuerte con el pH (Gráfico 12 y Gráfico 13) tanto en la fracción fina como en el *bulk*. En estos gráficos se muestra que conforme se incrementa el pH lo hace también la concentración de sodio.

En la cuenca del Río Aguarico, las concentraciones de K y Na aguas arriba oscilan entre 13-17  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ . En el Campo Libertador, se observa una variación en la concentración de elementos mayores en las 4 muestras. Las muestras M14-20 y M14-19 presentan concentraciones muy bajas inferiores a  $10\ \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ . No obstante, las concentraciones máximas de Na y K se alcanzan en el río Aguarico (M14-17), con concentraciones de aproximadamente 22 y  $14\ \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , para el Na y K respectivamente. Altas concentraciones de Na están asociadas con el vertido de las aguas de formación que contienen altos contenidos de NaCl [64]. Aguas abajo se registran concentraciones un poco más altas de Na a las encontradas aguas arriba, con concentraciones de aproximadamente 15 y  $18\ \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ .

En la cuenca del Río Napo, aguas abajo se presentan



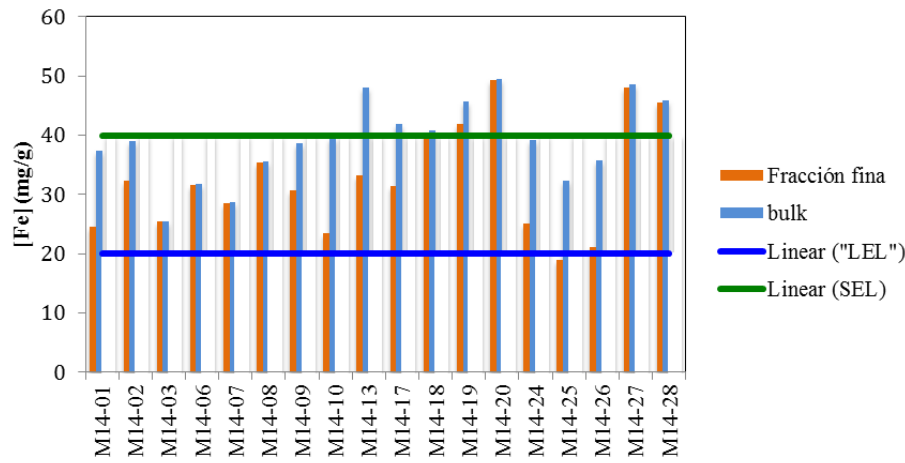


Gráfico 16: Límites máximos permisibles (LEL: nivel de efecto mínimo para la vida acuática; SEL: nivel de efecto severo para la vida acuática, según la normativa NOAA) para las concentraciones de Fe en la fracción fina y en el *bulk* de los sedimentos.

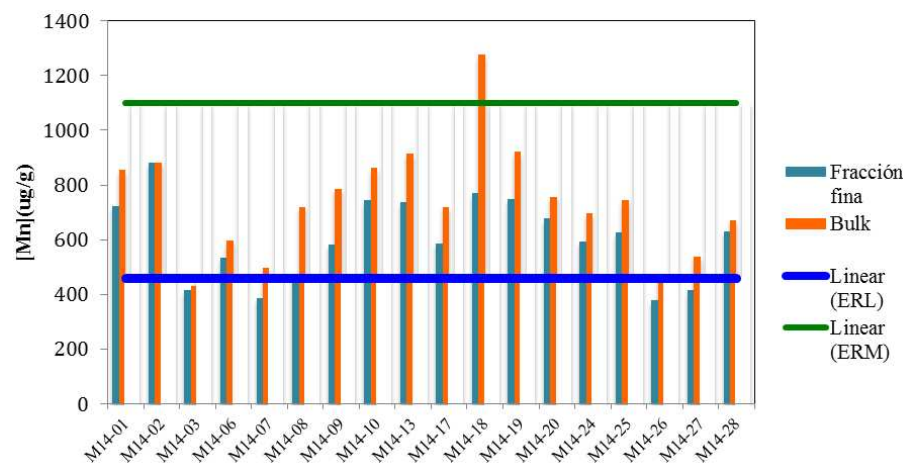


Gráfico 17: Límites máximos permisibles (ERL: nivel de efecto mínimo para la vida acuática; ERM: nivel de efecto severo para la vida acuática, según la normativa NOAA) para las concentraciones de Mn en la fracción fina y en el *bulk* de los sedimentos.

concentraciones de Na similares a las encontradas aguas arriba,  $19 \text{ mg g}^{-1}$ . Por el contrario, para el K las concentraciones encontradas aguas arriba,  $20 \text{ mg g}^{-1}$ , son superiores a las determinadas en aguas abajo,  $15 \text{ mg g}^{-1}$ . Las mayores concentraciones de Na se registran en el río Coca,  $22 \text{ mg g}^{-1}$ , las cuales pueden estar asociadas con las aguas de formación que contienen altos contenidos de NaCl [64]. Así también, altas concentraciones de sodio en los ríos amazónicos están asociados con un alto grado de salinidad de los cuerpos de agua. Las mayores concentraciones de K se localizan en el Río Napo con una concentración de  $17 \text{ mg g}^{-1}$ . En el río Tiputini y Rumiyacu las concentraciones de Na y K son muy bajas, menores a  $10 \text{ mg g}^{-1}$ . Sin embargo, se puede observar que aguas abajo existe una mayor concentración de Na y K que aguas arriba. Bajas concentraciones de Na y K en el río Tiputini se debe a que éste es un río de Aguas Negras, es decir contiene bajas concentraciones de cationes mayores ( $<10 \text{ mg L}^{-1}$ ).

En la cuenca del Río Esmeraldas, las concentraciones de Na y K aguas abajo y aguas arriba son similares ( $21$  y  $7 \text{ mg g}^{-1}$ ). Las mayores concentraciones de K y Na se encontraron en el río Esmeraldas, con concentraciones de aproximadamente  $8$  y  $24 \text{ mg g}^{-1}$ , respectivamente.

Elevadas concentraciones de Na y K se puede atribuir a la influencia del estuario y de los efluentes de la REE, cuyas concentraciones de NaCl son elevadas. Las concentraciones más bajas de Na y K se encontraron en la muestra M14-25, tomada en el canal de la refinera con concentraciones de  $9$  y  $5 \text{ mg g}^{-1}$ , respectivamente.

### Magnesio y Manganeseo

Las concentraciones porcentuales de Mg en el *bulk* de los sedimentos oscilan entre  $0.44$  y  $1.86 \%$ , mientras que en la fracción fina estas varían entre  $0.33$  y  $1.37 \%$ . El  $70 \%$  de Mg está asociado a la fracción fina, porque esta está constituida principalmente por minerales arcillosos que contienen Na y Mg en su estructura octaédrica [31] (Gráfico 5). Las concentraciones máximas y mínimas de Mn se encontraron en el Campo Libertador y en el río Rumiyacu, con valores de  $1275$  y  $430 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$ , respectivamente. Mientras que las mayores concentraciones de Mg se registraron en el río Esmeraldas ( $17 \text{ mg g}^{-1}$ ), y las concentraciones más bajas en el río Rumiyacu ( $4 \text{ mg g}^{-1}$ ). De manera general, el Mg tiende a encontrarse en mayores concentraciones en sitios cercanos a la desembocadura del río [58]. Elevadas concentraciones de Mg en los ríos Amazónicos puede atribuirse a la presencia de rocas carbonáticas, o al vertido de aguas de forma-

ción [31].

Por otro lado, el Mn es un elemento que está asociado con actividades humanas, como son las actividades petroleras [55]. Este a diferencia de los demás elementos analizados es un microelemento, por tanto las concentraciones encontradas son inferiores en tres órdenes de magnitud. Los sedimentos analizados se caracterizan por presentar elevadas concentraciones de Mn, cuyos porcentajes varían entre 0.04 y 0.12 % en el *bulk* de los sedimentos, mientras que en la fracción fina estos oscilan entre 0.04 y 0.09 %. Los valores de Mn en el *bulk* y en la fracción fina son bastante similares, por ende el Mn está directamente asociado con la fracción fina específicamente con la fase carbonatada [31]. Esto se debe a que la materia orgánica disuelta, de forma particular los ácidos húmicos mejoran la adsorción de  $Mn_{2+}$  [31]. Al ser los cuerpos de agua analizados, ambientes hidrodinámicos y biológicamente activos, están en condiciones de oxidación. Por tanto, un alto potencial de óxido reducción mejora la disponibilidad de Mn en los sedimentos [31].

En la cuenca del Río Aguarico, las muestras tomadas aguas arriba y aguas abajo contienen concentraciones similares de Mg, con concentraciones de aproximadamente  $14 \text{ mg g}^{-1}$ . En el Campo Libertador, se observa una variación en la concentración de las 4 muestras. La muestra M14-17 alcanza la máxima concentración de Mg, con concentraciones de aproximadamente  $14 \text{ mg g}^{-1}$ . Mientras que la muestra M14-19 presenta las concentraciones mínimas, concentraciones alrededor de  $5 \text{ mg g}^{-1}$ . Las concentraciones de Mn aguas arriba y en el Río Aguarico coinciden con valores de  $700 \mu\text{g g}^{-1}$ . Las mayores concentraciones de Mn se presentan en el río Dureno con concentraciones que alcanzan los  $1\,275 \mu\text{g g}^{-1}$ . Por último, aguas abajo las concentraciones de Mn presentan una leve tendencia al incremento de sus concentraciones,  $860 \mu\text{g g}^{-1}$ .

En la cuenca del Río Napo, a diferencia del anterior, aguas abajo se presentan mayores concentraciones de Mg que aguas arriba, con concentraciones aproximadas de  $11$  y  $14 \text{ mg g}^{-1}$ . Por el contrario, las concentraciones de Mn aguas abajo ( $785 \mu\text{g g}^{-1}$ ) son inferiores a las determinadas aguas arriba ( $850 \mu\text{g g}^{-1}$ ). Las concentraciones de Mg y Mn encontradas aguas arriba son bastante similares a las encontradas en el Río Napo, con concentraciones de  $15 \text{ mg g}^{-1}$  y  $850 \mu\text{g g}^{-1}$  aproximadamente. Las mayores concentraciones de Mg y Mn se encuentran en el Río Coca, con concentraciones de  $16 \text{ mg g}^{-1}$  y  $915 \mu\text{g g}^{-1}$ , respectivamente. En la cuenca del río Tiputini las concentraciones de Mn y Mg son bajas, concentraciones inferiores a  $10 \text{ mg g}^{-1}$  para el Mg y menores a  $800 \mu\text{g g}^{-1}$  para el Mn. Este hecho se atribuye principalmente a que el río Tiputini es un río de aguas negras y se caracteriza por presentar bajas concentraciones de cationes. Además se encontró que el pH presenta una correlación positiva fuerte con el Mg, es decir conforme se incrementa el pH, lo hace también la concentración (Gráfico 14 y Gráfico 15). Por tanto, a

bajos valores de pH se presentan bajas concentraciones de cationes.

En la cuenca del Río Esmeraldas, cerca al estuario predominan las concentraciones de Mg con concentraciones de aproximadamente  $17 \text{ mg g}^{-1}$ . Las elevadas concentraciones de Mg encontradas en el río Esmeraldas se pueden atribuir a la influencia del agua de mar. En el canal de la refinera los valores de Mg,  $15 \text{ mg g}^{-1}$ , son mayores que aguas arriba. Las concentraciones de Mg y Mn aguas abajo son similares a las encontradas aguas arriba, con concentraciones de  $14 \text{ mg g}^{-1}$  y  $500 \mu\text{g g}^{-1}$ , respectivamente. Las concentraciones de Mg y Mn encontradas aguas abajo (Río Teone) son inferiores que las encontradas en el canal de la REE debido a un proceso de dilución, ya que el canal de la REE aporta con elevadas concentraciones de Mg a la cuenca del río Esmeraldas. Las concentraciones de Mn en el canal de la REE coinciden con las del río Esmeraldas, con valores de  $750 \mu\text{g g}^{-1}$ .

Las concentraciones de Mn se compararon con las guías de calidad de los sedimentos propuestas por la NOAA y únicamente la muestra M14-03 se encuentra en concentraciones inferiores a los efectos en el rango bajo (Gráfico 17). Mientras que la muestra M14-18, presenta efectos que sobrepasan en un 23.95 % los niveles máximos permisibles en el rango alto. Por el contrario, todas las muestras restantes presentan efectos en el rango bajo. El Mn presenta una correlación positiva con el Fe y con el Al, debido a que este elemento está asociado con los aluminosilicatos. El Mn al igual que el Fe están contenidos en los oxihidróxidos de hierro y manganeso asociados con los minerales de arcilla [62]. Esto se puede evidenciar en las gráficas Gráfico 10 y Gráfico 11, donde el 71 y 83 % están asociados con la fracción fina para el Fe y Mn respectivamente.

## Conclusiones

El proceso de extracción de partículas finas de sedimentos colectados en los márgenes de ríos Amazónicos es bastante adecuado para el análisis químico de elementos mayores ya que la mayoría de los contaminantes se asocian con esta fracción granulométrica. Las partículas arcillosas tienen una carga iónica neta negativa y tienden a atraer a la materia orgánica y a los elementos mayores [26] y trazas. La fracción arcillosa no sobrepasa el 32 % del *bulk* mientras la fracción limosa representa un promedio de 13.2 %. El carbono orgánico se encuentra en el rango comprendido entre 0.19 y 9.18 %, lo cual justifica su textura del sedimento arcilloso-limoso (Gráfico 9). No existe una correlación significativa entre C-org % y % de limo (láser) pero sí entre el N-orgánico y la fracción fina. Sin embargo, sedimentos con altos contenidos de carbono orgánico (>0.3 %) presentan una granulometría más fina. Existe un control por el tamaño de las partículas en la distribución de los elementos mayores; a medida que se incrementa el tamaño del grano disminuyen las concentraciones de elementos mayores porque las partículas finas tienen una mayor capacidad de

adsorción de cationes. En las muestras analizadas 43 % Na, 93 % Fe, 70 % Mg, 62 % Mn y 94 % K están asociados con la fracción fina de los sedimentos. No obstante, para el Al no se encontró ninguna relación entre la granulometría y su concentración debido a las limitaciones del método analítico empleado.

Las actividades petroleras desarrolladas en el Campo Libertador y que están próximas al río Aguarico contribuyen a incrementar las concentraciones de Na y Mn, lo cual puede estar asociado con el vertimiento de aguas de formación ricas en NaCl y otros elementos traza. En tanto el Fe, K y Al dependen más bien del origen natural de los sedimentos es decir del material parental, de las rocas madres lixiviadas en la cordillera andina. En las aguas abajo, hasta la frontera con Perú, no se observa un incremento significativo en las concentraciones de elementos mayores en relación a los puntos de control, aguas arriba de la ZIL. Los elementos mayores se comportan de diferente manera dependiendo de sus fuentes, propiedades y condiciones hidrodinámicas de los cuerpos de agua. Las variaciones de las concentraciones de los elementos mayores analizados pueden atribuirse a las variaciones en las propiedades de los sedimentos [54]. La mayor parte de elementos mayores transportados están ligados a las fases sólidas de aluminosilicatos [65].

La fracción fina de los sedimentos se podría emplear en estudios posteriores como en la normativa ambiental ecuatoriana por ejemplo, para el análisis de metales pesados y elementos mayores complementariamente al análisis del *bulk* de los sedimentos. A pesar de que existen suficientes estándares y regulaciones de los límites máximos permisibles de elementos mayores y metales pesados en el agua, estos son muy limitados cuando se estudian en sedimentos. Para el Al, Na, K y Mg, no existen valores toxicológicos disponibles (EPA, 2008). Las concentraciones de Mn se compararon con las guías de calidad de los sedimentos propuestas por la NOAA y solo una muestra, el Río Rumiyacu en Dayuma, cumple con la normativa. De igual manera, se encontraron concentraciones de Fe de hasta  $48 \text{ mg g}^{-1}$ , excediendo los límites establecidos en las guías de calidad de la US-EPA de los sedimentos en un 15 %, desde los puntos de muestreo aguas arriba de la zona de influencia petrolera. Elevadas concentraciones de Fe y Mn pueden causar problemas estéticos en los cuerpos de agua y a pesar de ser contaminantes secundarios estos tienen pocos efectos adversos en la salud [62].

### Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por la Agencia Francesa de Investigación (ANR-2013-SENV-0002 (2014-2017) y la USFQ en el marco del Programa Franco-Ecuatoriano MONOIL. Expresamos nuestros agradecimientos a Sylvia Becerra, coordinadora en Francia del Programa MONOIL, y a todos los científicos y personas que participaron en este proyecto durante la recolección y análisis de muestras.

### Referencias

- [1] Saygi, Y.; Yiğit, S. A. 2012. "Heavy metals in Yeniçağa Lake and its potential sources: Soil, water, sediment, and plankton". *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(3): 1379-1389. ISSN 01676369.
- [2] Tabari, S.; Saravi, S.; Bandany, G.; Dehghan, A.; Shokrzadeh, M. 2010. "Heavy metals (Zn, Pb, Cd and Cr) in fish, water and sediments sampled from Southern Caspian Sea, Iran", *Toxicology and industrial health*, 26: 649-656. ISSN 0748-2337.
- [3] Darvish, K.; Afkhami, M.; Mohammadzadeh, M.; Ehsanpour, M.; Chambari, S.; Aghaei, S.; Esmaeilzadeh, M.; Reza, M.; Lagzaee, F. 2015. "Bioaccumulation and ecological risk assessment of heavy metals in the sediments and mullet *Liza klunzingeri* in the northern part of the Persian Gulf". *Marine Pollution Bulletin*, ISSN 0025-326X.
- [4] Gao, X.; Arthur, C. T.; Wang, G.; Xue, Q.; Tang, C.; Chen, S. 2010. "Environmental status of Daya Bay surface sediments inferred from a sequential extraction technique". *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 86(3): 369-378. ISSN 02727714.
- [5] Monroy, M.; Maceda-Veiga, A.; de Sostoa, A. 2014. "Metal concentration in water, sediment and four fish species from Lake Titicaca reveals a large-scale environmental concern". *The Science of the total environment*, 487: 233-44. ISSN 1879-1026.
- [6] Miranda, F.; Philippini, H.; de Freitas, A. 2001. "Speciation of heavy metals in estuarine sediments in the northeast of Brazil". *Environmental science and pollution research international*, 8(4): 269-274. ISSN 0944-1344.
- [7] Wang, J.; Lui, G.; Lu, L.; Zhang, J.; Liu, H. 2015. "Geochemical normalization and assessment of heavy metals (Cu, Pb, Zn, and Ni) in sediments from the Huaihe River, Anhui, China". *Catena*, 129: 30-38. ISSN 03418162.
- [8] Djordjević, L.; Živković, N.; Živković, L.; Djordjević, A. 2012. "Assessment of Heavy Metals Pollution in Sediments of the Korbevačka River in Southeastern Serbia". *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 21(7): 889-900. ISSN 1532-0383.
- [9] Lakhan, V. C.; Cabana, K.; Lavalley, P. D. 2002. "Heavy metal concentrations in surficial sediments from accreting and eroding areas along the coast of Guyana". *Environmental Geology*, 42: 73-80. ISSN 09430105.
- [10] Fernández-Cadena, J. C.; Andrade, S.; Sila-Coello, C. L.; de la Iglesia, R. 2014. "Heavy metal concentration in mangrove surface sediments from the north-west coast of South America". *Marine Pollution Bulletin*, ISSN 0025326X.
- [11] Leleyter, L.; Probst, J.; Depetris, P.; Haida, S.; Mortatti, J.; Rouault, R.; Samuel, J. 1999. "REE distribution pattern in river sediments: partitioning into residual and labile fractions". *Académie des sciences Elsevier*.

- [12] Clifton, J.; McDonald, P.; Plater, A.; Oldfield, F. 1999. "An investigation into the efficiency of particle size separation using Stokes' Law". *Earth Surface Processes and Landforms*, 24(8): 725-730. ISSN 01979337.
- [13] Burton, A. 2004. "Sediment quality criteria in use around the world". *Japanese Journal of Limnology (Rikusuigaku Zasshi)* 65: 117-134. ISSN 0021-5104.
- [14] Horowitz, A.; Elrick, K. 1988. "Interpretation of Bed Sediment Trace Metal Data: Methods for Dealing with the Grain Size Effect". ASTM STP 976: 114 - 128.
- [15] Bordas, F.; Bourg, A. 2001. "Modeling of the Results Obtained and Determination of Association Constants between the Metals and the Sediment". *Water, Air & Soil Pollut.* 128: 391-400.
- [16] Van Griethuysen, C.; de Lange, H. J.; Van den Heuvel, M.; de Bies, S. C.; Gillissen, F.; Koelmans, A. A. 2006. "Temporal dynamics of AVS and SEM in sediment of shallow freshwater floodplain lakes". *Applied Geochemistry*, 21(4): 632-642. ISSN 08832927.
- [17] El Bilalo, L.; Rasmussen, P. E.; Hall, G.; Fortin, D. 2002. "Role of sediment composition in trace metal distribution in lake sediments". *Applied Geochemistry*, 17(9): 1171-1181. ISSN 08832927.
- [18] El Wahab, M. A.; Melegy, A.; Helal, S. 2011. "Distribution and Enrichment of Heavy Metals in Recent Sediments of Safaga Bay, Egypt". *Marine Georesources & Geotechnology*, 29(4): 364-375. ISSN 1064119X.
- [19] Hernández, M. T.; García, M.; Cañas, R.; Sardiñas, O. 1999. "Fracciones biodisponibles de arsénico, plomo, cadmio y mercurio en sedimentos de corrientes superficiales seleccionadas". *Cubana Hig Epidemiol.*, 37(3): 132-135.
- [20] Freije, A. M. 2014. "Heavy metal, trace element and petroleum hydrocarbon pollution in the Arabian Gulf: Review". *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences*, 17: 90-100. ISSN 18153852.
- [21] Almeida, A. 2002. "Manual de monitoreo ambiental comunitario": 1 - 74. <http://www.cedip.edu.mx/graficacion/petroleros/ManualesdeperforaciondepozosGUIASPEMEX/Monitoreoambientaldelpetroleo.pdf>.
- [22] Becerra, S.; Paichad, E.; Sturma, A.; Maurice, L. 2013. "Living with oil contamination in Ecuador?: social perceptions of health risks and coping capacities". *Revista Lider*, 23: 102-120.
- [23] Instituto de Epidemiología y Salud Comunitaria "Manuel Amunarriz". 2000. "Impacto de la actividad petrolera en poblaciones rurales de la Amazonía Ecuatoriana". *Informe Yana Curí*: 12-13.
- [24] Mohammadi, S. Z.; Shamspur, T.; Baghelani, Y. M. 2014. "Determination of copper, nickel, manganese and cadmium ions in aqueous samples by flame atomic absorption spectrometry after simultaneous coprecipitation with Co(OH)<sub>2</sub>". *Arabian Journal of Chemistry*: 1-6. doi:10.1016/j.arabjc.2014.11.054. ISSN 18785352.
- [25] American Public Health Society. 2012. "Standard Methods for the examination of water and wastewater". 22nd ed: APHA, Washington.
- [26] Lemaire, E.; Blanc, G.; Schäfer, J.; Coynel, A.; Etcheber, H. 2006. "Dissolved trace metal-organic complexes in the Lot-Garonne River system determined using the C18 Sep-Pak System". *Aquatic Geochemistry*, 12(1): 21-38. ISSN 13806165.
- [27] Castro, G.; Valdes, G.; Valdes, J. 2012. "Concentración de metales pesados (Cu, Ni, Zn, Cd, Pb) en la biota y sedimentos de una playa artificial, en la bahía San Jorge 23oS, norte de Chile". *Latin American Journal of Aquatic Research*, 40(2): 267-281. ISSN 0718560X.
- [28] Yuan, F.; Depew, R.; Soltis-Muth, C. 2014. "Ecosystem regime change inferred from the distribution of trace metals in Lake Erie sediments". *Scientific Reports*, 4: 7265. ISSN 2045-2322.
- [29] Zhang, S.; Wang, S.; Shan, X. 2002. "Distribution and speciation of heavy metals in surface sediments from Guanting Reservoir, Beijing". *Journal of environmental science and health. Part A, Toxic/hazardous substances & environmental engineering*, 37(4): 465-478. ISSN 10934529.
- [30] Carrasco, J. P. 1978. "El Tratado de Cooperación Amazónica". Nueva Sociedad: 19-25.
- [31] Vital, H.; Statterger, K. 2000. "Major and trace elements of stream sediments from the lowermost Amazon River". *Chemical Geology*, 168(1-2): 151-168.
- [32] Calléde, J.; Guyot, J. L.; Ronchail, J.; L'Hôte, H.; Niel, H.; de Oliveira, E. "L'Amazonie O'ridos (Bre'sil). Etude statistique des débits et bilan hydrologique". *Hydrolog. Sci. J.*, 2(321-333): 47.
- [33] Espinosa, J. C.; Ronchail, J. C.; Guyot, J. L.; Santini, W. 2011. "La variabilidad hidrológica y climática reciente en la cuenca del río Amazonas: Un enfoque particular sobre los eventos hidrológicos extremos". *ResearchGate*.
- [34] Laraque, A.; Loup, J.; Pombosa, R. 2004. "Hidroclimatología del oriente e hidrosedimentología de la cuenca del Napo". La Cuenca Oriente: Geología y Petróleo. Travaux de l'Institut Français d'Etudes Andines.
- [35] Cueva, R. 2005. "Diagnóstico de los Recursos Naturales en el Territorio de Seis Comunidades Kichwas Asentadas en la Zona Noroccidental del Parque Nacional Yasuní, Río Napo, Orellana-Ecuador". *Wildlife Conservation Society*: 3-34.
- [36] Laraque, A.; Cerón, C. 2004. "Flux sédimentaires dans les bassins amazoniens d'Équateur". HYBAM, Quito: 271-274.
- [37] Sioli, H. 1950. "Das Wasser im Amazonasgebiet". *Forschungen und Fortschritte*: 274-280.
- [38] Neiff, J. J. 1999. "El Régimen De Pulsos En Ríos Y Grandes Humedales De Suramérica". *Tópicos sobre grandes humedales sudamericanos*: 99-149.

- [39] Parolin, P. 2002. "Bosques Inundados en la Amazonía Central: Su Aprovechamiento Actual y Potencial". *Ecología Aplicada*, 1: 111-114.
- [40] Zapata-Ríos, G.; Araguillín, E.; Jorgenson, J. 2006. "Caracterización de la Comunidad de Mamíferos no Voladores en las Estribaciones Orientales de la cordillera del Kutukú, Amazonía Ecuatoriana". *Wildlife Conservation Society*, 13(2): 227-238.
- [41] Hjorth, T. 2004. "Effects of freeze-drying on partitioning patterns of major elements and trace metals in lake sediments". *Analytica Chimica Acta*, 526(1): 95-102. ISSN 00032670.
- [42] Besoain, E. 1985. "Mineralogía de arcillas de suelos". Mineralogía de arcillas de suelos. Costa Rica - IICA: 264.
- [43] Encalada, A.; Guayasamín, J. M.; Sampedro, C.; Guevara, J.; Schrekinger, J.; Suárez, E.; Lessman, J.; Swing, K.; Mena, C. 2015. "Los ríos Andino-Amazónicos del Ecuador". Documento Interno Proyecto PEER USFQ: 1-47.
- [44] TULSMA. 2012. "Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua". <http://www.recaiecuador.com/BibliotecaAmbientaDigital/TULAS.pdf>/LIBROVIAnexo3.pdf.
- [45] EPA. 2012. "Water: Monitoring & Assessment". <http://water.epa.gov/type/rsl/monitoring/vms54.cfm>.
- [46] Kraemer, F. B.; Chagas, C. I.; Paz, M.; Moretton, J. A. 2011. "La textura del suelo como factor regulador de la adsorción de escherichia coli en una cuenca de la pampa ondulada (Argentina)". *Revista Argentina de Microbiología*, 43(2): 87-93. ISSN 03257541.
- [47] Montero, M.; Sanz, E. 1998. "Composición de los sedimentos acumulados en embalses españoles". *Ingeniería Del Agua*, 5: 21-28.
- [48] Martín, R.; Svartz, H. 1984. "Análisis granulométrico de suelos en escala reducida". *Ciencia del Suelo*, Argentina: 1-8.
- [49] Lan, X.; Wang, H.; Li, R.; Lin, Z.; Shang, Z. 2007. "Major Elements Composition and Provenance Analysis in the Sediments of the South Yellow Sea". *Earth Science Frontiers*, 14(4): 197-203. ISSN 18725791.
- [50] Sultan, K.; Shazili, N. A. 2010. "Geochemical baselines of major, minor and trace elements in the tropical sediments of the Terengganu River basin, Malaysia". *International Journal of Sediment Research*, 25(4): 340-354. ISSN 10016279.
- [51] Adamu, C. I.; Nganje, T. N.; Edet, A. 2015. "Major and trace elements pollution of sediments associated with Abandoned Barite Mines in parts of Oban Massif and Mamfe Embayment, SE Nigeria". *Journal of Geochemical Exploration*, 151: 17-33. ISSN 03756742.
- [52] Solís, J.; Fernández, E. Velasco, F.; Carhuapoma, W. 2008. "Características geoquímicas de sedimentos del perfil Callao". *Boletín Del Instituto Del Mar Del Perú*, 26: 25-31.
- [53] Georgina, L.; Benítez, C.; Pérez, A.; Rojas, A.; García Márquez, Z. 2006. "Contenido de carbono orgánico y características texturales de los sedimentos del sistema costero lagunar Chantuto-Panzacola, Chiapas. - Organic carbon content and textural characteristics of sediments within the Chantuto-Panzacola coastal lagoons system". *C. Hidrobiológica*, 16(2): 127-136.
- [54] Rojas, N.; Silva, N. 2003. "Distribución espacial de la textura, carbono y nitrógeno en sedimentos recientes en canales y fiordos chilenos, Golfo Corcovado a Golfo Elefantes, Chile". *Cienc. Tecnol. Mar.*, 26(1): 15-31.
- [55] Chen, J.; Bouchez, J.; Gaillardet, J.; Louvat, P. 2014. "Behaviors of Major and Trace Elements During Single Flood Event in the Seine River, France". *Procedia Earth and Planetary Science*, 10: 343-348. ISSN 18785220.
- [56] Prasad, T. D.; Danso-Amoako, E. 2014. "Influence of Chemical and Biological Parameters on Iron and Manganese Accumulation in Water Distribution Networks". *Procedia Engineering*, 70: 1353-1361. ISSN 18777058.
- [57] Lozano-Soria, A.; Borrego, J.; López-González, N.; Carro, B. 2005. "Características geoquímicas y factores de enriquecimiento (FE) de los sedimentos estuarinos de la costa de Huelva (SW España)". *Geogaceta*, 38: 147-150. ISSN 0213683X.
- [58] Gredilla, A.; Stoichev, T.; Fdez-Ortiz de Vallejuelo, S.; Rodríguez-Iruretgoiena, A.; de Moraes, P.; Arana, G.; de Diego, A.; Madariaga, J. M. 2015. "Spatial distribution of some trace and major elements in sediments of the Cávado estuary (Esposende, Portugal)". *Marine Pollution Bulletin*, 99(1-2): 305-311. ISSN 0025326X.
- [59] Delgado, J.; Nieto, J. M.; Boski, T. 2008. "Determinación de los valores de fondo regional en sedimentos Holocenos del estuario del río Guadiana (SW de España)". *Geogaceta*, 44(1): 235-238.
- [60] Marquéz, A.; Bonilla, J.; Martínez, G.; Senior, W.; Aguilera, D.; González, A. 2005. "Estudio Geoquímico de los Sedimentos Superficiales del Litoral". *Bol. Inst. Oceanogr.*, 44(2): 89-103.
- [61] Jirsa, F.; Gruber, M.; Stohanovic, A.I Omondi, S. O.; Mader, D.; Körner, W.; Schagerl, M. 2013. "Major and trace element geochemistry of Lake Bogoria and Lake Nakuru, Kenya, during extreme draught". *Chemie der Erde - Geochemistry*, 73(3): 275-282. ISSN 00092819.
- [62] Prasad, T. D.; Danso-Amoako, E. 2014. "Influence of Chemical and Biological Parameters on Iron and Manganese Accumulation in Water Distribution Networks". *Procedia Engineering*, 70: 1353-1361. ISSN 18777058.
- [63] Ingles, M.; Pueyo, J. 1984. "Aplicación de criterios geoquímicos al reconocimiento de medios hipersalinos en los materiales arcillosos terciarios de la Depresión Central Catalana". *Acta Geológica Hispánica*, 19(3): 207-213.
- [64] Moquet, J. S.; Maurice, L.; Crave, A.; Viers, J.; Arevalo, N.; Lagane, C.; Lavado-Casimiro, W.; Guyot, J. 2014. "Cl and Na Fluxes in an Andean Foreland Basin of the Peruvian Amazon: An Anthropogenic Impact Evidence". *Aquatic Geochemistry*, 20(6): 613-637. ISSN 1380-6165.



- [65] Manceau, A.; Marcus, M. A.; Tamura, N. 2002. "Quantitative Speciation of Heavy Metals in Soils and Sediments by Sunchrotron X-Ray Techniques. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 49: 341-428. <http://doi.org/10.2138/gsrmg.49.1.341>.

## Electronic Waste Recycling Campaign at Universidad San Francisco de Quito, Ecuador

Denisse Dalgo<sup>1,2</sup>, Valeria Ochoa-Herrera<sup>1,2\*</sup>, Gabriela Pérez<sup>2</sup>, René Parra<sup>2</sup>, Ródney Peñafiel<sup>2</sup>, Mateo Sáenz<sup>1</sup>,  
Alexandra Velasco<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Universidad San Francisco de Quito, Oficina de Innovación y Sustentabilidad (OIS-USFQ), Diego de Robles y Vía Interoceánica, Quito, Ecuador.

<sup>2</sup>Universidad San Francisco de Quito, Colegio de Ciencias e Ingenierías, Diego de Robles y Vía Interoceánica, Quito, Ecuador.

<sup>3</sup>Universidad San Francisco de Quito, Colegio de Administración y Economía, Diego de Robles y Vía Interoceánica, Quito, Ecuador.

\*Autor principal/Corresponding author, e-mail: vochoa@usfq.edu.ec

Editado por/Edited by: Cesar Zambrano, Ph.D.

Recibido/Received: 2015/10/15. Aceptado/Accepted: 2015/11/10.

Publicado en línea/Published on Web: 2015/12/30. Impreso/Printed: 2015/12/30.

### Abstract

The increasing consumption of technological products may have serious implications due to the worldwide generation of abundant electronic devices that can become contaminating electronic waste or e-waste after their lifespan. This is due to the hazardous nature of some of their components. In Ecuador, despite the presence of some recycling companies and the governmental policies that attempt to establish an appropriate electronic waste management, much must still be done at public and private level in order to implement e-waste recycling and thus avoid the generation of these hazardous waste. In this study we present the results for the first Electronic Waste Recycling Campaign carried out at Universidad San Francisco de Quito, Ecuador, on which the university community and the civil society cooperated. A total of 1.89 t of e-waste were gathered and more than a half of these materials were intended for recycling or reuse within the country or internationally. The main electronic waste gathered included laptops, CRT monitors, keyboards, tablets, CPU, UPS for PC, mouse, PC speakers, wired for power and ICD monitors. Flow charts were made using VENSIM software, basing the calculation on one unit of each electronic waste. This recycling campaign is the first one organized by an Academic Institution in Ecuador and therefore provides useful information about the role that higher education institutions can play in such sustainable initiatives.

**Keywords.** Electronic waste, recycling campaign, waste management, sustainability, university, Ecuador.

## Campaña de Reciclaje de Residuos Electrónicos en la Universidad San Francisco de Quito

### Resumen

El aumento del consumo de productos tecnológicos podría tener serias implicaciones debido a la abundante producción de equipos electrónicos a nivel mundial. Estos equipos pueden afectar el medio ambiente ya que pueden convertirse en residuos electrónicos o chatarra electrónica cuando han cumplido su vida útil debido a la naturaleza contaminante de algunos de sus componentes. En Ecuador, a pesar de la presencia de empresas recicladoras y de las políticas gubernamentales que intentan establecer un manejo adecuado de residuos electrónicos, mucho falta por hacer a nivel público y privado para implementar el reciclaje de residuos electrónicos y así eliminar la generación de este tipo de contaminantes peligrosos. En este estudio se presenta los resultados de la primera Campaña de Residuos Electrónicos llevada a cabo en la Universidad San Francisco de Quito en la que intervinieron tanto la comunidad universitaria como la sociedad. 1.89 t de residuos electrónicos fueron recolectados y más de la mitad de estos materiales fueron destinados para reciclaje o reutilización a nivel nacional o internacional. Los principales artículos recolectados fueron laptops, monitores CRT, teclados, tablets, CPU, memorias externas para PC, mouse, parlantes para PC, cables de poder y monitores. Diagramas de flujo fueron realizados utilizando el software VENSIM, asumiendo como base de cálculo una unidad de cada residuo electrónico. Esta campaña de reciclaje es la primera organizada por una institución académica en Ecuador y por lo tanto proporciona información útil sobre el rol que las instituciones de educación superior pueden desarrollar en la consecución de iniciativas sustentables.

**Palabras Clave.** Residuos electrónicos, campaña de reciclaje, manejo de residuos, sustentabilidad, universidad, Ecuador.

## Introduction

The technological era we are living in is characterized by an increasing consumption of computers and electronic devices. As long as new technologies are brought to market, the previous obsolete devices are left in disuse and become electronic waste [13]. The concept of electronic waste or e-waste comprises those technological products whose useful life has ended. These electronic devices also constitute electronic parts that are external or internal to the equipment and that become waste for its malfunction or its obsolete components [17]. Most of the electronic waste is discarded with household trash because people ignore or disregard the hazardous materials that electronic waste contains [9]. E-waste consists of approximately 60 chemical elements, including precious metals and hazardous materials that, if not treated properly, release lethal toxins into atmosphere, water, and soil [10] and therefore can cause serious problems to the environment and human health [19].

E-waste contains metals and persistent organic pollutants (POPs) [9, 17]. When e-waste is incinerated several toxins can be released into the biosphere, such as furans, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), hydrogen chloride, and dioxin [10]. Inappropriate recycling processes mostly occur in developing countries because of the low cost of labor and the permissiveness of environmental laws and as a result, these toxicants are being released into the environment causing several problems to some populations [9, 17].

Both scientists and policy makers are recognizing with increasing conviction the potential significance of the pollution caused by e-waste [3]. Many studies evidence the health risks that affect populations encountering the toxins from electronic devices [10]. For example, air and soils of the Chinese population of Guiyu are heavily contaminated with toxic substances emitted into the atmosphere and with chemicals originating in electronic goods or generated by the dangerous disposal of non-recyclable components [21]. Higher serum lead levels in the inhabitants suggest that populations like Guiyu are being affected by lead-discarded electronics and by open, uncontrolled, burning of e-waste [10].

Some estimates claim that each year 20 to 25 million t of e-waste are generated worldwide, equivalent to 3.5 to 4 kg of e-waste per inhabitant per year [10, 17]. Nevertheless, the United Nations Environment Programme UNEP estimates that each year the world produces 50 million tons of electronic waste, causing damage to the environment due to its toxic level [1, 18, 19]. According to the Environmental Protection Agency [6], the amount of e-waste discarded daily worldwide is 142 000 computers and approximately 416 000 cell phones. The final destination of 70% of global electronic waste is unknown [17], which is worrisome given the high toxicity of the pollution that this waste generates when not properly discarded.

On the other hand, in Latin America and the Caribbean the amount of e-waste reaches about 800 000 t and Argentina, Brazil, Chile, Colombia, Mexico and Venezuela are the countries that together produce more than 80% of e-waste in the region [1].

Industrially, different metallurgical routes are used to extract valuable metals from e-waste. In fact, e-waste recycling means taking an electronic product at the end of its useful life in order to use the whole or part of its components to make another product [4]. Electronic recycling represents an excellent and attractive alternative for environmental protection and for the recovery of reusable materials and precious metals such as gold (Au), silver (Ag), platinum (Pt), Gallium (Ga), palladium (Pd), tantalum (Ta), tellurium (Te), germanium (Ge) and selenium (Se) [8]. Overall, energy consumption for the recycling process is less than that required for the development of a new product [6]. Additionally, during the process of electronic recycling, the emissions of CO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> are reduced, and the waste generated during the development of new products is avoided [20].

On January 2013, in the Official Gazette No. 881, the Environmental Ministry of Ecuador issued its National Post Consumer Policy of Electrical and Electronic Equipment which establishes as general objective to apply the principle of responsibility and public participation in the management of electrical and electronic equipment whose useful life has ended [14]. This policy prohibits the disposal of electrical and electronic equipment, which can be recycled or treated under environmentally friendly conditions. It also requires the State to inform the population about the alternatives for e-waste management [14]. However, most people in Ecuador still know little about e-waste management options in order to not discard electronic waste with regular garbage. There are no official data on the amount of technological waste generated or its final destination. For this reason, the Office of Innovation and Sustainability in conjunction with the Student Government of the Universidad San Francisco de Quito (USFQ) organized the first Electronic Waste Recycling Campaign in order to encourage the university community to gather different types of electronic waste, to allocate them to recycling companies and thus contribute to reduce pollution.

The aim of this study was to document the results achieved through this campaign at USFQ. An estimate of the quantity and types of recyclable materials that could be recovered from the collected e-waste was performed by means of modeling and theoretical data in order to know the contribution of this campaign to the e-waste recycling process. Finally this estimate was compared with the actual results at the end of the campaign. Recycling and final disposal of electronic waste collected at USFQ were modeled based on the information provided by the private Ecuadorian companies PRODES, BIORECI-CLAR and ANDEC.

**Methods**

The Electronic Waste Recycling Campaign consisted on a competition between the different Faculties of the USFQ, on which the winner was the Faculty that contributes with the biggest amount of electronic waste per student. The different faculties of the USFQ and the number of students that belong to each one of them are shown in Table 1.

The Electronic Waste Recycling Campaign was carried out from November 14th to 20th, 2014. During these days, both members of the university community and people of the civil society in general attended two different e-waste collection points to deliver disused electronic devices. One e-waste collection point was located inside the University in Cumbayá, Ecuador and several posters promoting the campaign were placed in different strategic points of the campus. Considering that previous experience of converting shopping malls into e-waste collection points have been successful [2], the other collection point was settled down in the shopping mall “Paseo San Francisco” located near the university campus.

Electronic devices of different types were gathered as CPUs, LCDs, screens, monitors, UPSs, keyboards, laptops, tablets, chargers, wires, cellular phones, batteries, printers, scanners, headphones, mp3, walkmans, discmans, speakers, among others. A number of weighting points was assigned to each type of electronic device (Table 2). This number was based on two considerations: the amount of recyclable elements that constitutes each type of e-waste and the effort that involved delivering each type of e-waste for recycling rather than throwing it away.

Thereafter, each Faculty earned a total quantity of points depending on the amount and types of electronic waste provided by their students during the Electronic Waste Recycling Campaign. Because some faculties have more students than the others and this implies more possibilities of collecting e-waste, the winner Faculty was determined by obtaining the average of points earned per

Faculty	Number of students	Percentage (%)
POLITECNICO	1236	20.6
CADE	967	16.1
COCISOH	742	12.4
COCSA	724	12.1
COCOA	686	11.4
CADI	554	9.2
JURISPRUDENCIA	333	5.5
COM	309	5.1
COCIBA	256	4.3
CHAT	197	3.3
<b>TOTAL</b>	<b>6004</b>	<b>100.0</b>

**Table 1: Faculties of the USFQ and number of students for each Faculty that participated in the Electronic Waste Recycling Campaign.**

Electronic Waste	Points
Batteries	1
Keyboards	2
Chargers/wires	3
Headphones	5
LCD/screens/monitors	10
Speakers	15
Cell phones	20
mp3/walkman/discman	20
Others	20
Tablets	25
Printers/scanners	25
Laptops	30
CPU	50
UPS	50

**Table 2: Weighting points assigned to each type of e-waste during Electronic Waste Recycling Campaign.**

student (per capita) in each Faculty and not by the total amount of points. The winner was rewarded with a prize and public recognition.

During the campaign it was not possible to weigh all items received; therefore, the environmental manager PRODES provided an average weight of each type of electronic device (Table 3). An estimate of the total weight of e-waste was calculated multiplying the collected number of each type of device by its average weight. This estimation was then compared with the actual value of e-waste delivered to BIORECICLAR, the environmental manager in charge of the final disposition of e-waste at the end of the campaign.

Additionally, PRODES provided data of the percentage of materials like steel, aluminum, copper, plastic, etc. present in each electronic device and data of the proportion of these materials that must be disposed to the landfill or that can be recycled or reused nationally and internationally. This information is shown in Table 3 and was used to elaborate a mass balance of the electronic waste, to obtain flowcharts and to estimate the total of materials that would be recovered from the total amount of e-waste collected.

With the total amount of each type of electronic devices obtained, an estimate of the quantity of materials that could be recovered and recycled was processed by means of the simulation software VENSIM 6.3 and an Excel spreadsheet.

The VENSIM software was used to provide flowcharts based on the data of the spreadsheet, and thus graphically display the inflow and outflow of electronic waste. Moreover, the weights of copper, aluminum, iron and other recovered elements were based on information provided by PRODES.

**Results**

At the end of the campaign, the estimated total amount of e-waste gathered was 1.89 t of electronic e-waste delivered by the USFQ. Table 4 presents the final amount

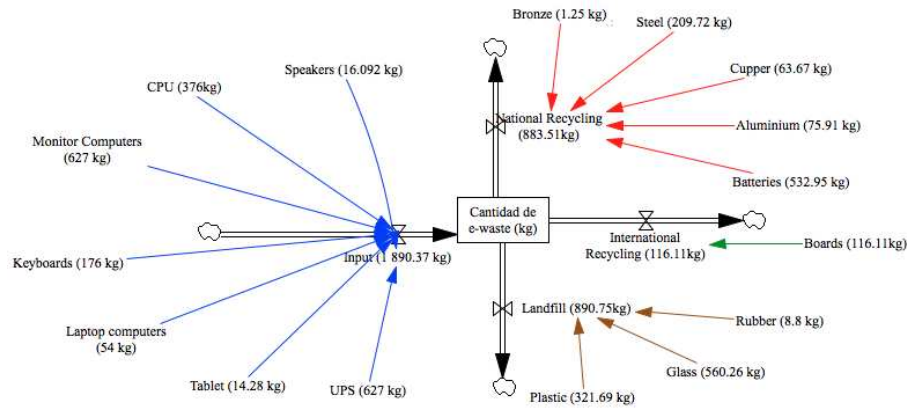


Figure 1: Flow chart of the electronic waste collected during the campaign. The inputs (in weight) of the different types of e-waste are shown with the blue arrows. The outputs (in weight) are shown with red arrows for national recycling, green arrows for international recycling and brown arrows for landfill as final destiny.

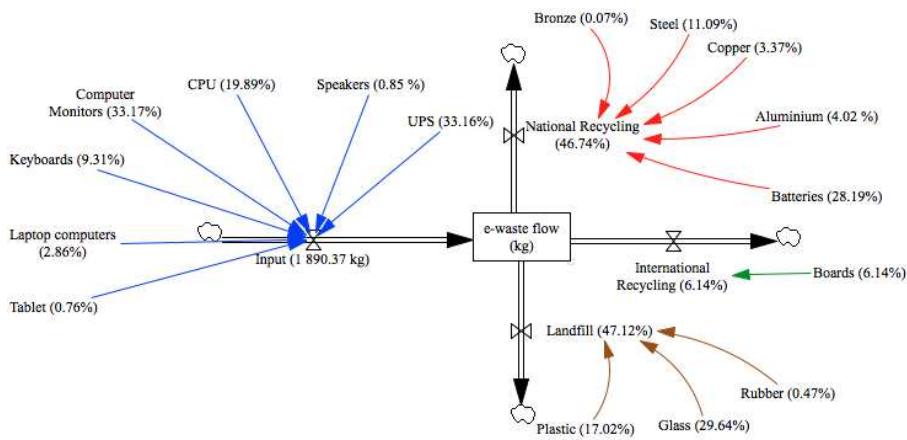


Figure 2: Flow chart of the electronic waste collected during the campaign. The inputs (in percentage) of the different types of e-waste are shown with the blue arrows. The outputs (in percentage) are shown with red arrows for national recycling, green arrows for international recycling and brown arrows for landfill as final destiny.

of each type of e-waste collected during only 7 days of the Electronic Waste Recycling Campaign at USFQ.

Figures 1 and 2 show flow charts modeled with VENSIM software. These diagrams illustrate, in weight (Figure 1) and percentage (Figure 2), the input flow of each type of device collected. As can be observed in the figures, the total input was 1890.37 kg of e-waste, including speakers, CPUs, monitors, keyboards, laptops, tablets and UPSs.

The output flow corresponds to the different allocations that were given to the electronic waste depending on the materials recovered. 46.74% of the materials was intended for recycling or reuse within the country and 6.14% was intended for recycling or reuse abroad. Unfortunately, 47.12% of the materials were destined to the landfill with common waste but at least 650 kg of plastic, 50 kg of glass and 10 kg of wood were managed with the company Arte Green for the elaboration of crafts. More than half of the collected e-waste was destined for recycling or reuse processes. Ferrous materials were destined to “Empresa de Acerías Nacionales de Ecuador” ANDEC, National Industry where the final destination is the production of raw steel ingots (billets) and construction rods (Prodes). Non ferrous materials

like bronze, steel, copper, aluminum and batteries were delivered to the company RECYNTER S.A.

Figure 3 shows the flowcharts modeled with VENSIM software for the different materials to be obtained in the process of collecting electronic waste such as bronze, batteries, steel, boards, glass, copper, aluminum, rubber and plastic.

Regarding the competition between USFQ Faculties, as can be seen in Table 5, the Faculty of Biological and Environmental Sciences COCIBA obtained the highest amount of points per capita (30.8 points/student), followed by the College of Science and Engineering POLI TÉCNICO (8.4 points/student).

### Discussion

The number of companies that have an environmental license for treatment and recycling of e-waste in Ecuador is still low; in fact, the first e-waste recycling company was established in the country just in 2012 [16]. Because of the lack of advanced technologies, part of e-waste produced in the country must be exported for its final disposal. The collected materials that cannot be



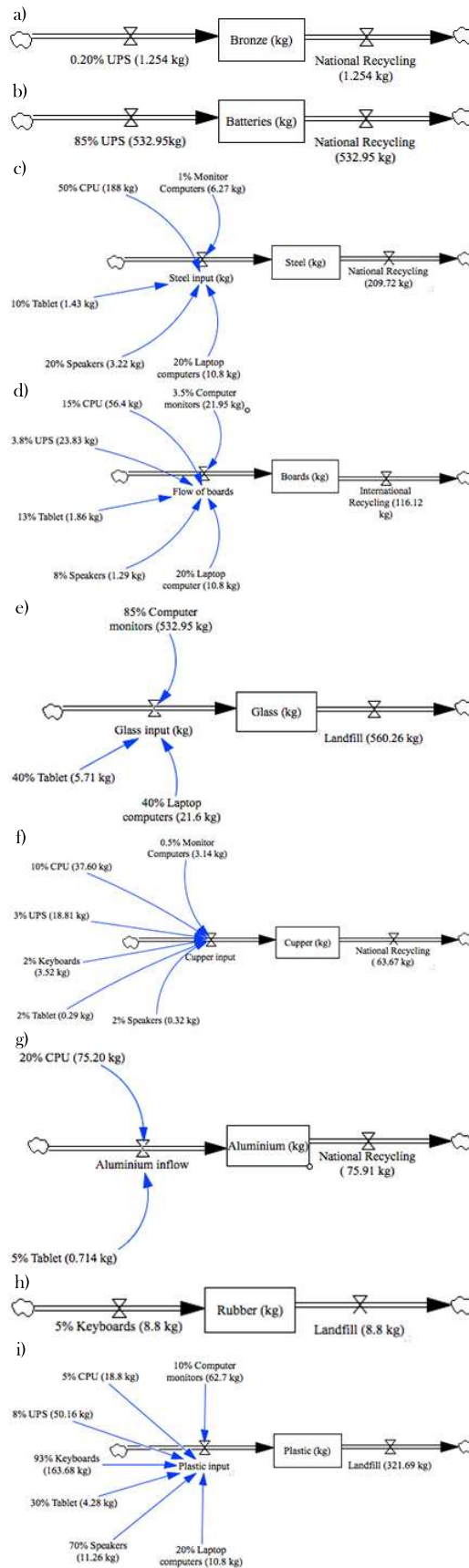


Figure 3: Flowcharts for different materials from electronic waste: A. Bronze, B. Batteries, C. Steel, D. Boards, E. Glass, F. Copper, G. Aluminium, H. Rubber and I. Plastic. Blue arrows show the different sources from which the materials are recovered and the arrow of the right shows the final disposal of each material.

Material	Average Weight (kg)	Percentage of recyclable materials to be processed in Ecuador (%)	Percentage of non-recyclable materials (%)	Percentage of recyclable materials to be processed abroad (%)
Laptop	1.80	20 of steel	40 of glass, 20 of plastic	20 of mainboard
Monitor CRT	11.00	1 of steel 0.5 of copper	85 of glass 10 of plastic	3.5 of mainboard
Tablet	0.68	10 of steel, 5 of aluminum, 2 of copper	40 of glass, 30 of plastic	13 of mainboard
CPU	8.00	50 of steel, 10 of copper, 20 of aluminum	5 of plastic	15 of mainboard (memory)
Monitor LCD	4.00	30 of steel, 0.5 of copper	60 of plastic	9.5 of mainboard
Charger	0.25	40 of copper	60 of rubber	
Keyboard	0.50	2 of copper	93 of plastic, 5 of rubber	
Mouse	0.20	2 of copper	89 of plastic, 5 of rubber	4 of mainboard
Speakers	0.29	2 of copper 20 of steel	70 of plastic	8 of mainboard
UPS	11.00	85 of batteries, 3 of copper, 0.2 of bronze	8 of plastic	3.8 of mainboard

**Table 3: Composition of different electronic devices and their possible allocation. Information provided by PRODES.**

processed inside the country must be processed by International Managers that are accredited for the extraction of precious metals like gold, silver and platinum. For example, Sitekol-Colombia processes mainboards and Codelco-Chile melts copper wires. The final destination for these materials is the production of metal ingots that are used in the medical field for amalgam and tooth pieces according to the information provided by PRODES. They are also intended for jewelry making and in the space field for the construction of satellites and ferries and processing of copper cathodes. On the other hand, the rest of the materials was destined to landfills. This is because, although some of the e-waste components are recovered, most of these devices are composed of non-recyclable glass, plastic or rubber, which is destined for landfills. However, it was possible to divert a fraction of non-recyclable materials towards the development of arts and crafts.

Finding efficient collection and appropriate technologies for recycling e-waste is especially difficult in developing countries [15]. Even in countries that count with advanced treatment equipment and technologies, finding an efficient collection system is a limiting aspect to an appropriate e-waste management [15]. Consequently, this type of campaign contributed by introducing an e-waste collection system in the university community and separating the most toxic and polluting e-waste materials. Moreover, this first Electronic Waste Recycling Campaign created awareness among college

students of the importance of the proper disposal of e-waste.

Besides the environmental concerns, e-waste collecting and processing implies energy savings and resource efficiency [8]. Therefore, campaigns like this should be replicated at the public and private level. Previously, in the public sector, the Governmental Institution of Telecommunications developed a campaign of Electronic Waste Recycling and Collection of batteries in order to promote the importance of proper management of electronic waste [12]. In the private sector there are some companies that are dedicated to the collection, dismantling and recovery of certain materials from electronic waste, other appliances and scrap in order to obtain some profit. Mobile phone companies in Ecuador have also organized campaigns in order to promote recycling. Cell phones are among the electronic devices most consumed in Ecuador, a market that has expanded during the last decade. These campaigns consist of gathering electronic devices and then exporting them to the United States where materials such as copper and silver can be recovered [11]. However, these campaigns only cover devices like phones, batteries and accessories of mobile phones; therefore it is more difficult to find incentives or information about an appropriate place to deposit other types of electronic waste.

During this first Electronic Waste Recycling Campaign organized by the USFQ, through its Office of Innovation and Sustainability, it was evidenced that Universi-

Type of electronic devices	Total (Units)
Batteries	5065
Chargers/wires	1418
Cell phones	267
Headphones	196
Printers/scanners	115
Keyboards	100
LCDs/screens/monitors	57
mp3/walkman/discman	54
Speakers	54
CPU	47
Laptops	30
Tablets	21
UPS	16

**Table 4:** Total number of units collected by type of electronic waste during Electronic Waste Recycling Campaign.

ties are important leaders when promoting initiatives for sustainability because they are able to spread the knowledge and skills necessary to engage in activities related to Sustainable Development [7]. The competition between Faculties was an extra incentive for students to contribute. The Faculty that contributed the most during the campaign and therefore that scored the highest amount of points per student was the Faculty of Biological and Environmental Sciences which suggests that, in general, students whose programs of study are related to the environment showed higher commitment to the environment; therefore contributed the most with the campaign. According to Edumadze et al. students' academic backgrounds influenced their awareness on e-waste [5]. It is also imperative the necessity of the inclusion of environmental education in university curricula. It should not only be included in scientific programs but also in different areas of specialization in general with courses related to e-waste hazards and e-waste management [5].

Educational institutions are frequently applying shifts in technology and it results in a large number of discarded devices after short periods of lifespan [13]. For this reason Universities are appropriate places to gather disused electronic devices. As evidenced in this study, university students and staff contribute greatly to the recycling process. On the other hand, malls are frequented places and therefore the effort and time consumed to deliver e-waste is reduced. Furthermore, Çetinsaya et al. identified other advantages of shopping malls for e-waste campaigns like being safe and public places where marketing campaigns related with electronic products are mounted [2]. However, in this study the e-waste collected at "Paseo San Francisco" was significantly lower as compared to the amount collected at the University campus.

Modeling and flow charts predicted the amount of recoverable materials from the different types of e-waste collected. Therefore, they are very good options applicable to other similar campaigns to predict and determine their success. The estimation and modeling of the

Faculty	Points per capita
COCIBA	30.80
POLITECNICO	8.34
CADI	8.25
COCISOH	7.11
CADE	4.75
COCOA	3.73
COM	3.04
CHAT	2.78
JURISPRUDENCIA	1.65
COCSA	0.91

**Table 5:** Final Results of the Electronic Waste Recycling Campaign.

e-waste flow were comparable to the actual values resulting at the end of the E-waste Recycling Campaign. Universities and other institutions of education must establish a cooperation network with other private and public institutions in order to replicate these campaigns periodically. For future e-waste campaigns the main focus should not only be recycling, as Walters and Santillo propose, reducing must also be promoted and governmental support and legislation is required to prevent use of hazardous substances in electronics and to increase the participation and responsibility of producers and importers [21]. At the same time appropriate recycling technologies should be the mainstay of e-waste recycling practices.

## Conclusions

The campaign organized by the USFQ, through its Office of Innovation and Sustainability and the support of their students and the community in general, is the first electronic waste recycling campaign conducted at the level of an academic institution in Ecuador. The support received by this campaign as well as its results showed that citizens share a general impetus to contribute to such sustainable initiatives that seek to reduce global pollution. USFQ plans to develop this campaign every year and will use this case study as an initial insight for further investigation and for gathering new and more data related to e-waste.

## Acknowledgments

We are very thankful to the members of Student Government of USFQ and to the university community in general who actively participated in this first Electronic Waste Recycling Campaign at USFQ. Special thanks to Melanie Valencia for reading this manuscript and providing valuable insights.

## References

- [1] Barreiro, E.; Winicki, M. 2010. "Los residuos electrónicos: Un desafío para la Sociedad del Conocimiento en América Latina y el Caribe: Gestión de residuos electrónicos". La visión del Plan CEIBAL en Uruguay. UNESCO Montevideo, Günther Cyranek, y Chile Plataforma RELAC SUR/IDRC Uca Silva.

- [2] Çetinsaya Özkir, V.; Efendigil, T.; Demirel, T.; Çetin Demirel, N.; Deveci, M.; TopÇu, B. 2015. "A three-stage methodology for initiating an effective management system for electronic waste in Turkey". *Resources, Conservation and Recycling*, 96: 61-70.
- [3] Chen, A.; Dietrich, K. N.; Huo, X.; Ho, S. 2011. "Developmental Neurotoxicants in ?-Waste: An Emerging Health Concern". *Environmental Health Perspectives*, 119(4).
- [4] Chibunna, J. B.; Siwar, C.; Mohamed, A. F.; Begum, R. A. 2013. "The role of university in E-waste recycling: Case of University Kebangsaan Malaysia". *Research Journal of Applied Sciences*, 8(1): 59-64.
- [5] Edumadze, J. K. E.; Tenkorang, E. Y.; Armah, F. A.; Luginaah, I.; Edumadze, G. E. 2013. "Electronic waste is a mess: Awareness and proenvironmental behavior among university students in Ghana". *Applied Environmental Education and Communication*, 12(4): 224-234.
- [6] EPA. 2013. U.S. Environmental Protection Agency. [www.epa.gov](http://www.epa.gov).
- [7] Ferrer-Balas, D.; Adachi, J.; Banas, S.; Davidson, C. I.; Hoshikoshi, A.; Mishra, A.; Ostwald, M. 2008. "An international comparative analysis of sustainability transformation across seven universities". *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 9(3): 295-316.
- [8] Khaliq, A.; Rhamdhani, M. A.; Brooks, G.; Masood, S. 2014. "Metal Extraction Processes for Electronic Waste and Existing Industrial Routes: A Review and Australian Perspective". *Resources*, 3: 152-179.
- [9] Ladou, J.; Lovegrove, S. 2008. "Export of Electronics Equipment Waste". *International Journal of Occupational and Environmental Health*, 14(1): 1-10.
- [10] Massey, K. A.; Eunsonb, J. 2010. "Electronic Wastelands: Decomposing Computers and Communities Around the World". *UBCMJ*, 2(1).
- [11] Merino, D. 2010. "Gestión De Desechos Electrónicos De Mayor Generación En La Ciudad De Loja". Proyecto final Ing. en Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL): 1-90.
- [12] Ministerio de Telecomunicaciones y Sociedad de la Información. 2014. "MINTEL participó con Campaña de Reciclaje de residuos electrónicos en la feria 'Vivamos con valores 2014 Scouts Ecuador' ". <http://www.telecomunicaciones.gob.ec/mintel-participo-con-campana-de-reciclaje-de-residuos-electronicos-en-la-feria-vivamos-con-valores-2014-scouts-ecuador/>
- [13] Odhiambo, B. D. 2009. "Generation of e-waste in public universities: The need for sound environmental management of obsolete computers in Kenya". *Waste Management*, 29(10): 2788-2790.
- [14] Política Nacional Post Consumo de Equipos Eléctricos y Electrónicos. 2013. Acuerdo Ministerial N° 190. Registro Oficial No. 881.
- [15] Qu, Y.; Zhu, Q.; Sarkis, J.; Geng, Y.; Zhong, Y. 2013. "A review of developing an e-wastes collection system in Dalian, China". *Journal of Cleaner Production*, 52: 176-184.
- [16] Reliche, A. 2012. "Con licencia ambiental se abrió la primera planta de reciclaje de desechos electrónicos del país". Agencia pública de noticias del Ecuador y Suramérica. <http://www.andes.info.ec/es/sociedad/5752.html>.
- [17] Robinson, B. H. 2009. "E-waste: an assessment of global production and environmental impacts". *The Science of the Total Environment*. 408(2): 183-191.
- [18] UNEP. 2005. "E-waste, the hidden side of IT equipment's manufacturing and use". *Environmental Alert Bulletin*, 5: 1-3.
- [19] UNEP. 2013. "Storage and disposal of mercury in Mexico and Panama". UNEP in Latin America and the Caribbean Newsletter, 6.
- [20] USGS. 2001. "Obsolete Computers, 'Gold Mine', or High-Tech Trash?". Resource Recovery from Recycling. USGS Fact Sheet FS-060-01: 1-4.
- [21] Walters, A.; Santillo, D. 2008. "Evidence of environmental and health impacts of electronics recycling in China: an update". *Greenpeace International*, 4: 1-12.

## A Simplified Analytical Method to Calculate the Lifting Condensation Level from a Skew-T Log-P Chart

Erith Muñoz<sup>1\*</sup>, Rafael Mundaray<sup>2</sup>, Nelson Falcón<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Carabobo, Venezuela.

<sup>2</sup>National Institute of Meteorology and Hydrology, Caracas, Venezuela.

<sup>3</sup>Laboratorio de Física de la Atmósfera y el Espacio Ultraterrestre, FaCYT Universidad de Carabobo,

Apdo postal 129 Avda Bolívar Norte, Valencia Edo Carabobo, Venezuela.

\*Autor principal/Corresponding author; e-mail: erith7@gmail.com

Editado por/Edited by: Cesar Zambrano, Ph.D.

Recibido/Received: 2015/05/19. Aceptado/Accepted: 2015/09/27.

Publicado en línea/Published on Web: 2015/12/30. Impreso/Printed: 2015/12/30.

### Abstract

In this work, a methodological framework is presented to automate the Lifting Condensation Level (LCL) height estimate process in meteorological applications, by assimilating dependencies on the saturation mixing ratio from a Skew-T log-P chart. Results of the methodology implementation show a high correlation with the measurements made by atmospheric soundings. In addition, LCL height maps were built for the Caribbean region, these were generated by the proposed automatized process using daily reanalysis data from 1948 to 2010.

**Keywords.** Lifting Condensation Level, Cloud Base Altitude, Cloud Physics, Espy's Equation.

### Un Método Analítico Simplificado para Calcular el Nivel de Condensación por Ascenso a partir de un Diagrama oblicuo-T log-P

#### Resumen

En este trabajo, se propone un marco metodológico para automatizar el proceso de estimación de la altura del nivel de condensación por ascenso (LCL, por sus siglas en inglés) desde un enfoque de meteorología operativa, considerando la dependencia de una parcela de aire convectiva, respecto a la razón de mezcla de saturación, usando para esto, un diagrama oblicuo-T log-P. Los resultados de la evaluación de la metodología muestran una alta correlación cuando son comparados respecto a mediciones realizadas con radiosondas. Adicionalmente, se muestra el resultado de la generación automatizada de mapas promedios mensuales y anual de LCL sobre el Caribe, para una serie temporal de datos reanálisis que comprende datos diarios desde 1948 a 2010.

**Palabras Clave.** Nivel de Condensación por Ascenso, Altitud de base de Nube, Física de Nubes, Ecuación de Espy.

#### Introduction

The LCL computation has important applications from a meteorological point of view; as it is a technique long used to estimate boundary layer cloud heights has been the lifting condensation level (LCL) calculation [4]. The LCL is defined as the pressure-temperature point at which a dry-adiabatically rising air parcel of initially specified pressure, temperature, and moisture content reaches saturation [18]. On a Skew-T log-P chart, this point is the interception of the line of constant saturation mixing ratio  $w_s$ , drawn from the initial dew point temperature  $T_d$ , and the dry-adiabatic  $\Gamma_d$  line drawn from the initial surface temperature  $T_o$ . Thus, if  $T_o$  and  $T_d$  are known, the

LCL height  $z_{LCL}$  can be estimated by a Skew-T log-P chart.

In mathematical terms, when  $T_o$  and  $T_d$  are known the  $z_{LCL}$  can be calculated by the equation 1 [6], in which the dry-adiabatic lapse rate  $\Gamma_d$  is approximately  $9.8 \text{ K/km}$ , and the dew point lapse rate  $\Gamma_{dew}$  is  $1.8 \text{ K/km}$ . Therefore, generally the difference between  $\Gamma_d$  and  $\Gamma_{dew}$  is defined as  $8.0 \text{ K/km}$ , and then equation 1 is simplified to 2, where  $T_o$  and  $T_d$  are expressed in Kelvin and  $z_{LCL}$  in meters.

$$z_{LCL} = \frac{T_o - T_d}{\Gamma_d - \Gamma_{dew}} \quad (1)$$



$$z_{LCL} = 125(T_0 - T_d) \quad (2)$$

The approach taken in the equation 2 is based upon the assumption that the dew point temperature lapse rate and the dry-adiabatic lapse rate are both constants in the troposphere. Moreover, gross errors in the  $z_{LCL}$  calculations could result if the surface temperature and/or the dewpoint do not represent the thermodynamic profile in the boundary layer [4]. Considering that  $\Gamma_{dew}$  varies from 1.6 to 1.8 K/km, and that it is assumed to be a constant when applying the equation 2, uncertainties higher than 200 meters could be expected. Regarding the accuracy level provided by the calculation of  $z_{LCL}$  from a Skew-T log-P chart, where the dependence of  $\Gamma_{dew}$  on the saturation mixing ratio is considered, the availability of an analytical equation to estimate  $z_{LCL}$  is useful for the automation of the LCL estimate process.

Even when several analytical equations have been proposed for  $z_{LCL}$  calculation [1, 10, 17], neither of them allow the replication, in an automatic way, of the methodology of a thermodynamical diagram, such as the Skew-T log-P chart. In this paper, an alternative analytical equation is proposed, in order to automate the methodology involved in the Skew-T log-P chart to calculate  $z_{LCL}$ . The main feature of this model is the assimilation of the dependence of  $\Gamma_{dew}$  on the saturation mixing ratio from a Skew-T log-P chart. Taking into account the dependence of  $\Gamma_{dew}$  on  $w_s$ , an enhancement of the estimation accuracy of  $z_{LCL}$  is expected.

### Methodology

To determine  $z_{LCL}$  in automatic mode, and following the procedures established in the Skew-T log-P chart methodology, we analyzed mathematic functions that could explain how the dew point temperature lapse rate depends on the saturation mixing ratio. In a Skew-T log-P chart, this dependence determines the location of the interception point between the dry adiabatic line for the state defined by the initial surface temperature and the dew point temperature for a convective air parcel.

When a convective parcel of air ascends adiabatically in the atmospheres until reaching saturation, the temperature at the LCL height ( $T_{LCL}$ ), also known as the condensation temperature, can be calculated by using the empirical equation of Barnes [1]. Equation 3 shows the model of Barnes, in which the difference between  $T_{LCL}$  and  $T_d$ , divided by the difference between  $T_o$  and  $T_d$  is a constant as a consequence of the relation between  $T_{LCL}$  and  $T_d$ . Then the equation 4 leads to establish a functional dependence of  $k$  on  $T_d$ .

$$k = \frac{T_d - T_{LCL}}{T_o - T_d} \quad (3)$$

$$k = 0.001296T_d + 0.1963 \quad (4)$$

Where  $T_d$  is measured in Celsius. Combining the equations (3) and (4), and isolating  $T_{LCL}$  we have:

$$T_{LCL} = T_d - (0.001296T_d + 0.1963)(T_o - T_d) \quad (5)$$

The equation 5 is useful, because if  $T_o$  and  $T_d$  are known,  $T_{LCL}$  can be estimated directly, and with an uncertainty near to 0,5C [1]. This is a starting point that establishes a conceptual framework to build an analytical expression to calculate  $z_{LCL}$ , on the basis of fundamental atmospheric physics.

It is also known that the temperature of the convective parcel decreases linearly according to the pseudoadiabatic lapse rate  $\Gamma_s$  [5, 11, 12, 16], until it reaches  $z_{LCL}$ , then:

$$T_{LCL} = T_o - \Gamma_s(z_{LCL} - z_o) \quad (6)$$

Isolating  $z_{LCL}$ , and considering that  $z_o$  is the initial height (in meters) above sea level of the convective parcel, we obtain:

$$z_{LCL} = z_o + \frac{T_o - T_{LCL}}{\Gamma_s} \quad (7)$$

As  $\Gamma_s$  is a constant in equation 7 ( $\Gamma_s = 6.5K.km^{-1}$ , approximately), it could be analogous to equation 1, in the sense that both lead to  $z_{LCL}$  estimates when  $T_o$  and  $T_d$  are known. However this scenario is only feasible in a free atmosphere. In contrast, variations in  $\Gamma_s$  are frequent in a standard atmosphere; hence, there is a possibility to include such changes into the analytical formulation by using equation 8 [8].

$$\Gamma_s = \Gamma_d \frac{[1 + \frac{Lw_s}{R'T_o}]}{[1 + \frac{L^2\varepsilon w_s}{R'c_p T_o^2}]} \quad (8)$$

where  $L$  is latent heat,  $R'$  is the universal gas constant, and  $c_p$  is the heat capacity at constant pressure [2], the set of variables presented in equation 8 can be considered constants except the saturation mixing ratio  $w_s$ . This last variable could be considered like a function of  $T_d$  ( $w_s(T_d)$ ) [2]. To define the  $w_s(T_d)$  function from a regression model, an extensive choice of ordered pairs was achieved from a digitized Skew-T log-P chart, obtaining:

$$w_s = 3,8166e^{0,0665*T_d} \quad (9)$$

The purpose of deducing equation (9) is to emulate the Skew-T log-P chart methodology, since the fact that for each  $T_d$ , a value for  $w_s$  was assigned. The set conforming by the equations 5, 7, 8 and 9 represents the conceptual framework to estimate  $z_{LCL}$  considering dependences on the saturation mixing ratio. Additionally,

from equations (6) and (7) we deduce that the pressure experimented by the air parcel at the LCL height, also known as the condensation pressure, is given as:

$$p_{LCL} = p_o e^{\left[-\frac{g}{RT_{LCL}}(z_{LCL}-z_o)\right]} \quad (10)$$

where  $g$  is the gravity and  $R$  is the gas constant for dry air. Then, equation 10 defines the pressure exerted over the convective parcel at the LCL point.

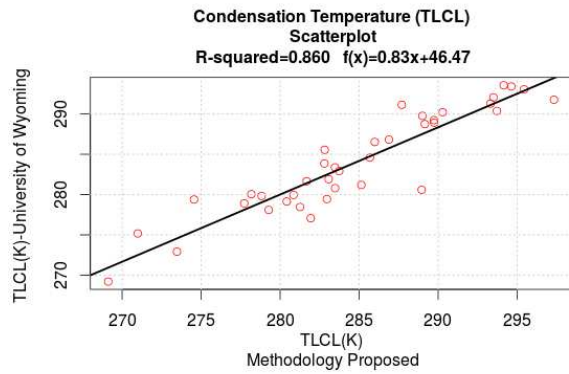


Figure 1: Scatterplot for the condensation temperature between soundings measurements and computations using the Barnes equation

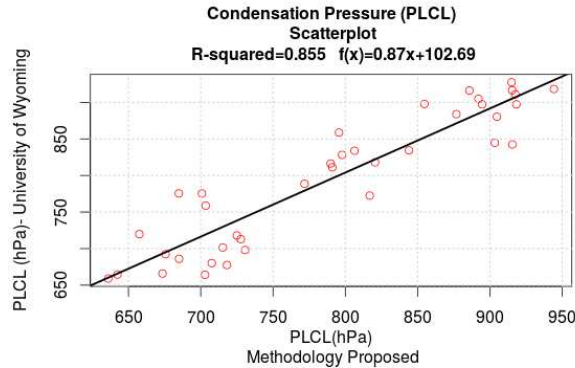


Figure 2: Scatterplot for the condensation pressure between soundings measurements and the method proposed

### Results and Discussions

The main advantage of using the methodology proposed, is the automatization of the LCL calculations following the methodology of the Skew-T log-P chart. In this context, it is important to remark that the complete procedure to calculate the  $z_{LCL}$  includes i) computation of  $w_s$  by using equation 9, ii) computation of  $\Gamma_s$  using equation 8, iii) computation of  $T_{LCL}$  by using equation 5, iv) the  $z_{LCL}$  computation using equation 7, and v) an option to calculate the  $p_{LCL}$  from equation 10. In order to assess the accuracy of the implementation of the method hereby presented, we have compared the

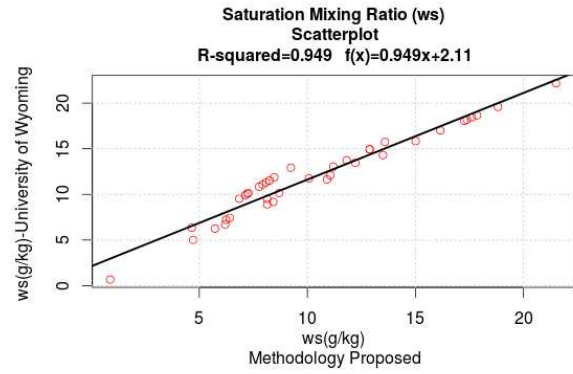


Figure 3: Scatterplot for the saturation mixing ratio between soundings measurements and the method proposed

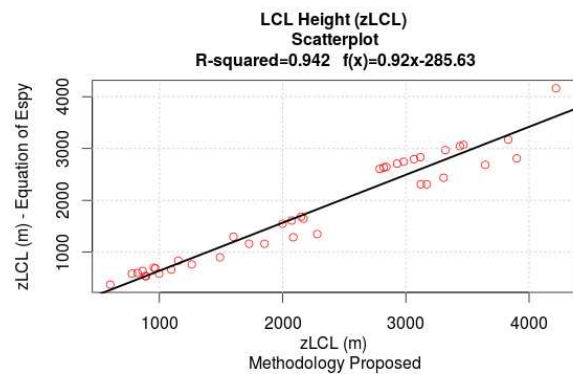


Figure 4: Scatterplot for LCL height estimates between the Espy's equation and the method proposed

output for 39 soundings provided for the University of Wyoming. The variables  $T_{LCL}$ ,  $p_{LCL}$  and  $w_s$  have been compared in a scatterplot with the soundings measurements, and the results can be observed in figures 1, 2, and 3 respectively. The University of Wyoming's soundings do not report the  $z_{LCL}$  directly, for this reason the  $z_{LCL}$  calculation were evaluated by considering the Espy's equation (2), and the result is shown in the figure 4.

The stations used for the analysis are listed in table (1). For each station, and for each variable, a selection of monthly measurements data was taken for the period from january to november of 2015. Henceforth, the results reported on this paper, involve estimates for a representative set of interannual temporal and spatial conditions. In addition, in figure 5 are shown the average monthly LCL height maps for a portion of the Caribbean region. These maps were generated considering daily reanalysis data from 1948 to 2010. In general, it could be observed that the LCL height patterns match well with the annual convective activity in the region [13, 14], and also with the dynamic behavior of the Intertropical Convergence Zone (ITCZ) [7, 15, 19, 20].

Some importants features about the feasibility of the implementation of the method proposed can be derived

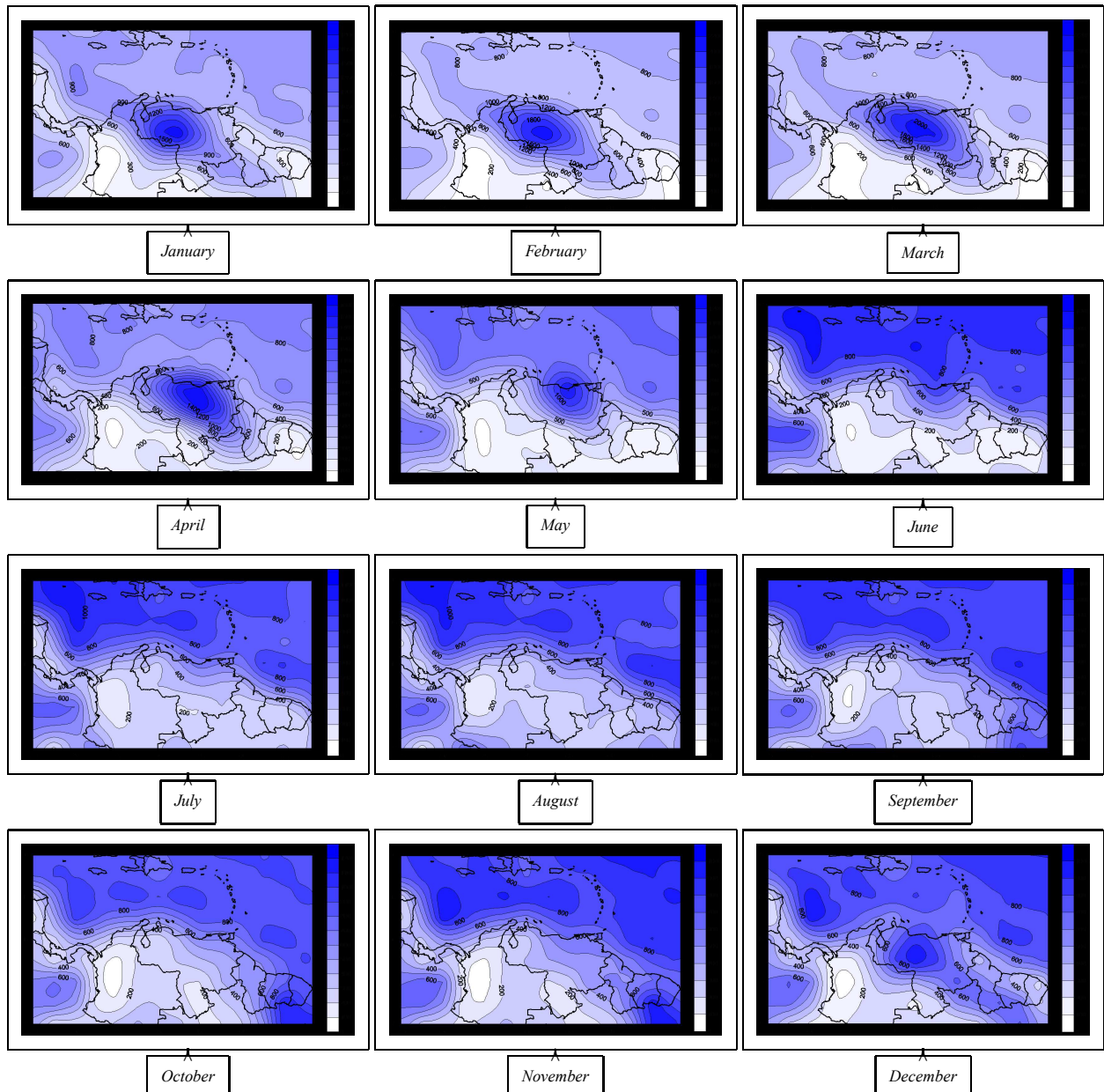


Figure 5: Monthly calculation of  $z_{LCL}$  for the Caribbean region following the methodology proposed. The data used as input was assimilated from the reanalysis database, taking both the daily surface temperature and the dew point temperature as input variable for the time series from 1948 until 2010 for a spatial grid conformed by 135 points between the longitude range from -85 to -55, and the latitude 0 to 20. These data was processed using the Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) in order to filter and write the data in un specific format, and the set of equations (5, 7, 8 and 9) were programmed into the Grid Analysis and Display System (GrADS) to calculate the LCL. It is remarkable the fact that all these LCL maps have been generated in an automatic mode following the conceptual methodology of the Skew-T log-P chart in a very short period of time.

from these results. For instance, the equation of Barnes showed a high R squared when is compared with soundings measurements, it is a remarkable evidence about the quality of this semiempirical expression to determine the condensation temperature of a convective mass of air, when  $T_o$  and  $T_d$  are known. A key element considered in the method was to model the dependence of LCL on the saturation mixing ratio from equation 9. The performance of this equation has been evaluated in the figure 3 against the saturation mixing ratio mea-

sured by sounding measurements finding a R squared of 0.949 for 39 experiments. Fitting performance is maximized for high values of  $w_s$ , while for low values an alternative fitting strategy could increase the R squared. The relevance for ensuring a high accuracy for equation 9, remains in the fact that it will determines the value of the pseudoadiabatic lapse rate from equation 8 for a given dew point temperature. This feature is an advantage over the equation of Espy aimed to improve the accuracy of the LCL estimates.

Identifier	Latitude (deg)	Longitud (deg)	Elevation (m)
SBAT	-9.86	-56.10	288
SACO	-31.32	-64.22	474
SBBR	-15.86	-47.93	1061
SKBO	4.70	-74.13	2548

**Table 1:** List of sounding stations used for the analysis. The criteria for the selection is based on the geographical location, and the elevation of the station, in order to evaluate the results in different scenarios.

Regarding the LCL height estimates evaluation, the soundings carried out by the University of Wyoming do not report results for  $z_{LCL}$ ; for this reason, the evaluation was performed by the scatterplot between the Espy's equation and the method output (see figure 4). The R squared is 0.942, which mean that there is a deep correlation between the two approaches, however the difference in most of the puntual samples is higher than 200m. Depending on the objectives guiding the LCL height computation, the magnitude of this difference can affect substantially the results, for example, when the LCL height is used to seed clouds through bombing silver iodide into the atmosphere [9], the theoretical methodology demands that the bombing should be done close to the LCL height for reaching an optimum degree of condensation during the convection process [3], hence, in this case 200m could be a big source of uncertainty when a satisfactory quality about results is expected. In this context, a further research could be oriented to estimate the level of uncertainty of this method.

In figure 2, is exposed the scatterplot for the condensation pressure measured by sounding, against the calculation made using the equation 10. The fitting performance obtained is quite satisfactory, because it is useful to validate the output generates by the equations 5, 7, 8 and 9, as an integrated methodology, to estimate  $z_{LCL}$ . The approach proposed implicates that  $p_{LCL}$  depends on the calculated values for  $T_{LCL}$ ,  $w_s$ , and  $z_{LCL}$ , then the good fitting exhibited against the sounding data provides a remarkable framework of robustness for the method proposed.

### Conclusions

The main task of this research was to provide a methodological framework to automate the LCL height estimates process in meteorological operational applications by assimilating dependencies on the saturation mixing ratio from a Skew-T log-P chart. We achieved an integration of a) the equation of Barnes to estimate the condensation temperature ( $T_{LCL}$ ), b) the Skew-T log-P chart approach -used to find a mathematical relationship between the dew point temperature and the saturation mixing ratio in order to take variations on the pseudoadiabatic lapse rate for each value of the dew point temperature-, and c) the thermodynamical models (equation 7, 8) for convective dynamics. These three elements combined allowed the calculation of the LCL height ( $z_{LCL}$ ) and the condensation pressure ( $p_{LCL}$ ).

The results shown on this research, lead us to conclude

that the method turned out to be useful to calculate LCL height. However, we suggest to conduct further analyses in order to determine whether the method could be applied to other regions and even at a global scale, considering that its effective implementation could be associated to similar levels of uncertainties as the Skew-T log-P chart approach.

### Acknowledgements

The authors thank the Venezuelan Hidrometeorology National Institute (INAMEH) for the financial support, and also the University of Wyoming for providing the data for the evaluation of results.

### References

- [1] Barnes, S. 1968. "An Empirical Shortcut to the Calculation of Temperature and Pressure at the Lifted Condensation Level". National Severe Storms Laboratory, ESSa, Norman, Okla.
- [2] Bjerknes, J. 1938. "Saturated Ascent of Air through a Dry-adiabatically Descending Environment". *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 64: 325-330.
- [3] Bruintjes, R. 1999. "A Review of Cloud Seeding Experiments to Enhance Precipitation and Some New Prospects". *American Meteorological Society*, 80: 805-820.
- [4] Craven, J. P.; Jewell, R. E.; Brooks, H. E. 2002. "Comparison between observed convective cloud-base heights and lifting condensation level for two different lifted parcels". *Weather and Forecasting*, 17: 885-890.
- [5] Davies-Jones, R. P. 1974. "Discussion of measurements inside high-speed thunderstorm updrafts". *Journal of Applied Meteorology*, 13: 710-717.
- [6] Espy, J. P. 1841. "The philosophy of storms". CC Little and J. Brown.
- [7] Hess, P. G.; Battisti, D. S.; Rasch, P. J. 1993. "Maintenance of the intertropical convergence zones and the large-scale tropical circulation on a water-covered earth". *Journal of the atmospheric sciences*, 50: 691-713.
- [8] Holten, J. 2004. "An Introduction to Dynamic Meteorology". Elsevier academic Press. Washington.
- [9] Hsie, E.; Farley, R.; Orville, H. 1980. "Numerical Simulation of Ice-Phase Convective Cloud Seeding". *American Meteorological Society*, 19: 950-977.
- [10] Inman, R. 1968. "Computation of Temperature at the Lifted Condensation Level". National Severe Storms Laboratory, ESSA, Norman, Okla.
- [11] Jacobson, M. Z. 2005. "Fundamentals of atmospheric modelling". Cambridge University Press.
- [12] Lasker, B. M. 1963. "Wet Adiabatic Model Atmospheres for Jupiter". *The Astrophysical Journal*, 138: 709.

- [13] Liu, C.; Zipser, E. J. 2009. " 'Warm rain' in the tropics: Seasonal and regional distributions based on 9 yr of TRMM data". *Journal of Climate*, 22: 767-779.
- [14] Muñoz, E.; Busalacchi, A. J.; Nigam, S.; Ruiz-Barradas, A. 2008. "Winter and summer structure of the Caribbean low-level jet". *Journal of Climate*, 21: 1260-1276.
- [15] Raymond, D. J.; Bretherton, C. S.; and Molinari, J. 2006. "Dynamics of the intertropical convergence zone of the east Pacific". *Journal of the atmospheric sciences*, 63: 582-597.
- [16] Sánchez-Lavega, A.; Pérez-Hoyos, S.; Hueso, R. 2004. "Clouds in planetary atmospheres: A useful application of the Clausius-Clapeyron equation". *American Journal of Physics*, 72: 767-774.
- [17] Schrieber, K.; Stull, R.; Zhang, Q. 1996. "Distributions of Surface-Layer Buoyancy Versus Lifting Condensation Level over a Heterogeneous Land Surface". *Journal of the Atmospheric Sciences*, 53: 1086-1107.
- [18] Stackpole, J. D. 1967. "Numerical analysis of atmospheric soundings". *Journal of Applied Meteorology*, 6: 464-467.
- [19] Thompson Jr, R. M.; Payne, S. W.; Recker, E. E.; Reed, R. J. 1979. "Structure and properties of synoptic-scale wave disturbances in the intertropical convergence zone of the eastern Atlantic". *Journal of the Atmospheric Sciences*, 36: 53-72.
- [20] Waliser, D. E.; Somerville, R. C. 1994. "Preferred latitudes of the intertropical convergence zone". *Journal of the Atmospheric Sciences*, 51: 1619-1639.



## Estudio de la generación de gas metano a partir del agua residual del proceso de extracción de aceite crudo de palma en biodigestores experimentales

Pablo Garzón<sup>1</sup>, Valeria Ochoa-Herrera<sup>1</sup>, Rodny Peñafiel<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Universidad San Francisco de Quito (USFQ), Colegio de Ciencias e Ingeniería, Diego de Robles y Vía Interoceánica, Campus Cumbayá, Casilla Postal 17-1200-841, Quito, Ecuador.

\*Autor principal/Corresponding author; e-mail: rpenafiel@usfq.edu.ec

Editado por/Edited by: Cesar Zambrano, Ph.D.

Recibido/Received: 2015/10/01. Aceptado/Accepted: 2015/10/10.

Publicado en línea/Published on Web: 2015/12/30. Impreso/Printed: 2015/12/30.

### Methane gas generation from palm oil mill effluent in experimental biodigesters

#### Abstract

The aim of the present study is to determine the rate of methane generation in experimental bioreactors at laboratory scale, using acetate as a substrate and as microbial inoculum water and sludge from wastewater treatment lagoons from a Palm Oil Mill located in the province of Esmeraldas, Ecuador. Influent wastewater showed high concentrations of total and soluble chemical oxygen demand (COD), total solids (TS) and volatile solids (VS) and an acid pH. The specific methanogenic activities (SMA) of water and sludge from the lagoons are very low, 0.032 and 0.035 gCOD-CH<sub>4</sub> gVSS<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> respectively, nevertheless the activity of the bioreactor mixed liquor after 171 d of operation increases to 0.60 gCOD-CH<sub>4</sub> gVSS<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>. The biodigester was fed with a COD loading rate of 0.28 gCOD<sub>acetate</sub> L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>, a COD removal percentage of 89.2 % and a methane generation rate of 1.17 · 10<sup>-3</sup> mol<sub>CH<sub>4</sub></sub> L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> was reached.

**Keywords.** methanogenic activity, methane, bioreactor, POME, anaerobic digestion, COD.

#### Resumen

En presente artículo reporta sobre la generación de metano en biodigestores experimentales a escala de laboratorio, utilizando acetato como sustrato y como inóculos agua y lodos provenientes de lagunas de tratamiento del agua residual de una extractora de aceite crudo de palma ubicada en la provincia de Esmeraldas, Ecuador. El agua residual que ingresa a las lagunas presenta elevadas concentraciones de demanda química de oxígeno (DQO), de sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV) y un pH ácido. La actividad metanogénica específica (AME) de agua y lodos provenientes de las lagunas es muy baja, 0.032 y 0.035 gDQO-CH<sub>4</sub> gSSV<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> respectivamente, sin embargo la actividad del licor mezcla del biodigester después de 171 d de operación aumenta a 0.60 gDQO-CH<sub>4</sub> gSSV<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>. El biodigester se alimentó con una carga orgánica de 0.28 gDQO<sub>acetato</sub> L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>, alcanzó un porcentaje de remoción de DQO de 89.2 % y una tasa de generación de metano 1.17 · 10<sup>-3</sup> mol<sub>CH<sub>4</sub></sub> L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>.

**Palabras Clave.** actividad metanogénica, metano, biodigestores, POME, digestión anaerobia, DQO.

### Introducción

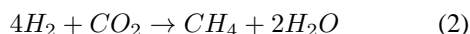
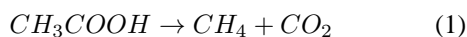
La industria del aceite de palma, que abarca el cultivo, extracción, refinamiento y comercialización de aceite, puede generar grandes impactos ambientales tales como la deforestación, pérdida de biodiversidad, contaminación del agua y suelo y la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera [1]. En las diferentes etapas del proceso de extracción de aceite crudo de palma, como esterilización, clarificación y purga de calderas, se

genera una importante cantidad de agua residual [2]. Se estima que al extraer una tonelada de aceite crudo, se descargan de 2.5 a 3 m<sup>3</sup> de agua residual conocida como POME (Palm Oil Mill Effluent) [3], la cual debe ingresar a un sistema de tratamiento previo para que pueda ser vertida al alcantarillado o hacia un cuerpo de agua receptor. Debido a las elevadas temperaturas y concentración de materia orgánica, el tratamiento se inicia comúnmente con procesos anaerobios [4].

Actualmente la digestión anaerobia es muy utilizada en

plantas de tratamiento de agua residual industrial debido a que tiene varias ventajas sobre la degradación aerobia [5]. Una de las ventajas es que al no requerir oxígeno, prescinde de un sistema de aireación, lo cual reduce costos de operación. Otra ventaja y una de las más importantes es la formación de biogás (mezcla de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  y otros gases) que se puede aprovechar energéticamente [6]. Finalmente, la baja producción de lodos disminuye costos para su tratamiento [7].

La degradación anaeróbica de materia orgánica se desarrolla en cuatro etapas que son: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Cada una de estas es muy importante ya que los productos de cada etapa son los precursores de las siguientes [8]. En la etapa de hidrólisis se solubilizan compuestos orgánicos macromoleculares gracias a la intervención de enzimas hidrolíticas; por lo tanto, la hidrólisis se encarga de la transformación de los diferentes polímeros en sus respectivos monómeros [6]. A continuación, en la acidogénesis o etapa fermentativa, los compuestos orgánicos solubles (productos de la hidrólisis) son transformados principalmente en ácidos grasos volátiles (AGV) como el ácido acético, propiónico y butírico [9]. En la acetogénesis, los AGV son convertidos en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono [10]. Finalmente en la metanogénesis se produce metano y dióxido de carbono. Existen dos rutas para llegar a la metanogénesis, la primera a partir del acetato (Ecuación 1) y la segunda a partir de la reacción del hidrógeno y el dióxido de carbono (Ecuación 2) [8].



Uno de los productos finales de la digestión anaerobia es el gas metano, el mismo que forma parte del grupo de los gases de efecto invernadero (GEI) [11]. Por este motivo se debe buscar un manejo adecuado de este gas para que no sea liberado directamente a la atmósfera. La alternativa más utilizada, debido a su facilidad, es almacenarlo y luego quemarlo sin aprovechamiento energético [2]. Sin embargo el metano con un poder calorífico promedio de  $890 \text{ kJ mol}^{-1}$  tiene varias aplicaciones útiles como la producción y aprovechamiento de calor o vapor, la generación de electricidad, e incluso se puede utilizar como combustible para vehículos [12].

Los objetivos del presente estudio son: 1) caracterización de muestras de agua residual y lodos obtenido de un sistema de tratamiento de aguas residuales de una extractora de aceite crudo de palma ubicada en la provincia de Esmeraldas, Ecuador; 2) determinación de la actividad metanogénica específica (AME) del inóculo microbiano mediante bioensayos; 3) aclimatar a los microorganismos para la producción de gas metano utilizando medio basal mineral con acetato; 4) determinar la producción de gas metano y el porcentaje de remoción de materia orgánica en biodigestores a escala de laboratorio.

## Materiales y Métodos

### Toma de muestras

Las muestras para el presente estudio se tomaron en dos diferentes puntos del sistema de tratamiento de agua residual en la extractora. El primer punto de muestreo fue al ingreso de un tanque denominado "florete". En este se inicia el proceso de tratamiento de agua, su función es separar y recuperar el aceite del efluente, también sirve para sedimentar los sólidos más pesados y trozos de fruta. El segundo punto de muestreo fue una laguna anaeróbica del sistema, denominada "laguna 3". En esta laguna se tomaron muestras del fondo (lodos) y de agua.

### Métodos analíticos

La determinación de los parámetros de calidad del agua se realizó de acuerdo a los protocolos del Laboratorio de Ingeniería Ambiental USFQ (LIA-USFQ) que se basan en los métodos estándar para el análisis de agua y agua residual de la APHA (American Public Health Association) [13] y de la EPA (Environmental Protection Agency) [14]: Los parámetros fueron: demanda química de oxígeno (DQO) total y soluble, sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), sólidos suspendidos totales (SST), sólidos suspendidos volátiles (SSV), nitrato, amonio y pH.

### Bioensayos AME

Los bioensayos AME se realizaron mediante el método de desplazamiento de líquido [15]. En una botella de vidrio de 160 mL se añadió 90 mL de medio basal mineral con acetato (Tabla 1) previamente ajustado el pH entre 7.1-7.3, junto con 10 mL del inóculo microbiano previamente caracterizado y se la selló herméticamente. Se cambió la atmósfera de la misma mediante un proceso de "flushing" con  $\text{N}_2$  durante 3 minutos, con esto se logró las condiciones anaerobias. En una segunda botella se colocó 150 mL de una solución de NaOH al 2 % para disolver en la base el dióxido de carbono generado. Finalmente se armó el bioensayo (Figura 1) de tal manera que la botella que contiene el medio basal mineral con acetato y el inóculo microbiano, se conecte mediante una manguera a la botella que contiene la solución de NaOH, la misma que cuenta con una aguja hacia el exterior. Adicionalmente se colocó un colector para acumular la solución de NaOH desplazada por el gas metano generado. Se incubó a una temperatura de  $30^\circ\text{C}$ . El monitoreo de la producción de gas metano se realizó registrando el peso de la solución de NaOH desplazada cada dos horas por tres días. Con estos datos se obtuvo una tasa producción de gas metano que finalmente se expresa en unidades de actividad metanogénica específica:  $\text{gDQO-CH}_4 \text{ gSSV}^{-1} \text{ d}^{-1}$ . Los bioensayos se realizaron por triplicado.

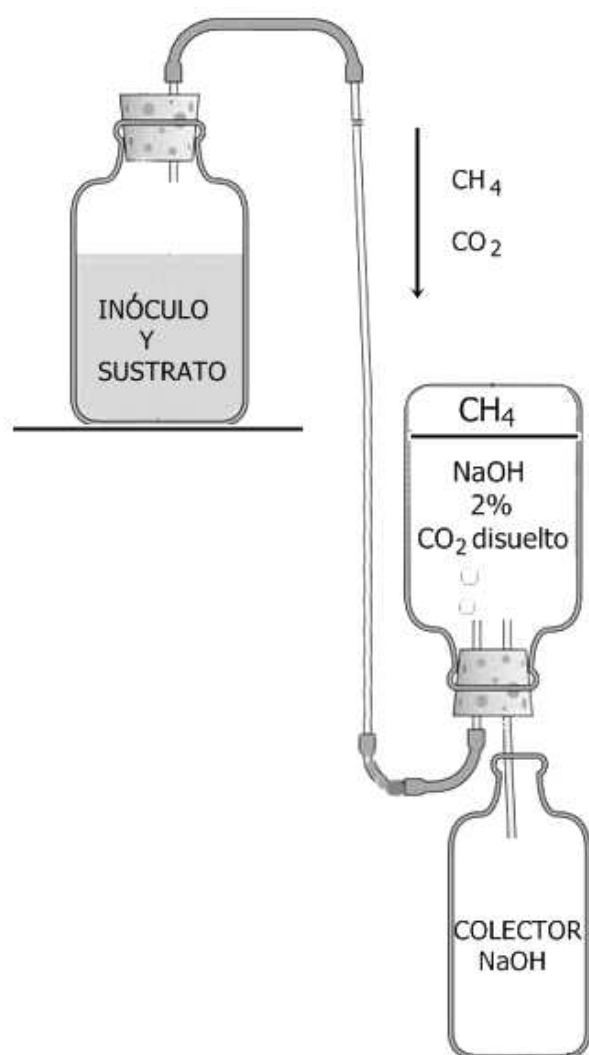
### Biodigestores

Se instalaron 3 biodigestores utilizando recipientes plásticos herméticos, cada uno con una capacidad de 4 litros y un volumen de operación de 2 litros (Figura 2).

Compuesto	mg L <sup>-1</sup>
NH <sub>4</sub> Cl	280
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	250
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	100
CaCl <sub>2</sub>	10
NaHCO <sub>3</sub>	3000
Extracto de levadura	10
Solución de elementos traza	1 mL L <sup>-1</sup>
CH <sub>3</sub> COONa 3H <sub>2</sub> O*	5316

\*equivalente a 2.5 g DQO de acetato

**Tabla 1: Composición del medio basal mineral con acetato. Composición elementos de solución traza: H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>, FeCl<sub>2</sub> 4H<sub>2</sub>O, ZnCl<sub>2</sub>, MnCl<sub>2</sub>, (NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub> 4H<sub>2</sub>O, AlCl<sub>3</sub> 6H<sub>2</sub>O, CoCl<sub>2</sub> 6H<sub>2</sub>O, NiCl<sub>2</sub> 6H<sub>2</sub>O, CuSO<sub>4</sub> 5H<sub>2</sub>O, NaSeO<sub>3</sub> 5H<sub>2</sub>O, EDTA, resazurin, HCl 36 %.**



**Figura 1: Esquema Bioensayos AME.**

Los biodigestores se llenaron inicialmente con 1 litro de agua y 1 litro de lodo de la laguna 3. Los tres biodigestores tienen una agitación alternada, es decir 12 horas con agitación (día) y 12 horas sin agitación (noche). La alimentación, de medio basal mineral con acetato, única-

mente se realizó en 2 biodigestores (R2 y R3) el restante sirvió como control. El caudal de alimentación fue 222 mL d<sup>-1</sup>, logrando un tiempo de residencia de 9 días. La carga orgánica la aporta el acetato y está expresada como DQO. En la Tabla 2 se indica la concentración de DQO en la alimentación y la carga orgánica utilizada en el tiempo de operación de los biodigestores.

Días	Concentración (gDQO L <sup>-1</sup> )	Carga orgánica (gDQO L <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )
0 - 14	-	-
15 - 29	15	1.66
30 - 47	-	-
48 - 89	2.5	0.28
90 - 117	5	0.56
118 - 147	-	-
148 - 172	2.5	0.28

**Tabla 2: Concentración de DQO en la alimentación y carga orgánica de R2 y R3.**

## Resultados y Discusión

La caracterización físico-química de las tres muestras tomadas en la planta de tratamiento de agua residual de la extractora de aceite crudo de palma se presenta en la Tabla 3.

Como se muestra en la Tabla 3, el pH del agua residual que ingresa al sistema de tratamiento es muy ácido y aumenta a medida que pasa por las lagunas, en la laguna 3 alcanza valores de 5.4 y 5.3 en el fondo. A partir de un pH de 5, los microorganismos son capaces de iniciar los procesos de digestión anaerobia de la materia orgánica [16].

La DQO total al ingreso al florentino es muy alta comparada con el agua residual doméstica (500 mg L<sup>-1</sup>) [17]. En varios estudios previos de efluentes residuales en extractoras de aceite, se encuentran valores de DQO en un rango de 44.3 a 79.7 g L<sup>-1</sup> [18]. La diferencia en estos rangos se debe a la producción en la extractora, cuando la producción es baja, la DQO también es baja y viceversa [19]. La DQO soluble es 2.7 veces menor de la total, en la literatura se presenta un rango de 25 a 35 g L<sup>-1</sup>, esto quiere decir que alrededor del 45 al 60 % de la materia orgánica presente en el agua residual está solubilizada y se puede degradar biológicamente con mayor facilidad [20]. En la laguna 3 la DQO total y soluble del agua disminuyen con un porcentaje de remoción del 51.4 % y 83 % respectivamente, en la literatura se encuentran porcentajes de remoción hasta del 90 % en este tipo de lagunas anaerobias y se atribuye al consumo de la materia orgánica por parte de los diferentes grupos de microorganismos, especialmente arqueas metanógenas y bacterias sulfato-reductoras [21]. La DQO total de los lodos es alta debido a la presencia de partículas orgánicas, alcanzando un porcentaje de remoción del 14.3 %, mientras que la DQO soluble presenta un porcentaje de remoción del 45.1 %.

Con respecto a los sólidos, el efluente llega al florentino con 44.0 ± 0.7 g L<sup>-1</sup> de ST y 37.2 ± 0.6 de SV.

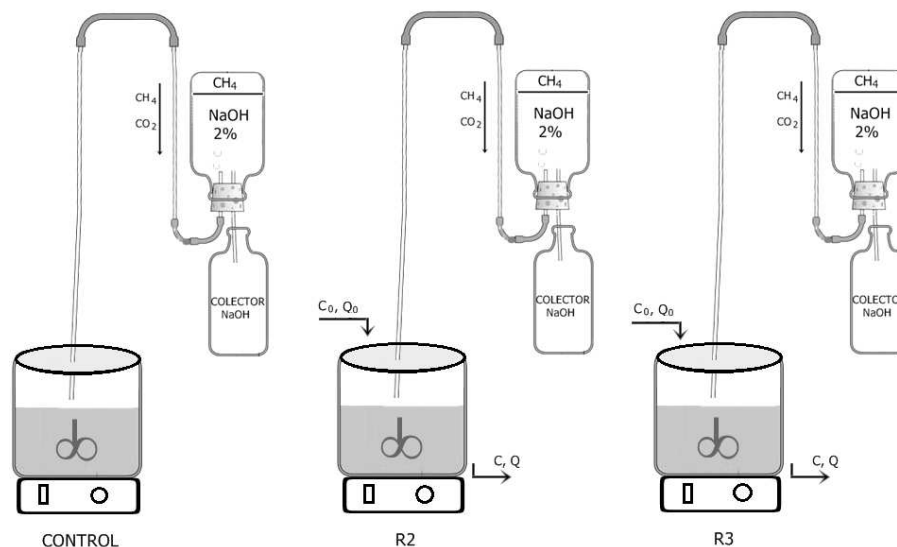


Figura 2: Esquema de biodigestores: control y dos réplicas.

Parámetro	Unidad	Ingreso a florentino	Agua laguna 3	Lodo laguna 3
pH		3.9	5.4	5.3
DQO total	$\text{g L}^{-1}$	$74.9 \pm 2.2$	$36.4 \pm 3.9$	$64.2 \pm 0.6$
DQO soluble	$\text{g L}^{-1}$	$27.8 \pm 0.6$	$4.7 \pm 0.0$	$15.3 \pm 0.8$
Sólidos totales	$\text{g L}^{-1}$	$44.0 \pm 0.7$	$26.1 \pm 0.4$	$62.6 \pm 0.0$
Sólidos volátiles	$\text{g L}^{-1}$	$37.2 \pm 0.6$	$19.3 \pm 0.3$	$32.6 \pm 0.3$
Sólidos suspendidos totales	$\text{g L}^{-1}$	$22.6 \pm 3.6$	$19.4 \pm 0.4$	$43.1 \pm 0.3$
Sólidos suspendidos volátiles	$\text{g L}^{-1}$	$20.3 \pm 2.9$	$16.2 \pm 0.3$	$25.6 \pm 0.1$
Nitratos	$\text{mg L}^{-1}$	$68.8 \pm 2.1$	$414.8 \pm 11.7$	$82.4 \pm 0.5$
Amonio	$\text{mg L}^{-1}$	$122.0 \pm 3.5$	$82.0 \pm 4.0$	$123.2 \pm 24.6$

Tabla 3: Caracterización de muestras tomadas en la planta de tratamiento de agua residual de la extractora de aceite crudo de palma.

Estos valores están dentro de los rangos encontrados en la literatura. Para los ST se presenta un rango de  $31.5$  a  $72.0 \text{ g L}^{-1}$  mientras que para los SV de  $34$  a  $49.3 \text{ g L}^{-1}$  [22]. En la laguna 3 los ST y SV del agua disminuyen a  $26.1 \pm 0.4$  y  $19.3 \pm 0.3 \text{ g L}^{-1}$  respectivamente. En los lodos de la misma laguna la concentración de ST y SV es de  $62.6$  y  $32.6 \pm 0.3 \text{ g L}^{-1}$  respectivamente. Estos valores son elevados comparados con los obtenidos al inicio del tratamiento debido a la gran cantidad de partículas sedimentadas en el fondo de la laguna, donde se tomó la muestra. La concentración de SST y SSV en el florentino también se encuentra dentro de los rangos de estudios realizados con este tipo de efluentes, para los SST se tiene un rango de  $15.6$  a  $39.1 \text{ g L}^{-1}$  y para los SSV de  $3.6$  a  $27.3 \text{ g L}^{-1}$  [18]. En el agua de la laguna 3 se reducen los SST y SSV a  $19.4 \pm 0.4$  y  $16.2 \pm 0.3 \text{ g L}^{-1}$  respectivamente mientras que en el lodo las concentraciones se mantienen altas  $43.1 \pm 0.3$  y  $25.6 \pm 0.1 \text{ g L}^{-1}$  respectivamente.

La concentración de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) en el florentino es  $68.8 \pm 2.1 \text{ mg L}^{-1}$ , en la laguna 3 la concentración aumenta a  $414.8 \pm 11.7 \text{ mg L}^{-1}$  y en el fondo de la misma es de  $82.4 \pm 0.5 \text{ mg L}^{-1}$ . El incremento de la concentración de  $\text{NO}_3^-$  en la laguna 3 se atribuye a procesos biológicos como la nitrificación a nivel superficial de la

laguna, ya que a mayor profundidad, el oxígeno disuelto es escaso o inexistente [23]. Este proceso está relacionado con las concentraciones de amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), que inicia en  $122 \pm 3.5 \text{ mg L}^{-1}$  en el florentino y en la laguna 3 alcanza un valor de  $82.0 \pm 4.0 \text{ mg L}^{-1}$  mientras que en el fondo de la laguna (lodo) su concentración es de  $123.2 \pm 24.6 \text{ mg L}^{-1}$ . Como se puede notar el  $\text{NO}_3^-$  y el  $\text{NH}_4^+$  no interfieren en el proceso de digestión de la materia orgánica. En un estudio realizado sobre los efectos de los compuestos de nitrógeno en la metanogénesis, se obtiene que hasta los  $600 \text{ mg NO}_3^- \text{ L}^{-1}$  no hay ningún efecto significativo, pasado este límite se presenta inhibición. La toxicidad del nitrógeno amoniacal sobre la actividad metanogénica se debe principalmente a su forma no ionizada (amoníaco libre,  $\text{NH}_3$ ) y a elevadas concentraciones de amonio ( $1300$  a  $4500 \text{ mg L}^{-1}$ ) [24].

### Bioensayos AME

La actividad metanogénica específica (AME) es una medida utilizada para evaluar la capacidad que tienen los microorganismos metanogénicos para convertir un sustrato orgánico en  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$  bajo condiciones controladas [25]. La producción de gas metano, expresado en moles, en función del tiempo, se presenta en la Figura 3, como se puede ver, la tendencia de generación para las 3 muestras analizadas es muy parecida a la que aparece

en la literatura, es decir primero crece aceleradamente la generación de CH<sub>4</sub>, después se estabiliza y nuevamente empieza a crecer [26]. La Tabla 5 presenta un resumen de la actividad metanogénica específica y el porcentaje de relación que existe entre los SSV y SST de las 3 muestras analizadas.

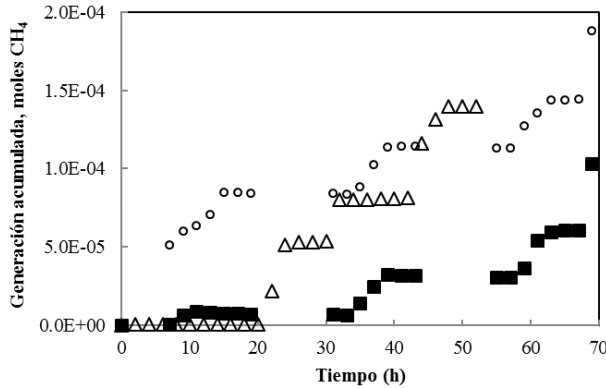


Figura 3: Generación acumulada de CH<sub>4</sub> en los bioensayos en función del tiempo. Leyenda: (Δ) inóculo agua del biodigestor R3, (○) inóculo lodos de la laguna 3, (■) inóculo agua de la laguna 3.

Como se indica en la Tabla 4, tanto el lodo como el agua de la laguna 3 presentan valores bajos, de actividad metanogénica específica, mientras que el agua del biodigestor R3 tiene un valor mucho más alto. Una tasa máxima específica de generación de metano óptima es aquella que se encuentra en un rango de 0.5 a 1 g DQO-CH<sub>4</sub> gSSV<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>. Estos valores son comunes cuando los bioensayos se realizan con lodos granulares, ya que por sus características el lodo granular proporciona un medio adecuado para la aglomeración y enriquecimiento de los microorganismos [27]. En un estudio realizado en diferentes tipos de lodos, se demuestra que la concentración de SSV es inversamente proporcional a la AME [28]. En la literatura se encuentran rangos desde 0.094 hasta 1.54 gDQO-CH<sub>4</sub> gSSV<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> para inóculos microbianos que son o serán utilizados para el tratamiento anaerobio de POME [21].

Con respecto a la relación %SSV/SST, el agua de la laguna 3 presenta el porcentaje más alto, sin embargo no tiene la mejor actividad metanogénica. La relación del agua del biodigestor también es muy buena y su actividad metanogénica está dentro del rango óptimo. Esta relación es muy importante ya que los SST representan la concentración de sólidos presentes en el inóculo microbiano y los SSV representan la fracción de los SST que está presente como biomasa, responsable de la degradación de la materia orgánica en CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> [29]. Por lo tanto mientras mayor sea el porcentaje de esta relación, el inóculo será más saludable, la literatura sugiere que una buena relación es del 60 al 80 % dependiendo el tipo de lodo que se utilice [17]. La concentración de SSV del agua del biodigestor es de 16 a 25 veces menor con relación a los SSV del agua y lodo de la laguna 3. Por este motivo su AME también aumenta en estos rangos ya que esta indica la actividad de SSV como microorganismos metanogénicos.

### Biodigestores

La Figura 4 muestra la concentración de DQO total y soluble a lo largo del tiempo de operación de los biodigestores R2 y R3 en periodos con agitación (durante el día) y sin agitación (durante la noche). Es evidente la tendencia que existe en la disminución de esta concentración. R2 arranca con 76.1 y 6.2 g L<sup>-1</sup> de DQO total y soluble respectivamente, mientras que R3 con 67.51 y 3.06 g L<sup>-1</sup>. Los dos biodigestores se estabilizan a partir del día 70 con una carga orgánica de 0.28 gDQO L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> alcanzando porcentajes de remoción del 89.2 % en R3 y tan solo el 38.4 % en R2. En el día 127 se aumenta la carga orgánica a 0.56 gDQO L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> con porcentajes de remoción del 61 y 38 % de remoción en R2 y R3 respectivamente. En la literatura se encuentran valores de 0.5 hasta 50 gDQO L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> de carga orgánica con porcentajes de remoción del 80-90 % en biodigestores con TRH de 1 a 3 días [18-20].

La Figura 5 muestra la concentración de sólidos totales y volátiles a lo largo del tiempo de operación de los biodigestores R2 y R3 con agitación y sin agitación. También se evidencia la tendencia de disminución de estos parámetros hasta su estabilización en el día 70. La literatura indica que tanto los sólidos totales como los volátiles tienden a acumularse debido a que en el proceso de degradación de la materia orgánica se producen lodos [17]. La alimentación de los biodigestores también aporta un porcentaje al aumento de lodos, en este caso la alimentación fue soluble, por lo tanto solamente salían lodos del sistema pero no entraban.

### Generación de CH<sub>4</sub>

En la Figura 6 se presenta la generación acumulada de CH<sub>4</sub> en R2, R3 y en el control (sin alimentación). Como se puede ver, en los primeros 14 días de estabilización, solamente R3 tiene una generación considerable comparada a R2 y el control. A partir del día 15 existe un decaimiento en la generación de CH<sub>4</sub> en los biodigestores debido a una inhibición por exceso de sustrato en la alimentación (15 g DQO L<sup>-1</sup>) [30]. En el día 30 se dejó de alimentar y los biodigestores se recuperaron, a partir del día 48 se comenzó una nueva alimentación de 2.5 gDQO L<sup>-1</sup>. R2 y R3 presentaron su tasa máxima de generación de CH<sub>4</sub> 2.34 · 10<sup>-3</sup> y 1.75 · 10<sup>-3</sup> mol d<sup>-1</sup> (corresponde a 1.17 · 10<sup>-3</sup> mol<sub>CH<sub>4</sub></sub> L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> y 0.88 · 10<sup>-3</sup> mol<sub>CH<sub>4</sub></sub> L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>) respectivamente con esta alimentación, R2 se demoró alrededor de 10 días en adaptarse, pero después se igualó a R3. En el día 90 hubo un cambio de operación y se alimentó el doble de concentración de DQO esperando un aumento en la generación de CH<sub>4</sub> sin embargo R3 no tuvo una generación significativa en este periodo. R2 al igual que antes, se demoró 10 días en adaptarse a la nueva concentración y comenzar a generar gas metano, pero su generación no fue mayor a la de la anterior fase y después de 8 días de operación, dejó de producir CH<sub>4</sub> y no pudo recuperarse. R3 por otro lado se recuperó después de quitar la alimentación en el día 126. Se regresó a operar con la alimentación de 2.5 gDQO L<sup>-1</sup>



Muestra	gDQO-CH <sub>4</sub> gSSV <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	SSV (g L <sup>-1</sup> )	%SSV/SST
Lodo laguna 3	0.035	25.6 ± 0.1	59.5
Agua laguna 3	0.032	16.2 ± 0.3	83.4
Agua biodigestor R3	0.60	1.0 ± 0.0	75.5

Tabla 4: Actividad metanogénica específica, SSV y porcentaje de relación SSV/SST de las muestras analizadas.

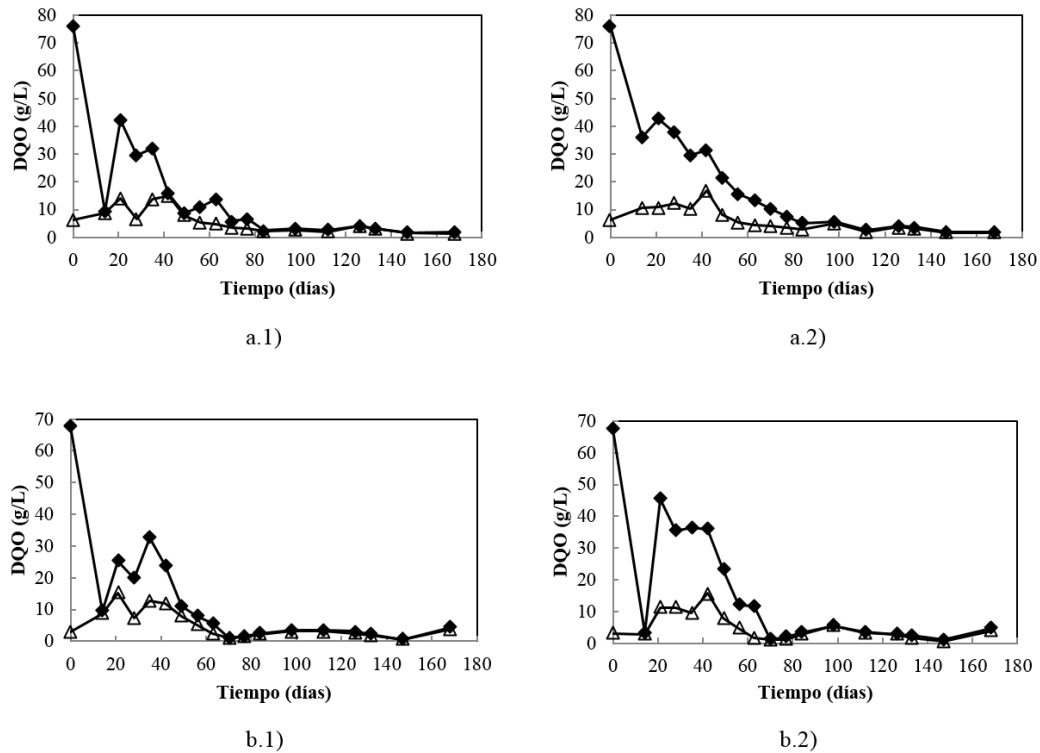


Figura 4: Concentración de DQO total (♦) y soluble (△) en función del tiempo de operación de los biodigestores. a.1) y a.2) representan al biodigestor R2 sin y con agitación respectivamente, b.1) y b.2) representan al biodigestor R3 sin y con agitación respectivamente.

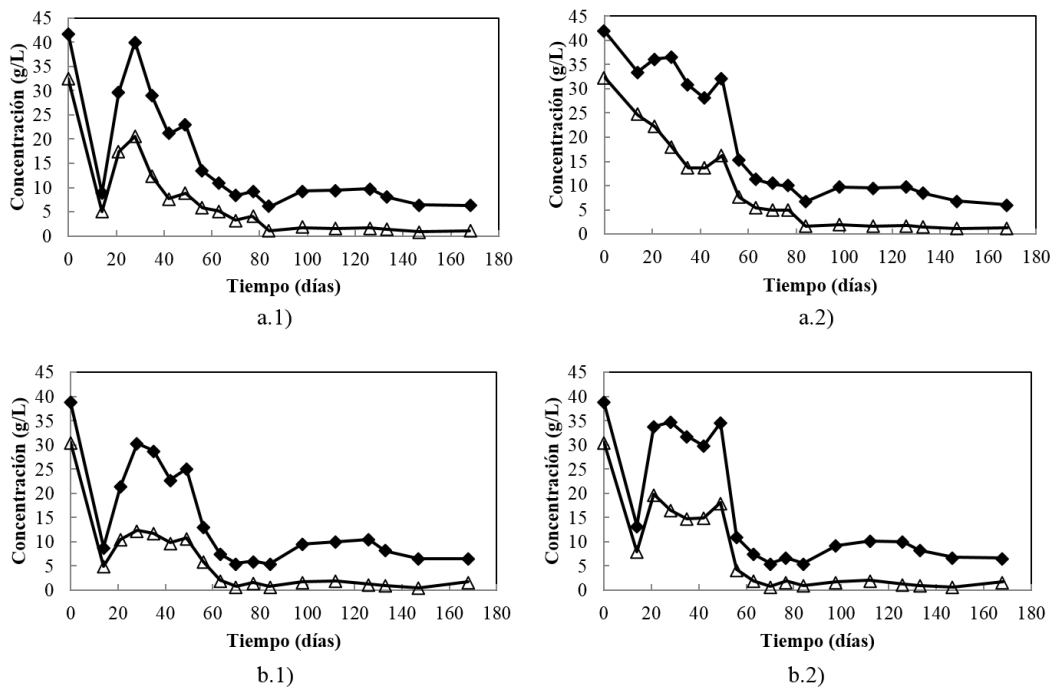
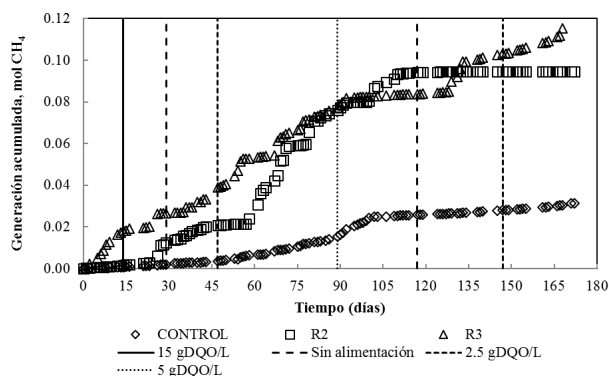


Figura 5: Concentración de Sólidos totales (♦) y volátiles (△) en función del tiempo de operación de los biodigestores. a.1) y a.2) representan al biodigestor R2 sin y con agitación respectivamente, b.1) y b.2) representan al biodigestor R3 sin y con agitación respectivamente.

en el día 148 y se obtuvo una generación máxima de gas metano de  $1.68 \cdot 10^{-3} \text{ mol d}^{-1}$ , valor cercano a lo producido anteriormente. El control presenta una generación máxima de metano de  $0.72 \cdot 10^{-3} \text{ mol d}^{-1}$  y una curva parecida a las de actividad metanogénica ya que se trata de un reactor batch.



**Figura 6:** Generación acumulada de  $\text{CH}_4$  en los biodigestores en función del tiempo de operación. Las líneas representan las diferentes concentraciones de DQO en la alimentación. Periodos: de 0 a 15 días sin alimentación; de 15 a 30 días alimentación de  $15 \text{ gDQO L}^{-1}$ ; de 30 a 48 días sin alimentación; de 48 a 90 días alimentación  $2.5 \text{ gDQO L}^{-1}$ ; de 90 días a 118 días alimentación  $5 \text{ gDQO L}^{-1}$ ; de 118 días a 148 días sin alimentación; de 148 días a 180 días alimentación  $2.5 \text{ gDQO L}^{-1}$ .

La generación de gas metano con respecto a los SV presentes en el biodigestor es de  $16.3 \cdot 10^{-3}$  y  $12.0 \cdot 10^{-3} \text{ mol CH}_4 \text{ gSV}^{-1} \text{ d}^{-1}$  para R2 y R3 respectivamente. Estos valores son mucho mayores a los presentados en un estudio similar realizado anteriormente [31]. Sin embargo en otros estudios similares pero con otro tipo de sustrato en la alimentación, se tiene valores de  $900\text{-}2000 \text{ mL CH}_4 \text{ gSV}^{-1} \text{ d}^{-1}$  (corresponde a  $36.2 \cdot 10^{-3} - 80.5 \cdot 10^{-3} \text{ mol CH}_4 \text{ gSV}^{-1} \text{ d}^{-1}$ , a 1 atm y  $30^\circ\text{C}$ ) [32].

## Conclusiones

Las muestras de agua residual y lodos obtenidas de un sistema de tratamiento de aguas residuales de una extractora de aceite crudo de palma, presentan concentraciones altas de DQO total y soluble; los sólidos totales, volátiles y suspendidos también son muy elevados especialmente en los lodos; las concentraciones de nitrato y amonio son bajas y no interfieren en el proceso de digestión de la materia orgánica. La actividad metanogénica específica (AME) del agua del biodigestor es la más alta ( $0.60 \text{ gDQO-CH}_4 \text{ SSV}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ). El uso de medio basal mineral con acetato promueve el enriquecimiento microorganismos generadores de gas metano. La producción de gas metano más alta se registró en el biodigestor R2 con un valor de  $1.17 \cdot 10^{-3} \text{ mol}_{\text{CH}_4} \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}$  a una carga de DQO en la alimentación de  $0.28 \text{ gDQO}_{\text{acetato}} \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ . El mayor porcentaje de remoción de materia orgánica se presentó en el biodigestor en R3 con un valor de 89.2 %.

## Agradecimientos

Agradecemos a las autoridades de la Universidad San Francisco de Quito por el apoyo en el desarrollo de este trabajo científico. Nuestro agradecimiento también para los representantes de la extractora de aceite crudo de palma por la apertura y ayuda durante el desarrollo del proyecto.

## Referencias

- [1] Obidzinski, K.; Andriani, R.; Komarudin, H.; Andrianto, A. 2012. "Environmental and social impacts of oil palm plantations and their implications for biofuel production in Indonesia". *Ecology and Society*, 17(1): 25.
- [2] Igwe, J.; Onyegbado C. 2007. "A review of palm oil mill effluent (POME) water treatment". *Glob. J. Environ. Res.*, 1: 54-62.
- [3] Zahrim, A.; Nasimah A.; Hilal N. 2014. "Pollutants analysis during conventional palm oil mill effluent (POME) ponding system and decolourisation of anaerobically treated POME via calcium lactate-polyacrylamide". *J. Water Process Eng.*, 4: 159-165.
- [4] Rupani, P.; Singh, R.; Ibrahim M.; Esa, N. 2010. "Review of current palm oil mill effluent (POME) treatment methods: vermicomposting as a sustainable practice". *World Appl. Sci. J.*, 11: 70-81.
- [5] Teng, T.; Wong, Y.; Ong, S.; Norhashimah, M.; Rafatullah, M. 2013. "Start-up Operation of Anaerobic Degradation Process for Palm Oil Mill Effluent in Anaerobic Bench Scale Reactor (ABSR)". *Procedia Environ. Sci.*, 18: 442-450. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proem.2013.04.059>.
- [6] Acosta, Y.; Cristina, M.; Abreu, O. 2005. "La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I". *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar XXXIX*. 1: 35-48.
- [7] Chandra, R.; Vijay, V.; Subbarao, P.; Khura T. 2012. "Production of methane from anaerobic digestion of jatropha and pongamia oil cakes". *Appl. Energy*, 93: 148-159. doi:10.1016/j.apenergy.2010.10.049.
- [8] Thauer, R. 1998. "Biochemistry of methanogenesis: a tribute to Marjory Stephenson: 1998 Marjory Stephenson Prize Lecture". *Microbiology*, 144: 2377-2406.
- [9] Gujer, W.; Zehnder, A. 1983. "Conversion processes in anaerobic digestion". *Water Sci. Technol.*, 15: 127-167.
- [10] Koster, I.; Cramer, A. 1987. "Inhibition of Methanogenesis from Acetate in Granular Sludge by Long-Chain Fatty Acids". *Appl. Envir. Microbiol.*, 53: 403-409.
- [11] Stocker T.; Qin, D., Plattner G.; Tignor, M.; Allen, S.; Boschung, J., et al. 2013. "IPCC, 2013: climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change". Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, doi:10.1017/CBO9781107415324.

- [12] Salomon, K.; Lora E. 2009. "Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil". *Biomass and Bioenergy*, 33: 1101-1107.
- [13] APHA. 2012. "Standard methods for the examination of water and wastewater, American Public Health Association Washington". 22nd. Washington, DC: American Public Health Association.
- [14] U.S. EPA, 2000. "Anaerobic Lagoon". Wastewater Technology Fact Sheet, Cincinnati Ohio.
- [15] Torres, P.; Pérez, A. 2010. "Actividad Metanogénica Específica: Una herramienta de control y optimización de sistemas de tratamiento anaerobio de aguas residuales". *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, 9: 5-14
- [16] Chan Y.; Chong, M.; Law C. 2010. "Biological treatment of anaerobically digested palm oil mill effluent (POME) using a Lab-Scale Sequencing Batch Reactor (SBR)". *J. Environ. Manage.*, 91: 1738-1746. doi:10.1016/j.jenvman.2010.03.021.
- [17] Metcalf & Eddy 2014. "Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery". 5th Edition AECOM. New York.
- [18] Poh P.; Yong, W.; Chong M. 2010. "Palm oil mill effluent (POME) characteristic in high crop season and the applicability of high-rate anaerobic bioreactors for the treatment of POME". *Ind. Eng. Chem. Res.*, 49: 11732-11740. doi:10.1021/ie101486w.
- [19] Najafpour G.; Zinatizadeh, L.; Mohamed, R.; Hasnain Isa, M.; Nasrollahzadeh, H. 2006. "High-rate anaerobic digestion of palm oil mill effluent in an upflow anaerobic sludge-fixed film bioreactor". *Process Biochem.*, 41: 370-379. doi:10.1016/j.procbio.2005.06.031.
- [20] Cheng X.; Li, Q.; Liu C. 2012. "Coproduct of hydrogen and methane via anaerobic fermentation of cornstalk waste in continuous stirred tank reactor integrated with up-flow anaerobic sludge bed". *Bioresour. Technol.*, 114: 327-333. doi:10.1016/j.biortech.2012.03.038.
- [21] Zinatizadeh L.; Mohamed, R.; Abdullah, Z.; Mashitah M.; Hasnain Isa, M.; Najafpour, G. 2006. "Process modeling and analysis of palm oil mill effluent treatment in an up-flow anaerobic sludge fixed film bioreactor using response surface methodology (RSM)". *Water Res.*, 40: 3193-3208. doi:10.1016/j.watres.2006.07.005.
- [22] Abdurahman, N.; Rosli Y.; Azhari N. 2013. "The Performance Evaluation of Anaerobic Methods for Palm Oil Mill Effluent (POME) Treatment: A Review". *Int. Perspect. Water Qual. Manag. Pollut. Control.*, 87 - 106. doi:10.5772/54331.
- [23] Zeng, R.; Lemaire, R.; Yuan Z.; Keller, J. 2003. "Simultaneous nitrification, denitrification, and phosphorus removal in a lab-scale sequencing batch reactor". *Biotechnol. Bioeng.*, 84: 170-178.
- [24] Klüber, H.; Conrad, R. 1998. "Effects of nitrate, nitrite, NO and N<sub>2</sub>O on methanogenesis and other redox processes in anoxic rice field soil". *FEMS Microbiol. Ecol.*, 25: 301-318.
- [25] Rojas, M.; Netto, A.; Zaiat, M. 2008. "Actividad metanogénica específica en un reactor anaerobio - Aerobio aplicado al tratamiento de agua residual doméstica". *Interciencia*, 33: 284-289.
- [26] Lozano, C.; Mendoza, M.; de Arango, M.; Monroy E. 2009. "Microbiological characterization and specific methanogenic activity of anaerobe sludges used in urban solid waste treatment". *Waste Manag.*, 29: 704-711. doi:10.1016/j.wasman.2008.06.021.
- [27] Collieran, E.; Concannon, F.; Golden, T.; Geoghegan, F.; Crumlish, B.; Killilea, E. et al. 1992. "Use of methanogenic activity tests to characterize anaerobic sludges, screen for anaerobic biodegradability and determine toxicity thresholds against individual anaerobic trophic". *Water Sci. Technol.*, 25: 31-40.
- [28] Guerra, R.; González, S.; Trupiano, A.; Figueroa, M. 2001. "Perfiles de actividad metanogénica específica en un reactor UASB (reactor anaeróbico de flujo ascendente y manto de lodos) utilizado para el tratamiento de líquidos cloacales pre-sedimentados". *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 5: 19-22.
- [29] Theuretzbacher, F.; Lizasoain, J.; Lefever, C.; Saylor, M.; Enguidanos, R.; Weran, N. et al. 2015. "Steam explosion pretreatment of wheat straw to improve methane yields: Investigation of the degradation kinetics of structural compounds during anaerobic digestion". *Bioresour. Technol.*, 179: 299-305. doi:10.1016/j.biortech.2014.12.008.
- [30] Lowe S.; Jain M.; Zeikus, J. 1993. "Biology, ecology, and biotechnological applications of anaerobic bacteria adapted to environmental stresses in temperature, pH, salinity, or substrates". *Microbiol. Rev.*, 57: 451-509. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC372919/>.
- [31] Pazmiño, G.; Peñafiel, R. 2015. "Determinación de generación de metano y remoción de carga orgánica en las lagunas anaerobias del sistema de tratamiento de aguas residuales de una empresa extractora de aceite de palma africana". Universidad San Francisco de Quito, Tesis de Ingeniería Ambiental: Quito.
- [32] Bouallagui, H.; Ben Cheikh, R.; Marouani, L.; Hamdi, M. 2003. "Mesophilic biogas production from fruit and vegetable waste in a tubular digester". *Bioresour. Technol.*, 86: 85-89.

## Brazo inalámbrico para procesos industriales de alto riesgo

Jhonny Marcelo Orozco Ramos<sup>1\*</sup>, Carlos José Santillán Mariño<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Escuela de Ingeniería Industrial, Riobamba, Ecuador.

\*Autor principal/Corresponding author, e-mail: jhonny.orozco@espoch.edu.ec

Editado por/Edited by: Cesar Zambrano, Ph.D.

Recibido/Received: 2015/04/15. Aceptado/Accepted: 2015/09/25.

Publicado en línea/Published on Web: 2015/12/30. Impreso/Printed: 2015/12/30.

### Wireless arm to high risk industrial processes

#### Abstract

The draft wireless arm for industrial processes of high risk consist of a detailed study of anthropometric movements of a person, these parameters allow to specify the values of range, scope, and turns that must reproduce the robotic arm, the same arm is commanded by a sensory flex glove, equipped with sensors; the intercommunication and reproduction of movements such as finger, hand, elbow and shoulder are driven from the glove placed on the operator and located at a distance considered not to risk for the worker; all these movements are the result of a simulation in Matlab and reproduced by Arduino boards in their physical connection; wireless communication is done via Bluetooth to a HC05 master - slave and scope of proven range of 15 to 20m separation man - workplace. Each of the elements of the robotic arm are tested and simulated with Solidworks, ie static analysis, material selection and dimensional aspects prior to running the 3D printing piece by piece and conclude in the assembly step; along side the assembly movement mechanisms and servomotors sized for a maximum clamping force range from 18 to 22 kgf which is what a normal person has the capacity; expected outcome is to safeguard the integrity of workers in relation to elements of occupational health and safety in environments with conditions of handling of toxic substances.

**Keywords.** Arm, Wireless, Arduino, Bluetooth, Servomotors.

#### Resumen

El proyecto de brazo inalámbrico para procesos industriales de alto riesgo, parte de un estudio minucioso de los movimientos antropométricos de una persona, estos parámetros permiten especificar los valores de alcance, campo de acción, y giros que debe reproducir el brazo robótico, el mismo que es comandado por un guante sensorial equipado con sensores tipo flex; la intercomunicación y reproducción de los movimientos como son de los dedos, mano, codo y el hombro son accionados desde el guante colocado en el operario y ubicado a una cierta distancia considerada como de no riesgo al trabajador; todos estos movimientos son resultado de una simulación en Matlab y reproducido por las placas Arduino en su conexión física; la comunicación inalámbrica se lo realiza vía Bluetooth con un HC05 master - esclavo y con alcance de rango probado de entre 15 a 20m de separación hombre - centro de trabajo. Cada uno de los elementos que conforman el brazo robótico son comprobados y simulados con Solidworks, es decir el análisis estático, selección de materiales y aspectos dimensionales, paso previo a ejecutar la impresión 3D pieza por pieza y concluir en el ensamble; a la par del ensamble se colocan los mecanismos de movimiento así como de los servomotores dimensionados para obtener una fuerza de sujeción de rango máximo entre 18 a 22 kgf que es lo que una persona normal tiene como capacidad; resultado final esperado es lograr precautelar la integridad de los trabajadores en lo relacionado a los elementos de seguridad y salud ocupacional en ambientes con condiciones de manipulación de sustancias tóxicas.

**Palabras Clave.** Brazo, Inalámbrico, Arduino, Bluetooth, Servomotores.

#### Introducción

El desarrollo de sectores productivos en el Ecuador relacionados con la industria de productos químicos básicos, fabricación de pinturas, barnices y productos de revestimiento, fabricación de productos farmacéuticos,

sustancias químicas medicinales, fabricación de plaguicidas, pesticidas, fertilizantes, tratamiento de desechos industriales y otros, exigen la manipulación de materiales o sustancias considerados como peligrosos y a pesar de que se cuenta con buena información sobre su

conducción y manipulación por ejemplo en la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2 266:2010 del Instituto Ecuatoriano de Normalización; no ha impedido que ocurran accidentes, a mencionar según informe anual del año 2010 del IESS se registraron 3554 accidentes en las ramas de la agricultura, explotación de minas y canteras y en las industrias manufactureras todas ellas relacionados con la manipulación y contacto de los trabajadores con sustancias químicas [1].

Para reducir estos valores de accidentes por concepto de manipulación de sustancias químicas y tóxicas se lo puede hacer y se lo viene realizando mediante el empleo adecuado de EPP, sin embargo, hacer una propuesta alternativa que permita dar una solución desde un punto de vista más práctico, es decir retirando al trabajador del contacto directo con la manipulación de estas sustancias y ubicándolo a una distancia segura, se lo puede realizar mediante un manipulador inalámbrico que emule los movimientos de un brazo humano.

### Objetivo

Retirar al trabajador a una zona segura para manipular sustancias tóxicas mediante la reproducción de sus movimientos a través del empleo de un manipulador inalámbrico.

### Alcance

Determinar las variables básicas de la anatomía, ergonomía y antropométricos para dimensionar parámetros del diseño de la estructura seleccionada.

Realizar el estudio de los elementos electrónicos y mecánicos, vinculados con los resultados del análisis cinemático y dinámico, modelización y dibujos CAD a utilizarse en la construcción del proyecto.

Prototipar y construir mediante impresión en 3D un brazo inalámbrico para procesos industriales de alto riesgo.

### Materiales y Métodos

La Organización Internacional de Estándares (ISO) define al robot industrial como:

“Manipulador multifuncional reprogramable con varios grados de libertad, capaz de manipular materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales según trayectorias variables programadas para realizar tareas diversas” [2].

Del estudio antropométrico de un brazo humano, se determina los principales tipos de movimientos y ángulos para los siguientes elementos:

El dimensionamiento del brazo robótico contempla, el análisis cinemático que permite encontrar las ecuaciones físicas para determinar la transmisión de movimientos, se procede por tanto a encontrar las relaciones de las velocidades articulares de entrada y la velocidad tanto lineal como angular del extremo operativo del brazo

Hombro	$\pm 20^\circ$ y $< 45^\circ$
Codo	Posición inicial $15^\circ$ respecto a la vertical
Amplitud del brazo	$< 170^\circ$
Amplitud del codo	$< 120^\circ$
Desviación de muñeca	$< 100^\circ$
Giro de muñeca	$< 120^\circ$
Carga sujeción vertical puño cerrado	$< 35$ Kg
Fuerza de agarre	$< 16$ Kg
Distancia de agarre	$< 4,12$ cm

Tabla 1: Grados de movimientos del brazo [3].

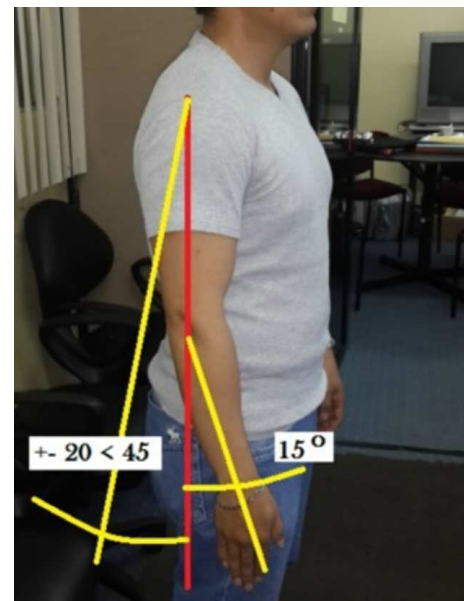


Figura 1: Grados de movimiento del antebrazo.

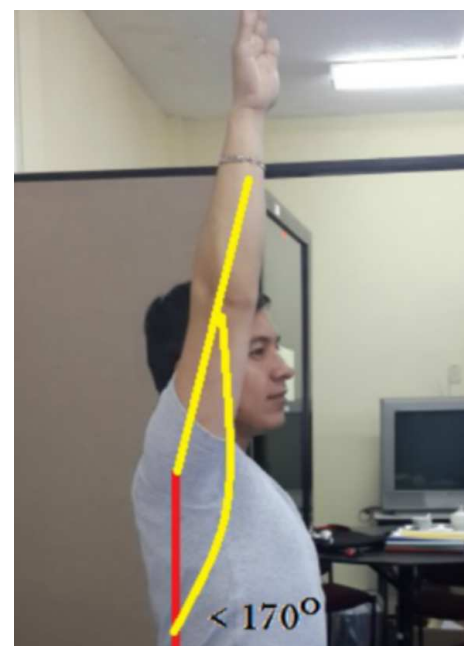


Figura 2: Grados de movimiento del hombro.



Figura 3: Verificación de los grados de movimientos.

robótico, esto a partir de la matriz jacobiano, y posteriormente la determinación del espacio de trabajo real del manipulador.

Si consideramos dos grados de libertad considerando el hombro, el antebrazo y el giro de la muñeca se tiene una matriz jacobiana para determinar las velocidades en la muñeca con las siguientes matrices:

Teniendo las matrices de transformación homogénea [4]:

$$H_1^0(\theta_1) \begin{bmatrix} c1 & -s1 & 0 & a1c1 \\ s1 & c1 & 0 & a1s1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$H_2^0(\theta_2) \begin{bmatrix} c2 & -s2 & 0 & a2c2 \\ s2 & c2 & 0 & a2s2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$H_2^0(\theta_1, \theta_2) \begin{bmatrix} c12 & -s12 & 0 & a1c1 + a2c2 \\ s12 & c12 & 0 & a1s1 + a2s2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$H_2^0(\theta_1, \theta_2) \begin{bmatrix} c12 & -s12 & 0 & a1c1 + a2c2 \\ s12 & c12 & 0 & a1s1 + a2s2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Las velocidades en la muñeca se obtienen al aplicar la siguiente ecuación:

$$\vec{\omega}_2^0 = J_w(\theta_1, \theta_2) \times \begin{pmatrix} \hat{\theta}_1 \\ \hat{\theta}_2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Donde  $\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2$  son las velocidades de las articulaciones en este caso del hombro y antebrazo y  $J_w$  el jacobiano de velocidad angular.

$$J_w(\theta_1, \theta_2) = [ Z_0 \quad Z_1 ] \quad (5)$$

Donde  $Z_0$  es igual al vector unitario k y  $Z_1$  la tercera columna de la matriz homogénea  $H_1^0$

$$Z_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = k_0 \quad (6)$$

$$Z_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

De esta manera tenemos el jacobiano:

$$J_w(\theta_1, \theta_2) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

Por ultimo para encontrar la velocidad angular en la muñeca tenemos lo siguiente:

$$\vec{\omega}_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \hat{\theta}_1 \\ \hat{\theta}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \hat{\theta}_1 \times \hat{\theta}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Wx \\ Wy \\ Wz \end{pmatrix} \quad (9)$$

Estas funciones  $J_w$ , el cuadro DH de cinemática así como el control de posición son ejecutadas en Matlab.

El Análisis dinámico, permite conocer los parámetros físicos de las velocidades y aceleraciones así como de los esfuerzos, esto permite establecer aspectos del brazo robótico como tipo de material, rendimiento del mecanismo y potencia de los actuadores.

En relación al cómputo de los esfuerzos se determinan los valores de esfuerzos de tensión (eslabones), esfuerzos cortantes (sujetadores, pernos) de torsión (para seleccionar el servomotor), flexión pura y simulación con FEM para comprobar que la selección del material cumple con el requerimiento de diseño.

Para la construcción de la carcasa del brazo inalámbrico mediante impresión 3D, se realizó el dibujo tridimensional en SolidWorks de cada uno de sus partes llegando a obtener 48 elementos, determinándose además el cálculo del centro de masas, efectos inerciales, selección del material, cálculo de espesor de la carcasa, fuerzas centrípetas, par gravitacional y de fricción, análisis estático y el ensamble; esto por cuanto resulta más práctico que utilizar ecuaciones del movimiento de Euler Lagrange.



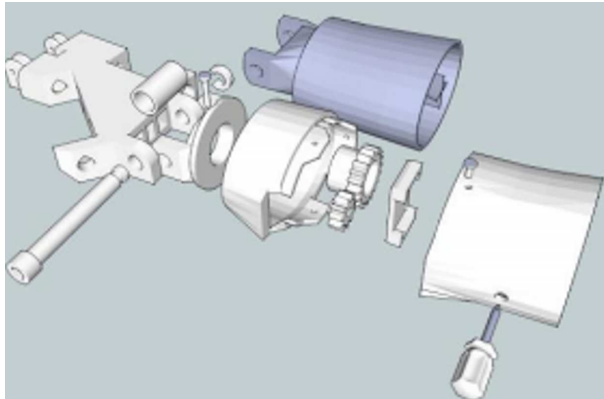


Figura 4: Estructura de la muñeca.

Material	Densidad (g/cm <sup>2</sup> )	Resistencia a la rotura (kg/cm <sup>2</sup> )	Temperatura de fusión °C
ABS	1,07	450-750	215-250
PLA	1,50-1,64	0	160-230

Tabla 2: Propiedades Mecánicas y Físicas del material ABS y PLA.

Dentro de las posibilidades comunes para la impresión de las piezas se tiene dos materiales con las siguientes características:

Se escoge el material ABS por las características que nos presenta y la posibilidad de cromarles para tener una mayor resistencia a la corrosión con una alternativa de acabado superficial.

La reproducción de movimientos del brazo robótico son idénticos al brazo humano considerando todas sus partes: dedos, muñeca, codo y hombro e intercomunicados por un guante sensorial que se propone que el operario o trabajador manipule desde su espacio de trabajo; a través de la simulación ejecutada mediante elementos sensoriales ubicados en el brazo del trabajador y que son repetidos por el brazo robótico. Esto mediante una interfaz inalámbrica Bluetooth (Operario-Brazo Robótico), la señal emitida por el emisor (operario) es interpretada por un módulo receptor el cual convierte las señales analógicas en una modulación por ancho de pulsos para determinar el ángulo de giro en cada motor el mismo que controla el posicionamiento de cada elemento del brazo.

Para la reproducción de los movimientos básicos se lo realiza mediante el empleo de Galgas sensores flex, que permiten enviar señales analógicas.

Los circuitos electrónicos constan de una parte central a través de una placa Arduino Leonardo R3 y Bluetooth HC05 destinado para la comunicación.

Para el accionamiento de los mecanismos de reproducción de los movimientos se utiliza servomotores, los mismos que son seleccionados dependiendo la carga que se va a utilizar, para nuestro caso responde a reproducir la fuerza de una persona de condiciones promedio y calculado en valores de rango entre 18 a 22kgf.



Figura 5: Sensor flex.

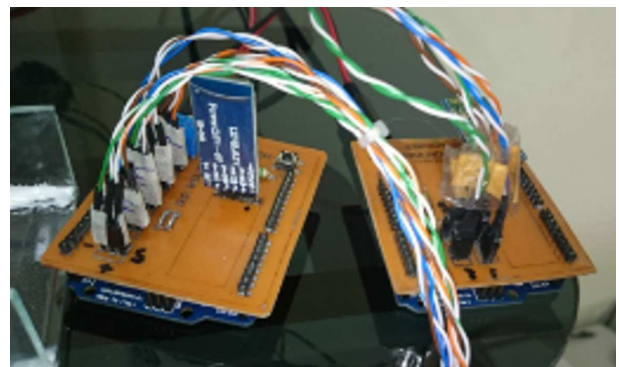


Figura 6: Placa Arduino con el Bluetooth para el enlace.



Figura 7: Servomotor.

El análisis de la fuerza se tiene mediante la aplicación de ecuaciones sencillas donde se considera el torque de cada uno de los servomotores seleccionados, cabe mencionar que una de las condiciones especiales para incrementar la fuerza en el caso del antebrazo se tiene un tornillo de potencia que me da mayor fuerza y se pueda levantar un peso de hasta 20kgf.

$$Mf = F \times \text{Brazo de palanca} \times \sin \alpha \quad (10)$$

Donde:

Mf = Momento de fuerza.

D = Distancia o brazo de palanca.

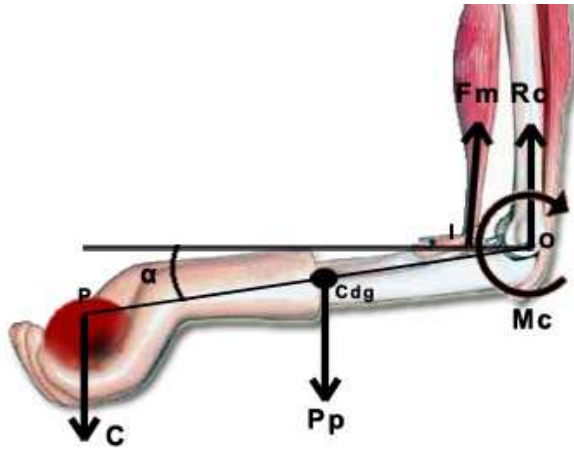


Figura 8: Posicionamiento para el cálculo de la fuerza que levanta el brazo [5].

Si se considera el momento máximo se tiene un seno de alfa igual a 1 teniendo:

$$F = \frac{T}{D} \quad (11)$$

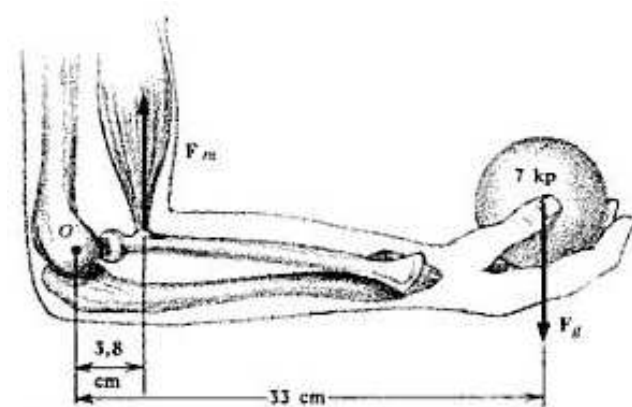


Figura 9: Componentes para la fuerza del brazo [6].

### Resultados

Los parámetros de diseño de cada uno de los componentes del brazo robótico se los realiza con ayuda del software SolidWorks, simulando las tolerancias específicas y de esta manera garantizar un ensamble adecuado.

Cada uno de los componentes fueron impresos en 3D previo diseño y verificación de medidas y tolerancias, obteniéndose ensamble con condiciones óptimas.

Los movimientos del brazo para determinar los aportes de ángulos y velocidades de las articulaciones, es decir comprobar el análisis cinemático de posiciones y campo de acción, es estimado en Matlab.

La reproducción de movimientos es idéntica al brazo humano considerando todos los movimientos como es el caso de dedos, muñeca, codo y hombro obteniendo de esta manera todos los movimientos del brazo humano.

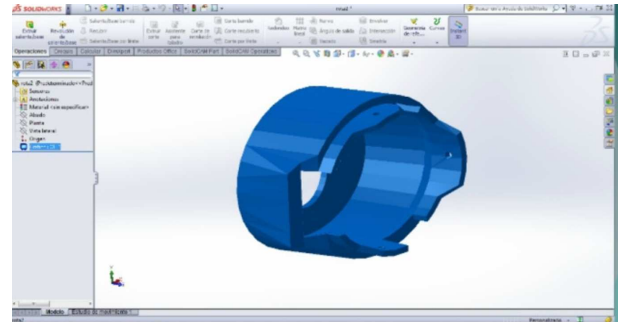


Figura 10: Parte de la muñeca.

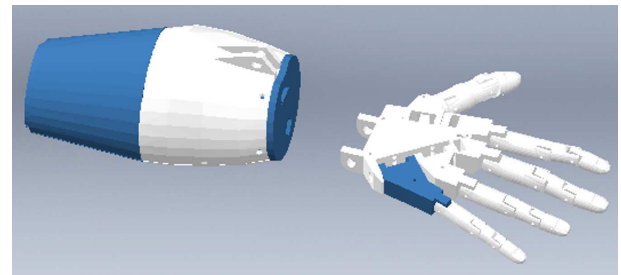


Figura 11: Ensamble en Solidwork de las piezas para imprimir en 3D.

Para la conexión inalámbrica se emplea un Bluetooth HC05, que emite señales de intercomunicación casi instantánea alrededor de 0,001 de segundo de velocidad emisión – recepción y una distancia comprobada de campo de comunicación de hasta 15 metros.

La estructura cuenta con topes de control de amplitud de movimientos, esto como un medio de mantener la salud del trabajador en el caso de realizar movimientos extremos o exagerados, además cumple con la función de permitir proteger los circuitos electrónicos internos en los casos de contacto con las sustancias tóxicas como por ejemplo ácidos.

La fuerza de sujeción del brazo está de acuerdo a los cálculos antropométricos de una persona trabajador ecuatoriano medio, esto permite justificar el diseño de la transmisión y los servomotores seleccionándose Servos HITEC HS-805BB de 12 y 24,7 kg\*cm.

La estructura o carcasa permite proteger los circuitos electrónicos contra el deterioro en el posible contacto con sustancias tóxicas, seleccionándose un elastómero tipo PLA.

### Discusión

El brazo inalámbrico es de gran utilidad dentro de la industria ecuatoriana, evitando los daños en los trabajadores que puede ocasionar la manipulación de sustancias químicas y tóxicas presente en los procesos productivos.

Los movimientos del brazo inalámbrico son idénticos al de un brazo humano.

La comunicación y mando inalámbrico se aplica en muchos de los procesos industriales, considerándose actualmente en implementaciones robóticas y androides,

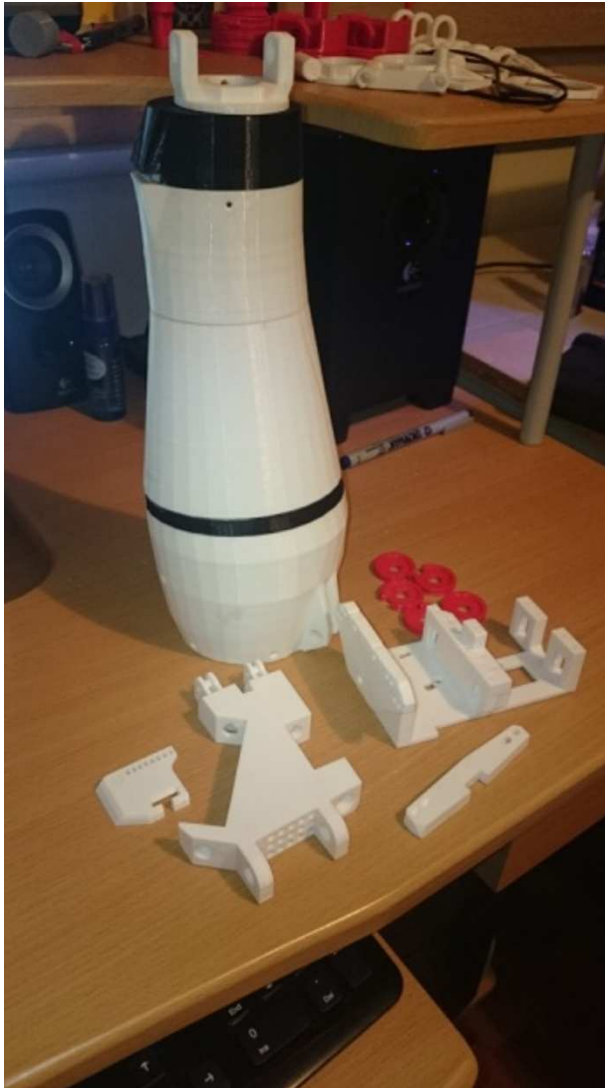


Figura 12: Piezas Impresas.

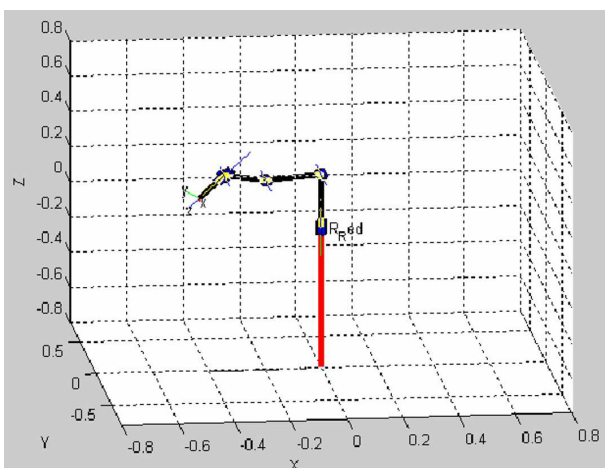


Figura 13: Análisis cinemático en Matlab.

sin embargo la manipulación inalámbrica sustituye las programaciones de movimientos en situaciones donde dichas programaciones resulten altamente complejas.

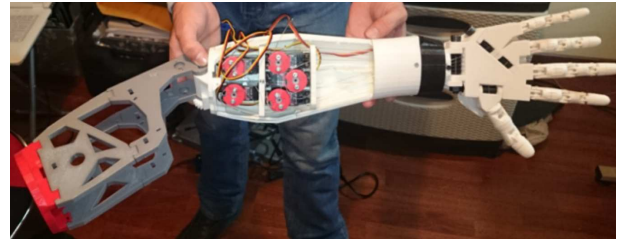


Figura 14: Ensamble del brazo.

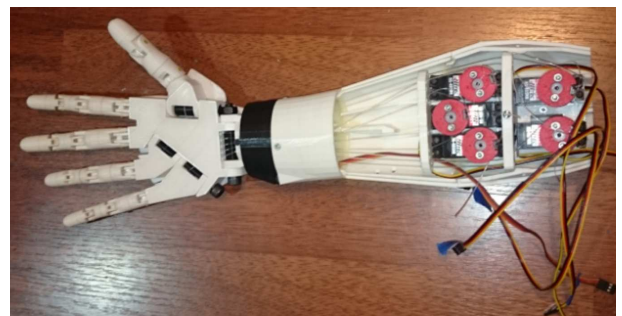


Figura 15: Ensamble de los motores en el brazo.



Figura 16: Brazo con la cubierta de los servomotores.

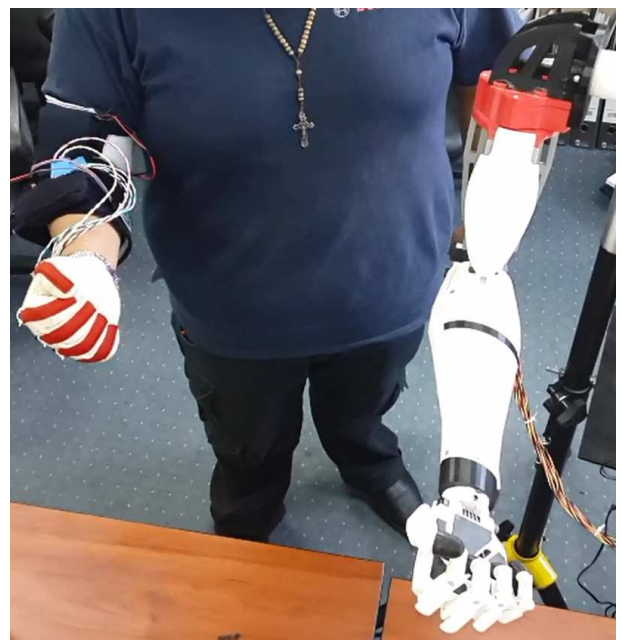


Figura 17: Reproducción de movimientos comandados por un brazo real.

### Agradecimientos

Se agradece a la Escuela de Ingeniería Industrial de la ESPOCH por darnos la oportunidad de dar nuevas solu-

ciones a toda el área industrial.

Un agradecimiento especial a nuestros estimados alumnos Santiago Garrido y Paul Villa por ser parte del grupo de investigación y cuyo aporte permitió llegar a la ejecución del proyecto.

### Referencias

- [1] Instituto Ecuatoriano de Normalización. 2010. "Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2 266". Primera Edición, Quito - Ecuador.
- [2] Eulália B.; Rodríguez, J.; Sánchez R. 2004. "Robots Industriales". FIB, [http://www-pagines.fib.upc.es/~rob/protegit/treballs/Q2\\_03-04/industr/Robots%20Industriales.htm](http://www-pagines.fib.upc.es/~rob/protegit/treballs/Q2_03-04/industr/Robots%20Industriales.htm).
- [3] Universidad Politécnica de Valencia. 2015. "RULA (Rapid Upper Limb Assessment)". <http://www.ergonautas.upv.es/metodos/rula/rula-ayuda.php>.
- [4] Valderrama, F. 2015. "Matriz jacobiana de un campo vectorial". <http://www.ugr.es/~rpaya/documentos/AnalisisI/2014-15/Jacobiana.pdf>.
- [5] Universidad Politécnica de Valencia. 2015. "Biomecánica (Esfuerzos Estáticos Coplanares)". [www.ergonautas.upv.es](http://www.ergonautas.upv.es).
- [6] Slideshare. 2012. "Torque y Equilibrio de Cuerpo Rígido". <http://es.slideshare.net/aaprfull1992/torque-y-equilibrio-de-cuerpo-rgido?related=2:170-192>.