

Epidemiological profile of Chagas disease in Southern coastal Ecuador: pilot study of the *Trypanosoma cruzi* infection in the vector *Triatoma dimidiata*

Perfil epidemiológico de la enfermedad de Chagas en la costa sur del Ecuador: estudio piloto de la infección de *Trypanosoma cruzi* en el vector *Triatoma dimidiata*

Bárbara Mantilla^{1,2}, Mauricio S. Lascano³, Fernanda Jimenez⁴, Leonardo Quinde⁵, Manuel Espinoza⁵, Ángel Guevara⁶, Renato León^{2*}

¹Universidad San Francisco de Quito (USFQ). Colegio de Ciencias de la Salud. Av. Interoceánica Km 12.5 y Av. Florencia, 2977900, Quito, Ecuador.

²Universidad San Francisco de Quito (USFQ). Laboratorio de Entomología Médica & Medicina Tropical (LEMMT). Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales. Calle Diego de Robles y Vía Interoceánica, Campus Cumbayá, Casilla Postal 17-1200-841, Quito, Ecuador.

³Centers for Disease Control and Prevention (CDC), Center for Global Health/Division of Parasitic Diseases and Malaria/Entomology Branch, 1600 Clifton Rd, Atlanta, GA, 30329, USA.

⁴Programa Nacional para el Abordaje Multidisciplinario de las Parasitosis Desatendidas en el Ecuador - Instituto Nacional de Investigación en Salud Pública (INSPI-PROPAD) Dirección: Iquique N14- 285, Yaguachi código postal: 170412. Quito - Ecuador.

⁵Servicio Nacional de Control de Enfermedades Transmitidas por Vectores Artrópodos (SNEM), Programa Nacional de Chagas. Calle 10^{ma} y Avenida 6^{ta}, frente a la Ciudadela Naval Norte, Guayaquil, Ecuador.

⁶Universidad Central del Ecuador (UCE), Escuela de Medicina, Centro de BioMedicina. Dirección: Campus de Medicina, Sodiro N14-121 e Iquique, Quito, Ecuador.

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

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

Recibido/Received: 03/05/2014. Aceptado/Accepted: 21/04/2014.

Publicado en línea/Published on Web: 19/12/2014. Impreso/Printed: 19/12/2014.

Abstract

Chagas disease is a prevalent and potentially fatal parasitic infection that affects millions of people, especially in Latin America. The causative agent of the disease is the protozoan *Trypanosoma cruzi*, transmitted mainly by blood-sucking insect vectors of the subfamily Triatominae. The objective of this study was to analyze the infection by *Trypanosoma cruzi* in the vector *Triatoma dimidiata* in a rural area of Southern coastal Ecuador. Triatominae searches were carried out in peridomestic habitats of households located in Bajada de Chanduy, a rural village in the border between Santa Elena and Guayas provinces. Feces and intestinal contents were extracted from the insects and observed in the microscope for the presence of mobile trypanosomes. Approximately 72% of the insects analyzed were infected with trypanosomes. This percentage reflects the occurrence of active foci of *T. cruzi* and the potential risk that this poses for people living in rural villages in the study area. The trypanosomes that were found infecting the triatomine bugs will be molecularly identified and a study of the genetic variability of the population of *T. dimidiata* collected at the study site will be carried out in the future. The results of all these analyses will provide a better understanding of the epidemiology of Chagas disease in rural Ecuador, which is an essential step in the development of control and prevention strategies for the transmission of this pathogenic parasite.

Keywords. Chagas Disease, *Trypanosoma cruzi*, *Triatoma dimidiata*, Ecuador.

Resumen

La Enfermedad de Chagas es una infección parasitaria prevalente y potencialmente fatal, que afecta a millones de personas, especialmente en América Latina. El agente causal de esta enfermedad es el protozoario *Trypanosoma cruzi*, que es transmitido por insectos hematófagos de la subfamilia Triatominae. El objetivo de este estudio es analizar la infección por *Trypanosoma cruzi* en el vector *Triatoma dimidiata* en un área rural de la costa sur del Ecuador. Las búsquedas de triatomíneos se llevaron a cabo en hábitats peridomésticos de viviendas ubicadas en Bajada de Chanduy, un pueblo rural en el borde entre las provincias de Santa Elena y Guayas. Las muestras de heces y contenido intestinal fueron extraídas de los insectos y observadas en el microscopio para detectar la presencia de tripanosomas móviles. Aproximadamente 72% de los insectos analizados estaban infectados con tripanosomas. Este porcentaje refleja la presencia de focos activos de *T. cruzi* y el potencial riesgo que esto implica para los habitantes de los pueblos en el área de estudio. Los tripanosomas que se encontraron infectando a los insectos triatomíneos serán identificados molecularmente y un estudio de la variabilidad genética de la población de *T. dimidiata* se llevará a cabo en el futuro. Los resultados de todos estos análisis contribuirán a un mayor conocimiento de la epidemiología de la Enfermedad de Chagas en las zonas rurales del Ecuador, lo que constituye un paso esencial en el desarrollo de estrategias de control y prevención para la transmisión de este parásito patógeno.

Palabras Clave. Enfermedad de Chagas, *Trypanosoma cruzi*, *Triatoma dimidiata*, Ecuador.

Trypanosoma cruzi is a hemoflagellate parasite of mammals, and the causative agent of Chagas disease in humans. Chagas disease is a potentially fatal condition for which there is no vaccine or effective and safe treatment available. Chronic infection causes associated cardiac abnormalities in 30% and digestive and/or neurological disease in 10% of the cases [1]. Infection occurs when Triatominae insect vectors -commonly known as kissing bugs- feed on blood from an infected mammal, defecate close to the feeding wound, and the feces contaminated with *T. cruzi* enter the host's circulatory system through the wound or through mucosal tissues in the body. About eight million people are infected worldwide, primarily in Latin America, where *T. cruzi* is found in endemic rural areas of 21 countries in this region [1].

In Ecuador, it is estimated that 170,000 people are seropositive for *T. cruzi*, and 4,400 acquire the infection every year, resulting in 300 deaths from causes directly related to Chagas disease [2]. Most of the studies on Chagas disease in Ecuador have focused on a few provinces, namely Loja, Manabí, Guayas and El Oro, where some of the highest rates of *T. cruzi* prevalence have been reported [2]. These areas constitute the habitat of at least five species of triatomines, which are responsible for most of the vectorial transmission of Chagas disease in Ecuador [3]. *Rhodnius ecuadoriensis* and *Triatoma dimidiata* are the most important vectors in the country. It is believed that *T. dimidiata* was introduced from Central America and its presence is restricted to the coastal provinces of Guayas, Santa Elena, and Manabí. *R. ecuadoriensis* is also present in the Ecuadorian coast, commonly associated with palm trees, but it is not exclusively limited to this region [2]. In addition to occupying sylvatic habitats, this vector colonizes peridomestic and domestic areas. The transmission of *T. cruzi* is highly influenced by the invasion and adaptation of the kissing bugs to human dwellings [4].

It has been demonstrated that vector control is the most effective method of preventing *T. cruzi* infection and controlling the disease. Thus, more research on the biological interactions vector-parasite and the influence of environmental factors in parasite transmission is needed in order to establish effective and targeted control strategies. The presence of the non-pathogenic parasite *Trypanosoma rangeli*, which infects the same wild reservoir hosts and insect vectors of *T. cruzi*, and also occurs in the same geographic areas, could make parasite identification confusing and difficult and thus may interfere with the understanding of the epidemiology of Chagas disease in Ecuador. Therefore, the differentiation between *T. rangeli* and *T. cruzi* infections in vectors has a particular importance and a variety of epidemiological and medical implications [5]. For example, the presence of *T. rangeli* may explain why despite the high infection by *T. cruzi* in *T. dimidiata*, there is a low seropositivity in humans in Pedro Carbo (Guayas province, Ecuador) [6]. The morphological similarity and immunological cross-reactivity of *T. cruzi* and *T.*

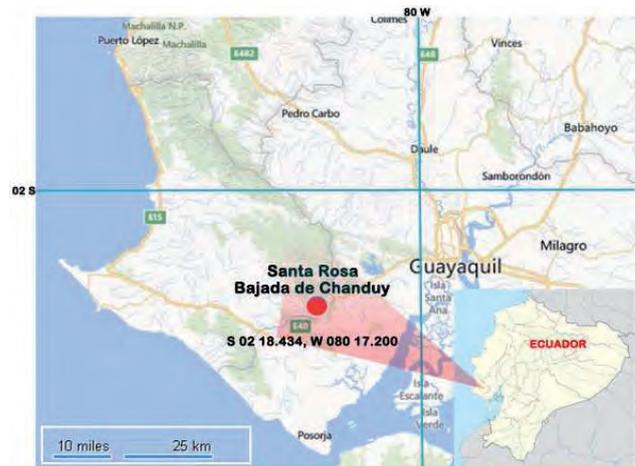


Figure 1: Study site. Rural village of Bajada de Chanduy.

rangeli has prompted the development of molecular assays to differentiate these two parasites and to identify the several genetic strains of each species [7].

The main objective of this study was to determine the infection by *T. cruzi* in Triatominae vectors in a village in the border of Santa Elena and Guayas provinces, Southern coastal Ecuador. Insect collection was carried out in the neighborhood of Santa Rosa, Bajada de Chanduy (S 02° 18.434, W 80° 17.200), in Santa Elena county (Fig. 1). The entomological searches were conducted by trained field personnel from the National Service for the Control of Diseases transmitted by Arthropod Vectors (SNEM) using the man-hour method [8] in peridomestic areas of houses that voluntarily agreed to participate in the study. The peridomestic sites that were searched included fire or construction wood, trash, tiles, and/or rocks as well as other potential places where triatomines' eggs, nymphs, and/or adults could be found. These areas are particularly important because they are usually close to sleeping/resting sites for domestic animals and also provide nesting places for wild animals (rodents, opossums, etc.). The neighborhood of Santa Rosa, Bajada de Chanduy, has a total of 60 houses. Thirteen houses of the village were closed at the moment of the visit, and the inhabitants of one house did not provide consent to the research team to look for triatomines in their household. Therefore, a total of 44 houses were thoroughly searched. Most houses were constructed with concrete, had wooden doors, and rooftops made of zinc. Additionally, most houses had either a front (or back) yard with piles of construction materials (bricks, tiles, wood, coal, reed, cement) and many had the presence of domestic animals (fowl, pigs, and dogs).

Only three houses from Santa Rosa, Bajada de Chanduy, had triatomines in their peridomestic sites. A total of 71 triatomines from different developmental stages were collected in these three houses (Fig.2). Sixty eight specimens were found in a pile of stored reed in the backyard of one house (12 adults, 56 nymphs). The backyard in this house had a few trees, dirt floor, and a

Variables	Houses searched		p value
	Non-infested houses (N=41)	Infested houses (N=3)	
Concrete wall			
-	11 (26.8)*	3 (100)*	
+	30 (73.2)	0	0.027
Wood wall			
-	35 (85.4)	0	
+	6 (14.6)	3 (100)	0.006
Brick wall			
-	35 (87.8)	3 (100)	
+	6 (12.2)	0	1
Zinc roof			
-	7 (17)	0	
+	34 (83)	3 (100)	1
Tile roof			
-	33 (80.4)	3 (100)	
+	8 (19.6)	0	1
Domestic animals			
-	30 (73.2)	0	
+	11 (26.8)	3 (100)	0.027
Hen house with chickens			
-	30 (73.2)	0	
+	11 (26.8)	3 (100)	0.027
Stored material			
-	11 (26.8)	0	
+	30 (73.2)	3 (100)	0.562
Wood			
-	24 (58.5)	0	
+	17 (41.5)	3 (100)	0.086
Reed			
-	36 (87.8)	0	
+	5 (12.2)	3 (100)	0.004
Rock			
-	37 (90.2)	3 (100)	
+	4 (9.8)	0	1
Concrete			
-	36 (87.8)	2 (66.7)	
+	5 (12.2)	1 (33.3)	0.363
Metal			
-	38 (92.7)	3 (100)	
+	3 (7.3)	0	1
Trash			
-	26 (63.4)	2 (66.7)	
+	15 (36.6)	1 (33.3)	1
Proximity to vegetation			
-	29 (70.7)	0	
+	12 (29.3)	3 (100)	0.034
Altitude			
≤ 40 mts	23 (56.1)	2 (66.7)	
>40 mts	18 (43.9)	1 (33.3)	1

*numbers in parenthesis are percentages

(+) presence of that variable

(-) absence of that variable

Table 1: Potential risk factors associated with house infestation by *T. dimidiata* in the neighborhood of Santa Rosa, Bajada de Chanduy.

Village	County	Infestation			Colonization
		index (%)	Density	Crowding	index (%)
Bajada de Chanduy	Santa Elena	6.8	1.6	23.7	100

Table 2: Entomological indexes of *T. dimidiata* collected in Bajada de Chanduy.



Figure 2: Neighborhood of Santa Rosa, Bajada de Chanduy. The houses where *T. dimidiata* were found are shown as red circles (numbers outside the red circles refer to the total specimens collected in each house).

hen house full of chickens. This area also had trash and other stored materials (wood, zinc and trash). Additionally, two specimens (one adult and one nymph V) were found in a nearby house, and one specimen (nymph IV) was collected in one last house of the neighborhood of Santa Rosa (Fig. 2). These three triatomines were collected in piles of wood, reed and trash from the backyard of these dwellings. All three houses were located in an area of the village surrounded by abundant veg-

Infected triatomines	
Stage	#
Adult	10
Nymph V	5
Nymph IV	3
Nymph III	3
Total	21 (72.4%)

Table 3: Trypanosome-infected *T. dimidiata* by developmental stage.

etation (Fig. 2). A Fisher’s exact test was performed to determine if certain characteristics of the house or its surroundings were associated with the presence of triatomines. The variables analyzed were the following: altitude (≤ 40 m or >40 m), housing structure (wood, brick or concrete walls, zinc or tile roofs), presence of animals, stored construction materials in peridomestic areas (reed, wood, concrete, rock, metal and trash), presence of a hen house with chickens, and proximity to vegetation (Table 1). There was a significant association between the presence of triatomines and wooden house walls ($p=0.006$), the presence of animals ($p=0.027$), the presence of a hen house with chickens ($p=0.027$), stored reed ($p=0.004$) and the proximity to vegetation ($p=0.034$) (Table 1). Additionally, the absence of concrete walls is also associated with house infestation ($p=0.027$). None of the other variables analyzed were significantly associated with the presence of triatomines (Table 1).

The collected insects were placed in labeled containers and transported to the entomology laboratory (LEMMT) at San Francisco University for further analysis. The following entomological indexes were calculated: infestation index, density, crowding, and colonization index [9]. All the collection procedures in the field were performed by the SNEM personnel following the standard guidelines for vector handling. Feces and intestinal contents were extracted in the laboratory from each triatomine. The rest of the body was preserved in 96% ethanol and stored at -20°C for further molecular analysis. A small volume of each of the intestinal samples and/or feces was observed under the microscope to detect living trypanosomes and the rest was stored in TE buffer at -20°C until further use.

T. dimidiata vectors were found in 6.8% of the 44 houses that were inspected. The triatomine density was 1.6 insects per house (Table 2). The vector crowding was 23.7 insects per infested house. Nymphs of *T. dimidiata* were found in 100% of the infested houses.

From the 71 triatomines collected, feces and intestinal contents were extracted from 29 specimens (13 adults and 16 nymphs) and observed under the microscope. It was not possible to obtain samples for microscopy from the remaining specimens and thus the presence of trypanosomes in those insects will be analyzed with molecular techniques. Mobile trypanosomes were detected by microscopy in 21 of 29 specimens (Table 3). The infected triatomines are described in Table 3 according to developmental stage. Taking into account only the total

number of specimens that were studied by microscopy (29 triatomines), the infection rate of these vectors is 72.4% (95% CI= 52.8-87.3). This percentage evidences an active presence of *T. cruzi* in the village of Bajada de Chanduy, where the human population may be at risk of contracting the parasite, and therefore there is a need for the implementation of vector control strategies.

As it was mentioned before, it was not possible to search all the houses in the neighborhood of Santa Rosa due to unpredictable factors (N= 44, total= 60). Thus, the total number of houses where the vectors were found (N=3) may be over or underestimated. This also has implications in the previous analysis of the domestic and peridomestic determinants for house infestation by *Triatoma dimidiata*. Even though the wooden house walls, the presence of animals, the presence of chickens in a corral, stored reed, and the proximity to vegetation, were significantly associated with the presence of triatomines, it cannot be concluded that these are risk factors given the low number of infested houses (N=3). However, various studies in Latin America have shown a positive association between house infestation by triatomines and poor sanitary conditions, presence of animals (rodents, chicken, dogs), construction material storage and proximity to vegetation [10–13]. The study of these determinants of invasion is crucial for a long-lasting control of the vector population and can help explain the variability in infestation between houses of the same village.

It is important to note that 68 of the 71 triatomines collected in Bajada de Chanduy were found exclusively in one house (house 2) and only three specimens were found in the rest of the houses (houses 5 and 6) (Fig. 2). The fact that nymphs were found in all the infested houses indicates that the insects are actively breeding and the population most likely growing. As triatomines colonize the peridomicile and move closer to domestic animals and people, the risk for *T. cruzi* infection in humans increases dramatically. Since all the specimens in house 2 were collected from a pile of reed located in the backyard, it is possible that this is the primary source of triatomines in this village. However, according to the owners of the house, that material was brought into their property from elsewhere. It is not clear whether the triatomines came imported with the reed or if a local population of vectors colonized the habitat provided by that material after it came into the house. The genetic analysis of the vectors collected will provide additional information that will help to elucidate the origin and structure of this particular triatomine population. The genetic study of this population of *T. dimidiata* will allow us to compare its genetic similarity with other local and foreign populations and to determine the geographic distribution of these vectors as well as their immigration status. Knowledge of the biology and genetics of the most prevalent vector species, their infection status (*T. cruzi*, *T. rangeli* or both) and dispersal is essential for the understanding of the transmission dynamics of Cha-

gas disease and the implementation of adequate strategies for vector control.

Acknowledgements

This study was supported by a Chancellor's Grant from San Francisco de Quito University. We thank the National Service for the Control of Diseases Transmitted by Arthropod Vectors (SNEM) for facilitating the search and collection of the insects used in the study. We also thank David Salomon, David Guevara, Daniela Zuñiga, and Antonia Castells from the undergraduate program in Biotechnology (USFQ), as well as Ana María Salinas and Melina Rodríguez from the Masters program in Microbiology (USFQ), for their help with the field work. Finally, we thank Pablo Endara from the Health Science Department (USFQ) for his guidance and support with the statistical analysis.

References

- [1] World Health Organization. 2013. "American Trypanosomiasis, an Online Reference". <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs340/en/>.
- [2] Guhl, F. 2007. "Chagas disease in Andean Countries". *Mémoires do Instituto Oswaldo Cruz*, 102:29–37.
- [3] Aguilar, H.; Abad-Franch, F.; Racines, V.; Paucar, C. 1999. "Epidemiology of Chagas Disease in Ecuador. A Brief Review". *Mémoires do Instituto Oswaldo Cruz*, 94:387–393.
- [4] Aguilar, H.; Abad-Franch, F.; Dias, L.; Junqueira, A.; Coura, J. 2007. "Chagas Disease in the Amazon Region". *Mémoires do Instituto Oswaldo Cruz*, 102:47–55.
- [5] Pavia, P.; Vallejo, G.; Montilla, M.; Nicholls, R.; Puerta, C. 2007. "Detection of *Trypanosoma cruzi* and *Trypanosoma rangeli* infection in triatomine vectors by amplification of the histone H2A/SIRE and the SNO-RNA-CL1 Genes". *Revista do Instituto de Medicina Tropical de Sao Paulo*, 49:23–30.
- [6] Guevara, A.; Garzón, E.; Bowen, C.; Córdova, X.; Gómez, E.; Ouaiissi, A. 2005. "High infection rates of *Triatoma dimidiata* are associated with low levels of *Trypanosoma cruzi* seroprevalence in Pedro Carbo, Ecuador: Use of a tc24 gene-based PCR approach". *Parasite*, 12:65–68.
- [7] Vallejo, G.; Guhl, F.; Carranza, J.; Lozano, L.; Sánchez, J.; Jaramillo, J.; Gualtero, D.; Castañeda, N.; Silva, J.; Steindel, M. 2002. "kDNA markers define two major *Trypanosoma rangeli* lineages in Latin America". *Acta Tropica*, 81:77–82.
- [8] Oliveira, F. 1997. "Uso de nuevas herramientas para el control de triatomines en diferentes situaciones entomológicas en el continente americano". *Revista da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical*, 30:41–46.
- [9] World Health Organization. 2002. "Control of Chagas Disease, an Online Reference". http://whqlibdoc.who.int/trs/WHO_TRS_905.pdf.

- [10] Dumonteil, E.; Nouvellet, P.; Rosecrans, K.; Ramirez-Sierra, M.; Gamboa-León, R.; Cruz-Chan, V.; Rosado-Vallado, M.; Gourbiere, S. 2013. "Eco-bio-social determinants for house infestation by non-domiciliated *Triatoma dimidiata* in the Yucatan Peninsula, Mexico". *PLOS Neglected Tropical Diseases*, 7:1–9.
- [11] Starr, M.; Rojas, J.; Zeledon, R.; Hird, D.; Carpenter, T. 1991. "Chagas' disease: risk factors for house Infestation by *Triatoma dimidiata*, the major vector of *Trypanosoma cruzi* in Costa Rica". *American Journal of Epidemiology*, 133:740–747.
- [12] Andrade, A.; Zicker, F.; De Oliveira, R.; Da Silva, I.; Silva, S.; De Andrade, S.; Martelli, C. 1995. "Evaluation of risk factors for house infestation by *Triatoma infestans* in Brazil". *American Journal of Tropical Medicine*, 53:443–447.
- [13] Ramsey, J.; Alvear, A.; Ordoñez, R.; Muñoz, G.; Garcia, A.; Lopez, R.; Leyva, R. 2005. "Risk factors associated with house infestation by the Chagas disease vector *Triatoma pallidipennis* in Cuernavaca metropolitan area, Mexico". *Medical and Veterinary Entomology*, 19:219–228.

Development of computational meshes to implement the model ADCIRC (Advance Three Dimensional Circulation Model) in the Galapagos Archipelago

Elaboración de mallas computacionales para la implementación del Modelo ADCIRC (Advance Three Dimensional Circulation Model) en el Archipiélago de Galápagos

Daniel E. Gaona^{1*}, Jesús Portilla¹

¹Universidad San Francisco de Quito - Colegio de Ciencias e Ingenierías. Diego de Robles y Vía Interoceánica, Cumbayá - Ecuador.

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

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

Recibido/Received: 01/10/2014. Aceptado/Accepted: 19/10/2014.

Publicado en línea/Published on Web: 19/12/2014. Impreso/Printed: 19/12/2014.

Abstract

The study of physical oceanographic variables is a topic of great interest for understanding other relevant processes like chemical, biological, heat transfer, among others. In the Galapagos Islands in particular, knowledge about these processes is a key issue to understanding its biodiversity and equilibrium, unique in the world. Among the most basic physical phenomena driving the whole physical regime, wind waves and tidal circulation are the dominant and can explain largely secondary fundamental processes like transport phenomena (e.g., larvae, plankton, fish, sediments, chemicals, heat, among others), which in turn have a direct impact over ecosystems. In the present paper, several preliminary developments for the implementation of the "Advanced Three Dimensional Circulation Model" (ADCIRC) are documented. An important aspect detailed here is the design and development of computational grids, a non-trivial pre-processing set of steps that requires bathymetry and mesh homogenization to guarantee the proper representation of physical process by the model, and to avoid numerical instabilities in the downstream operations. Several algorithms have been developed to this end and are presented here. With these developments, a preliminary implementation of ADCIRC was carried out to check the grids functionality.

Keywords. Mallas, Galápagos, Bluekenue, ADCIRC, Mesh generation, Circulation model.

Resumen

El estudio de las variables oceanográficas físicas es un tema de gran interés para entender otros procesos relevantes como los químicos, biológicos, transferencia de calor, entre otros. En el Archipiélago de Galápagos en particular, el conocimiento de estos procesos es la clave para entender su biodiversidad y equilibrio, única en el mundo. De los fenómenos más básicos que controlan todo el régimen físico, las olas de viento y la circulación inducida por las mareas pueden explicar una parte importante de otros procesos secundarios fundamentales como los de transporte (e.g., larvas, plancton, peces, sedimentos, químicos, calor, entre otros), que tienen a su vez un efecto directo sobre los ecosistemas. En el presente artículo, se presenta la documentación algunos de los desarrollos preliminares para la implementación del modelo ADCIRC (Advanced Three Dimensional Circulation Model). Un aspecto importante es el diseño y elaboración de las mallas computacionales, compuesto de un grupo de pasos de pre-procesamiento que requiere homogeneización de datos de batimetría y mallas de cálculo para garantizar la adecuada representación de los procesos físicos y evitar inestabilidad numérica en operaciones posteriores. Varios algoritmos han sido desarrollados con este propósito y son presentados aquí. Con estos avances, se realizó una implementación preliminar de ADCIRC para evaluar la funcionalidad de las mallas.

Palabras Clave. ADCIRC, mallas computacionales, Islas Galápagos, circulación, mareas.

Introducción

Durante las últimas décadas, los estudios oceanográficos han sido tópicos de especial interés a nivel mundial. El estudio de las corrientes, mareas y circulación oceánica ha ganado importancia debido a su implicación di-

recta sobre la explicación de una diversidad de fenómenos físicos y antropológicos [1], [2]. Las corrientes y las mareas son responsables de diversos fenómenos de transporte de nutrientes y biodiversidad tales como el transporte de larvas, plancton, peces y sedimentos

[3, 4]. Estos fenómenos tienen un gran impacto sobre los ecosistemas marítimos y sobre la producción biológica primaria y secundaria (e.g., [5, 6]). Asimismo, tienen un efecto importante sobre la conservación ambiental y los ecosistemas marinos. Además del transporte de sedimentos, las corrientes y mareas se encargan del transporte y dispersión de compuestos básicos como sales, oxígeno, dióxido de carbono e incluso contaminantes. El entendimiento del comportamiento dinámico de la circulación oceánica es esencial, por ejemplo, para predecir la propagación de químicos en accidentes ambientales y el comportamiento del océano cerca de puertos, playas y zonas costeras en donde además, el uso del suelo con fines comerciales o de producción acuícola [7], [8] están asociados a un gran impacto antrópico. Por otro lado, los fenómenos de circulación marina influyen en los procesos de transferencia de calor, que afectan directamente la climatología. Así por ejemplo, la corriente fría de Humbolt junto con la corriente y contracorriente Ecuatorial tienen un efecto sobre el clima de la región costera del noroeste sudamericano (e.g., [1]).

Los fenómenos de transporte tienen efectos directos importantes sobre las propiedades oceánicas como la densidad, temperatura y acidez, convirtiéndose así en componentes importantes de los ciclos bioquímicos, geoquímicos e hidrológicos. Es así que un adecuado entendimiento del comportamiento de corrientes, mareas y circulación oceánica constituye la base para comprender estos fenómenos, predecir su comportamiento, y aprovechar los recursos disponibles de forma sustentable [9]. Se debe tomar en cuenta que tanto las corrientes como las mareas obedecen a leyes físicas bien establecidas, por lo que es posible, mediante modelos numéricos, reproducir sus condiciones con bastante aproximación. Algunas corrientes son producidas por la rotación y traslación terrestre, los vientos planetarios, cambios de densidad y presión, fricción, la fuerza de Coriolis, entre otros [10]. Por otro lado, las mareas y su circulación asociada se producen principalmente por los efectos de atracción gravitacional del sol y de la luna por lo que tienen un alto grado de periodicidad y en condiciones de aguas profundas pueden predecirse con gran precisión, en aguas someras, el efecto de la batimetría adquiere la mayor relevancia. La descripción matemática de estos fenómenos físicos (i.e., continuidad, conservación de energía y momento), y la gran capacidad de computación actual, permiten el desarrollo y utilización de modelos numéricos de confiabilidad para describir estos procesos.

ADCIRC (Advanced Three Dimensional Circulation Model), es un modelo de circulación desarrollado por el Departamento de Ciencias Marinas de la Universidad de North Caroline (Chapel Hill). ADCIRC resuelve las ecuaciones de movimiento de fluidos sobre un marco de referencia rotativo [11]. El programa permite resolver de manera bidimensional y tridimensional problemas (de superficie libre) de circulación y transporte en función del tiempo. ADCIRC utiliza las ecuaciones de

presión hidrostática tradicionales y aproximaciones de la ecuación de Boussinesq. Numéricamente utiliza métodos de elementos finitos (en espacio) y métodos de diferencias finitas para permitir un alto grado de flexibilidad por medio del uso de mallas no estructuradas [12, 13]. En general, ADCIRC puede ser usado para predecir mareas e inundaciones, modelar mareas y circulaciones causadas por vientos. Las aplicaciones varían desde la cuantificación del transporte de larvas, hasta operaciones marítimas cerca de las costas [14–16].

Dada la importancia del papel que juegan las mareas y sus corrientes asociadas en la dinámica del océano [17], en el presente estudio se tiene como meta la aplicación de ADCIRC al estudio de ecosistemas, con la finalidad de predecir fenómenos ambientales, optimizar el uso de recursos y sustentar la conservación ambiental. Dado a que el archipiélago de Galápagos uno de los ecosistema más ricos del mundo, resulta un caso especialmente relevante. El objetivo general es simular procesos de transporte, describir las mareas y la circulación de corrientes alrededor del Archipiélago. El objetivo específico en este caso, es preparar las herramientas, métodos y algoritmos para la creación de las mallas computacionales y obtener resultados preliminares de la simulación. Se debe notar también que la metodología y los algoritmos desarrollados puede utilizarse también en otros casos de estudios.

Métodos

El modelo ADCIRC

ADCIRC es un modelo de circulación oceánica compuesto de robustos algoritmos de cálculo. La base matemática del modelo está constituida por las ecuaciones de Continuidad y de Momento en dos y tres dimensiones [13, 18].

Ecuación de la Continuidad

Tanto en el modelo bidimensional como en el tridimensional, ADCIRC resuelve la ecuación de la continuidad utilizando la GWCE (Generalized Wave Continuity Equation), [19], que se muestra a continuación

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(UH) + \frac{\partial}{\partial y}(VH) \quad (1)$$

donde:

- H: Altura total de la columna de agua = $\zeta + h$.
- ζ : Variación del nivel del mar sobre el geoid.
- h: Profundidad del fondo oceánico bajo el geoid (batimetría).
- U: Velocidad promedio (espacial) en la dirección X.
- V: Velocidad promedio (espacial) en la dirección Y.

El primer término se refiere a la variación del nivel de mar en el tiempo. Cuando la batimetría (h) es invariable, dicho término depende únicamente de ζ . El segundo término, por su parte aporta con el gradiente de velocidad en la dirección x ; mientras que el tercer término representa el gradiente de velocidad en el eje y .

Ecuación de conservación de momento

Además de la ecuación de continuidad, ADCIRC resuelve la ecuación de balance de momento, que se muestra a continuación

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV = -g \frac{\partial [\zeta + P_s/g\rho_o - \alpha\eta]}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{H\rho_o} - \frac{\tau_{bx}}{H\rho_o} + \frac{M_x}{H} - \frac{D_x}{H} - \frac{B_x}{H} \tag{2}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} - fU = -g \frac{\partial [\zeta + P_s/g\rho_o - \alpha\eta]}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{H\rho_o} - \frac{\tau_{by}}{H\rho_o} + \frac{M_y}{H} - \frac{D_y}{H} - \frac{B_y}{H} \tag{3}$$

donde:

- f: Parámetro de Coriolis = $2\omega \sin(\phi)$.
- ω : Coeficiente de Coriolis = $7,29 \times 10^{-5} \text{rad/s}$.
- ϕ : Latitud en grados.
- P_s : Presión atmosférica a nivel del mar.
- g : Gravedad = $9,8 \text{m/s}^2$
- $\alpha\eta$: Potencial de Marea de Equilibrio
- ρ_o : Densidad de Referencia del agua.
- τ_{sx}, τ_{sy} : Esfuerzos superficiales impuestos.
- τ_{bx}, τ_{by} : Esfuerzos por fricción en el fondo.
- M_x, M_y : Gradiente de esfuerzos laterales.
- $M_x = \frac{H\tau_{xx}}{\partial x} + \frac{H\tau_{yx}}{\partial y}$
- $M_y = \frac{H\tau_{xy}}{\partial x} + \frac{H\tau_{yy}}{\partial y}$

El primer término de ambas ecuaciones se refiere a la variación de la velocidad en función del tiempo en los ejes x y y respectivamente. El segundo y tercer término considera el gradiente de momento lineal. El cuarto término se refiere al cambio de momento generado por el efecto de Coriolis, que depende de la latitud. En el lado derecho de la igualdad, se tienen los cambios de momento debido a la variación de la altura con respecto al geoid, al gradiente de presiones y al potencial de las mareas. Además, se consideran los efectos del viento al incluir esfuerzos superficiales τ en la ecuación. La fricción con el fondo marino se toma en cuenta como un esfuerzo cortante τ_b . Finalmente, los últimos tres términos M , D y B consideran los gradientes de los esfuerzos, la dispersión de momento y el gradiente de presiones baroclínicas debidas a los cambios de densidad. Estos términos completan la ecuación general. Según la aplicación se puede reducir algunos términos de la ecuación en función de las necesidades e importancia de los mismos [18, 20].

Ejemplos

Las ecuaciones descritas anteriormente pueden llegar ser tan complejas como se requiera. Por lo tanto su complejidad (o simplificación) dependerá de la cantidad de

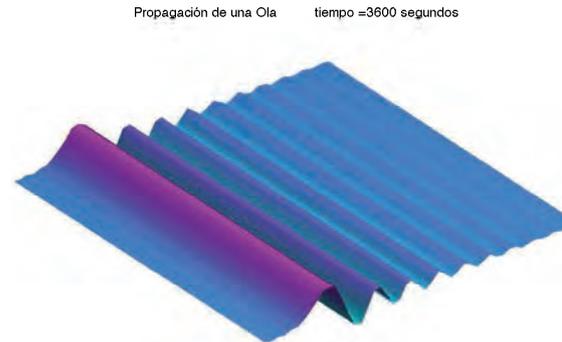


Figura 1: Propagación de una ola en un dominio cerrado.

variables y fenómenos físicos que se deseen incluir. Mientras más fenómenos se incluya, mayor será la precisión de los resultados, pero también mayores las demandas computacionales y en cuanto al conocimiento de las condiciones iniciales y de frontera (e.g., [21]).

Continuidad $\frac{\partial \zeta}{\partial t} + h \frac{\partial u}{\partial x} = 0$
 Momento $\frac{\partial u}{\partial t} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + ru = 0$

Según este modelo, el balance de momento se reduce de tal manera que la aceleración del fluido depende únicamente del cambio de altura en el nivel de agua y de la fricción. Aplicando el método de diferencia centradas se pueden convertir las ecuaciones diferenciales en ecuaciones discretas:

Cont. $\frac{\zeta_{n+1} - \zeta_{n-1}}{2\Delta t} + h \frac{u_{n+1} - u_{n-1}}{2\Delta x} = 0$
 Mom. $\frac{u_{n+1} - u_{n-1}}{2\Delta t} + g \frac{\zeta_{n+1} - \zeta_{n-1}}{2\Delta x} + r \frac{u_{n+1} - u_{n-1}}{2} = 0$

Para efectos ilustrativos y para relacionar adecuadamente las variables temporales y espaciales en el modelo de las islas, estas ecuaciones fueron implementadas en un entorno MATLAB y aplicadas a un dominio sencillo (un reservorio). El resultado de esta implementación se presenta en la Figura 1

Datos

Para el sitio de estudio de Galápagos, los datos de la batimetría utilizados para la creación de la malla corresponden a la base de datos de William Chadwick (Oregon State University), que es una compilación de mediciones in-situ. Para las zonas más profundas, se cuenta con datos de batimetría satelital provenientes de la base de datos de ETOPO [22]. Estas dos fuentes de batimetría fueron combinadas para obtener una cobertura en toda la zona de estudio con suficiente detalle en las zonas costeras de interés. Algunos detalles del proceso de combinación se indican a continuación. En primer lugar, la distribución de los datos in-situ es irregular, dispersa y en algunos puntos, se hay heterogeneidad de los valores de los diversos grupos de datos que la componen. La ventaja de los datos in-situ es la densidad relativamente alta, sobretodo en las zonas costeras. La desventaja es que en muchas zonas, especialmente en aguas profundas no existen datos. Por esta razón, la combinación de

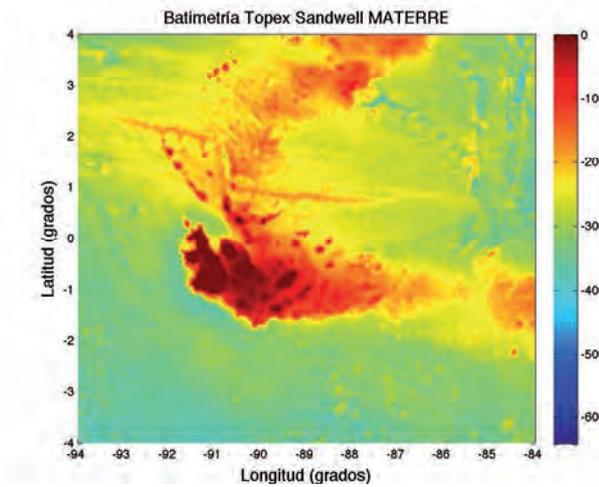


Figura 2: Batimetría Topex Sandwell MATERRE (ETOPO)

estas dos fuentes es mandatoria. La batimetría de ETOPO se muestra en las Figura 2, mientras que la densidad de puntos de los datos in-situ se muestra en la Figura 3.

Resultados

Procesamiento de datos e implementación de la malla computacional en Galápagos

A partir de las batimetrías de ETOPO e in-situ (Oregon State University [23]) se construyó la malla computacional.

Corrección de bordes de islas

El primer paso fue adecuar el nivel-0 de la batimetría que corresponde a los bordes de las islas. Los datos de batimetría de ETOPO son menos densos, mientras que en los datos in-situ, a menudo se puede encontrar más de un borde costero para cada isla, esto se debe a la variación del nivel de marea durante las diferentes campañas de medición (ver por ejemplo la Figura 4). La necesidad de tener los puntos del borde de la isla radica en que

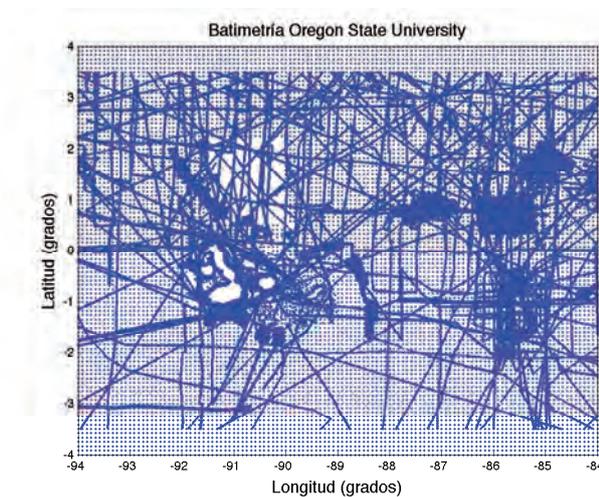


Figura 3: Batimetría OSU-William Chadwick

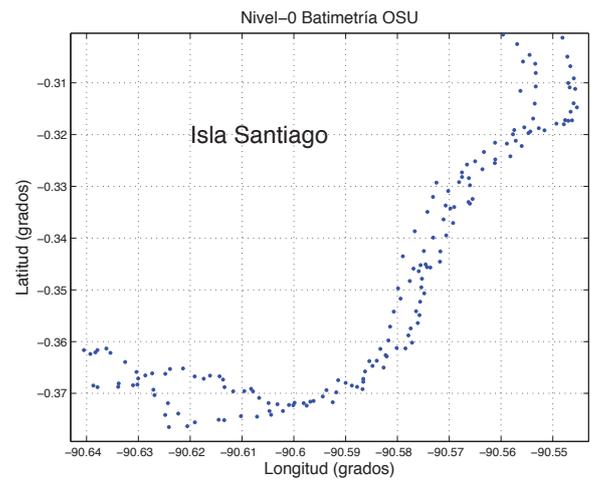


Figura 4: Batimetría OSU. Repetición de puntos en la línea costera.

el modelo de ADCIRC requiere es información para establecer las condiciones de borde para la simulación.

Dado a que todos los procesos numéricos se realizan de forma automática, resulta evidente que la falta de definición de un único borde para las islas, genera problemas numéricos, por lo que es necesario procesar los datos antes de pasarlos al programa de generación de mallas (BlueKeneu en este caso). Además, dado a que el número de puntos y el número de islas es elevado, este procedimiento no puede llevarse a cabo de forma manual, por lo que fue necesario escribir dos algoritmos para realizar esta tarea. Estos procedimientos siguen criterios distintos a) de distancia mínima, y b) del mayor ángulo externo. En ambos casos se decidió tomar los puntos más externos para definir los bordes. Esto implica considerar el perfil de marea baja como borde.

1. **Distancia Mínima.-** En algunos casos, los datos in-situ presentan bordes regulares por lo que un algoritmo de selección del punto más cercano permite definir directamente el borde de la misma. El resultado se muestra en la Figura 5:

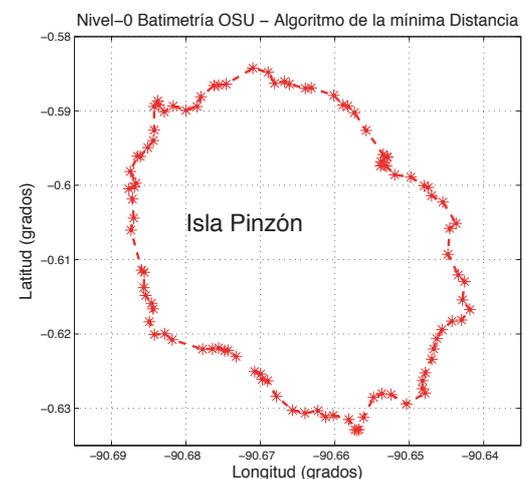


Figura 5: Batimetría in-situ. Corrección de la línea costera. Método de la Distancia mínima

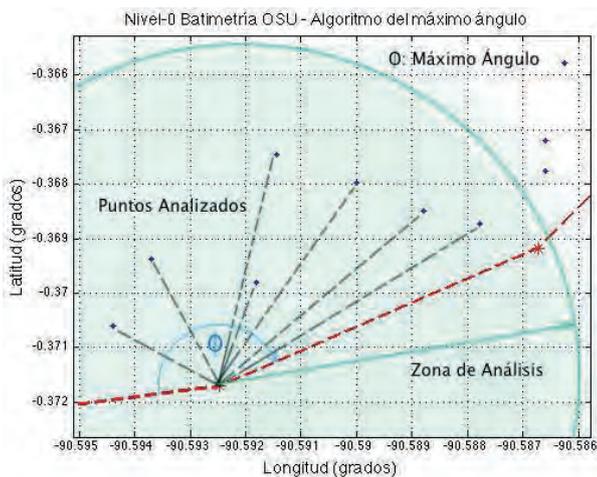


Figura 6: Concepto del Método del ángulo Máximo.

2. **Mayor ángulo Externo.-** En otras ocasiones los bordes de las islas no están delimitados perfectamente, sino que se presentan repeticiones y alta densidad de puntos. El algoritmo desarrollado para esos casos considera los puntos más externos de un entramado de puntos a cierta distancia del punto de análisis. Este criterio se ilustra en la Figura 6. El resultado obtenido, por ejemplo para la Isla Pinzón se muestra en la Figura 7.

Creación de la máscara de alta resolución

Para hacer por un lado las simulaciones computacionalmente eficientes y aprovechar por otro la flexibilidad de los elementos finitos, se requiere una malla que tenga alta densidad en las cercanías de las islas y baja resolución en el resto del dominio. Entonces, como segundo paso se creó una máscara que permitiera esta dualidad de resolución, gruesa y fina. La malla gruesa se forma a partir de los datos de la batimetría de ETOPO, mientras que la malla fina se forma a partir de los datos in-situ. Para esto el algoritmo toma una distancia de 20 km y traza círculos a partir de cada punto de borde. El dominio de alta resolución se toma de la intersección de los

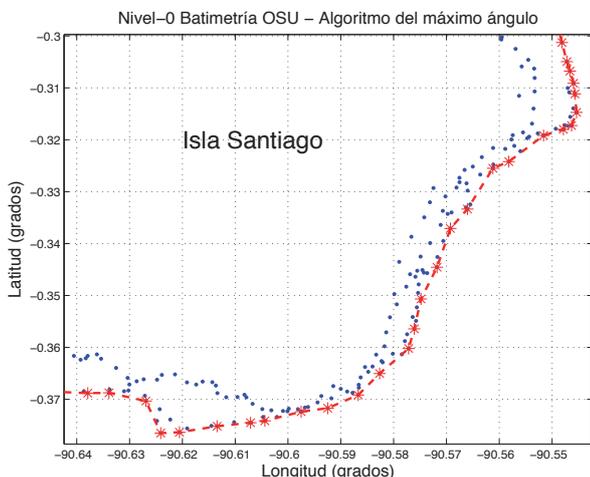


Figura 7: Batimetría de datos in-situ. Corrección de la línea costera. Método del ángulo Máximo.

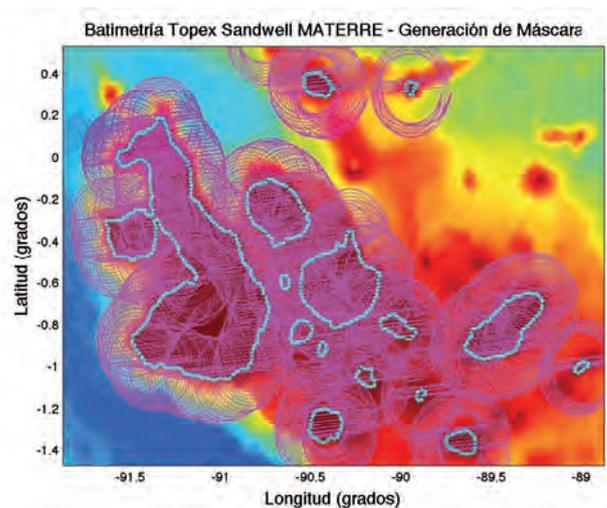


Figura 8: Batimetría ETOPO. Algoritmo de Enmascaramiento.

más externa de estos círculos. En la Figura 8, se ilustra este procedimiento.

Corrección de uniformidad de la malla

Por otro lado, como se observa en la Figura 3, la densidad de los puntos no es uniforme en el dominio. Con el objetivo de obtener una malla de distribución más uniforme, sin perder mayor información, se desarrolló un método de interpolación por capas. La necesidad de este algoritmo radica en que por la misma falta de uniformidad, los algoritmos de interpolación disponibles en MATLAB no operan correctamente o colapsan. El algoritmo parte de una malla fina predefinida y mapea sobre ésta los puntos de la malla de datos in-situ. En algunos casos, más de un punto de la batimetría in-situ corresponde a un sector de la malla fina. En este caso, se crea otra malla de tal manera de que no haya más de un punto por sector. Obviamente, se trabaja solo en la porción determinada por la máscara. La Figura 9 muestra la densidad de la Primera y la Tercera malla. Este algoritmo permite no solamente formar una malla de mayor uniformidad, sino también, determinar la desviación estándar de los puntos de diversas campañas en cada sector de la malla. Cada nueva malla contiene una menor cantidad de puntos que la anterior y se obtuvieron en total 11 mallas, las últimas con muy pocos datos.

Se calculó luego las desviaciones estándar de cada uno de los segmentos de la malla fina con el objetivo de estimar la variabilidad de los datos dentro de un mismo sector, el resultado se muestra en la Figura 10, donde se aprecia ciertos puntos atípicos con variaciones de profundidad de hasta 1000m. Sin embargo, la gran mayoría de los puntos mantienen variaciones menores a 100m. Esta variabilidad se debe al desfase entre campaña y campaña y al hecho de que la batimetría cambia con abruptamente en las cercanías de las islas.

Posteriormente, se interpoló la malla de ETOPO a la resolución de la malla fina utilizando el algoritmo de

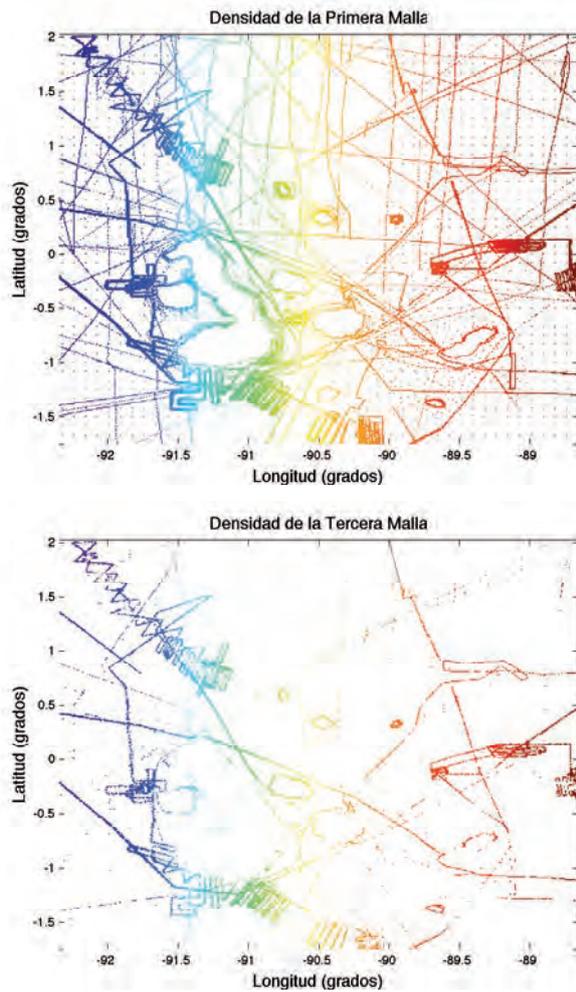


Figura 9: Batimetría OSU. Algoritmo de Corrección de Uniformidad. Densidad en la Primera y Tercera Malla.

interpolación bidimensional de MATLAB (*interp2*) y se obtuvo la malla final a partir del promedio, sector a sector, de todas las mallas.

Creación de la Máscara de las islas

Se observa que la malla incluye valores dentro de las islas debido a que la malla de ETOPO está contiene también valores de topografía, por lo que se creó una máscara que permita discernir los puntos del interior de las islas. El algoritmo creado para este fin utiliza los bordes de las islas calculados anteriormente e interpola estos bordes a la resolución de la malla fina. Luego realiza un barrido en latitud, isla por isla. Para cada diferencial de latitud se seleccionan los puntos extremos que definen el borde de la isla. Todos los puntos internos hacen parte de la máscara de islas. Al final, se obtiene una máscara como se muestra en la Figura 11.

Filtro bidimensional

Un análisis detallado de la batimetría obtenida muestra cambios bruscos y persistentes, especialmente en los puntos donde sólo existe información de ETOPO (ver por ejemplo Figura 12).

Para corregir estas imperfecciones se utilizó un filtro de suavizado aplicado a toda la batimetría. El filtrado se

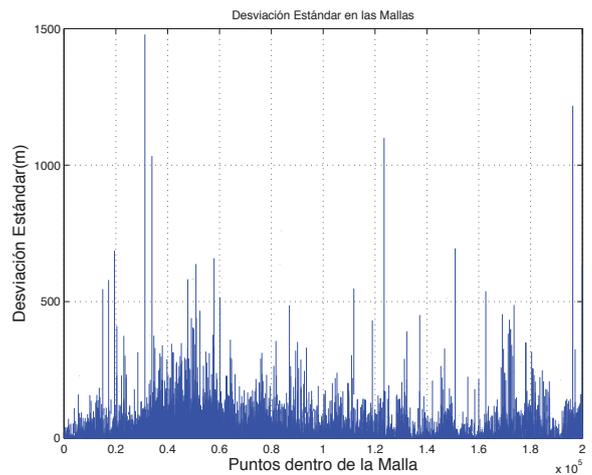


Figura 10: Batimetría OSU. Desviación Estándar por sectores de las mallas resultantes del Algoritmo de Corrección de Uniformidad.

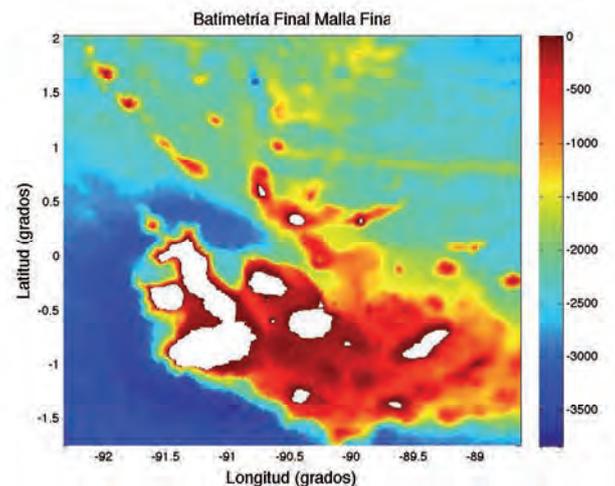


Figura 11: Batimetría Final de la Malla Fina. Algoritmo de Corrección de Uniformidad.

hizo usando la función *medfilt2* de MATLAB. Los resultados fueron satisfactorios y se muestran en la Figura 13.

Fusión de mallas

La máscara para el dominio de resolución fina, permitió fusionar la malla fina creada en los alrededores de las islas y la malla gruesa proveniente de ETOPO. El resultado se muestra en la Figura 14.

Un análisis más detallado de la Figura 14 revela ciertas brechas en los límites de fusión de las malla fina y gruesa. Estos vacíos fueron corregidos por la interpolación final sobre la malla generada utilizando el software Bluekenue.

BlueKenue

Una vez obtenida una batimetría consistente, la elaboración de la malla computacional se realizó utilizando el software Bluekenue. Este programa fue integrado para crear y adaptar mallas bidimensionales para ser usadas

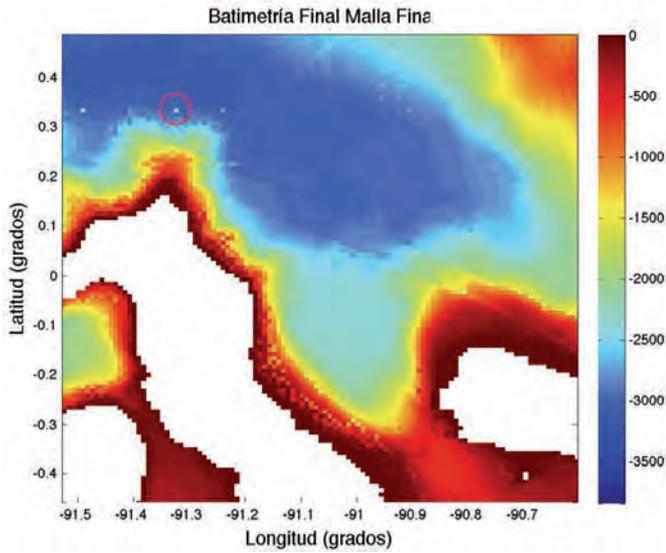


Figura 12: Batimetría Final de la Malla Fina. Algoritmo de Corrección de Uniformidad.

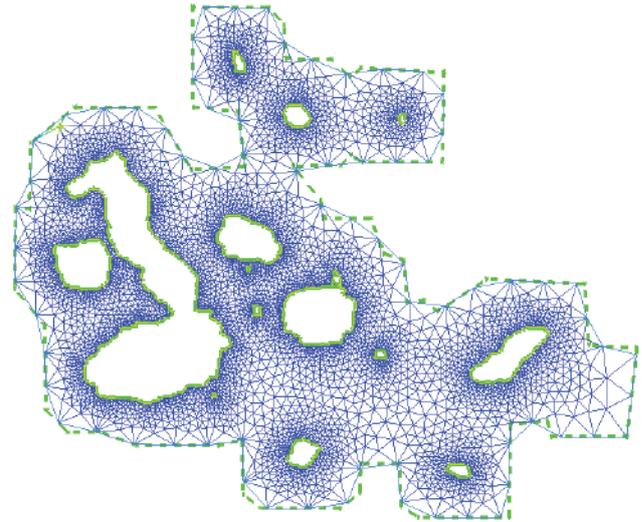


Figura 15: Malla fina desarrollada en BlueKenue.

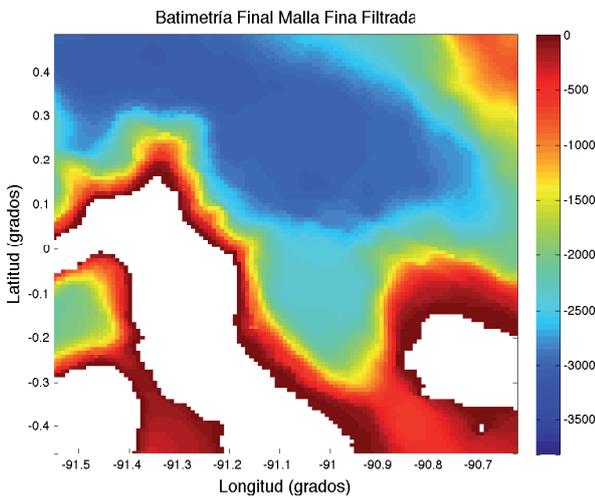


Figura 13: Batimetría Final de la Malla Fina. Algoritmo de Corrección de Uniformidad. Batimetría Filtrada.

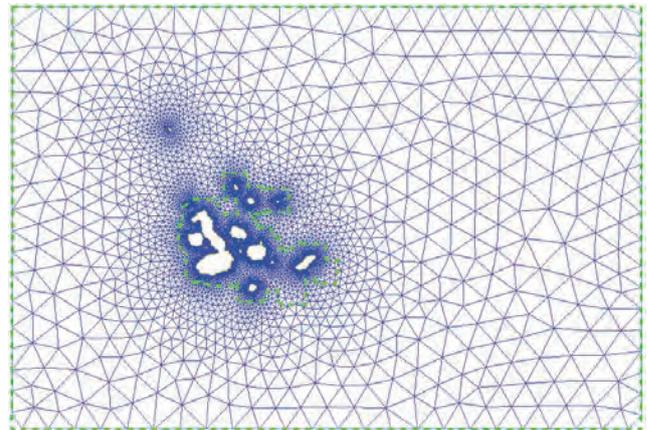


Figura 16: Malla final desarrollada en BlueKenue.

cada isla. Para la malla de mayor cobertura se requiere además proporcionar datos del borde de la máscara (Sub-Mesh). El resultado de la malla se muestra en las Figura 15 y 16.

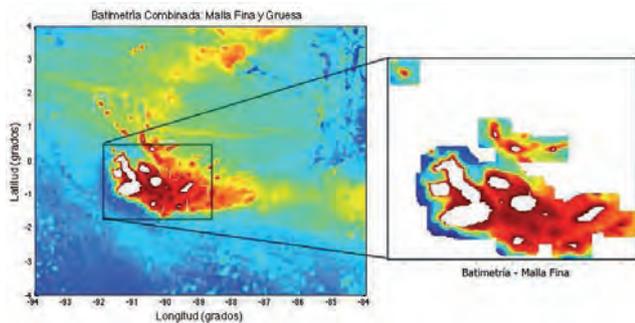


Figura 14: Batimetría Final. Algoritmo de Fusión de Mallas.

en el desarrollo de simulaciones basadas en elementos finitos. Para la creación de la malla se importaron los datos de la batimetría final, los bordes de las islas y la máscara de islas. El proceso comienza con la inicialización de una nueva malla tridimensional *new3TMesh* y la creación de las dos mallas: *Bluekenue: Sub-mesh* y *Principal-Mesh*. Los datos de entrada para la generación de estas mallas son: a) Outline, el borde exterior de la máscara, y b) Hard Lines, el borde exterior de la

La malla final es de tipo bidimensional. El archivo de exportación, incorpora una variable adicional que permite distinguir los nodos de acuerdo a su ubicación, esto es los límites de las islas o bordes externos de la malla (outline). Esta variable facilita el proceso de interpretación de ésta malla junto con la de batimetría. El algoritmo de interpolación utiliza el comando *griddata* de MATLAB para consolidar ambas mallas. El resultado de la malla de batimetría final se muestra en la Figura 17.

Implementación preliminar de ADCIRC

La implementación en ADCIRC se realizó de la manera más simplificada posible, sin considerar condiciones de fuerzas externas como la acción del viento, y resolviendo únicamente la ecuación de la continuidad sobre el espacio predeterminado bajo las condiciones iniciales adecuadas. Se asumió una marea de altura de 0,7m en la componente lunar semidiurna *M2* y se fijó únicamente el extremo oeste como abierto al mar. El resultado se muestra en la Figura 18, donde se puede distinguir la de

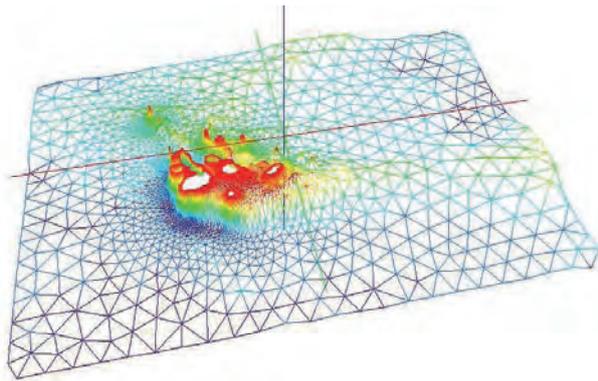


Figura 17: Malla de batimetría interpolada para Bluekenue.

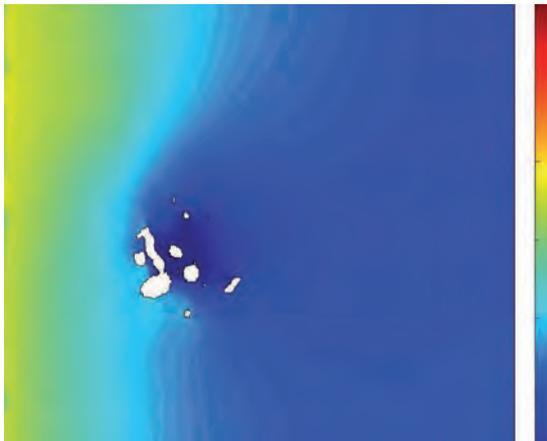


Figura 18: Propagación de una ola en la malla usando ADCIRC.

la propagación en el dominio y la refracción alrededor de las islas.

Conclusiones

En el presente artículo se describe los pasos preliminares para la implementación del modelo ADCIRC en el Archipiélago de Galápagos. El énfasis del presente trabajo ha sido en la obtención de una batimetría uniforme y consistente, la misma que es fundamental para el cómputo posterior de las mareas y corrientes. Se describen los procedimientos realizados, para los cuales ha sido necesaria la implementación de varios códigos, que fueron escritos en entorno MATLAB. Se describe además el desarrollo de las mallas computacionales utilizando el software Bluekenue, y se presentan los resultados de las corridas preliminares en ADCIRC.

En cuanto al procesamiento de los datos de batimetría, el algoritmo de distancia más corta resultó excelente para la definición única de los bordes de las islas en los casos en que el perfil de las mismas estaba bastante bien definido, a excepción de ciertos puntos discretos. Por otro lado, el algoritmo de mayor ángulo se destacó por permitir definir un único contorno de las islas en casos con diversidad de bordes. Asimismo, el algoritmo de corrección de uniformidad de la malla permitió obtener una distribución más uniforme de los datos y reducir así errores de interpolación durante el proceso. De esta

manera, la malla final generada por la superposición de la malla gruesa y fina mostró suavidad superficial y representó consistentemente el fondo oceánico del archipiélago.

El Modelo implementado en ADCIRC fue ejecutado y una simulación de propagación simple fue desarrollada con la malla del Archipiélago mostrando los resultados esperados. Es posible notar como la ola generada se propaga, llega al borde de las islas y se refracta como se espera. La coherencia de la simulación permite garantizar una adecuada simulación y pronosticar adecuados resultados de futuras simulaciones. En la realidad, no existe ningún borde cerrado por lo que se deberán establecer condiciones de borde de altura y de velocidad en los puntos exteriores de la malla. Asimismo, se deberán incluir factores de simulación adecuados como velocidad de vientos y coeficientes de fricción acordes al dominio y profundizar sobre todas las diversas opciones que ADCIRC ofrece para mejorar los resultados.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Rick Luettich, Director del Instituto de Ciencias Marinas (University of North Carolina), por la licencia del modelo ADCIRC y por su apoyo desinteresado durante esta implementación. Se agradece el suministro de los datos de batimetría a William Chadwick, y a la base de datos de ETOPO. El presente estudio tiene el soporte de la Universidad San Francisco de Quito, a través de los fondos GAIAS. La colaboración de Margarita Brandt y Luis Vinueza en el presente estudio son altamente apreciados.

Referencias

- [1] Stewart, R. 2009. "Introduction to Physical Oceanography". *University Press of Florida*. <http://books.google.com.ec/books?id=3dXTRAAACAAJ>.
- [2] Cifuentes, J. 2010. "El océano y sus recursos III. Las ciencias del Mar: oceanografía, física, matemáticas e ingeniería". *Biblioteca Digital ILCE*, 1.
- [3] Luettich, J.; et al. 1999. "Barotropic tidal and wind driven larval transport in the vicinity of a barrier island inlet". *Fisheries Oceanography*, 8(2):190–209.
- [4] Fleming, J. 2008. "A Real Time Storm Surge Forecasting System using ADCIRC". *Estuarine and Coastal Modeling X*, M. L. Spaulding [ed], ASCE: 373–392.
- [5] Mann, K.; Lazier, J. 2005. "Dynamics of marine ecosystems Biological-physical interactions in the oceans". *Wiley-Blackwell*. 3 edition: 512.
- [6] Carter, R. 1990. "Coastal Environments: An Introduction to the Physical, Ecological, and Cultural Systems of Coastlines". *Academic Press*: 617.
- [7] Dietrich, J. 2012. "Surface Trajectories of Oil Transport along the Northern Coastline of the Gulf of Mexico". *Continental Shelf Research*, 41(1):17–47.

- [8] Dietrich, C.; et al. 2011. "Hurricane Gustav (2008) Waves and Storm Surge: Hindcast, Synoptic Analysis, and Validation in Southern Louisiana". *Mon. Wea. Rev.*, 139: 2488-2522.
- [9] Palumbi, S. 2003. "Population genetics, demographic connectivity, and the design of marine reserves". *Ecological Applications*, 13:146–158.
- [10] Nielsen, P. 2009. "Coastal and Estuarine Processes". *World Scientific. Advanced series on ocean engineering*. <http://books.google.com.ec/books?id=eLpyPwAACAAJ>.
- [11] University of North Carolina at Chapel Hill. 2014. "ADCIRC". <http://adcirc.org/>.
- [12] Luettich, R.; et al. 2002. "Considerations in the calculation of vertical velocity in three-dimensional circulation models". *Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(12): 2063–2076.
- [13] Luettich, R.; et al. 2004. "Formulation and numerical implementation of the 2D/3D ADCIRC finite element model version 44". *Institute of Marine Sciences UNC*.
- [14] Seahorse Coastal Consulting. 2014. "ADCIRC". <http://seahorsecoastal.com/docs>.
- [15] Davenport, J.; et al. 2010. "Challenges to Marine Ecosystems: Proceedings of the 41st European Marine Biology Symposium". *Springer*: 211.
- [16] Cowen, R.; Sponaugle, S. 2009. "Larval Dispersal and Marine Population Connectivity". *Annual Review of Marine Sciences*, 1:443–466.
- [17] Haase, A.; et al. 2012. "Estuarine circulation and predicted oyster larval dispersal among a network of reserves". *Estuarine, Coastal and Shelf Science*.
- [18] Luettich, R.; et al. 1992. "ADCIRC: an advanced three-dimensional circulation model for shelves coasts and estuaries, report 1: theory and methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL". *Dredging Research Program Technical Report DRP-92-6, U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS*: 137.
- [19] Dresback, K.; et al. 2004. "A 2D Implicit Time-Marching Algorithm for Shallow Water Models Based on the Generalized Wave Continuity Equation". *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 45: 253–274.
- [20] ADCIRC. 2014. "ADCIRC home page (online, 2014)".
- [21] Demirbilek, Z.; et al. 2005. "Prediction of Storm-Induced High Water Levels in Chesapeake Bay. Solutions to Coastal Disasters 2005". *Charleston, South Carolina, US Army Engineer Research and Development Center*.
- [22] Amante, C.; Eakins, B. 2009. "ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24. National Geophysical Data Center". *Biblioteca Digital ILCE*, 1.
- [23] Chadwick, B. 2014. "Galapagos bathymetry". <http://www.pmel.noaa.gov/eoi/staff/chadwick/galapagos.html>.

Hydrogen Economy in Ecuador: opportunities and barriers

La Economía del Hidrógeno en el Ecuador: oportunidades y barreras

Fausto Posso Rivera^{1,2*}, Johanna Sánchez Quezada³

¹Investigador Prometeo, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.

²Departamento de Ciencias, Universidad de Los Andes, Núcleo-Táchira, Sede Paramillo, Venezuela.

³Centro de Energía, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Cuenca, Av. 12 de Abril s/n, Cuenca, Ecuador.

*Autor principal/Corresponding author, e-mail: fausto.posso@ucuenca.edu.ec

Editado por/Edited by: F. Javier Torres, Ph.D.

Recibido/Received: 07/07/2014. Aceptado/Accepted: 09/09/2014.

Publicado en línea/Published on Web: 19/12/2014. Impreso/Printed: 19/12/2014.

Abstract

The hydrogen economy, H₂, is an emerging energy paradigm proposed to H₂ as the vector that drives the development of human society in this century, and as embodied in the energy system Solar Hydrogen SESH where primary sources are renewable, and it is the secondary source H₂. A large number of countries are undertaking plans to incorporate the SESH in their energy structure. In this context, this paper argues whose purpose is to identify and analyze the factors involved in the development of SESH in Ecuador, through research supported methodologically on a literature review and a survey of a group of experts involved, from different fields, renewable energy and the H₂ as a vector. It is obtained that the country has sufficient potential exploitable renewable energy to ensure the operability of SESH, with hydropower and biomass are the most appropriate sources. Furthermore, the vision of development of the Ecuadorian state, driving the transformation of the energy matrix by the massive incorporation of renewable energy, would favor the gradual penetration SESH, especially in two niche opportunities, rural electrification and urban transport. Barriers are also reported: scarce and scattered research activity; minimum formation of human talent necessary for the operation and innovation in the technologies of H₂; absence of a legal and regulatory framework that encourages penetration SESH and the incipient formation of collaborative networks in research and advocacy, in the balance predominate advantages over the barriers. It is concluded that only by agreed action academia, research centers and private companies, under the tutelage of the state will allow this new energy system contributes to sustainable development and conductive Ecuador joining hydrogen economy.

Keywords. Energy systems, hydrogen energy, renewable energy, Ecuador.

Resumen

La economía del hidrógeno, H₂, es un paradigma energético emergente que propone al H₂ como el vector que conduzca el desarrollo de la sociedad humana en este siglo, y que se concreta en el sistema energético Solar Hidrógeno, SESH, en el cual las fuentes primarias son renovables y la fuente secundaria es el H₂. Una amplia cantidad de países están emprendiendo planes para la incorporación del SESH en su estructura energética. En este contexto se plantea este artículo cuyo propósito es identificar y analizar los factores intervinientes en el desarrollo del SESH en el Ecuador, mediante una investigación soportada metodológicamente en una encuesta aplicada a un conjunto de expertos involucrados, desde diferentes ámbitos, con las energías renovables y con el H₂ como vector, y en una revisión documental. Se obtiene que el país dispone de suficientes potenciales aprovechables de energías renovables para garantizar la operatividad del SESH, siendo la hidroenergía y la biomasa las fuentes más adecuadas. Además, la visión del desarrollo del Estado ecuatoriano, impulsando la transformación de la matriz energética mediante la incorporación masiva de las energías renovables, favorecería la penetración paulatina del SESH, especialmente en dos nichos de oportunidad, energización rural y transporte urbano. También se reportan barreras: escasa y dispersa actividad de investigación; mínima oferta formativa del talento humano necesario para la operación e innovación en las tecnologías del H₂; inexistencia de un marco legal y regulatorio que incentive la penetración del SESH y la incipiente conformación de redes colaborativas en investigación y promoción, en el balance final predominan las ventajas sobre las barreras. Se concluye que sólo mediante la acción consensuada de la academia, centros de investigación y empresa privada, bajo la tutela del Estado será posible que este novedoso sistema energético contribuya al desarrollo sostenible del Ecuador y propicie su incorporación a la Economía del H₂.

Palabras Clave. Sistemas energéticos, energía del hidrógeno, energías renovables, Ecuador.

Introducción

En la actualidad estamos en presencia de un desarrollo inusitado de las energías renovables, ER, cuyas aplicaciones cubren prácticamente todos los sectores de la economía y contribuyendo con el 19 % de la generación mundial de electricidad para el año 2013 [1]. Sin embargo, su posicionamiento en el mercado mundial de la energía y su popularización, enfrentan retos importantes: la intermitencia en su captación, la distancia entre producción y consumo, las dificultades de almacenamiento y la imposibilidad de utilizarse directamente en el transporte automotor; tal que es necesaria la participación de un vector energético que complementa a la electricidad y permita una conexión más eficiente entre los centros de producción y de consumo [2].

De las diversas alternativas estudiadas, el Hidrógeno, H_2 , está constituyéndose en el vector más adecuado para superar en gran parte las dificultades mencionadas, por sus propiedades únicas, complementa perfectamente a la electricidad al producirse por electrólisis, y a su vez ser transformado en electricidad en celdas de combustible. Al igual que los combustibles fósiles, puede ser transportado y almacenado, es relativamente seguro y menos contaminante. Es compatible con los actuales sistemas de suministro de energía y con la producción de calor; y algo sumamente ventajoso: cuando se obtiene por electrólisis, con la electricidad requerida de origen renovable, su sistema energético es cerrado, de manera que el H_2 constituye una ruta excelente entre la fuente primaria renovable y los usuarios finales [3]. Estas características del H_2 han motivado la propuesta de la Economía del H_2 , innovadora estructura energética conducida por los paradigmas energéticos emergentes de equidad, sustentabilidad y cooperación. En esta estructura, el H_2 , en sinergia con la electricidad, sería el vector que suministre la energía requerida por todos los sectores de la economía para sus actividades. La Economía del H_2 se concreta en el sistema energético Solar-Hidrógeno, SESH, cuyas características y perspectivas de desarrollo han despertado el interés de investigadores independientes, centros de I&D y los propios Estados, al visualizarlo como una vía adecuada hacia el desarrollo sustentable; así, en una amplia cantidad de países en diversas regiones del mundo, se están llevando adelante ambiciosos programas de I&D del SESH con vista a su utilización masiva en un plazo no mayor a 30 años [4].

En este sentido, América Latina, AL, al ser una región que dispone de grandes potenciales de ER, punto de inicio del SESH, resulta atractivo estudiar su participación en la matriz energética de los países de la región con vista a la satisfacción de sus necesidades energéticas de diferente índole, en especial en el sector rural, cuyas carencias de servicios energéticos no han sido totalmente satisfechas por la vía tradicional, ni probablemente lo sean. Sin embargo, en muy pocos países de AL existe el desarrollo científico y tecnológico, políticas de Estado y acciones formativas, para avanzar en la incorporación

del SESH en su matriz energética [5], siendo Brasil el líder en investigación y en innovación tecnológica, con la puesta en marcha de proyectos orientados a la utilización del SESH, especialmente en dos nichos de oportunidad: la energización rural y el transporte automotor urbano, aprovechando los altos potenciales de energía hidroeléctrica y de biomasa como fuentes primarias para la obtención del H_2 [6].

En la República del Ecuador, el Ecuador en adelante, se replica la situación señalada para la región: existencia de potenciales aprovechables de ER y sectores de la economía susceptibles de aprovechar las ventajas del SESH. Sobre ello, según cifras oficiales, alrededor de cien mil hogares rurales, el 11 % del total, no disponen de servicios de energía; además, este porcentaje no está homogéneamente distribuido en el país, ya que hay provincias con hasta un 35 % de hogares rurales en situación de deprivación energética [7]. Por otra parte, el Estado ecuatoriano ha emprendido la transformación de la matriz energética del país basada en la incorporación de las ER, estableciendo políticas y planes de desarrollo de las mismas para que tales fuentes sean amplia mayoría en la oferta energética en el corto plazo, en especial en la generación eléctrica [8]. En resumen, la perspectiva del SESH como mecanismo para el desarrollo sustentable en el marco de la Economía del H_2 ; la existencia de potenciales aprovechables de ER en el Ecuador, al igual que sectores de población y de la economía susceptibles beneficiarios del SESH; y finalmente, la posición y acción del Estado ecuatoriano hacia las ER, constituyen un escenario en el cual el estudio del desarrollo del SESH en el Ecuador, es no sólo conveniente sino necesario.

En este contexto, el principal propósito de este artículo es identificar y analizar los factores desencadenantes e inhibidores del desarrollo del SESH en el Ecuador, con vista a su inclusión paulatina en la matriz energética del país, propiciando además la incorporación del Ecuador a la Economía del H_2 . Los resultados obtenidos constituyen un conocimiento base para estudios más detallados de la integración del SESH al sector de energía del país, y para la formulación de proyectos que valoren su utilización en contextos y requerimientos específicos, todo lo cual constituye el aporte de este trabajo.

Los fundamentos del SESH

Conceptualmente, el SESH es un sistema energético cuya fuente primaria es la energía solar, directa o indirecta, y cuya fuente secundaria es el H_2 . Estructuralmente, el SESH comporta los mismos componentes de todo sistema energético: transformación, almacenamiento, transporte y distribución, y usos finales, con una estructura genérica mostrada en la Figura 1 [9]; mientras que su arquitectura dependerá del tipo de energía solar utilizada para la obtención del H_2 y del proceso seleccionado para ello. En esta figura se distingue la situación de la utilización del H_2 *in situ*, o luego de su almacenamiento (línea punteada), del caso más general de su transporte



Figura 1: Estructura genérica del SESH.

hasta el usuario final (línea continua). Si bien en cada uno de los componentes se ha avanzado en conocimiento científico y desarrollo tecnológico, aún quedan escollos importantes por superar en todos ellos, como una mejor y mayor comprensión de los fenómenos de diferente naturaleza involucrados en las etapas de Transformación y Usos Finales, o la necesidad de lograr sistemas de almacenamiento más eficientes y seguros.

En la etapa de Transformación se convierte la energía contenida en la fuente renovable en energía química acumulada en el H₂. Sus procesos de obtención a partir de ER se han comparado, técnica y económicamente, con los procesos tradicionales de obtención a partir de fuentes fósiles, en especial el reformado de gas natural, obteniendo que el H₂ renovable todavía no es competitivo, a excepción del proceso de producción por gasificación de biomasa [10, 11]. Pero también se señala que en el mediano plazo se pueden lograr costos comparables debido a los avances tecnológicos y la economía de escala, más aún si las externalidades del sistema energético basado en las fuentes fósiles se cuantifican y monetizan, con el fin de tener una comparación más justa entre ambos sistemas [12, 13].

Una vez producido, el H₂ se almacena y transporta, con el fin de garantizar, en tiempo y espacio, su disponibilidad para su conversión en energía útil mediante dos procesos: combustión directa o reacción electroquímica. La energía útil, en la forma de calor, potencia mecánica y eléctrica, se destina a la satisfacción de un amplio abanico de requerimientos energéticos de diferente naturaleza: móviles, estacionarias y portátiles, ubicados en todos los sectores de la economía [14]. De todos ellos, hacia los sectores Transporte y Residencial se han dirigido los mayores esfuerzos, técnicos y económicos, para lograr la utilización masiva de las tecnologías de uso final del H₂ y la aceptación social de las mismas [15]. Así, en el primer sector, las grandes corporaciones automotrices han creado sus divisiones del H₂ con programas de I&D que han derivado en proyectos demostrativos de la utilización del H₂ en vehículos propulsados por motores de combustión interna, o por celdas de combustible, tal que las proyecciones optimistas señalan que la comercialización de vehículos de pasajeros puede darse en el año 2015 [16, 17].

Sin embargo, la ausencia de una infraestructura de abastecimiento de H₂ suficientemente distribuida y las difi-

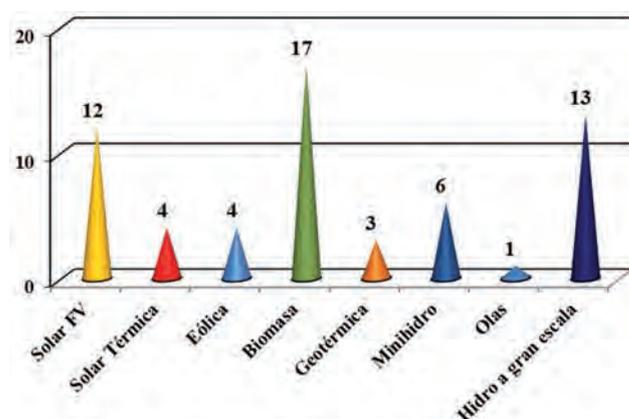


Figura 2: Las ER como fuente para la producción de H₂ en Ecuador.

cultades técnicas del almacenamiento de H₂ a bordo, son obstáculos que amenazan con retardar en forma importante tales proyecciones. Ante esta situación, los esfuerzos se han orientado en detectar nichos de oportunidad en este mismo sector que no requieran de una infraestructura compleja, estos son los mercados emergentes o *early markets*, que tienen que ver con los procesos logísticos de transporte y manejo de personas, bienes y materiales. Así, la utilización del H₂ en vehículos de soporte en tierra en aeropuertos, y en montacargas en grandes almacenes y centros de distribución de bienes y materiales, han tenido una gran aceptación y experimentado un gran crecimiento [18]. El propósito es sustituir las baterías y combustibles fósiles por celdas de combustible en la operación de tales vehículos, mejorando la eficiencia operativa y disminuyendo la emisión de contaminantes [19].

En el sector residencial, las aplicaciones del SESH van desde su uso compartido con los sistemas energéticos tradicionales en ambientes urbanos, hasta sistemas energéticos autónomos ubicados en zonas remotas y aisladas, tales como poblaciones rurales, puestos fronterizos o islas. En este sentido, en las regiones rurales de los países en vías de desarrollo, el SESH, sólo o conformando sistemas energéticos híbridos, está teniendo cada vez mayor presencia, contribuyendo a elevar la calidad de vida y al desarrollo sustentable de vastas regiones de América, Asia y África [20].

Respecto a las acciones para desarrollar el SESH en regiones y países, se pueden reportar, el European Integrated Hydrogen Project, EIHP; el Programa del Hidrógeno de la Agencia Internacional de Energía, el Hy-Ways, Hydrogen Energy in Europe, los cuales han dado un gran impulso a la implantación del SESH en su ámbito de influencia, mientras que AL adolece de algún programa regional con un propósito similar, [6]. En cuanto a los países que están llevando a cabo importantes programas para el desarrollo del SESH, están Canadá, Alemania, EE.UU., Japón e Islandia [21].

En la región latinoamericana, Brasil es el líder en I&D y con mayor trayectoria, su Programa Nacional del Hidrógeno data de hace 28 años, y en él se establecen las

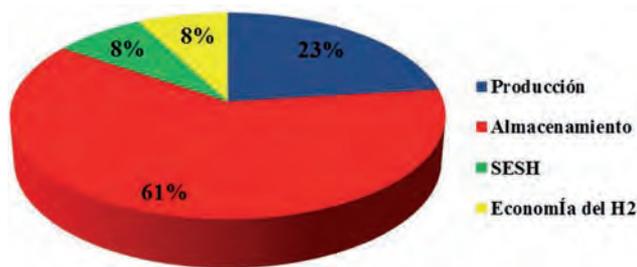


Figura 3: Distribución porcentual de los artículos científicos sobre el H₂ en Ecuador.

líneas directoras para la incorporación del H₂ en la matriz energética brasileña [22]; también está el Programa de Ciencia, Tecnología e Innovación para la Economía del Hidrógeno, que abarca todos los componentes del SESH, aunque la prioridad está los Usos Finales [5]. Argentina es el segundo país, en orden de importancia, en adelantar acciones para la incorporación del SESH a su matriz energética, trabajando sobre ello desde 1986, proponiendo además la utilización de las celdas de combustible como nichos de oportunidad en la Antártida [23, 24]. El proyecto bandera argentino, único en AL, es la Planta Experimental de Pico Truncado, en el extremo sur del país, en el cual el H₂ se obtiene a partir de energía eólica, manteniendo además un amplio programa de financiamiento de proyectos de investigación sobre la producción, purificación y aplicaciones del H₂ [5].

Otro país en emprender acciones sistemáticas y continuadas es México, su programa de I&D contempla todos los componentes del SESH, pero enfatiza en la utilización del H₂ en el sector del transporte masivo de cara a mitigar los altos niveles de contaminación ambiental en las grandes ciudades del país [25], lo cual se plantea en detalle en un mapa de ruta hacia una economía sustentable basada en el H₂ y en un estudio prospectivo hasta el año 2025, sobre la reducción de gases de efecto invernadero y precursores de la lluvia ácida mediante el uso del SESH [26]. En los demás países de AL se reportan iniciativas personales aisladas y para situaciones muy específicas.

En cuanto al desarrollo de la energía del H₂ y del SESH en el Ecuador, no ha sido posible obtener elementos para evaluarlo, de una indagatoria preliminar se desprende que las iniciativas para el desarrollo del SESH en el Ecuador, son aisladas e individuales, situación que se debe revertir para lograr la incorporación paulatina del Ecuador a las nuevas corrientes que conducirían el escenario energético mundial ya avanzado el presente siglo, a lo cual este artículo aspira contribuir.

Metodología

El estudio de los factores que propician o desestiman el avance del SESH en el Ecuador se lleva a cabo desde varias dimensiones: los potenciales aprovechables de las ER; la investigación científica y desarrollo tecnológico; los costos asociados con su implantación; los sectores

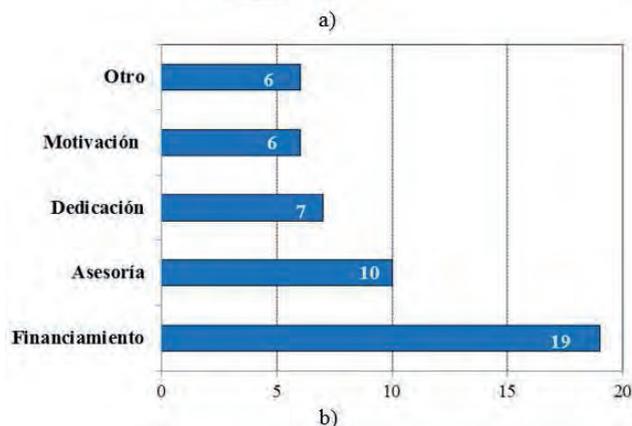
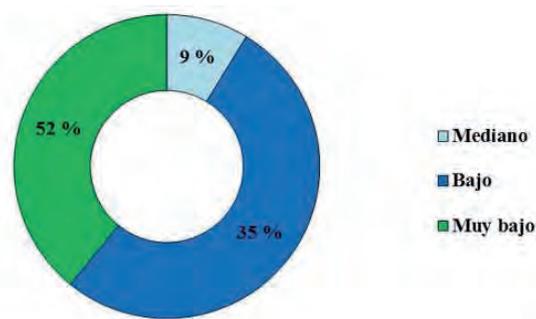


Figura 4: a) Nivel de la investigación del H₂ en el Ecuador, b) Factores que influyen en el nivel señalado.

de la economía susceptibles de aplicar las tecnologías de uso final del H₂; las políticas públicas y el marco legal; la participación de la empresa privada; los programas de formación; las redes colaborativas y las acciones de divulgación y promoción. Todas ellas a tomarse en cuenta en un programa de desarrollo que desde una visión sistémica y sinérgica, proponga la incorporación del SESH en la matriz energética del país. Para cumplir con este cometido, se contemplan los siguientes mecanismos de adquisición de información relevante:

- a) Encuestas de percepción, de alcance nacional, aplicada a diferentes especialistas del área energética: funcionarios públicos, investigadores, catedráticos, empresarios e industriales, con el fin de conocer sus experiencias, posiciones y visiones sobre el desarrollo del H₂ renovable en el Ecuador.
- b) Indagatoria documental en diferentes fuentes: bases de datos de publicaciones científicas; mapas y tablas de potenciales de ER; publicaciones oficiales sobre políticas, planes y programas de fomento y apoyo; marco legal y regulatorio; programas de formación universitaria; repositorios institucionales, redes académicas de cooperación científica y actividades de promoción y divulgación.

De la clasificación, interpretación y análisis de esta información, se genera un conocimiento estructurado que contiene los elementos necesarios para identificar los factores que aceleran o ralentizan el desarrollo del H₂ como vector y el SESH como sistema energético en el Ecuador.

Resultados y Análisis

Estos se analizan para cada una de las dimensiones señaladas, contrastando y complementando las dos fuentes de información utilizadas. En el caso de la primera fuente, se realizaron 23 entrevistas a un mismo número de participantes, cuyo perfil y conocimiento del H₂ se presentan en las Tablas 1 y 2, respectivamente.

De esta información se deduce que el perfil promedio del encuestado es: con estudios de doctorado, laborando en alguna institución en actividades de investigación y docencia, con un conocimiento teórico sobre el H₂ adquirido principalmente de artículos científicos, y un conocimiento práctico de trabajos experimentales y proyectos demostrativos. Señalando como principales limitaciones para el desarrollo del H₂, las de tipo técnico y económico; mientras que la principal ventaja es de tipo ambiental, indicada por una amplia mayoría de participantes. Finalmente, el 70 % de los participantes considera que las posibilidades de desarrollo del H₂ a nivel global son muy altas o altas.

Desde los potenciales de energías renovables

La consideración sobre el potencial de ER que podría aprovecharse en el Ecuador con vista a su participación en el SESH, se orienta hacia aquellas fuentes renovables que una indagatoria previa indica que tienen una presencia importante en el país.

La primera apreciación es para la energía solar, cuyo potencial usualmente se representa en mapas georeferenciados de la insolación promedio mensual o anual, construidos a partir de datos de estaciones meteorológicas terrestres, de satélites meteorológicos, o de ambos, utilizando para ello una amplia variedad de procedimientos matemáticos, estadísticos y herramientas informáticas y computacionales, como los sistemas de información geográfica, SIG. Este potencial estimado corresponde al potencial geográfico o teórico, y a partir de él, mediante una aproximación modélica tipo *top down*, se obtienen los potenciales técnicos y económicos [27].

En el Ecuador, en el año 2008, el Consejo Nacional de Electricidad, CONELEC, presentó el Atlas Solar del

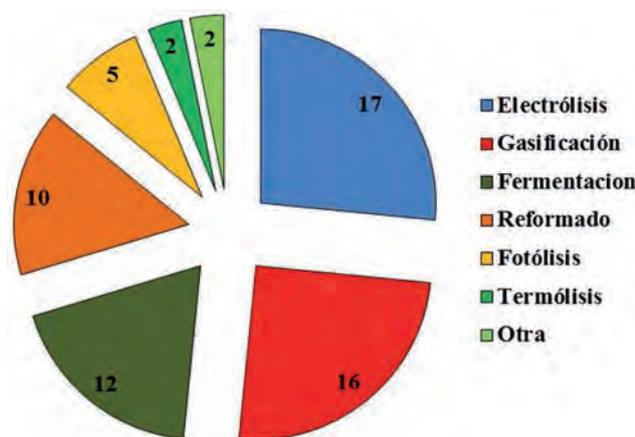


Figura 5: Procesos de producción teóricos del H₂ en el Ecuador.

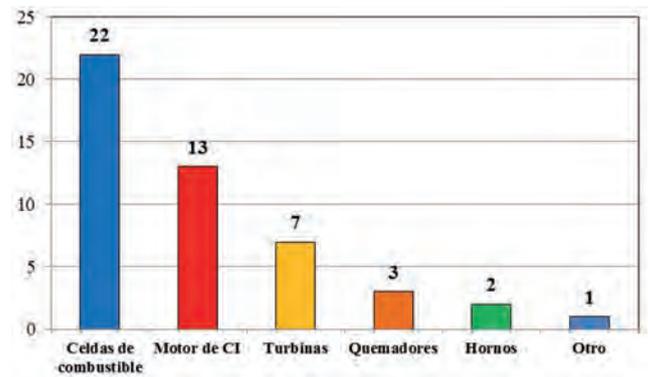


Figura 6: Tecnologías de transformación del H₂ a ser utilizadas teóricamente en el Ecuador.

Ecuador con Fines de Generación Eléctrica [28]. La información fuente utilizada proviene del Laboratorio Nacional de Energía Renovable de EE. UU., NREL, por sus siglas en inglés, la cual se procesa con el modelo CRS (Climatological Solar Radiation Model) generando la insolación diaria total sobre una superficie horizontal en celdas de 40 km de lado y cuyos resultados han sido validados con mediciones en estaciones meteorológicas con un error del 10 %. Esta información se filtra para seleccionar la correspondiente al territorio continental ecuatoriano, y se exporta a una plataforma de un SIG, obteniendo una cobertura de 472 puntos, y finalmente los mapas mensuales de insolación directa, difusa y global. Sin embargo, no se presentan los estimados globales de la potencia o energía eléctrica que podría generarse a partir de los valores de insolación, información de mucha utilidad para conocer la cantidad de H₂ que podría obtenerse a partir de esta fuente primaria.

En el caso de la energía eólica, también es usual expresar su potencial en mapas de velocidad y dirección promedio del viento, en unión del potencial eléctrico que podría generarse. Así, en el año 2013 el Ministerio de Energía Eléctrica y Energías Renovables, MEER, dió a conocer el Atlas Eólico del Ecuador con Fines de Generación Eléctrica, conformado por un amplio conjunto de mapas de las velocidades anuales de viento y otras variables de interés para toda la superficie continental del Ecuador [29]. Para su realización se utilizó el sistema MesoMap, integración de modelos de simulación de la atmósfera, bases de datos, estaciones de trabajo y almacenamiento de información de gran capacidad. La estructura fundamental es el MASS (Mesoscale Atmospheric Simulation System), modelo fisico-matemático que simula el comportamiento de la atmósfera a mesoescala y que se acopla con un modelo de microescala simplificado de flujo de viento, WindMap, para mejorar la resolución espacial e incluir los efectos locales de la rugosidad y la orografía. El MASS simula las condiciones atmosféricas sobre la región de interés para 366 días elegidos de forma aleatoria de un total de 15 años. El MASS se ejecuta hasta llegar a una resolución de 2,5 Km., mientras que WindMap alcanzó una resolución de 200m.

Formación	Pregrado 1	Maestría 6	Doctorado 15	Secundaria 1
Área de desempeño profesional	Educativa 16	Gubernamental 5	Empresarial 2	
Actividades que realiza	Docencia 18	Investigación 21	Industria 1	Otra 1

Tabla 1: Perfil de los participantes en la encuesta.

Adquisición de su conocimiento teórico	Cursos 0	Libros 12	Artículos 17	Eventos 10	Internet 15	Otro 2
Adquisición de su conocimiento práctico	Experimentos 10	Demostraciones 10	Plantas de producción 3	Otro 4		
Percepción de las limitaciones del H₂	Técnicas 19	Económicas 18	Políticas 13	Difusión 15		
Percepción de las ventajas del H₂	Técnicas 10	Económicas 6	Ambientales 21	Sociales 12		
Posibilidades de desarrollo del H₂ en el ámbito mundial	Muy altas 7	Altas 9	Medianas 5	Bajas 2		

Tabla 2: Conocimiento y percepción sobre el H₂ de los participantes de la encuesta.

También se calcula el potencial de generación eléctrica, bruto y factible a corto plazo, considerando aspectos técnicos y geográficos, locaciones ubicadas por encima de los 3.500 m, velocidades mayores a los 7 m/s, y añadiendo la cercanía a la red eléctrica y acceso vial en el segundo tipo. En la Tabla 3 se muestran los valores para las provincias que cumplen con las restricciones de cálculo.

En atención a la biomasa, su potencial se clasifica según su disponibilidad teórica, técnica, económica y sustentable; el primero toma en cuenta factores biofísicos y agroecológicos; de éste se deriva el potencial tecnoeconómico, considerando la accesibilidad, la logística y los costos de producción. Finalmente, el potencial sustentable se cuantifica evaluando el impacto social, económico y ecológico de un proyecto específico [27]. Por tanto, la estimación del potencial energético de la biomasa depende de un conjunto de factores de diferente naturaleza cuya cuantificación implica un cierto grado de complejidad. Para el Ecuador, en [30] se presenta un estimado para el año 2005 según el tipo de biomasa considerada, Tabla 4. En [31] se hace un estimado sin indicar el tipo de potencial, mostrado en la Tabla 5; en este caso se debe señalar que los potenciales de los bosques y plantaciones señalados no pueden tomarse en cuenta para generación de energía por los impedimentos legales al respecto y no cuantificables en el potencial.

Por su parte, el Instituto Nacional de Energías Renovables, INER, ha hecho una evaluación preliminar de la bioenergía obtenible a partir de los residuos sólidos urbanos, expresando sus resultados en un mapa de distribución geográfica [32]. A partir del valor total diario de esta energía se ha calculado el total anual, resultando un valor de 21.900 GWh que difiere ostensiblemente de las estimaciones anteriores. Finalmente, se conoce un estudio sobre la ubicación de la biomasa en Ecuador en términos de mapas de su distribución geográfica, pero

sin indicar valores del potencial, cualquiera sea su tipo [33].

La disparidad entre los diferentes estimados hace difícil tener un aproximado más o menos preciso de la cantidad de energía aprovechable del recurso de biomasa del país. Un estudio en profundidad sobre las razones de estas divergencias no ha sido posible por la dificultad de obtener mayores detalles de los aspectos técnicos que sustentan todos estos estimados. En este escenario, una vía sería centrar los esfuerzos en lograr estimaciones más precisas de un tipo de biomasa, con esta consideración, el estudio de [32] luce como el más fiable al basarse en procedimientos más elaborados; además por su condición preliminar puede estar sometido a ajustes que harían más consistentes sus resultados. En ésta misma línea, en [34] se ha logrado cuantificar la cantidad de energía contenida en los desechos residuales de la plantación de cacao, con un valor de 215.477 MJ.

Si ahora se considera la energía geotérmica, lo primero es precisar el significado del potencial geotérmico, en [35] se establece que el recurso geotérmico base accesible corresponde a la energía térmica localizada entre la superficie de la tierra y una profundidad específica,

Provincia	Área (km ²)	Potencia instalable (MW)	Energía anual (GWh/año)
Carchi	4,60	13,80	23,69
Imbabura	3,68	11,04	18,96
Pichincha	40,81	122,42	210,98
Bolívar	2,42	7,27	12,49
Chimborazo	11,87	35,61	61,14
Cañar	23,95	71,85	123,36
Azuay	33,92	101,77	174,74
Loja	173,49	520,46	833,62
Total	294,74	884,22	1.518,17

Tabla 3: Potencial eólico factible a corto plazo.

Tipo de biomasa	Teórico (GWh/año)	Técnico (GWh/año)
Residuos sólidos urbanos	3.144	2.114
Residuos agrícolas	17.299	6.919
Residuos agroindustriales	4.467	2.685
Residuos ganaderos	2.900	870
Industria alcoholera	48	43
Total	27.858	16.631

Tabla 4: Potencial teórico y técnico de la biomasa en el Ecuador.

siendo los 10 km la profundidad generalmente aceptada. Un valor referencial del potencial geotérmico del país se consigue en [36], donde se analizan los potenciales geotérmicos de los países de la región latinoamericana incluyendo el Caribe, ubicando al Ecuador en el lugar 11 de 17 países considerados, con valor del potencial de 1.700 MW.

Por su parte, en [31] se señala una capacidad geotérmica de 4,0 TJ, con una factibilidad de generación de 4.700 GWh, suficiente para satisfacer el 60 % del consumo anual. Mientras que en [37], se señala un potencial de 3.000 MWe y una capacidad instalada de 5 MWt, presentando además las ubicaciones geográficas con mayor potencial y el grado de avance de los proyectos geotérmicos, lo cual también se hace en [38], donde se señala un potencial aprovechable de 500 MWe para las tres zonas con mayores perspectivas de desarrollo. Nótese que en este caso, se repite la dificultad observada para el caso de la biomasa: la existencia de estimados diferentes. Sobre ello, se debe señalar que los dos últimos estudios son los más consistentes y fiables, por tratarse de los estudios más recientes y en ambos casos de investigadores con trayectoria en el estudio de la geotermia.

Por último se trata el potencial hidráulico del país, calculado en 15.000 m³/s, cuya conversión parcial en centrales hidroeléctricas de tamaño diverso, constituye el 55 % de la generación total para el año 2012, y un ele-

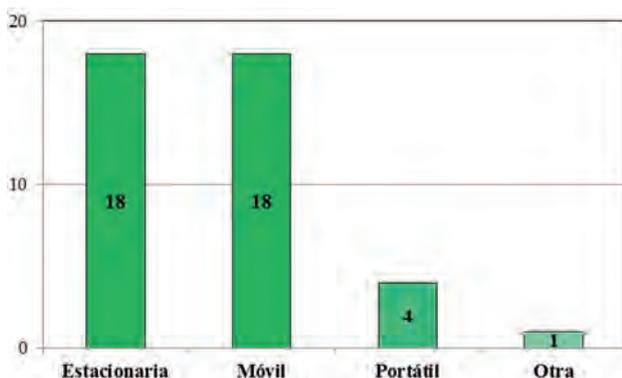


Figura 7: Aplicaciones teóricas de las tecnologías del H₂ en el Ecuador.

Tipo de biomasa	Energía Estimada (año)
Bosques y plantaciones	820 TWh
Residuos vegetales	4.300 GWh
Desechos municipales	4.000 GWh
Residuos animales	3.300 MWh

Tabla 5: Potencial energético teórico según el tipo de biomasa.

mento significativo en el proceso de diversificación de la matriz energética del Ecuador, al plantearse como una meta que la generación hidroeléctrica alcance el 90 % del total para el año 2017, [39]. Así, los proyectos Mazar, Sopladora, Coca Codo Sinclair son los más importantes que proveerán un total de energía adicional de alrededor de 17600 GWh para el 2015 [8]. Finalmente en [40], se presenta un estimado del potencial hidroeléctrico, señalando un valor de 91 GW para el potencial teórico; de 31 GW para el potencial técnico y de 22 GW para el potencial económico, sin ofrecer mayores detalles sobre la forma de calcularlo.

Para el propósito de éste trabajo, es relevante conocer el potencial hidráulico de baja escala con vista a su aprovechamiento en pequeñas centrales hidroeléctricas, consideradas tecnologías de transformación auténticamente renovables, en contraposición a las grandes centrales hidroeléctricas, cuestionadas en su naturaleza renovable, por los grandes desequilibrios ambientales y ecológicos que generan, en especial en la etapa de construcción [41, 42]. Además, la intención de construir pequeños emplazamientos de generación hidroeléctrica en aquellas regiones del país donde convenga su desarrollo, está a tono con la visión actual de distributividad de los sistemas energéticos renovables [43]. Si bien no ha sido posible obtener un estimado total del potencial a pequeña escala, el CONELEC reporta 137 proyectos con una capacidad total proyectada cercana a los 300 MW, con un 40 % de proyectos con capacidades entre 1 y 10 MW,

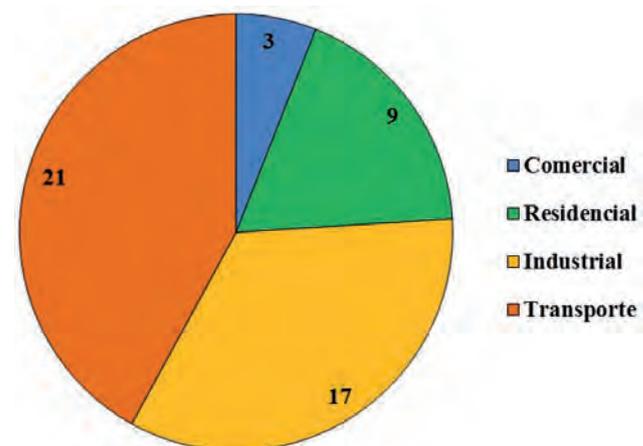


Figura 8: Sectores teóricos de la economía del Ecuador para la aplicación de las tecnologías del H₂.

Tipo de ER	Teórico	Factible	Técnico	Económico (MW)
Solar	—	—	—	6.500
Eólico	2.869 GWh/año	1.519 GWh/año	—	998
Biomasa	27.558 GWh/año	—	16.631 GWh/año	—
Geotérmica	1.700 MW	4.700 GWh/año	—	1.000
Hidroeléctrica	91.000 MW	—	31.000 MW	22.000
Total				30.498

Tabla 6: Potencial de las ER en el Ecuador según su tipo y clase.

y el 60 % de proyectos menores de 1 MW, todos en diferentes niveles de avance y ubicados principalmente en la vertiente del Pacífico [44].

En síntesis, de los estudios referidos sobre la estimación de las ER en el Ecuador, se desprenden dos características: una, la ausencia de valores completos de los diferentes tipos de potenciales; y dos, la diversidad de estimaciones poco consistentes entre ellas, como sucede para la biomasa y la geotérmica. Un resumen de los potenciales para las diferentes ER se muestra en la Tabla 6, en la cual el potencial económico de las diferentes energías corresponde a la generación eléctrica [40].

En la tabla anterior se aprecia la preponderancia de los potenciales de biomasa e hidroléctrico, siendo éstas las ER más indicadas como fuentes primarias para la obtención del vector H₂, lo cual es corroborado en los resultados de la encuesta, al señalarse a ambas fuentes como las más indicadas para la producción de H₂ en el país, en especial la segunda al consolidarse los potenciales de gran y pequeña escala, Figura 2. En tercer lugar se ubica la energía solar FV, a pesar de las dificultades técnicas que implica la operación intermitente de los electrolizadores, para el caso en que esta fuente renovable provea la energía eléctrica para el proceso de producción por electrólisis [10].

Como última consideración sobre este apartado y con el fin de tener un orden de magnitud de la cantidad de H₂ que teóricamente podría obtenerse a partir del potencial total de ER, se plantea su producción por electrólisis del agua. Para este cálculo preliminar, se asume un escenario conservador en el cual sólo el 10 % de dicho potencial se destina a la producción de H₂, considerando además una eficiencia de conversión, EF, del 60 %; un

factor de disponibilidad de la planta electrolítica de 0,95 y tomando el Valor Calorífico Superior del H₂ (HHV) como base de referencia energética [45], tal que:

$$PH = \frac{PET \times EF \times FD}{HHV} \tag{1}$$

$$PH = \frac{30,498 \times 10^3 kW \times 0,1 \times 0,6 \times 0,95 \times \frac{8760 h}{ano}}{\frac{33,33 kWh}{kg H_2}} \tag{2}$$

$$= 4,57 \times 10^8 \frac{kg H_2}{ano}$$

En la Tabla 7 se presenta un resumen de la producción de H₂ por electrólisis a partir de electricidad renovable en varios países de América, si bien una comparación adecuada no es posible, al corresponder a situaciones y condiciones diferentes, sirve para tener una visión preliminar del posicionamiento del país en el ámbito americano. Otro referente es el valor obtenido en un reciente estudio sobre la producción de H₂ electrolítico en la provincia del Azuay, igual a 10,8 x 10⁶ kg H₂/año [46]. Sobre la producción, histórica y actual del H₂ en el país, como insumo químico para una amplia variedad de procesos en refinerías, petroquímicas e industrias del ramo, no ha sido posible obtener información alguna, revelando una carencia importante: la dificultad para disponer de un conocimiento fiable que soporte cualquier intención de adelantar un proyecto sobre la utilización de las tecnologías del H₂.

Desde la investigación científica y desarrollo tecnológico

Para conocer sobre este elemento relevante para el avance del SESH en el Ecuador, se realizó una búsqueda

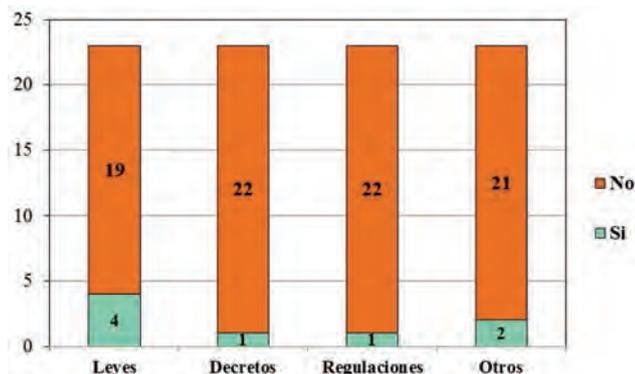


Figura 9: Existencia de instrumentos legales sobre el desarrollo del H₂.

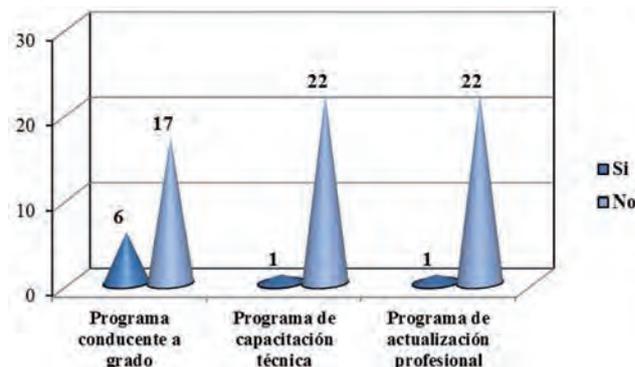


Figura 10: Actividades formativas que contemplan la enseñanza del vector H₂.

País, Provincia	Potencial (kg H ₂ /año)	Año
Argentina, Córdoba [47]	37,34x10 ⁶	2010
Brasil, Ceará [48]	5,06x10 ⁶	2010
Chile, Patagonia [49]	3,8x10 ⁵	2010
Ecuador	4,57x10 ⁸	2014
USA [50]	1.110x10 ¹⁵	2005
Venezuela [51]	2.073x10 ¹⁰	2014

Tabla 7: Potencial teórico de producción de H₂ renovable en varios países de América.

documental sobre artículos científicos y ponencias en eventos científicos, ambas formas usuales de divulgar los resultados de investigaciones. En el primer caso, se obtuvo un total de 12 publicaciones en revistas indexadas, cuya distribución porcentual, según el aspecto del SESH considerado, se muestra en la Figura 3. En esta distribución se destaca el aporte de las publicaciones sobre el componente Almacenamiento por parte de investigadores de la Universidad San Francisco de Quito, USFQ, enfocadas al estudio del almacenamiento de H₂ en hidruros y nanoestructuras de carbono. Esta escasa producción científica también se da en el caso de las ER, ya que en un reciente estudio que trata sobre la producción científica en Iberoamérica, se reporta que en el Ecuador apenas se han publicado cuatro artículos incluidos en el Science Citation Index, en el lapso 2000-2011, ubicándolo en el lugar 17 de un total de 20 países incluidos en el estudio y significando un aporte insignificante a la producción científica iberoamericana en ER [52].

Estos resultados revelan una importante carencia, que a su vez, es una consecuencia de la baja intensidad en investigaciones sobre el H₂ y las ER. Al respecto, primero se precisaron las investigaciones hechas bajo la modalidad de tesis de grado de licenciatura, obteniendo un total de 7 en el lapso 2010-2014, Tabla 8. Es resaltable que en 5 de ellas se estudia la producción de H₂ por electrólisis con vista a su utilización en mezclas combustibles para motores de combustión interna, aplicación bastante debatida y controversial en cuanto a su soporte teórico, viabilidad técnica y seguridad operativa [53–55].

En cuanto a los proyectos de investigación propiamente dichos sobre los diferentes componentes del SESH, los resultados evidencian una carencia importante, ya



Figura 11: Actividades del sector privado de la economía relativas al H₂.

que sólo se obtuvo información de cuatro; el primero, formulado en el año 2009 y actualmente en etapa de reformulación, se titula “Generación eléctrica alternativa para uso doméstico utilizando combustible hidrógeno” de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, con financiamiento de la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia y Tecnología, SENESCYT, con un monto de USD 287.782. Su objetivo principal es popularizar en el país el uso del H₂ como fuente secundaria de energía y mejorar la productividad de la industria acuícola al utilizar las cáscaras de camarón y cangrejo, como base para el desarrollo una membrana biopolimérica para ser usada en las celdas de combustible, siendo esto su principal aporte e innovación más relevante [56]. Sin embargo, no ha sido posible obtener información sobre el estado del proyecto y el hecho de su reformulación es una señal que no se ha llevado a cabo en la forma originalmente planificada.

El segundo proyecto, del año 214, se titula “Producción de H₂ a partir de la biomasa procedente de los residuos de la planta del banano mediante la gasificación catalítica en agua a temperatura supercrítica”, con el apoyo financiero de la SENESCYT, con un aporte cercano a los USD 800.000, y con el trabajo cooperativo entre la Universidad de Cuenca, el INER y la Universidad de Zaragoza de España. La investigación a realizarse en tres años, aborda una investigación de tipo fundamental sobre el desarrollo de catalizadores a partir de un residuo que actualmente no tiene ningún uso [57]. Constituye la acción investigativa más importante, incentivará la conformación de un grupo de investigación multidisciplinar y contribuirá a la formación de docentes de la Universidad de Cuenca, en principios y aplicaciones del H₂.

El tercer proyecto, de tipo experimental, está realizándose en la Universidad Central y plantea un novedoso método de producción del H₂ por hidrólisis a partir de los desechos de la producción de aluminio, utilizando el óxido de calcio como promotor, de ésta manera sólo es necesario disponer de agua, residuos de aluminio y cal, [58]. Finalmente se debe mencionar una investigación desarrollada en la Escuela Politécnica Nacional, titulada “Desarrollo de células sostenibles H2EXERGIA, para el aprovechamiento del hidrógeno como vector energético, generado a partir de energía solar”, que mereció el tercer premio del Concurso Odebrecht del año 2013. Un prototipo fue el principal resultado de este estudio para

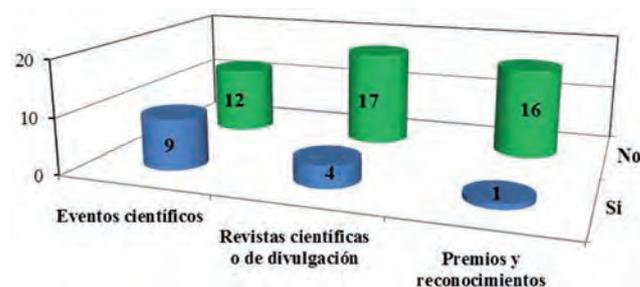


Figura 12: Actividades de promoción y difusión sobre las tecnologías del H₂.

Título	Institución	Año
Diseño de un prototipo para un sistema de alimentación de gas H ₂ como combustible alternativo para un motor de ciclo Otto	Universidad Politécnica Salesiana	2010
Diseño y construcción de un electrolizador de corriente continua de 200 W con energía solar e instrumentación necesaria para medir la producción de H ₂	Escuela Politécnica Nacional	2010
Estudio comparativo del funcionamiento y rendimiento en un motor de combustión interna con la adaptación de un sistema de alimentación adicional de H ₂ y O ₂	Universidad Internacional del Ecuador	2011
Construcción y adaptación de un sistema generador de gas de hidrógeno para suministrarlo a un motor de combustión interna	Universidad Técnica del Norte. Ibarra	2012
Implementación de un generador e inyector de hidrógeno en un motor de vehículo MAZDA BT-50, 2.2 L, para reducir emisiones de gases contaminantes	Escuela Superior Politécnica del Chimborazo	2013
Estudio de la viabilidad socio-ambiental del hidrógeno como vector energético producido a partir de energías renovables en el Ecuador	Escuela Politécnica Nacional	2014
Diseño y construcción de un prototipo para generación de hidrógeno y oxígeno	Escuela Politécnica Nacional	2014

Tabla 8: Tesis de pregrado sobre las tecnologías del H₂. Lapso 2010-2014.

un SESH, con la energía solar como fuente primaria, la producción del H₂ por electrólisis, su almacenamiento en forma de gas comprimido, aunque sin incluir la tecnología de uso final [59].

Todo lo anterior manifiesta que la investigación y desarrollo tecnológico del SESH en el Ecuador, es incipiente, sin articulación y principalmente conducida por intereses particulares, posicionándose muy por debajo de la actividad realizada en Brasil, México y Argentina, países líderes en este campo en América Latina [6]. La percepción de los encuestados refleja también una situación desfavorable para el desarrollo del H₂ en el Ecuador y se presenta en las Figuras 4.a y 4.b.

Nótese que respecto a la percepción del desarrollo de la investigación, el 87 % de las respuestas la ubica en niveles bajos y muy bajos. Mientras que 19 de los 23 encuestados afirman que tal situación se debe a limitaciones de financiamiento; y en segundo lugar, a falta de asesoría, en forma de tutorías y conducción de proyectos. Esta situación debe atenderse por parte de las instancias oficiales encargadas de ello y de los cuerpos directivos de las instituciones de educación superior que tienen que ver con las políticas de investigación y acompañamiento académico.

Desde los costos del SESH

Esta dimensión constituye un elemento importante de cualquier decisión sobre la implantación del SESH, y comprende los costos de los diferentes componentes del mismo y del sistema global resultante de la interconexión de todos ellos. Para el componente Transformación, los costos están asociados con la utilización de la

energía primaria renovable en la obtención del H₂ y varían según el tipo de fuente primaria y el proceso de conversión utilizado. En varios estudios de evaluación económica se señala que el uso de la biomasa como fuente del H₂, es ya competitiva con las fuentes fósiles [11, 60]. Esta situación resulta favorable para la intención de desarrollar el SESH en el Ecuador, tomando en cuenta su potencial, la experiencia de su utilización en ingenios azucareros como fuente de energía; siendo también significativo que el principal proyecto de I&D reseñado se oriente al aprovechamiento de esta fuente renovable para la producción de H₂.

En el caso de la producción de H₂ por electrólisis, sus costos dependen principalmente del costo de la energía eléctrica requerida para el rompimiento de la molécula de agua, de manera que este proceso será competitivo respecto a los procesos tradicionales en la medida que el costo de la electricidad lo permita. Sobre ello, la posibilidad de utilizar la electricidad en exceso, de bajo costo, en la producción de H₂ es una opción que ha sido estudiada en países de la región con altos potenciales hidroeléctricos, Brasil [61], Paraguay [62] y Venezuela [63], obteniendo costos atractivos para la producción de H₂ y altamente competitivos, tanto con la producción de H₂ por reformado del gas natural como por gasificación de biomasa. En el caso de Ecuador, se ha estudiado la posibilidad de utilizar la energía hidráulica “desperdiciada” en la central hidroeléctrica Hidropaute para generar electricidad, que a su vez, permitiría obtener el H₂ a unos costos atractivos [46], Tabla 9.

Además, en un estudio realizado en Turquía sobre la utilización de electricidad secundaria proveniente de pe-

País	Costos (USD/kg)	Año del estudio
Brasil	2,38	2013
Ecuador	2,26 a 3,62	2014
Paraguay	4,3	2012
Venezuela	2,36 a 4,12	2007

Tabla 9: Estimados teóricos de costos de producción de H₂ electrolítico en varios países de AL.

pequeñas centrales hidroeléctricas, se reporta un costo de producción de H₂ en el rango de 0,55 a 1,21 USD/kg aprovechando la disminución de los costos por las economías de escala [64]. Esta situación podría replicarse en el país, tomando en cuenta la gran cantidad de proyectos disponibles para el aprovechamiento de pequeñas centrales hidroeléctricas, en las cuales se podría dar el acoplamiento y sinergia entre los dos vectores implicados: electricidad e H₂, con las ventajas que esto conlleva. De todo lo anterior, se desprende que la biomasa y la hidroeléctrica constituyen las fuentes renovables más atractivas para ser usadas como punto de origen del SESH en el Ecuador.

Este resultado del análisis documental se corrobora desde la percepción y conocimiento de los encuestados sobre los posibles procesos de producción del H₂ en el Ecuador, Figura 5, observándose que la electrólisis, la gasificación y fermentación son indicados como los más adecuados. La electrólisis con la electricidad de origen renovable, en especial la hidroelectricidad, y los dos siguientes enfocados al aprovechamiento de la biomasa.

Desde los usos y aplicaciones del SESH

Constituyen el eslabón entre la infraestructura energética y el usuario final ubicado en cualquier sector de la sociedad, de manera que la aceptación social y el manejo seguro de las tecnologías de uso final del H₂ determinarán en gran medida la penetración exitosa y la utilización masiva del H₂ como vector energético en el futuro mediato. Al respecto, en las Figuras 6, 7 y 8, se expresan los resultados de la encuesta sobre cómo se concibe la utilización del H₂ en el Ecuador, en la primera se aprecia la distribución de las diferentes tecnologías de transformación que podrían ser utilizadas en el país, evidenciándose el predominio de las celdas de combustible al ser seleccionadas por 22 de los 23 participantes, seguida del uso en motores de combustión

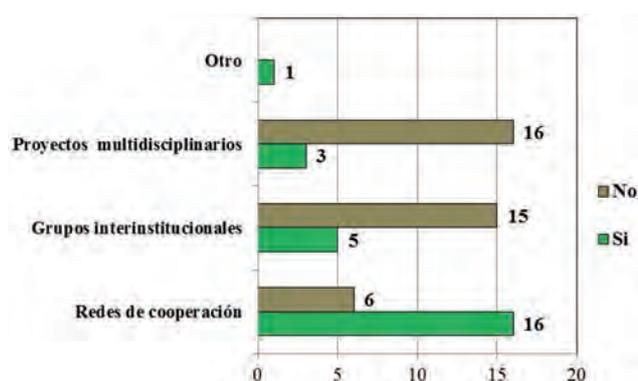


Figura 13: Actividades colaborativas sobre el H₂ en el Ecuador.

interna, lo cual está a tono con lo reportado en la bibliografía sobre las tecnologías de uso predominantes [65], y representan las dos formas de aprovechar la energía química contenida en el H₂: reacción electroquímica y combustión, respectivamente.

Estas tecnologías se utilizarían tanto en aplicaciones estacionarias como móviles, relegando las aplicaciones portátiles a un tercer plano, Figura 7; mientras que el sector del Transporte es considerado el más adecuado para utilizar el H₂ en el Ecuador, seguido del sector Industrial, con el sector Residencial como tercera opción, Figura 8. Sobre estos resultados vale señalar que ambos están en concordancia con un estudio previo sobre las posibilidades de desarrollo del H₂ en América Latina en el cual se concluye que los nichos oportunidad son el transporte urbano en vehículos movidos por celdas de combustible (aplicación móvil) y la energización rural (aplicación estacionaria) [6]. Manifestándose una sola discrepancia, la ubicación del sector Industrial por encima del sector Residencial, lo cual deja entrever que probablemente se estime la utilización del H₂ como fuente química más que como fuente energética.

Desde el marco legal y regulatorio

Este elemento relativo a la estructura jurídica y normativa que favorezca e incentive la penetración del H₂ en el país es prácticamente inexistente, apenas puede referirse una iniciativa del año 2005, consistente de una propuesta de ley para promover la investigación, el desarrollo, la producción y el uso del H₂ como combustible y generador energético, la cual no prosperó [66]. Vale decir que esta ausencia de instrumentos legales que estimulen el avance del H₂ no es exclusiva del Ecuador, ya que, salvo Argentina, con leyes tanto en el ámbito federal como provincial, y una reciente iniciativa en México, en ningún país de la región se ha detectado la presencia de leyes, decretos y normas sobre la participación del H₂ en el sector energético [6].

Sobre esta situación, los resultados de la encuesta muestran un consenso de la ausencia de instrumentos legales en pro del H₂ en el país, Figura 9. En los casos que se señala la existencia de tales instrumentos, se alude a la Constitución de la República, mientras que en las

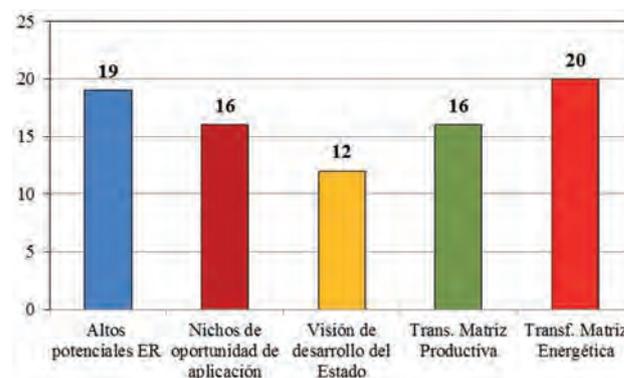


Figura 14: Oportunidades para el desarrollo del H₂ en el Ecuador, desde la visión de los encuestados.

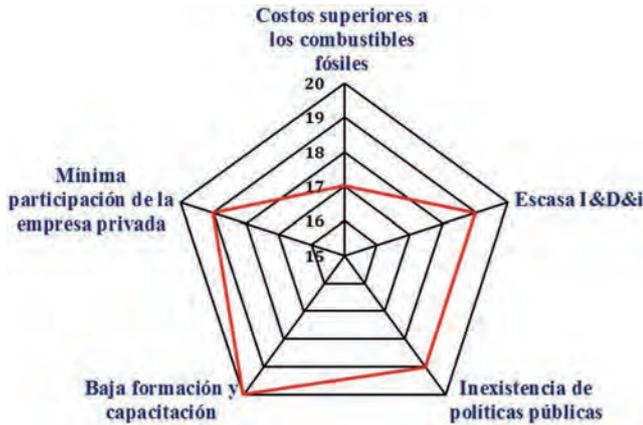


Figura 15: Barreras para el desarrollo del H₂ en el Ecuador desde la visión de los encuestados.

opciones Decretos y Regulaciones, se señala el decreto correspondiente a los Biocombustibles, sin mayores especificaciones, y la Regulación 001/13 del CONELEC relativa a la generación de electricidad a partir de fuentes renovables no convencionales. Finalmente en el ítem Otros se indica el Plan Nacional del Buen Vivir. Nótese que en todos los casos, la existencia de instrumentos legales se refiere a las ER más que al vector H₂ en forma directa.

Desde la formación y capacitación

En esta dimensión de análisis se replica exactamente la situación hallada para la dimensión Marco Legal, la ausencia de oferta formativa, tanto en cursos dentro de la malla curricular de programas académicos, como en cursos extracurriculares, programas de capacitación u otro tipo de actividad orientada a la formación del capital humano requerido para la investigación e innovación tecnológica, como para la operación y mantenimiento de las tecnologías de Uso Final del H₂. De manera que las acciones sobre la formación en fundamentos y aplicaciones del H₂ energético se remiten a la dirección y asesoría de tesis de pregrado y responden al interés particular de los propios docentes más que a algún plan académico estructurado de formación en este campo de estudio. El resultado de la encuesta para esta dimensión se presenta en la Figura 10, destacando que las respuestas positivas en la opción de programas conducentes a grado, en realidad corresponden a la formación en ER, en los cuales los encuestados consideran puede insertarse la formación sobre el H₂ y el SESH.

Ante esta situación, corresponde a las universidades y otras instituciones de educación superior adelantar acciones sistemáticas y coherentes sobre la formación en los fundamentos y aplicaciones de las del SESH e incrementar también la oferta en las ER. En este punto se debe señalar la importancia que se le está confiando a la formación en H₂ en países que están avanzando hacia la Economía del H₂, orientándola principalmente a la experimentación en laboratorios especialmente diseñados para ello, tanto en forma presencial como virtual [67, 68].

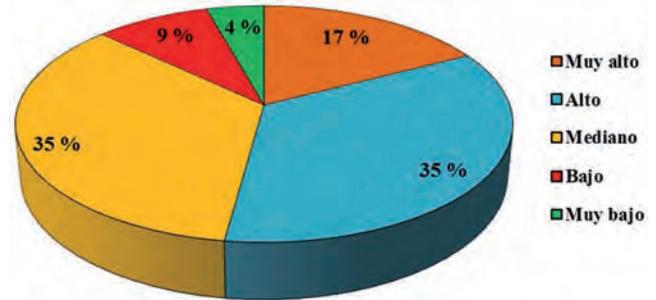


Figura 16: Visión de los participantes sobre desarrollo del H₂ en el Ecuador.

Desde las políticas públicas: planes, programas y proyectos de desarrollo

Sobre esta dimensión se debe señalar que aunque el Estado ecuatoriano no ha formulado instrumento alguno que contemple explícitamente la incorporación del H₂ y del SESH como mecanismos contribuyentes al desarrollo sustentable del país, en el Plan Nacional del Buen Vivir, documento en el cual se plasma la visión de desarrollo del país, se manifiesta la intención de desarrollar las ER [39]. Esta actitud del Estado ecuatoriano, se puede considerar como una ventana de oportunidad para la penetración del H₂ en el sector de la energía del país, ya que la dupla ER e H₂ está presente en el mismo concepto del SESH y el desarrollo de las primeras propiciaría el avance del segundo. Esta intención se manifiesta específicamente en: a. Objetivo 7, Política 7.7., Líneas estratégicas b y c; b. Objetivo 10, Política 10.9, Líneas estratégicas a y c; c. Objetivo 11, Política 11, Líneas estratégicas a, b y t. Este conjunto de objetivos, políticas y lineamientos estratégicos sentarían la base de la formulación de acciones específicas para el avance del H₂ en el país.

Además, en el Plan Maestro de Electrificación, PME, en su objetivo general, específicos y políticas, se plantea el desarrollo de las ER mediante su participación en proyectos de generación; y en los planes de expansión de la distribución, se incluye el Plan de Energización Rural y Electrificación Urbano Marginal, FERUM, para dotar de servicios de energía a sectores de población carentes del mismo, aspirando a beneficiar alrededor de 250.000 viviendas para el año 2022, aumentando la cobertura eléctrica rural al 96 %, mediante la generación tradicional y renovable [8]. La segunda opción constituye un escenario propicio para la participación del H₂ complementado la generación renovable como un mecanismo de almacenamiento de energía, para su uso cuando esta generación sea insuficiente para abastecer la demanda o simplemente no esté disponible el recurso.

En este caso, la amplia mayoría de los encuestados afirmaron no conocer alguna acción del Estado para el desarrollo del H₂ energético en el país, el 95 % para el caso de los planes y el 100 % en el caso de los programas. Esta situación se replica al inquirir sobre la existencia de incentivos fiscales y preferencias aduanales que esti-

mulan la realización de algún proyecto industrial o comercial de la utilización del H₂ como fuente secundaria de energía; así, el 91 % de los participantes en el primer caso, y el 96 % en el segundo, desconocen la existencia de alguna acción en pro de la actividad empresarial y comercial del H₂ en el país, lo cual se traduce en una mínima participación del sector privado en actividades relativas al H₂ energético, tal como se observa en la Figura 11, en la cual el ítem Fabricación tiene que ver con la elaboración de equipos y dispositivos requeridos para la operación del SESH; el ítem Importación corresponde principalmente equipos didácticos e incluso recreativos sobre las ER y el H₂, mientras que los ítems restantes están relacionados con las asesorías y capacitaciones que se pueden realizar en el área.

Desde la difusión, divulgación y reconocimiento

Si la difusión se concibe como el resultado de la actividad de una masa crítica y de cierta madurez investigativa sobre el H₂ y sobre sus tecnologías, cabe esperar que la misma no tiene presencia efectiva en el Ecuador. Lo que si puede mencionar son eventos sobre las ER en los cuales el H₂ tiene cabida, como el congreso ISEREE, evento científico internacional sobre Eficiencia Energética y Energías Renovables, organizado por el INER en el año 2013 y en el cual se presentaron dos ponencias sobre el H₂ energético que ya han sido referidas en la discusión sobre la dimensión de Investigación [69], la misma situación se dio en dos eventos realizados en la USFQ, la Segunda Escuela Computacional para las Américas, y el Congreso de Químicos Teóricos de Expresión Latina, QUITEL [70, 71].

En cuanto a la divulgación, no existe alguna actividad editorial dedicada a la divulgación de resultados de investigación sobre el H₂ y el SESH, lo cual es un signo distintivo de América Latina, región en la apenas puede mencionarse una revista especialmente dedicada al H₂ [72]. Finalmente, el reconocimiento a la actividad académica y de investigación, no se conoce alguna iniciativa al respecto. Los resultados de la encuesta sobre esta dimensión se presentan en la Figura 12, en la cual se alude a eventos, revistas y premios, que si bien no son restrictivos al H₂ tampoco lo excluyen.

Desde las acciones colaborativas y redes

La acción más relevante es el proyecto multidisciplinario sobre la producción de H₂ a partir de los residuos del banano, que conlleva a su vez la creación de un grupo interinstitucional entre la Universidad de Cuenca, el INER y la Universidad de Zaragoza, [56]. En cuanto a las redes colaborativas en I&D y en actividades conexas sobre la energía del H₂, la referencia está la recién creada Red del Hidrógeno y Celdas de Combustible de Ecuador, conformada por un grupo de investigadores de varias instituciones y organizaciones que llevan adelante investigación básica y aplicada sobre el H₂ y el SESH. Esta plausible iniciativa se encuentra en fase de definición conceptual que conduzca su desempeño y su

organización [73], y ha sido señalada ampliamente en la encuesta, Figura 13, en la cual el ítem Otro, se refiere a la Red Temática sobre Biomasa del programa Ciencia y Tecnología, CYTED de España.

Desde las oportunidades

Un resultado importante de este estudio, es la detección de escenarios de oportunidad para la penetración del SESH en el sector de energía del país. Es así como del análisis hecho en los apartados previos, y también desde la percepción de los participantes, Figura 14, han emergido varias situaciones de oportunidad que podrían estimular la penetración progresiva del H₂. La primera de ellas es la intención y acción del Estado ecuatoriano de transformar la matriz energética, impulsando la participación de las ER, en especial, la hidroenergía, lo cual favorecería la intervención del H₂ como portador de energía.

Los grandes potenciales de ER ofrecen una amplia gama de opciones para la producción de H₂, con la obtención a partir de biomasa por procesos químicos, y de la hidroenergía por electrólisis, como las más convenientes y competitivas; lo cual es la segunda situación favorable para el desarrollo del H₂ en el país.

En tercer lugar, los nichos de aplicación detectados, el transporte y la energización rural, podrían convertirse en la forma inicial de introducción del SESH en la matriz energética, tal como se ha planteado en varios países de la región. Esta penetración se basa, por una parte, en la obtención del H₂ a costos atractivos a partir de hidroelectricidad barata y su uso en el transporte urbano en celdas de combustible; y por la otra, la participación del H₂ en sistemas híbridos que garanticen un suministro permanente, eficiente y poco contaminante de energía a poblaciones rurales, contribuyendo a mejorar su calidad de vida [6, 20]. Finalmente, la transformación de la matriz productiva, acorde con la visión de desarrollo del estado, es otra situación propicia ya que el H₂ podría participar en este proceso, tanto como fuente energética como insumo químico.

Desde las barreras

Al escenario propicio sobre el avance del H₂ en el país se le opone el relativo a las barreras a superar para que cualquier intención prospere, y que se han apreciado desde la investigación documental y desde la percepción de los encuestados. Estas barreras pueden agruparse por asociación natural y por importancia, Figura 15; en primer lugar, el grupo referente a la formación y a la actividad investigativa y de innovación que están unidas por una relación de causalidad mutua, ya que la baja formación y la escasa investigación pueden superarse conjuntamente mediante un agresivo plan de fortalecimiento de la oferta formativa soportada en la captación de docentes e investigadores idóneos para que aporten su experticia y conocimientos en la formación actualizada del recurso humano y cumplan el rol de tutores

en programas de postgrado en ER y SESH; pero también para que se constituyan en el núcleo generador de grupos de investigación que soporten y consoliden los programas de cuarto y quinto nivel. Además en las acciones formativas deben incluirse programas de socialización y de alfabetización energética popular que divulguen las ventajas del H₂ como nuevo medio de suministro de energía, propiciando el acercamiento de los ciudadanos a sus tecnologías, ya que de la aceptación social de las mismas dependerá en gran parte su utilización generalizada y eficiente [74, 75].

La continuidad de estas acciones necesitan del apoyo financiero e institucional del Estado, lo cual conlleva al segundo grupo de barreras, la falta de políticas públicas especialmente orientadas al desarrollo del H₂ ocasiona que este vector no tenga el respaldo legal, institucional y de gestión requerido. Corresponde al sector académico y otras instituciones relacionadas con las ER, emprender acciones para que esta situación de precariedad se subsane, sensibilizando al Estado sobre la necesidad de un marco legal que propicie la incorporación del país a la Economía del H₂, tal como ya sucede en una amplia cantidad de países. A su vez, la formulación de tales políticas contribuirá a que la participación del sector privado crezca, ya que las mismas deben contemplar incentivos fiscales y de estímulo a la actividad privada en el sector energético relativo al H₂, en especial en el componente de generación, tal como se ha planteado para las ER.

Por último, la barrera referente a los costos no es exclusiva del país, sino de ámbito global, por tanto en su superación participan factores extrínsecos e intrínsecos; sobre los primeros, se espera que los costos disminuyan con la mejora de las tecnologías del H₂ como resultado de procesos de conversión más eficientes, el desarrollo de nuevos materiales para el almacenamiento de H₂, y en una fase posterior, por las economías de escala debidas a la masificación de dichas tecnologías. Pero también pueden superarse a través de acciones propias del país enfocadas al aprovechamiento de las ventajas competitivas de obtener el H₂ a partir de dos fuentes renovables ampliamente existentes en el país: biomasa e hidroenergía.

En el balance de las oportunidades y barreras, predominan las primeras, lo cual es corroborado por los participantes al inquirirles sobre su visión del desarrollo del H₂ en el Ecuador, en la cual las opciones favorables alcanzan el 70 % de todas, Figura 16.

Conclusiones

La investigación ha permitido identificar y analizar los factores desencadenantes e inhibidores de la intención de desarrollar el SESH en el Ecuador con el fin de incorporar al país en la Economía del Hidrógeno. Entre los factores favorables se encuentran, el proceso de transformación de la matriz energética del país, los altos potenciales de ER, la detección de nichos de oportunidad

del mercado energético, y eventualmente en la industria química y petroquímica como insumo para sus procesos, lo cual además se inscribiría en la transformación de la matriz productiva del país. A esta visión favorable se le opone una serie de factores desfavorables que ralentizan e incluso podrían impedir la intención de incorporación del H₂: la escasa oferta formativa, la baja intensidad de la actividad de investigación y de desarrollo tecnológico, la ausencia de políticas públicas, y de un marco legal y regulatorio que vigorice el financiamiento de la investigación y estimule la acción privada en las diferentes etapas del desarrollo de las ER y el SESH. Por último, la baja actividad de promoción y difusión, siendo un resultado esperado de una baja actividad investigativa y mínima masa crítica existente en el país.

Al contrastar ambos efectos, predominan los primeros; sin embargo, sólo con la participación consensuada y el trabajo cooperativo entre las universidades, centros de investigación y desarrollo, y la empresa privada, bajo la visión de desarrollo sustentable del Estado, se daría un escenario propicio para la penetración del H₂ en la matriz energética del país y se avanzaría hacia la inserción del Ecuador en la Economía del Hidrógeno, entendido como mecanismo para el desarrollo humano armónico y respetuoso de la naturaleza.

Finalmente los resultados obtenidos deben entenderse como un estudio básico que proporciona los elementos a considerar en estudios más detallados que utilicen modelos matemáticos predictivos sobre la forma, dinámica e impacto de la inclusión del H₂ en la matriz energética del país, siendo éste el propósito de un siguiente estudio y cuyos resultados se plasmarán en una futura publicación.

Agradecimientos

Agradecemos de manera especial al Proyecto Prometeo de la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación de la República del Ecuador por su patrocinio a este trabajo.

Referencias

- [1] REN. 2014. "Renewables 2014: Global status report". <http://www.ren21.net/REN21Activities/>.
- [2] Barbir, F. 2009. "Transition to renewable energy systems with hydrogen as an energy carrier". *Energy*, 34:308-312.
- [3] Winter, C. 2009. "Hydrogen energy-Abundant, efficient, clean: A debate over the energy system of change". *International Journal of Hydrogen Energy*, 34:1-52.
- [4] Bockris, J. 2013. "The hydrogen economy: Its history". *Int. J. Hydrogen Energy*, 38:2579-2588.
- [5] Laborde, M.; Lombardo, E.; Bellot, F.; Soares, J.; Fierro, J.; González, M. 2011. "Potencialidades del hidrógeno como vector de energía en América Latina". *Ediciones CYTED: Madrid*.

- [6] Posso, F.; Sánchez, J. 2014. "El desarrollo del sistema energético Solar-Hidrógeno en América Latina: Potencialidades, oportunidades y barreras". *Maskana*, 5:1–19.
- [7] CONELEC. 2013. "Cobertura eléctrica". <http://www.conelec.gob.ec/contenido.php?cd=1102&>.
- [8] MEER. 2013. "Plan Maestro de Electrificación 2013-2022". <http://www.conelec.gob.ec/contenido.php?cd=10329&l=1>.
- [9] Posso, F. 2011. "Modelado y simulación de un sistema energético basado en el hidrógeno". *Editorial Académica Española: Madrid*.
- [10] Tasneem, A.; Abbasi, S. 2011. "Renewable hydrogen: Prospects and challenges". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15:3034–3040.
- [11] Bartels, J.; Pate, M.; Olson, N. 2010. "An economic survey of hydrogen production from conventional and alternative energy sources". *Int. J. Hydrogen Energy*, 35:8371–8384.
- [12] Guerrero, M.; Martínez, J. 2010. "Updated hydrogen production costs and parities for conventional and renewable technologies". *Int. J. Hydrogen Energy*, 35:3929–3936.
- [13] Kothari, R.; Buddhi, D.; Sawhney, R. 2008. "Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32:553–563.
- [14] Veziroglu, T.; Sahin, S. 2008. "21st Century's energy: Hydrogen energy system". *Energy Conversion and Management*, 49:1820–1831.
- [15] Sherry, F.; Devine, H.; Devine, P. 2010. "Public understanding of hydrogen energy: A theoretical approach". *Energy Policy*, 38:5311–5319.
- [16] Fayaz, H.; Saidur, R.; Anuar, F.; Saleman, A.; Islam, M. 2012. "An overview of hydrogen as a vehicle fuel". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16:5511–5528.
- [17] Zhenhong, L.; Dong, J.; Green, D. 2013. "Hydrogen vehicles: Impacts of DOE technical targets on market acceptance and societal benefits". *Int. J. Hydrogen Energy*, 38:7973–7985.
- [18] Garland, N.; Papageorgopoulos, D.; Stanford, J. 2012. "Hydrogen and fuel cell technology: Progress, challenges, and future directions". *Energy Procedia*, 28:2–11.
- [19] Renquist, J.; Dickman, B.; Bradley, T. 2012. "Economic comparison of fuel cell powered forklifts to battery powered forklifts". *Int. J. Hydrogen Energy*, 37:12054–12059.
- [20] Bauen, A.; Hart, D.; Chase, A. 2003. "Fuel cells for distributed generation in developing countries-an analysis". *Int. J. Hydrogen Energy*, 28:695–701.
- [21] McDowall, W. 2012. "Technology roadmaps for transition management: The case of hydrogen energy". *Technological Forecasting & Social Change*, 79:530–542.
- [22] Padilha, J.; da Trinidad, L.; de Souza, R.; Miguel, M. 2009. "An evaluation of the potential of the use of wasted hydroelectric capacity to produce hydrogen to be used in fuel cells in order to decrease CO₂ emissions in Brazil". *Int. J. Hydrogen Energy*, 34:7898–7902.
- [23] Rodríguez, C.; Riso, M.; Jiménez, G.; Yob, R.; Ottogalli, R.; Santa Cruz, R.; Aisa, S. 2010. "Analysis of the potential for hydrogen production in the province of Córdoba, Argentina, from wind resources". *Int. J. Hydrogen Energy*, 35:5952–5956.
- [24] Marschoff, C. 1998. "Transition from to renewable energy sources: Fuel cells in Antarctica as an economically attractive niche". *Int. J. Hydrogen Energy*, 23:303–306.
- [25] Sebastian, P.; Martinez, M.; Eapen, D.; Savadogo, O. 1996. "Hydrogen energy and fuel cells: A recent R & D program in Mexico". *Int. J. Hydrogen Energy*, 21: 613–616.
- [26] Ramírez, J.; Estrada, A. 2004. "Roadmap towards a sustainable hydrogen economy in Mexico". *Journal of Power Sources*, 129:255–263.
- [27] Dimakis, A.; Biberacher, M.; Dominguez, J.; Fiorese, G.; Gadocha, S.; Gnansounou, E.; Guariso, G.; Kartalidis, A.; Panichelli, L.; Pinedo, I.; Robba, M. 2011. "Methods and tools to evaluate the availability of renewable energy sources". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15:1182–1200.
- [28] CONELEC. 2008. "Atlas Solar del Ecuador". http://www.conelec.gob.ec/archivos_articulo/Atlas.pdf.
- [29] MEER. 2013. "Atlas Eólico del Ecuador". <http://www.energia.gob.ec/bibliotecal/>.
- [30] Barriga, A. 2013. "Energías renovables en el Ecuador". *Ciclo de conferencias: La Matriz Energética del Ecuador. ESPOL. Enlace: <http://www.matrizenergrec.espol.edu.ec/>*.
- [31] Sánchez, S. 2003. "Energías renovables. Conceptos y aplicaciones". *WWF-Fundación, Natura, Quito*.
- [32] Narváez, R. 2012. "Potencial de generación de energía a partir de desechos sólidos". <http://redes.iner.gob.ec/biomasal/presentations/potencial-de-generacion-de-energia-a-partir-de-desechos-sólidos>.
- [33] Trávez, D. 2011. "Estado del arte y novedades de la bioenergía en el Ecuador". *FAO. <http://www.fao.org/docrep/019/as418s/as418s.pdf>*.
- [34] Sánchez, J. 2013. "Evaluación energética de cáscaras de cacao nacional y CCN-51". *Facultad de Ciencias Químicas. Universidad de Cuenca*.
- [35] Muffler, P.; Cataldi, R. 1978. "Methods for regional assessment of geothermal resources". *Geothermics*, 7: 53–89.
- [36] Parra, C. 2013. "Situación de la geotermia en Latinoamérica y el Caribe". <http://redes.iner.gob.ec/geotermia/files/04-christian-parra-situacion-de-la-geotermia-en-alc-olade.pdf>.

- [37] Lloret, A.; Labus, J. 2014. "Geothermal development in Ecuador: History, current status and future". *INER. United Nations University. Geothermal Training Programme*. <http://los.is/gogn/unu-gtp-sc/UNU-GTP-SC-18-08.pdf>.
- [38] Beate, B.; Salgado, R. 2010. "Geothermal country update for Ecuador, 2005-2010". *Proceedings World Geothermal Congress 2010 Bali, Indonesia*. http://217.174.128.43/web_data/liga_db/Ecuador.pdf.
- [39] SENPLADES. 2013. "Buen Vivir. Plan Nacional 2013-2017". *Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo. República del Ecuador*.
- [40] Orejuela, V. 2013. "Perspectivas de la matriz energética de electricidad en el Ecuador". <http://www.matrizenergec.espol.edu.ec/>.
- [41] Abassi, T.; Abassi, S. 2011. "Small hydro and the environmental implications of its extensive utilization". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15:2134–2143.
- [42] Lahimer, A.; Alghoul, M.; Sopian, K.; N., A.; Fadhel, M. 2012. "Research and development aspects of pico-hydro power". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16:5861–5878.
- [43] Muller, H.; Nitsch, J. 2005. "The contribution of renewable energies to a sustainable energy economy". *Process Safety and Environmental Protection*, 83:285–297.
- [44] CONELEC. 2009. "Proyectos hidroeléctricos". <http://www.conelec.gob.ec/contenido.php?cd=1351&l=1>.
- [45] Da Silva, E.; Marin, A.; Ferreira, P.; Camargo, J.; Apolinario, F.; Pinto, C. 2005. "Analysis of hydrogen production from combined photovoltaics, wind energy and secondary hydroelectricity supply in Brazil". *Solar Energy*, 78:670–677.
- [46] Peláez, M.; Riveros, G.; Torres, S.; Garcia, T.; Albornoz, E. 2014. "Production and use of electrolytic hydrogen in Ecuador towards a low carbon economy". *Energy*, 64:626–631.
- [47] Rodríguez, C.; Riso, M.; Jiménez, G.; Ottogalli, R.; Santa Cruz, R.; Aisa, S.; Jeandrevin, G.; Leiva, E. 2010. "Analysis of the potential for hydrogen production in the province of Córdoba, Argentina, from wind resources". *Int. J. Hydrogen Energy*, 35:5952–5956.
- [48] Patricio, R.; Sales, A.; Sacramento, E.; de Lima, L.; Veziroglu, T. 2012. "Wind hydrogen energy system and the gradual replacement of natural gas in the State of Ceará-Brazil". *Int. J. Hydrogen Energy*, 37:7355–7364.
- [49] Zolezzi, J.; Garay, A.; Reveco, M. 2010. "Large scale hydrogen production from wind energy in the Magallanes area for consumption in the central zone of Chile". *Journal of Power Sources*, 195:8236–8243.
- [50] Levene, J.; Mann, M.; Margolis, R.; Milbrandt, A. 2005. "An Analysis of Hydrogen Production from Renewable Electricity Sources". *Conference Paper NREL/CP-560-37612. ISES 2005. Solar World Congress, Florida*.
- [51] Posso, F.; Zambrano, J. 2014. "Estimation of Electrolytic Hydrogen Production Potential in Venezuela from Renewable Energies". *Int. J. Hydrogen Energy*. *In press*.
- [52] Barrere, L.; Matas, L.; Roldan, A. 2013. "La investigación y el desarrollo en energías renovables en Iberoamérica. Situación actual y tendencias". *Observatorio Iberoamericano de la Ciencia, Tecnología y Sociedad. Ediciones AECID: Madrid*.
- [53] Al-Rousan, A. 2010. "Reduction of fuel consumption in gasoline engines by introducing HHO gas into intake manifold". *Int. J. Hydrogen Energy*, 35:12930–12935.
- [54] Collings, N. 2012. Comment on the article "Reduction of fuel consumption in gasoline engines by introducing HHO gas into intake manifold by Ammar A. Al-Rousan". *Int. J. Hydrogen Energy*, 37:12039.
- [55] Al-Rousan, A. 2012. Responses regarding the issues raised by Dr. Nick Collings on the manuscript "Reduction of fuel consumption in gasoline engines by introducing HHO gas into intake manifold". *Int. J. Hydrogen Energy*, 37:12040–12042.
- [56] Ruiz, W. 2009. "Generación eléctrica, alternativa de uso doméstico utilizando hidrógeno". *Revista Actualidad Científica y Tecnológica del Ecuador*. <http://repositorio.educacionsuperior.gob.ec/handle/28000/1075>, 1:52–55.
- [57] INER. 2014. "Iner firma convenio de cooperación para el desarrollo del proyecto del hidrógeno". <http://www.iner.gob.ec/iner-firma-convenio-de-cooperacion-para-el-desarrollo-del-proyecto-de-hidrogeno/>.
- [58] Arias, J.; Florez, R. 2013. "Generación de hidrógeno por hidrólisis con aluminio metálico para uso en celdas de combustible". *Memorias del ISEERE. Quito. Ecuador*.
- [59] Aguinaga, A. 2009. "Diseño y construcción de un prototipo de planta dispensadora de hidrógeno doméstica, con electrolizador híbrido, solar y eléctrico". *Revista Politécnica*, 30:10–20.
- [60] Bolat, P.; Thiel, C. 2014. "Hydrogen supply chain architecture for bottom-up energy systems models. Part 2: Techno-economic inputs for hydrogen production pathways". *Int. J. Hydrogen Energy*, 39:8898–8925.
- [61] Godoy, G.; Cavaliero, C.; Silva, E. 2013. "Analysis of electrolytic hydrogen production models and distribution modes for public urban transport: study case in Foz do Iguacu, Brazil". *Int. J. Hydrogen Energy*, 37:1142–1150.
- [62] Galeano, M.; Peres, E.; Camargo, J. 2012. "Are HFC buses a feasible alternative for urban transportation in Paraguay?". *Int. J. Hydrogen Energy*, 37:16177–16185.
- [63] Contreras, A.; Posso, F.; Veziroglu, T. 2007. "Modeling and simulation of the production of hydrogen using hydroelectricity in Venezuela". *Int. J. Hydrogen Energy*, 32:1219–1224.
- [64] Yumurtaci, G.; Bilgen, E. 2004. "Hydrogen production from excess power in small hydroelectric installations". *Int. J. Hydrogen Energy*, 29:687–693.

- [65] Verhelst, S.; Wallner, T. 2009. "Hydrogen-fueled internal combustion engines". *Progress in Energy and Combustion Science*, 35:490–527.
- [66] Torres, W. 2008. "Proyecto de Ley del Hidrógeno". <http://www.derechoecuador.com/articulos/>.
- [67] Reijalt, M. 2010. "Hydrogen and fuel cell education in Europe: from when? And where? To here! And now!". *Journal of Cleaner Production*, 18:S112–S117.
- [68] Kimmig, D.; Brenner, T.; Bittner, K.; Schmidt, A. 2014. "Towards a web based Modelling and Simulation Tool for Research, Engineering and Education in the field of Hydrogen and Fuel Cell Technology". *International Conference on Computational Science and Computational Intelligence*.
- [69] INER. 2013. "ISEREE 2013: Primer Congreso Internacional y Expo científica". <http://www.iner.ec/congreso/>.
- [70] PREFALC. 2014. "2da Escuela de Química Computacional de las Américas". <http://www.usfq.edu.ec/eventos/prefalc/>.
- [71] QUITEL. 2014. "XL Congreso de Químicos Teóricos de Expresión Latina". <http://www.usfq.edu.ec/eventos/quitel2014/>.
- [72] Sánchez, J. 2014. "La Universidad de Cuenca presente en la creación de la Red de Hidrógeno y celdas de combustible en el Ecuador". *Revista de la Facultad de Ciencias Químicas*, 8:62.
- [73] Hidrógeno. 2013. "Asociación Argentina del Hidrógeno". <http://www.aah2.org.ar/news.htm>.
- [74] Sherry, F.; Devine, H.; Devine, P. 2010. "Wright public understanding of hydrogen energy: A theoretical approach". *Energy Policy*, 38:5311–5319.
- [75] Sovacool, B.; Brossmann, B. 2010. "Symbolic convergence and the hydrogen economy". *Energy Policy*, 38: 1999–2012.

Characterization the average daily intensity and the vehicular traffic profiles in Distrito Metropolitano de Quito

Caracterización de la intensidad media diaria y de los perfiles horarios del tráfico vehicular del Distrito Metropolitano de Quito

Dayana Vega¹, René Parra^{1*}

¹Universidad San Francisco de Quito - Instituto de Investigaciones Atmosféricas - Colegio de Ciencias e Ingeniería
Diego de Robles y Vía Interoceánica, Quito - Ecuador.

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

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

Recibido/Received: 29/09/2014. Aceptado/Accepted: 15/10/2014.

Publicado en línea/Published on Web: 19/12/2014. Impreso/Printed: 19/12/2014.

Abstract

On-road traffic is a significant source of air pollutants. The spatial and temporal configuration of on-road emissions should be described with the best available information, to underpin the air quality management, or to undertake studies about the behavior of pollutants in the atmosphere. The emission maps are typically built using intensity maps and hourly traffic profiles. We present an updated map for the year 2013, of the daily intensity of traffic of the Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) and its hourly variation by type of day, based on counting 335 points developed by the Secretary of Mobility from the Municipality of Quito. The roads with most traffic are located mainly in the north of the urban area of Quito and those that connect to the valleys of Los Chillos Cumbayá and Tumbaco. In the north, the traffic flow of working days is over Saturday flows (10 %) and Sundays (60 %). In the south, traffic flow on Saturdays is similar to the values of working days. On Sundays, the traffic intensity is reduced by 26 %. In roads of the urban area of Quito the traffic is reduced during holidays. However, in the ways of the periphery there is an increase (between 11 and 47 %) compared to the flow of the weekdays. In the future this information will be used to generate maps of high spatial and temporal resolution of the emissions of primary air pollutant. These maps will allow the performance of updated studies of air pollutants dispersion in the DMQ.

Keywords. DMQ, emission inventories, top-down approach, traffic profile.

Resumen

El tráfico vehicular es una fuente relevante de contaminantes del aire. La configuración espacial y temporal de las emisiones vehiculares debe caracterizarse con la mejor información disponible, para apuntalar la gestión de calidad del aire, o emprender estudios del comportamiento de los contaminantes en la atmósfera. Los mapas de emisión se estructuran típicamente en base de mapas de la intensidad y de los perfiles horarios de tráfico. Presentamos una caracterización actualizada al año 2013 de la intensidad media diaria del tráfico vehicular del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) y de su variación horaria por tipos de día, en base al conteo en 335 puntos desarrollado por la Secretaria de Movilidad del Municipio de Quito. Las vías con mayor actividad se localizan principalmente al norte de la zona urbana de Quito y en aquellas que conectan con los valles de Los Chillos, Cumbayá y Tumbaco. En la zona norte, el flujo vehicular de días laborables es mayor a los flujos de los sábados (en un 10 %) y domingos (en un 60 %). En la zona sur, el flujo vehicular de los sábados es similar a los valores de días laborables. Los domingos, la intensidad de tráfico se reduce en un 26 %. En la zona urbana de Quito el tráfico se reduce en días feriados. Sin embargo, en las vías de la periferia hay un incremento (entre 11 y 47 %) con respecto al flujo de los días laborables. A futuro esta información será utilizada para generar mapas de alta resolución espacial y temporal de las emisiones de contaminantes primarios del aire. Estos mapas permitirán el desarrollo estudios actualizados de dispersión de contaminantes del aire en el DMQ.

Palabras Clave. DMQ, inventario de emisiones, enfoque top-down, perfil de tráfico.

Introducción

La gestión del tráfico vehicular y de sus impactos, es uno de los principales retos de la sociedad. En los úl-

timos años hay un incremento notable del parque vehicular de los países en desarrollo, aspecto asociado a un mayor poder adquisitivo, mayor acceso al crédito, y como respuesta a las deficiencias del transporte público

[1]. El incremento del parque vehicular ha generado; especialmente en las zonas urbanas, problemas asociados con la congestión, como mayores tiempos de viaje y de emisión de contaminantes atmosféricos. Se estima que en el año 2013, el parque vehicular del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) fue de 570 282 unidades, y que la tasa de crecimiento anual es del 10 % [2].

La valoración de las emisiones atmosféricas constituye un elemento imprescindible para establecer políticas y acciones de control de la calidad del aire. Esta información se obtiene por medio de los inventarios de emisiones, que se definen como la colección de números que representan las cantidades de uno o más contaminantes emitidos hacia la atmósfera, a causa de las actividades socioeconómicas o naturales, dentro de una zona geográfica determinada y en un período de tiempo establecido (pasado, presente o futuro) [3]. Los inventarios de emisiones pueden ser utilizados con fines de política ambiental o de interés científico. Con fines de política ambiental, los inventarios sirven para conocer, vigilar o comprobar el cumplimiento de políticas ambientales por medio del comportamiento o de las tendencias de las emisiones en el tiempo. Este tipo de inventarios suelen tener las siguientes características: 1) períodos de cálculo anuales, 2) se refieren al territorio limitado por las fronteras nacionales, y 3) suelen requerir el uso de un método de cálculo y formato de presentación definidos. Desde el punto de interés científico, los inventarios de emisiones proporcionan la información requerida por un modelo de transporte químico, para simular el comportamiento de contaminantes en la atmósfera. Estos inventarios tienen las siguientes características: 1) alta resolución espacial y temporal (emisiones horarias para celdas territoriales de tamaño del orden de 1 km de lado), 2) desagregación en altura de las emisiones, 3) el dominio espacial debe tener forma rectangular o cuadrada, dentro del cual se inscribe la zona de interés, y 4) las celdas de emisión deben ser georeferenciadas.

En el Ecuador ya se han desarrollado algunos inventarios de emisiones, que indican el aporte del tráfico vehicular. Para el DMQ (Fig. 1), el último inventario de emisiones oficialmente publicado, corresponde al año 2007 [4]. En este inventario, al tráfico vehicular se le atribuye un total de 101.2 kt de monóxido de carbono (CO) (que representa el 97.3 % de las emisiones totales de CO del DMQ), 18 kt de óxidos de nitrógeno (NOx) (52.3 %), 14.2 kt de compuestos orgánicos volátiles (COV) (39.4 %), 0.86 kt de material particulado con diámetro equivalente menor a 10 micras (PM10) (26.2 %), 0.63 kt de material particulado fino (PM2.5) (45.6 %) y 1.2 kt de dióxido de azufre (SO2) (11.9 %). Para el Cantón Cuenca, en el inventario de emisiones del año 2009, al tráfico vehicular le corresponde el 97 % de las emisiones de CO, 78 % de NOx, 52 % de COV, 52 % de PM2.5 y 30 % de SO2 [5]. De acuerdo al inventario preliminar de emisiones de contaminantes del aire, de los cantones Esmeraldas, Ibarra, Santo Domingo, Manta, Portoviejo, Milagro, Riobamba, Ambato y Latacunga; con año base

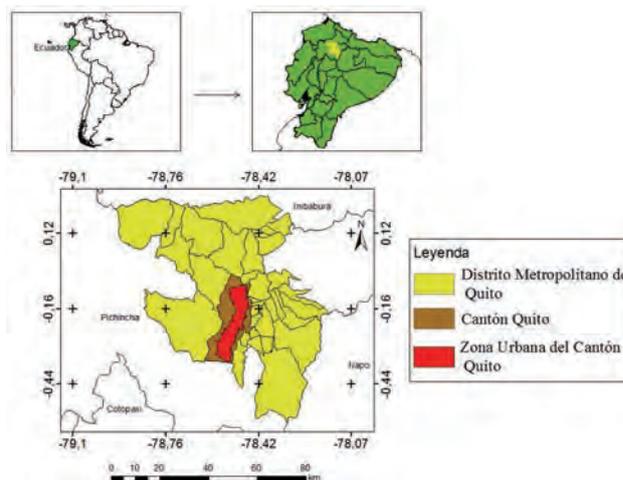


Figura 1: Ubicación del Distrito Metropolitano de Quito.

2010, el tráfico vehicular, con respecto al total cantonal, emite entre un 99.1 - 99.9 % de las emisiones de CO, 48.1 - 99 % de NOx, 24 - 53.3 % de COV, 3.6 - 95.3 % de PM10, 4.9 - 97.6 % de PM2.5 y 1.2 - 99.6 % de SO2 [6].

Al ser el tráfico vehicular una fuente relevante de contaminantes del aire en el Ecuador, es necesario caracterizar de la mejor manera su comportamiento emisor. Los mapas de emisión del tráfico, se estructuran típicamente en base de mapas de intensidad de tráfico. Las emisiones totales en la zona de estudio, se reparten espacialmente, en función de la longitud de la vía, y de la cantidad de vehículos que circulan por esta vía. Esta práctica se conoce en la literatura como enfoque *top-down* [3].

El desarrollo de inventarios de emisiones en el Ecuador, y su posterior uso en modelos de transporte químico, es un objetivo prioritario del Instituto de Investigaciones Atmosféricas de la Universidad San Francisco de Quito. A fin de obtener mapas actualizados de las emisiones de tráfico vehicular, presentamos, una caracterización actualizada de la intensidad media diaria del tráfico vehicular del DMQ para el año 2013, y de información para describir la variación horaria del tráfico por tipos de día.

Método

Área de Estudio

El DMQ se localiza en la zona de la sierra, al norte del Ecuador (Fig. 1). Cuenta con una superficie de 423 000 ha. Comprende 55 parroquias (33 rurales y 32 urbanas) [7]. Su población al año 2013 asciende a 2 458 900 habitantes [8]. Su topografía es compleja. La altura media de la zona urbana de Quito es de 2800 msnm, lo que incide directamente en los procesos de combustión, ya que al haber menor disponibilidad de oxígeno en relación al nivel del mar, hay una mayor emisión de contaminantes primarios del aire. Se conforma de 8 administraciones zonales: La Delicia, Calderón, Norte - Eugenio Espejo, Centro - Manuela Saenz, Sur - Eloy Alfaro, Quitumbe, Tumbaco y Los Chillos.

Información base

Conformamos un mapa actualizado de los ejes viales del DMQ, en base de la información georeferenciada de la Secretaría de Movilidad del Municipio de Quito [9] y del “Catálogo Ecuador” de la Universidad San Francisco de Quito [10]. Recopilamos y organizamos la información de conteos de tráfico, efectuados por la Secretaría de Movilidad, entre enero de 2009 y marzo de 2014. Los conteos corresponden a 335 puntos distribuidos en el DMQ, principalmente en la zona urbana de Quito (Fig. 2). Las vías con registros de conteo corresponden al 7 % del total de la red vial del DMQ. Los puntos de conteo para las zonas norte, centro y sur de Quito, fueron 136, 33 y 105; respectivamente.

Según lo indicado por la Secretaría de Movilidad, los conteos de tráfico corresponden al levantamiento de información base para el diseño de pavimentos, la sincronización de semáforos, ampliación y apertura de vías, construcción de pasos peatonales y ciclo vías, rediseño geométrico de vías y gestión del tráfico en feriados; entre otras aplicaciones. Para ello se utilizan contadores automáticos que registran la información cada 15 min. Estos contadores asumen que un vehículo produce el registro de dos ejes. Por una parte, la circulación de vehículos con más de dos ejes produce un registro mayor de automotores. También puede haber una subestimación cuando hay rotura o vandalismo de mangueras y/o cables que forman parte del contador. En este último caso y de ser factible, la Secretaría de Movilidad realiza una corrección en base de su experiencia. La entidad municipal estima que el método de medida presenta un margen de error del 0.7 %.

A fin de caracterizar los conteos al año 2013, ajustamos los registros de otros años, considerando el cambio del parque vehicular. Para ello analizamos la información de la Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador [11, 12], y determinamos los porcentajes y factores de la Tabla 1. Al momento de esta actividad, no se dispone del valor del parque del año 2014. Para este caso

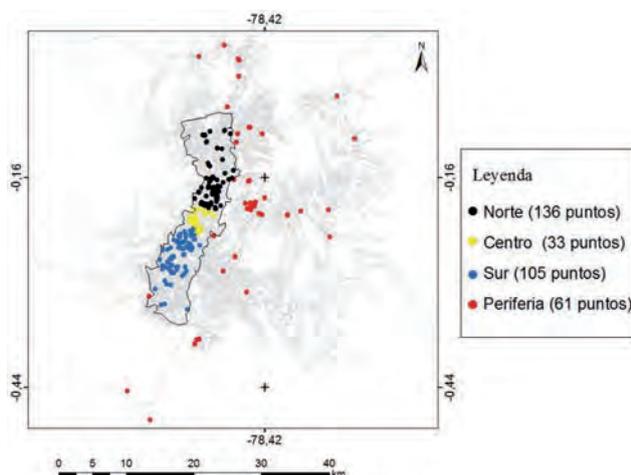


Figura 2: Zonas y puntos de conteo de la intensidad de tráfico vehicular en el Distrito Metropolitano de Quito.

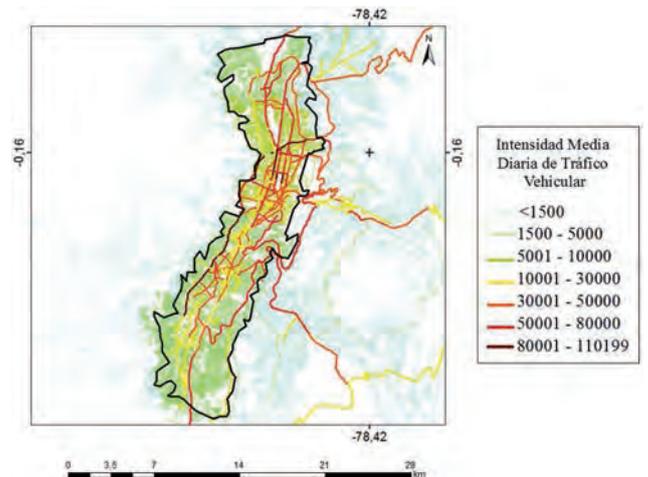


Figura 3: Mapa de la intensidad media diaria de tráfico vehicular del Distrito Metropolitano de Quito. Año 2013.

estimamos el parque vehicular en base a los porcentajes de crecimiento históricos.

A los 335 segmentos de vía asociados con cada punto de conteo, asignamos el correspondiente valor de la intensidad de tráfico. Para las vías sin conteo, según el caso, aplicamos uno de los siguientes criterios:

- a) Balance de flujo vehicular para las vías que forman parte de la red principal y que no disponen de registros de tráfico. Estas vías representan solamente el 15 % de la red principal, de acuerdo al procesamiento geográfico que elaboramos.
- b) Correlación con la cantidad de vehículos por Administración Zonal, para las vías secundarias que pertenecen a las zonas con población consolidada.

Para las vías secundarias, distribuimos el total de vehículos del año 2013 (570 282) por Administración Zonal, en función de la tasa de motorización (número de vehículos por cada 100 habitantes) y de la población. Asumimos una intensidad media diaria de 6000 vehículos como valor representativo para la Administración Norte -

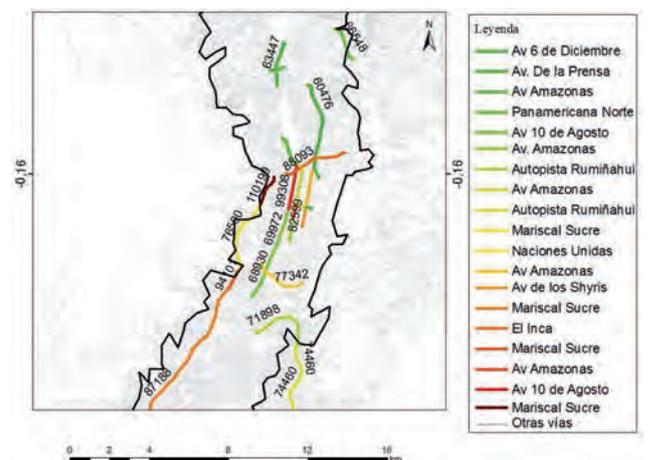


Figura 4: Vías con intensidad media diaria mayor a 60 000 vehículos.

Porcentaje de variación del parque vehicular en la Provincia de Pichincha		Factores para el ajuste de la intensidad media de tráfico al año 2013	
10.02	2009 respecto a 2008	1.47	de 2009 a 2013
12.34	2010 respecto a 2009	1.31	de 2010 al 2013
11.30	2011 respecto a 2010	1.18	de 2011 a 2013
9.01	2012 respecto a 2011	1.08	de 2012 a 2013
7.88	2013 respecto a 2012	0.93	del 2014 a 2013

Tabla 1: Factores para el ajuste de la intensidad media de tráfico al año 2013.

Administración Zonal	Tasa Motorización (vehículos por 100 habitantes)*	Habitantes (2010)**	Vehículos por Administración Zonal	Intensidad media diaria
La Delicia	14	351 963	83 913	2917
Calderón	15	162 915	41 615	1447
Norte - Eugenio Espejo	24	422 242	172 573	6000
Centro - Manuela Saenz	12	217 509	44 449	1545
Sur - Eloy Alfaro	12	429 112	87 690	3049
Quitumbe	11	319 857	59 916	2083
Tumbaco	14	157 358	37 516	1304
Los Chillos	15	166 812	42 611	1481
Total		2 227 768	570 282	

*[13], **[14]

Tabla 2: Intensidad media diaria de vehículos para vías secundarias por Administración Zonal.

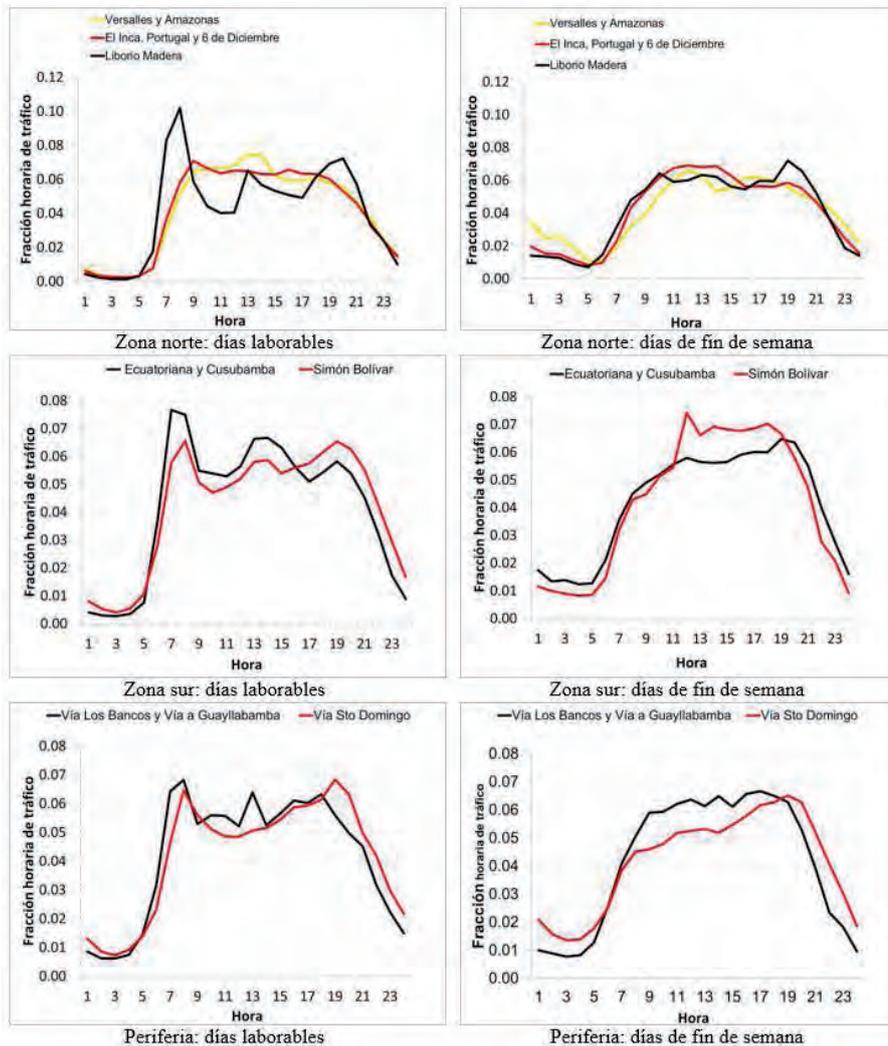


Figura 6: Perfiles horarios de tráfico de días laborables y de fin de semana para vías específicas.

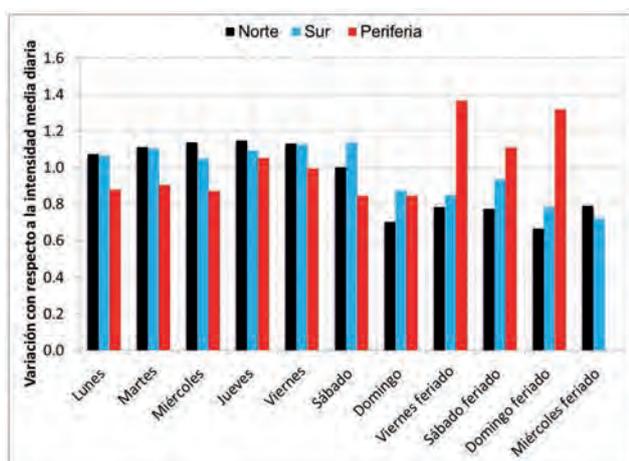


Figura 5: Variación de la intensidad de tráfico con respecto a la intensidad media diaria.

Eugenio Espejo; y en base a este valor, obtuvimos los niveles de tráfico para las demás administraciones zonales (Tabla 2).

Adicionalmente, con la información de 26 puntos de conteos del año 2013, obtuvimos las fracciones de tráfico horario con respecto al total diario, a fin de caracterizar por zonas los perfiles de tráfico en días laborables, de fin de semana y feriados.

Resultados y Discusión

Mapa de intensidad de tráfico

La Figura 3 indica el mapa obtenido de la intensidad media diaria de tráfico vehicular para el año 2013. Las vías con mayor actividad se localizan principalmente al norte de la zona urbana de Quito. También presentan altos niveles de tráfico vías periféricas y aquellas que conectan con los valles de Los Chillos, Cumbayá y Tumbaco. Específicamente se destacan: un tramo de Av. Mariscal Sucre (Fig. 4) con una intensidad de 110 119 vehículos/día, Av. 10 de Agosto (entre Ascaray y Río Coca, 99 308 vehículos/día), Av. Amazonas (entre Naciones Unidas y Atahualpa, 94 115 vehículos/día), Av. Simón Bolívar (88 093 vehículos/día), Av. de los Shyris (entre Portugal y Naciones Unidas, 82 599 vehículos/día), Av. 6 de Diciembre (sector del túnel Guayasamín 80 032 vehículos/día), Av. Patria (entre Amazonas y 9 de octubre, 77 342 vehículos/día), Av. Naciones Unidas (entre Amazonas y Nuñez de Vela, 77 105 vehículos/día), Autopista General Rumiñahui (74 460 vehículos/día) y Panamericana Norte (66 548 vehículos/día).

El mapa de intensidad de tráfico es coherente y representa una aproximación al flujo vehicular real en el DMQ. Paralelamente estamos desarrollando el inventario de emisiones del tráfico vehicular. Los valores totales de este inventario se repartirán espacialmente, por medio de este mapa de tráfico.

Perfiles de tráfico diarios

La Figura 5 indica la variación de la intensidad de tráfico de diferentes tipos de día con respecto a la intensidad



Figura 7: Perfiles horarios promedio de tráfico de días laborables y de fin de semana.

media diaria, en grupos de vías según su ubicación en las zonas norte, sur y periferia (Fig. 2).

En la zona norte, el flujo vehicular de días laborables es mayor a los flujos de los sábados (en un 10 %) y domingos (en un 60 %). En la zona sur, el flujo vehicular de los sábados es similar a los valores de días laborables. Los domingos, la intensidad de tráfico se reduce en un 26 %. En las vías de las zonas norte y sur, el tráfico se reduce en días feriados. Sin embargo, en las vías de la periferia hay un incremento (entre 11 y 47 %) con respecto al flujo de los días laborables. Este cambio se explica por la mayor cantidad de vehículos que salen y llegan al DMQ, en días feriados.

Perfiles horarios de tráfico vehicular

La Figura 6 presenta los perfiles horarios de tráfico para días laborables (lunes a viernes) y de fin de semana (sábado y domingo), para vías seleccionadas de las zonas norte, sur y periferia. El eje vertical indica la fracción de tráfico que corresponde a cada hora, en relación a la intensidad total diaria. La suma de todas las fracciones horarios es uno. En días laborables la configuración que predomina es el perfil con tres máximos: el primero entre las 07h00 y 09h00 (corresponde al tráfico de la mañana, cuando es generalizado el traslado hasta los lugares de trabajos y centros educativos), el segundo hacia las 13h00 (tráfico del mediodía); y el tercero, entre las 18h00 y 20h00 (retorno hacia domicilios). En los perfiles de fin de semana el primer máximo se desplaza a la derecha, en relación a los días laborables. Las actividades se desarrollan más tarde, en comparación con los días laborables. Para las vías que no disponen de conteos propios, asignamos los perfiles de la Figura 7, que corresponden a los perfiles promedios de días laborables y de fines de semana, obtenidos de todos los registros de tráfico horario que colectamos.

Los inventarios de emisiones actualmente presentan altos niveles de incertidumbre. La información utilizada para su distribución espacial y temporal (mapa de intensidad de tráfico, variaciones de tráfico por tipo de día,

fracciones horarias de tráfico con respecto al total diario) contribuye en parte con el nivel de incertidumbre de los inventarios de emisiones. La validez de los mapas de intensidad de tráfico se evaluará en parte, cuando las emisiones sean utilizadas en la simulación de la calidad del aire. Si los resultados simulados son coherentes con los registros de la calidad del aire, se puede afirmar que el inventario de emisiones (y toda la información utilizada en su elaboración, como la caracterización del tráfico), también es coherente.

Conclusiones

Disponemos de información actualizada sobre: 1) el mapa de la intensidad media diaria de tráfico, 2) la caracterización de los cambios de las intensidades de tráfico por tipo de día (laborable, de fin de semana o feriado, y 3) el comportamiento horario de tráfico para la red vial del DMQ, asimismo por tipo de día.

Esta información se usará para obtener mapas de alta resolución espacial (celdas de 1 km de lado) y temporal (1 hora) de las emisiones de contaminantes primarios del aire generados por el tráfico vehicular, diferenciando el comportamiento para días laborables, de fin de semana y festivos. Estos mapas nos permitirán simular el transporte de contaminantes del aire para eventos recientes de contaminación, mediante la aplicación de un modelo de transporte químico. Con ello buscamos entender mejor el comportamiento de los contaminantes atmosféricos en Quito, como elemento clave dentro de los objetivos del Instituto de Investigaciones Atmosféricas de la Universidad San Francisco de Quito.

Agradecimientos

A los ingenieros Henry Vilatuña y Wladimir Aguirre, de la Secretaria de Movilidad del Municipio de Quito, por la entrega de la información sobre los ejes viales y conteos de tráfico, respectivamente.

Referencias

- [1] Thomson, I.; Bull, A. 2002. "La congestión de tránsito. El problema y como enfrentarlo". *Revista CEPAL*, 36: 110-115.
- [2] AEADE. 2013. "Anuario 2013". *Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador, Quito*.
- [3] Van Aardenne, J. 2002. "Uncertainty in emission inventories". *PhD thesis. Wageningen University*: 143.
- [4] Corpaire. 2009. "Inventario de Emisiones del DMQ del año 2007". *Municipio del Distrito Metropolitano de Quito*: 100.
- [5] Parra, R. 2011. "Inventario de Emisiones Atmosféricas del Cantón. Año 2009". *Elaborado para el EMOV-EP del Ilustre Municipio de Cuenca*.
- [6] MAE. 2013. "Inventario preliminar de las emisiones de contaminantes del aire, de los cantones Ambato, Riobamba, Santo Domingo de los Colorados, Latacunga, Ibarra, Manta, Portoviejo, Esmeraldas y Milagro. Proyecto Calidad del Aire III. Año base 2010". *Ministerio del Ambiente*: 120.
- [7] STHV. 2012. "Plan metropolitano de ordenamiento territorial 2012-2022". *Secretaria de Territorio. Hábitat y Vivienda del Distrito Metropolitano de Quito, Quito*.
- [8] INEC. 2013. "Proyección de la población Ecuatoriana, por años calendario, según cantones (año 2013)". (<http://inec.gob.ec/estadisticas/index/>). *Instituto Nacional de Estadística y Censos. Ecuador*.
- [9] SMD. 2013. "Red vial del Distrito Metropolitano de Quito y vías". *Secretaria de Movilidad del Distrito Metropolitano de Quito, Quito*.
- [10] Catálogo Ecuador. "Base de datos del Ecuador". *Universidad San Francisco de Quito*.
- [11] AEADE. 2012. "Anuario 2012". *Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador, Quito*.
- [12] AEADE. 2013. "Anuario 2013". *Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador, Quito*.
- [13] Instituto de la Ciudad. 2013. "La Movilidad en Quito: un proyecto transformador". *Boletín Estadístico Mensual ICQ. Municipio del Distrito Metropolitano de Quito*, 21: 1.
- [14] Instituto de la Ciudad. 2012. "Tabulados Censo de Población y Vivienda. Población por administración zonal, año 2010". (<http://www.institutodelaciudad.com.ec/index>). *Municipio del Distrito Metropolitano de Quito*.

Anaerobic digestion of fruit and vegetable waste in semi-continuous reactors from a municipal market in Tumbaco, Ecuador

Digestión anaeróbica de desechos de frutas y hortalizas en reactores semicontinuos de un mercado municipal en Tumbaco, Ecuador

Paulina Castelo¹, Ródney Peñafiel², Valeria Ochoa-Herrera^{2*}

¹Universidad San Francisco de Quito, Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales, Diego de Robles y Vía Interoceánica, Quito, Ecuador.

²Universidad San Francisco de Quito, Colegio de Ciencias e Ingeniería, El Politécnico, 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: 16/10/2014. Aceptado/Accepted: 20/10/2014.

Publicado en línea/Published on Web: 19/12/2014. Impreso/Printed: 19/12/2014.

Abstract

Organic solid wastes are generated in large quantities in Ecuador. In 2010, the whole production of municipal solid waste in Quito was estimated to be 1500 tons per day and the organic fraction represented about 60% of the solid waste. Landfills which are the most common disposal way of municipal solid waste in the country pose a threat to the environment and public health. Anaerobic digestion of municipal organic waste has shown to be a suitable option for stabilizing the organic matter and preserving the ecosystem and well-being of the population. In addition, the conversion of the solid waste into biogas and bio-fertilizer provides an alternative energy source and organic fertilizer with great potential for agricultural usage, respectively. In this research, the anaerobic treatment of fruit and vegetable waste (FVW) coming from a municipal market in Tumbaco was studied in laboratory scale semi-continuous bioreactors (4 L capacity). First, FVW was characterized to be used as a feedstock for AD process. Subsequently, the bioreactors were incubated with 10% weight of prepared anaerobic inoculum and fed with different concentrations of FVW to identify the optimal organic load. Prepared microbial inoculum was composed of 40% granular sludge obtained from an anaerobic reactor of a wastewater treatment plant in Quito and 90% (v/v) cow dung slurry (CDS). The mesophilic mixed digesters were fed with raw FVW in a semi-continuous mode with organic loads of total solids (TS) of 5, 7.5, 10 and 12.5% during 90 days in three different periods of FVW loading. The biogas production as well as the performance of the bioreactors was periodically monitored. The highest cumulative methane generation was achieved by the bioreactor fed with 5% FVW with a value of 2401.92 L CH₄ kg VS⁻¹. Finally, an effective technology based on AD was successfully developed as an alternative to landfills for the treatment of municipal organic waste in Ecuador.

Keywords. Fruit and vegetable wastes (FVW), anaerobic digestion, granular sludge, cow dung slurry (CDS), methanogenic activity and cumulative methane production.

Resumen

En Ecuador se generan una gran cantidad de residuos orgánicos. En el año 2010, el promedio de recolección de desechos en el Distrito Metropolitano de Quito fue de aproximadamente 1500 t por día, de los cuales más del 60% fueron identificados como residuos orgánicos. Los rellenos sanitarios que son comúnmente empleados en el país para el tratamiento de desechos generan grandes problemas al medio ambiente y a la salud pública. El tratamiento biológico de residuos orgánicos bajo condiciones anaerobias constituye una alternativa viable para estabilizar la materia orgánica, proteger el medio ambiente y reducir el riesgo de afección a la salud pública; adicionalmente, se generan productos con valor agregado como son el biogás y el fertilizante orgánico que pueden ser empleados como fuente de energía alternativa y en las actividades agrícolas, respectivamente. En el presente trabajo de investigación, el tratamiento anaeróbico de residuos sólidos de frutas y vegetales (RFV) del mercado central de Tumbaco fue estudiado en cuatro biorreactores de 4L en modo de operación semi-continuo escala laboratorio. En primer lugar los RFV fueron caracterizados para ser utilizados como materia prima en el proceso de digestión anaeróbica. A continuación, los biorreactores fueron incubados con 10% de inóculo microbiano preparado y diferentes porcentajes en peso de residuos de frutas y vegetales con el fin de identificar la concentración óptima de carga orgánica. La composición del inóculo microbiano preparado fue 40% de lodos granulares provenientes del biodigestor de una planta de tratamiento de aguas de la ciudad de Quito y 90% (v/v) de estiércol vacuno disuelto. Los biodigestores mesófilos de mezcla completa fueron alimentados con diferentes porcentajes en peso de RFV equivalentes a 5, 7.5, 10 and 12.5% sólidos totales. Los biorreactores fueron operados durante 90 días en tres períodos correspondientes a las diferentes alimentaciones. La mayor producción acumulada de metano se alcanzó con el biorreactor alimentado con 5% RFV registrando un valor de 2401.90 L CH₄ kg SV⁻¹. Finalmente, una tecnología efectiva de digestión anaerobia fue exitosamente desarrollada como alternativa a los rellenos sanitarios para el tratamiento de residuos orgánicos municipales en Ecuador.

Palabras Clave. Residuos sólidos de frutas y vegetales (RFV), digestión anaeróbica, lodos granulares, estiércol vacuno disuelto, actividad metanogénica y producción acumulada de metano.

Introduction

Solid wastes are organic and inorganic residues produced during domestic, commercial and industrial activities. Organic wastes are of biological origin and mostly characterized as biodegradable waste. This type of waste is able to disintegrate rapidly under anaerobic conditions in order to transform into biogas and organic fertilizer [1, 2]. Municipal waste, depending on their nature and/or their physical characteristics are classified as food wastes, paper and cardboard, textiles, plastics, metals, glass and others [3]. According to Ministry of Environment in Ecuador, in 2002 the country generated close to 7423 tons of solid waste per day which was classified as organic origin (58%), paper (9%), plastic (11%), glass and aluminum (2%) and other components (8%) [4].

In Latin America, in average 70% of urban solid wastes are collected by the municipalities and the rest ends up as contaminants in rivers or lakes [4]. Sanitary landfills are the most common way employed to eliminate municipal solid waste (MSW); however, the generation of toxic leachates, unpleasant odors, wild fires caused by generation of methane from organic matter, proliferation of pests and diseases cause a negative impact in the environment and public health [5]. Anaerobic digestion (AD) of municipal solid waste MSW is currently used in Europe, Japan and USA to reduce the amount of material being landfilled, stabilize organic material before disposal to reduce impacts to the ecosystem due to air and water emissions and produce renewable energy [6]. This technology has been successfully employed in Europe for more than 15 years and the interest is growing worldwide. Agricultural and industrial wastes are good candidates for anaerobic digestion because they contain high levels of easily biodegradable materials. Low methane yield and process instability are often encountered in anaerobic digestion, preventing this technique from being widely applied [7]. Nevertheless, anaerobic digestion (AD) of municipal organic waste is today one of the best alternatives for the comprehensive treatment of solid waste because it allows the recovery of energy and the generation of a bio-based fertilizer [8]. In addition, the concentration of nutrients is appropriate and the presence of contaminants is low [9].

There are several factors that affect the anaerobic digestion process to be performed. Some of the factors that need to be considered are the characteristic of the feedstock, the reactor design and the operation mode [10]. The physical and chemical characteristics of the organic waste are important information for designing and operating anaerobic bioreactors, because they are related to biogas production and the stability of the AD process [10]. The characterization parameters include but are not limited to moisture content, pH, solids, chemical oxygen demand (COD), among others. Fruit and vegetable wastes are good feedstock for anaerobic digestion due to their easily biodegradable nature and high

moisture content (75 – 90%) [11]. However, the rapid acidification of FVW decreasing the pH in the reactor and the larger production of volatile fatty acids (VFA), inhibit the activity of methanogens and affect significantly the stability of the reactor [7]. Microbial inoculum plays an important role in the anaerobic digestion process because it is the source of microorganisms responsible for organic matter stabilization and biogas production. The health of the microbial community can be estimated based on the methanogenic activity [12]. Maximum specific acetoclastic methanogenic activity of granular sludge of $0.5 \text{ kg COD-CH}_4 \text{ kg VSS}^{-1} \text{ d}^{-1}$ suffices to economically operate a UASB-reactor [13]. Several reactor designs and operation modes can be employed in the AD process. The treatment of FVW has been studied in different types of reactors such as batch reactors, continuous one-stage reactors, continuous two stage reactors [11], continuously stir tank reactor (CSTR), sequencing batch reactors [8], tubular anaerobic digester [14], upflow anaerobic sludge blanket (UASB) [12] and anaerobic filters [2], among others with conversion of 70–95% of organic matter to methane [2, 8].

Anaerobic digestion has the potential to minimize the environmental impact of waste disposal by reducing the amount of biodegradable materials in landfills. The objective of this research is to study the anaerobic digestion of a mixture of fruit and vegetable waste (FVW) coming from a municipal market in Tumbaco in semi-continuous bioreactors at laboratory scale. First, FVW will be characterized to be used as a feedstock for AD process. Bioreactors will be then incubated with anaerobic inoculum and fed with different concentrations of FVW to identify the optimal organic load. Information on solid waste management adapted to the national situation will be generated to address one of the most important environmental issues in Ecuador.

Materials and Methods

Reagents

Sodium acetate (100%, purity), potassium dichromate (99.4%), sodium hydroxide ($\geq 99\%$) and silver nitrate ($\geq 99\%$) were obtained from Laboratorio de Reactivos H.V.O (Quito, Ecuador). Sulfuric acid (95-97%) was bought in MERCK. Zinc chloride (97.1%) was obtained from J.T. Baker. N_2 gas was delivered by AGA Ecuador (Guayaquil, Ecuador). All the chemicals were used in the condition they were received.

Microbial inoculum

Three inocula from different sources were evaluated in this study. Sediments of an artificial lagoon in the campus of Universidad San Francisco de Quito (USFQ), granular sludge from a wastewater treatment plant (WWTP) at "Cervecería Nacional" Cumbayá (GS), and the effluent from the digester installed at the Botanical Garden located at "Parque La Carolina" (BG digester).

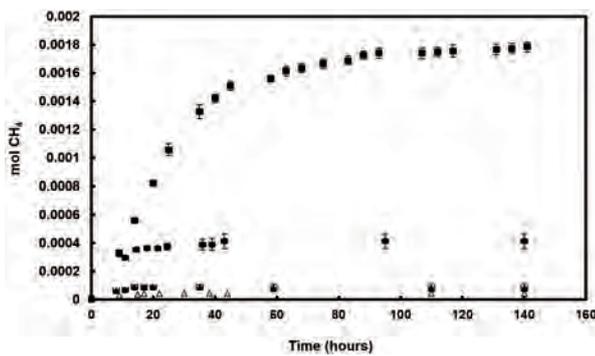


Figure 1: Cumulative methane production over time for different anaerobic sludge and sediments. Treatment bioassays were supplied with basal mineral medium, 10% v/v of the artificial lagoon sediments, or 20% v/v of granular sludge and BG digester sludge. Legend: (■) granular sludge (GS), (●) BG digester sludge, (▲) sediments of artificial lagoon and (△) abiotic control. Error bars represent the standard deviations of the bioassays performed in triplicates.

Cattle manure was used as part of the microbial inoculum in order to complement the selected anaerobic sludge. Manure was collected in a stable around Cumbayá, and it was diluted with tap water in a 1:1 ratio in order to produce the cow dung slurry (CDS). The inocula and CDS were stored in refrigeration at 4°C in plastic containers.

Culture media

The basal mineral medium used in the methanogenic activity and anaerobic degradation of FVW bioassays contained (in mg L⁻¹): NH₄Cl (280), KH₂PO₄ (250); MgSO₄ · 7H₂O (100), CaCl₂ [10], NaHCO₃ (3000) yeast extract (50) and 1 mL L⁻¹ trace element solution. The trace element solution contained (in mg L⁻¹): H₃BO₃ (50), FeCl₂ · 4H₂O (2000), ZnCl₂ (50), MnCl₂ (32), (NH₄)₆Mo₇O₂₄ · 4H₂O (50), AlCl₃ (50), CoCl₂ · 6H₂O (2000), NiCl₂ · 6H₂O (50), CuSO₄ · 5H₂O (44), NaSeO₃ · 5H₂O (100), EDTA (1000), resazurin (200) and 1 mL L⁻¹ of HCl 36% [15]. The pH of the basal mineral medium was adjusted to 7.1-7.3 with HCl and NaOH, as required.

Fruit and vegetable waste (FVW)

The fruit and vegetable waste used as substrate in batch bioassays and semi-batch bioreactors were obtained from the municipal market in Tumbaco. FVW was collected during fair days (Wednesday and Sunday) from 81 stores; then, the waste was selected to be used as a substrate based on its abundance as residues in the ground and around the stalls. Once collected, FVW was characterized based on physical-chemical parameters and then crushed with the shredder Proctor Silex (PS HB Group, SA, Polanco, Mexico), until particles were less than 5 mm in diameter. The FVW mixture was composed of apple (15% wt), lettuce (25%), bell pepper (20%), tomato (25%) and cabbage leaves (15%).

Microbial bioassays

In all bioassays the headspace was flushed with N₂ gas to assure anaerobic conditions. All bioassays were in-

cubated in a home-made climate-controlled chamber at 30±2°C. The maximum specific methanogenic activity expressed as mg CH₄-COD g VSS-1 d-1 was calculated from the slope of the cumulative methane production and biomass concentration; respectively, versus time (d). The cumulative methane production in the presence of FVW was expressed in liters of methane generated per kilogram of volatile solids added (L CH₄ kg VS⁻¹).

Methanogenic activity: Batch bioassays were conducted in duplicates using glass serum flasks (160 mL) with butyl rubbers stoppers and aluminum crimp seals. Each flask was supplemented with basal mineral medium, 10% v/v of the artificial lagoon sediments, or 20% v/v of GS and BG digester sludge. The substrate in the methanogenic activity bioassays was 2.5 g COD-acetate L⁻¹. Abiotic controls (absence of microorganisms) were run in parallel.

Batch: The optimal composition of a prepared microbial inoculum composed of granular sludge (GS), cow dung slurry (CDS) and water was determined in batch bioassays in triplicates using 160 mL glass serum flasks with butyl rubbers stoppers and aluminum crimp seals. GS concentrations of 10, 20, 30 and 40 % wt and CDS concentrations of 25, 50 and 90 % (v/v) as well as physical conditions of operation and the effect of agitation were evaluated in this study. Each flask was supplemented with basal medium (75% v/v), prepared inoculum GS-CDS (20% v/v) and shredded FVW (5% v/v). Abiotic controls (absence of microorganisms), granular sludge controls (absence GS) and cow dung slurry control (absence of manure) were run in parallel.

Semi – continuous: Anaerobic digestion of different organic loads of FVW was evaluated in semi-continuous bioreactors. The bioreactors were plastic containers with a volumetric capacity of 4 L tightly sealed with Teflon tape and silicone to prevent leakage of biogas and to maintain anaerobic conditions. Each bioreactor contained prepared inoculum GS-CDS (20 % v/v), basal mineral medium, water and different mixture of fruit and vegetable wastes (FVW). The percentage of solid waste evaluated in each reactor varied from 5, 7.5, 10 and 12.5 % wt corresponding to bioreactors R1, R2, R3 and R4; respectively. The bioreactors were fed three times with FVW and 500 mL CDS. All reactors were agitated using magnetic stirring plates. The cumulative methane production rate, soluble COD removal rate, pH, nitrate, VS and TS were periodically monitored in each bioreactor.

Analytic methods

Total solids (TS), volatile solids (VS), total suspended solids (TSS) and volatile suspended solids (VSS) and chemical oxygen demand (COD) were determined according to Standard Methods for Examination of Water and Wastewater [16]. Methane production during the anaerobic bioassays was determined by the liquid

displacement method with serum flasks as described by Field [17]. pH, temperature, dissolved oxygen and conductivity were measured by a Thermo Scientific Orion 5-Star portable multiparameter meter (Thermo Scientific, Beverly, MA, USA). Nitrate was measured using an Orion ion-selective chloride electrode (Thermo Scientific, Beverly, MA, USA).

Results and Discussion

Characterization of microbial inoculum

Table 1 presents the physical and chemical characterization of the different sludge and sediments evaluated in this study based on pH, TSS, VSS, ash, and total and soluble COD. The pH values were within the optimal pH of untreated primary inoculum ranging from 5.0 to 8.0 [15] and consistent with those found by Gomez - Lahoz et al. [18]. The VSS/TSS ratios of the two anaerobic sludges evaluated were within the range of healthy inoculum reported in the literature (60-80%) [19]. As expected, the sediments of the lagoon registered a low VSS/TSS ratio of 10.8% due to the significant presence of inert solids. The soluble COD values of BG digester sludge and GS were 685.9 and 360.6 mg O₂ L⁻¹, respectively. The BG digester registered a total COD value five times greater than that of GS. In the case of the sediments, the soluble and total COD values were very similar 186.5 and 228.6 mg O₂ L⁻¹; respectively, and these values are comparable to those obtained by Yang [20].

Figure 1 presents an illustrative example of the time course of cumulative methane production in the presence of 2.5 g COD-acetate L⁻¹ in an abiotic control (absence of microorganisms) and in the treatment bioassay with different anaerobic sludge and sediments as microbial inoculum. There is no methane generation in the abiotic control while the methane production increased over time in the treatment bioassays conducted with granular sludge, BG digester sludge and sediments of the artificial lagoon as microbial inoculum. These results demonstrate that the anaerobic microorganism present in the sludge and sediments are responsible for the production of methane from acetate as electron donor. Table 2 presents the maximum specific methanogenic activity of the sludge and sediments evaluated in this study. The BG digester sludge registered the highest maximum specific methanogenic activity, 1216.38 mg COD-CH₄ g VSS⁻¹d⁻¹ while the values for GS and sediments were two orders of magnitude lower. A possible explanation for this difference is that the amount of horse manure present in the BG digester is 1.6 times greater than the amount of vegetal material, and it is known that the ratio of VSS/TSS of horse manure is 83.7% [21]; however, the high COD concentration makes this sludge not suitable for anaerobic biodegradation processes. The methanogenic activity of the sediments was 67.15 COD-CH₄ g VSS⁻¹ d⁻¹. Yang and co-workers

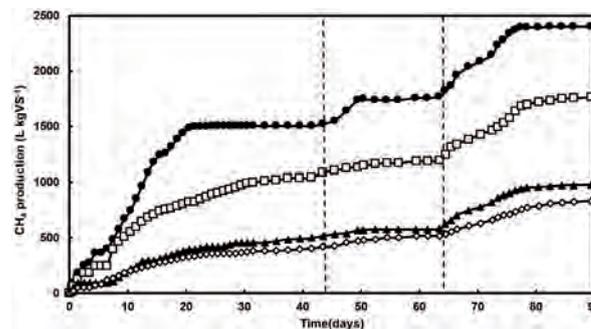


Figure 2: Cumulative methane production (L kg VS⁻¹) over time for the four bioreactors (R) operating in semi-continuous mode with 10% GS-CDS inoculum during anaerobic degradation of different amounts (weight) of FVW. Legend: (●) R 5%, (□) R 7.5%, (▲) R 10%, and (◇) R 12.5% of FVW. Period I corresponds to 0 - 42 days, period II corresponds to 43 - 63 days, and period III corresponds to 64 - 90 days.

studied the methanogenic activity in river and lake sediments from Taiwan and reported values very similar to the one found in this study, 54.54 mg COD-CH₄ g VSS⁻¹ d⁻¹ [20]. The maximum specific methanogenic activity of the microorganisms present in the GS inoculum was 89.03 mg COD-CH₄ g VSS⁻¹ d⁻¹ which is significantly lower than the values reported in the literature for granular sludge. For instance, Schmidt and Ahring reported a methanogenic activity for granular sludge in the presence of acetate of 500 mg COD-CH₄ g VSS⁻¹ d⁻¹ [22]. The low maximum specific methanogenic activity registered for the GS in the present study could be attributed to the concentration and health of the microbial community present in the sludge, the GS was acquired when the digester had been functioning just for 10 months and the sludge was kept refrigerated (4 °C) for several months; so presumably, the microorganisms were not healthy to reach typical values of methanogenic activity like the ones achieved by bioreactors operating for several years. Another explanation for obtaining low methanogenic activity for GS could be attributed to diffusion limitations that could occur during mass transfer from the substrate to the granular bead, or in the diffusion of methane from the bead to the liquid and gas phase [12]. In order to overcome these problems, an inoculum based on cow dung slurry (CDS) and granular sludge (GS) was prepared by adding different volumes of CDS to 10% GS. CDS had a positive effect on the process of anaerobic degradation of FVW, as the volume of CDS in the prepared inoculum (GS-CDS) increased, the maximum methanogenic activity also increased (refer to Table 2). Based on these results, it was established that the best composition of the prepared inoculum (GS-CDS) for the anaerobic degradation (AD) of FVW from Central Market in Tumbaco was 10% GS and 90% CDS.

Anaerobic digestion of FVW

A mixture of FVW from Mercado central in Tumbaco was characterized and prepared (by weight) with 15 % apple, 25% tomato, 25% lettuce, 20% bell pepper and 15% cabbage leaf as described in Table 3. The percentage of each compound in the mixture was established

Inoculum	pH	TSS (g L ⁻¹)	VSS (g L ⁻¹)	Ash (g L ⁻¹)	VSS/TSS %	COD (mg L ⁻¹)	COD _T (mg L ⁻¹)
Granular sludge (GS)	7.27	7.90±0.06	7.32±0.11	0.05±0.01	92.7	360.55±15.42	962.90±58.71
BG digester sludge (BG)	6.96	3.42±1.50	2.71±1.28	0.01±0.00	79.4	1685.91±22.03	5037.67±421.98
Sediments artificial lagoon USFQ	7.83	10.01±0.14	1.08±0.61	0.89±0.06	10.8	186.51±115.6	228.60±1.70

Table 1: Physical and chemical characterization of microbial inoculum based on pH, total suspended solids (TSS), volatile suspended solids (VSS), ash, soluble and total chemical oxygen demand (COD and COD_T).

Assay	Treatments	Maximum specific methanogenic activity (mg COD-CH ₄ g VSS ⁻¹ d ⁻¹)
Microbial inoculum	GS (20%)	89.03
	BG digester (20% v/v)	1216.38
	Sediments (10%)	67.15
Prepared inoculum GS-CDS*	Treatment 1: 10% GS + 25% CDS	36.54
	Treatment 2: 10% GS + 50% CDS	101.33
	Treatment 3: 10% GS + 90% CDS	119.12

*Maximum specific methanogenic activity in the bioassays conducted with prepared inoculum was calculated based on the VSS of the granular sludge.

Table 2: Maximum specific methanogenic activity with 2.5 g acetate-COD L⁻¹ for the different anaerobic sludge and sediments.

Substrate	pH	TS (g L ⁻¹)	VS (g L ⁻¹)	Ashes (g L ⁻¹)	Humidity (%)	VS/TS (%)	COD (mg O ₂ L ⁻¹)	COD _T (mg O ₂ L ⁻¹)	Mixture composition (%)
Tomato	4.31	4.70±0.14	3.86±0.10	0.08±0.003	95.29	82.02	-	-	25
Bell pepper	5.54	5.81±0.04	4.90±0.04	0.09±0.0002	94.18	84.25	-	-	20
Lettuce	6.19	6.33±0.04	5.63±0.04	0.07±0.0001	93.66	88.90	-	-	25
Cabbage leaves	6.53	6.90±0.02	6.51±0.02	0.03±0.0002	93.09	94.35	-	-	15
Apple	4.23	12.74±0.15	12.13±0.17	0.06±0.002	87.26	95.26	-	-	15
FVW Mixture	4.97	7.95±0.21	7.27±0.18	0.06±0.003	92.05	91.4	93.70±23.84	210.19±84	100

Table 3: Physical and chemical characterization of the components of the fruit and vegetable waste (FVW) and the mixture based on pH, total solids (TS), volatile solids (VS), ash, humidity, soluble and total chemical oxygen demand (COD and COD_T).

according to literature studies on anaerobic digestion processes of FVW [18, 23]. The pH of the municipal FVW components ranged from 4.23 to 6.53, while the pH of the mixture was 4.97. The humidity content of the FVW mixture was 92.1% with a total volatile solids (VS) content of 91.4%; these values are within the optimal ranges and are consistent with values reported in the literature [2, 8]. COD values of the mixture were quite low (120.19 mg O₂ L⁻¹), which shows that the amount of organic matter is relatively low suggesting that the FVW mixture might be anaerobically degraded in short periods of time.

Batch biodegradation bioassays were conducted to evaluate the impact of increasing concentration of granular sludge in the composition of the prepared inoculum GS-CDS and the effect of agitation during the anaerobic degradation of 5% weight of FVW. Table 4 presents the methane production rate for different bioassays. The rate of methane production achieved in the bioassays conducted with the prepared sludge was significantly higher than the ones recorded in assays conducted with manure or granular sludge only. Taking into consideration that granular sludge is a good candidate for anaerobic degradation processes because it is an excellent source of microorganisms [19], it is expected that the

higher the GS concentration the higher the methane production. Surprisingly, the increasing concentration of granular sludge in the prepared inoculum GS-CDS did not have a significant impact in the rate of methane production. In fact, the rate of methane production in treatment 2 was practically the same as the rate obtained in treatment 4 with twice as many as granular sludge (T4: 40% GS + 90% CDS). These results suggest that the low methane production reported in the treatment with the highest concentration of GS can be attributed to mass transfer limitations inside the flask. In this reaction flask, the space needed for reaction was limited resulting in poor contact between the microorganisms and the substrate and affecting the degradation process.

Literature studies on the anaerobic degradation of organic residues have reported mass transfer limitations. For instance, in the research conducted by Rizk et al., FVW municipal waste was digested in a batch bioreactor [24]. The authors reported that low residue degradation and low methane production could be attributed to mass transfer limitations between the microorganisms and the substrate. In other study, Harms and Bosma concluded that low biodegradation rates of organic pollutants are often a result of limited accessibility of the pollutants [25]. Mechanical mixing can be applied to

Bioassay	Treatments	CH ₄ production rate (L kg VS ⁻¹ d ⁻¹)	Operation time (days)
Granular sludge concentration	T1: 10% GS + 90% CDS	39.56	25
	T2: 20% GS + 90% CDS	44.18	
	T3: 30% GS + 90% CDS	42.07	
	T4: 40% GS + 90% CDS	42.27	
	CDS Control	15.50	24
	GS Control	17.44	
	Abiotic Control	1.94	
Agitation	T20% GS + 90% CDS Agitation	58.59	7
	T40% GS + 90% CDS Agitación	97.02	7

Table 4: Methane production rates during the anaerobic degradation of 5% FVW with increasing concentration of granular sludge in the prepared inoculum GS-CDS and the effect of agitation.

Period	Bioreactor	pH (average)	Cumulative methane production rate (L CH ₄ kg SV ⁻¹ d ⁻¹)	COD removal rate (% removal d ⁻¹)	VS/TS* (%)	Operation time (days)
I	R5%	7.14	62.25	1.56	-	20
	R7.5%	7.06	34.00	1.38	-	20
	R10%	7.06	20.17	1.02	-	20
	R12.5%	7.01	16.49	1.08	-	20
II	R5%	7.59	37.06	1.16	-	6
	R7.5%	7.43	6.14	0.66	-	6
	R10%	7.68	8.20	0.36	-	6
	R12.5%	7.52	9.72	0.13	-	6
III	R5%	7.41	44.28	1.20	84.62	13
	R7.5%	7.45	29.44	1.15	82.56	13
	R10%	7.63	23.93	0.21	80.25	13
	R12.5%	7.45	16.52	0.16	81.35	13

*VS/TS values measured in day 76.

*Soluble COD removal rate was calculated using the slope of the curve of COD removal related to time in each period.

Table 5: Operational parameters of semi-continuous bioreactors performance based on cumulative methane production rate, effluent pH, total and soluble COD removal rate, nitrate concentration, and VS/TS concentration during the three operation periods of AD of FVW.

overcome the limitations resulting from mass transport mechanisms, the main idea is to reduce the distance between cells and substrate molecules in order to obtain a faster flow of the substrate, retaining a greater number of microorganisms [25]. Taking into consideration this information, additional bioassays were conducted using a stirring plate. The cumulative methane production rate in treatment 4 under stirring conditions was 2.3 times higher than the one recorded in the same treatment without agitation in 7 and 25 days of incubation, respectively (Table 4). These results are consistent with data obtained by Rizk et al. and Adhikari et al., where they concluded that the lack of agitation during AD reduces the amount of methane produced and increases the residence time [24, 26]. The optimal composition of the prepared inoculum GS-CDS (40% GS and 90% CDS) and agitation were employed in the subsequent semi-continuous bioassays during the treatment of FVW.

The anaerobic digestion of fruit and vegetable waste (FVW) coming from a municipal market in Tumbaco was studied in semi-continuous bioreactors on laboratory scale applying the optimal conditions obtained in batch bioassays. 4 bioreactors (R) of 4 L capacity were

set-up with the prepared inoculum (40% GS + 90% CDS) and different concentration of FVW under agitation conditions. The bioreactors R1, R2, R3 and R4 were fed with 5, 7.5, 10 and 12% of total solids of FVW, respectively. Figure 2 illustrates the time course of the cumulative methane production expressed in L kg VS⁻¹ in the semi-continuous bioreactors (R) incubated with the prepared inoculum GS-CDS during the AD of different percentages of FVW. The bioreactors were operated in three periods directly identified by the addition of fresh mixture of FVW. Period I lasted for 42 days, period II lasted for 20 days, and period III lasted for 26 days. The bioreactors were incubated for 90 days and the methane production increased with time in all periods. In period I, R1 reached stationary phase in 20 days while R4 reached the stationary phase in 42 days and a second load of fresh substrate was added initiating period II. In this period, the only bioreactor that showed an exponential methane production was R1 with 5 % FVW. The other reactors recorded low values of methane production. In period III, the third FVW load was added and all reactors produced methane.

During the three periods of operation, the R1 fed with

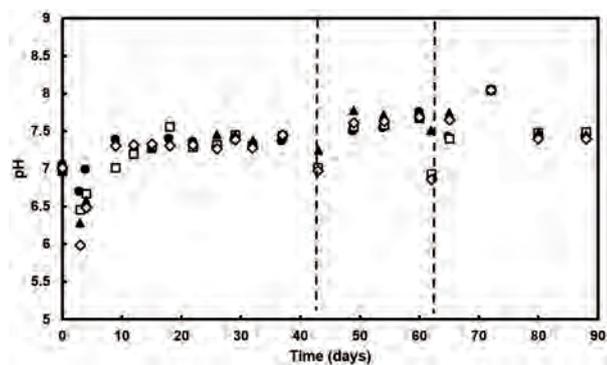


Figure 3: pH variation over time of the effluent of each reactor (R) in semi-continuous operation mode, using GS - CDS inoculum to degrade different amounts of FVW (●) R 5%, (□) R 7.5%, (▲) R 10%, and (◊) R 12.5% of FVW. Period I corresponds to 0 - 42 days, period II corresponds to 43 - 63 days, and period III corresponds to 64 - 90 days.

5% FVW showed the highest methane production, followed by the bioreactors R2, R3 and R4 fed with 7.5, 10 and 12.5 % FVW, respectively. The data indicates that AD is limited to substrate degradation capacity of microorganisms. Therefore the cumulative biogas production is related to the amount of organic matter added, so concentrations higher than the optimal organic load result in a decrease in the methane production. These results are comparable with previous publications. Bouallagui et al. employed tubular digesters to study the AD of FVW and demonstrated that biogas production increased as the organic load augmented from 4 to 6 % total solids [14]. However, the biogas production decreased dramatically when the organic matter content increased to 8%, and the process even stopped when the load reached 10% of total solids. This behavior could be attributed to the rapid conversion of the substrate into volatile fatty acids (VFA), and their accumulation inhibits the activity of the methanogenic microorganisms [7, 27]. As the amount of loaded substrate increases, the degradation of VFA into acetate, hydrogen and carbon dioxide is significantly augmented, while the degrading activity of the methanogenic microorganisms that use acetate and hydrogen does not increase at the same rate [7, 27, 28]. In fact, if hydrogen accumulates, acidogenesis gets partially inhibited causing disproportion in the methanogenic reactions which results in cessation of methane production [7, 27].

Table 5 presents the operational parameters of semi-continuous bioreactors performance based on cumulative methane production rate, effluent pH, total and soluble COD removal rate, nitrate concentration, and VS/TS concentration during the three operation periods of AD of FVW. The highest cumulative methane generation was achieved by the bioreactor with the best performance (5% FVW) and reached values of 2401.92 L CH₄ kg VS⁻¹ after 90 days of operation. Methane production in this bioreactor is comparable to the values recorded in the study of Bouallagui et al. where they produced 907.18 L CH₄ kg SV⁻¹ feeding an amount of FVW of 6% total solids in 20 days of operation [14].

Figure 3 illustrates the pH variation in the four bioreactors during 90 days of operation. The pH values in the effluent of the semi-continuous bioreactors dropped during the first three days of the experiment from 7 to 6. According to studies published in the literature, in the early days of AD process the concentration of VFA increases, probably causing acidification in the bioreactor [2, 7, 27]. This happens because the microorganisms are not able to remove organic acids and hydrogen at the same rate they are being produced. In addition, in the first days of reaction the pH drop could also be attributed to the low pH of the FVW mixture [14]. The pH of the FVW mixture fed into the bioreactors evaluated in this study was 4.97, which could have caused a slight acidification in the systems. In general terms, it can be concluded that pH values of the bioreactors remained stable during the 90 days of operation, except for few occasions near the organic matter loading where an increase in the substrate could have caused a disturbance in the system.

Regarding COD removal, it can be observed in Table 5 that the removal rate in the four bioreactors was higher during period I. In the case of R1 and R2, the COD removal rates were comparable in the following 2 periods while the rates for bioreactors R3 and R4 decreased with operation time. The low COD removal rates in these two reactors are consistent with the low cumulative methane production discussed previously. Finally, the semi-continuous bioreactors achieved similar percentages of VS removal, varying between 80.3 and 84.6 %, the highest removal values were reached by R1 treating 5% FVW. The VS removal values obtained in this research are quite high, indicating good levels of organic matter degradation in comparison with literature studies. For instance, Bouallagui et al., reported a 75.9% VS removal during AD in a tubular bioreactor fed with 6% total solids and 20 days retention time [14].

Conclusions

Anaerobic digestion of fruit and vegetable waste from municipal market in Tumbaco, Ecuador was successfully studied in semi-continuous bioreactors. The use of prepared inoculum resulted in a higher methane production probably due to synergism among the involved microorganisms. Agitation was identified as an important operational parameter that needs to be incorporated to avoid mass transfer limitations. pH value demonstrated to play a significant role during AD and needs to be controlled since it could inhibit the activity of methanogens in the reactor. The optimal operational conditions as well as the organic load to be treated in the AD process of FVW were established based on the cumulative methane production rate. Finally, anaerobic digestion of FVW was shown to be an effective alternative to landfills for stabilizing the organic matter and preserving the ecosystem and well-being of the population. This study contributes to the development of an integrated hazardous waste management of municipal

organic solid wastes that could be successfully implemented in Ecuador.

Acknowledgments

We would like to thank Universidad San Francisco de Quito for financial support through Chancellor Grants 2011.

References

- [1] Kato, K.; Miura, N.; Tabuchi, H.; Nioh, I. 2005. "Evaluation of maturity of poultry manure compost by phospholipid fatty acids analysis". *Biology and Fertility of Soils*, 41:399 – 410.
- [2] Bouallagui, H.; Touhami, Y.; Cheikh, R.; Hamdi, M. 2005. "Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes". *Process Biochemistry*, 40 (3-4):989 – 995.
- [3] Tchobanoglous, G.; Theisen, H.; Vigil, S. 1998. "Integrated Solid Waste Management". *McGraw-Hill*.
- [4] Rubio, M. 2011. "Manejo de Residuos Sólidos". *EMASEO. Quito*.
- [5] Renou, S.; Givaudan, J.; Poulain, S.; Dirassouyan, F.; Moulin, P. 2007. "Landfill leachate treatment: review and opportunity". *Journal of Hazardous Materials*, 150 (3):468 – 493.
- [6] Rapport, J.; Zhang, R.; Jenkins, B.; Williams, R. 2008. "Current anaerobic digestion technologies used for treatment of municipal organic solid waste". *California Integrated Waste Management Board. Davis, California: 1 – 90*.
- [7] Chen, Y.; Cheng, J.; Creamer, K. 2010. "Inhibition of anaerobic digestion process: A review". *Bioresour. Technol.*, 99(10):78 – 90.
- [8] Bouallagui, H.; Lahdheb, H.; Romdan, B.; Rachdi, B.; Hamdi, M. 2009. "Improvement of fruit and vegetable waste anaerobic digestion performance and stability with co-substrates addition". *Journal of Environmental Management*, 90(5):1844 – 1849.
- [9] Elango, D.; Pulikesi, M.; Baskaralingam, P.; Ramamuthi, V.; Sivanesan, S. 2007. "Production of biogas from municipal solid waste with domestic sewage". *Journal of Hazardous Waste Materials*, 141:301 – 304.
- [10] Zhang, R.; El-Mashad, H.; Hartman, K.; Wang, F.; Liu, G.; Choate, C.; Gambie, P. 2007. "Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion". *Bioresour. Technol.*, 98:929 – 935.
- [11] Velmurugan, B.; Ramanujam, A. 2011. "Anaerobic digestion of vegetable wastes for biogas production in a fed-batch reactor". *International Journal of Emerging Sciences*, 1(3):455 – 486.
- [12] Van Leeuwenhoek, A. 1995. "Anaerobic digestion and wastewater treatment systems". *Lettinga*, 67(1):3 – 28.
- [13] Rinzema, A.; van Lier, J.; Lettinga, G. 1988. "Sodium inhibition of acetoclastic methanogens in granular sludge from a UASB reactor". *Enzyme and Microbial Technology*, 10(1):24 – 32.
- [14] Bouallagui, H.; Cheikh, R.; Marouani, L.; Hamdi, M. 2003. "Mesophilic biogas production from fruit and vegetable waste in a tubular digester". *Bioresour. Technol.*, 86(1):85 – 89.
- [15] Ochoa - Herrera, V.; Banihani, Q.; Leon, G.; Khatri, C.; Field, J.; Sierra - Alvarez, R. 2009. "Toxicity of fluoride to microorganisms in biological wastewater treatment". *Water Research*, 43:3177 – 3186.
- [16] APHA. 1998. "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater". 20th. *Washington, DC: American Public Health Association*.
- [17] Field, J. 1987. "Parameters measurements". *Wageningen Agricultural University*, 13:22 – 34.
- [18] Gomez - Lahoz, C.; Fernandez Gimenez, B.; Garcia - Herruzo, F.; Rodriguez - Maroto, J.; Vereda, A. 2007. "Biomethanization of mixtures of fruits and vegetables solid wastes and sludge from a municipal wastewater treatment plant". *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 42(4):481 – 487.
- [19] Metcalf & Eddy. 2007. "Wastewater Engineering Treatment and Reuse". 5th Edition *AECOM. New York*.
- [20] Yang, S. 1998. "Methane production in river and lake sediments in Taiwan". *Environmental Geochemistry and Health*, 20:245 – 249.
- [21] Wartell, B. 2009. "Anaerobic digestion of Equine Waste". *The State University of New York, Tesis de Maestria: New Jersey*.
- [22] Schmidt, J.; Ahring, B. 1996. "Granular sludge formation in upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors". *Biotechnology and Bioengineering*, 49(5):229 – 246.
- [23] Virtutia, A.; Mata - Alvarez, J.; Cecchi, F.; Fazzini, G. 1989. "Two-phase anaerobic digestion of a mixture of fruit and vegetable wastes". *Biological Wastes*, 29(3): 189 – 199.
- [24] Rizk, M.; Bergamasco, R.; T., G.; R., C. 2007. "Anaerobic co-digestion of fruit and vegetable waste and sewage sludge". *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 5(1):1 – 10.
- [25] Harms, H.; Bosma, T. 1997. "Mass transfer limitation of microbial growth and pollutant degradation". *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 18(2-3):97 – 105.
- [26] Adhikari, R. 2006. "Sequential batch and continuous anaerobic digestion of municipal solid waste in pilot scale digesters". *Asian Institute of Technology. Thailand: 1 – 184*.
- [27] Dogan, E.; Demirel, G. 2009. "Volatile fatty acid production from organic fraction of municipal solid waste through anaerobic acidogenic digestion". *Environmental Science and Engineering*, 26(9).

- [28] Liu, H.; Walter, H.; Vogt, G.; Holbein, B. 2002. "Steam pressure disruption of municipal solid waste enhances anaerobic digestion kinetics and biogas yield". *Biotechnology and Bioengineering*, 77(2):121 – 130.

Atmospheric measurement station at Universidad San Francisco de Quito (EMA): ground-based physical meteorology instrumentation and assessment of initial measurements

Estación de mediciones atmosféricas en la Universidad San Francisco de Quito (EMA): instrumentación de meteorología física de la estación terrena y evaluación de mediciones iniciales

María Cazorla^{1*}, Esteban Tamayo²

¹Universidad San Francisco de Quito – Instituto de Investigaciones Atmosféricas - Colegio de Ciencias e Ingeniería Diego de Robles S/N, Cumbayá.

* Autor principal/Corresponding author, e-mail: cazorla.chem@gmail.com

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

Recibido/Received: 29/09/2014. Aceptado/Accepted: 07/10/2014.

Publicado en línea/Published on Web: 19/12/2014. Impreso/Printed: 19/12/2014.

Abstract

Meteorological variables in the valley of Cumbayá, Ecuador, are being monitored continuously at Universidad San Francisco de Quito's Atmospheric Measurement Station, EMA (Spanish acronym), since the end of May, 2014. Two months of data, June and July, were processed to assess instrument performance and data quality. A first look into the data sets shows that information generation is optimal. Data time series and monthly diurnal profiles for solar radiation flux density, ambient temperature, surface pressure, relative humidity, and wind speed and direction are presented. Wind rose plots show typical S, SE seasonality of summer winds. Finally, a 40.6 mm precipitation event on 23 May is shown.

Keywords. meteorology, Cumbayá, EMA, USFQ.

Resumen

Las variables meteorológicas en el valle de Cumbayá están siendo monitoreadas continuamente en la Estación de Mediciones Atmosféricas, EMA, de la Universidad San Francisco de Quito, desde fines de mayo de 2014. Dos meses de datos, junio y julio, fueron procesados a fin de evaluar el desempeño de los sensores y la calidad de los datos. Una primera mirada al juego de datos indica que la generación de información es óptima. En este trabajo se presentan series de tiempo y perfiles diurnos mensuales de flux de radiación solar, temperatura ambiente, presión, humedad relativa y velocidad y dirección del viento. Las rosas de viento muestran la estacionalidad S, SE de los vientos de verano. Finalmente se presenta un evento de precipitación de 40.6 mm de lluvia, que tuvo lugar el 23 de mayo.

Palabras Clave. meteorología, Cumbayá, EMA, USFQ.

Introduction

Continuous monitoring of meteorological variables is of major importance, as it is a source of first-hand information of current weather for the public and scientists who study atmospheric phenomena. In addition, weather observations from ground stations are critical inputs for numerical weather prediction models [1, 2]. In this regard, the number of regional ground stations that can supply models with high quality data has an impact on model results. Another factor is the temporal resolution of data collected at weather stations, since reliable sources of model boundary conditions imply availability and continuity of observational data. Furthermore, physical variables such as temperature, rel-

ative humidity, wind speed and direction, solar radiation and precipitation have an impact on the formation and dispersion of air pollutants in the ambient air [3]. Therefore, ground station measurements of meteorological variables provide the appropriate baseline information to interpret observations of air quality data [4] and to run chemical transport models [3, 5].

Environmental authorities in the city of Quito, through Secretaría del Ambiente, operate a monitoring network of air quality and physical meteorology variables within the city and its adjacent valleys [6]. The local network monitors weather and ambient air quality, and issues alerts for the population in the event of atmospheric conditions that could threaten public health. On the other

hand, the Ecuadorian meteorological service (INAMHI) operates a nation-wide surface weather network, although online information is scarce and efforts to automate stations are recent. In spite of all these efforts, scientific research in the field of Atmospheric Science that involves specialized experimentation, data analysis and modeling is still a field to explore in Ecuador.

An atmospheric research facility, EMA (Spanish acronym for Atmospheric Measurement Station) began operations at Universidad San Francisco de Quito (USFQ) in February 2014. EMA was not conceived with the idea of becoming a meteorological or air quality service, although its baseline instrumentation can provide the public with useful information about the current weather. EMA has its origins in the need to acquire equipment and develop new techniques to conduct atmospheric research with the purpose of answering specific science questions.

The university's atmospheric measurement facility is located in one of Quito's densely populated outskirts valleys, Cumbayá. In this valley neither the local nor the national monitoring networks have placed automated weather or air quality stations. The observations taken with the EMA instruments, therefore, augment the local efforts to study the atmosphere.

Currently, specialized research is conducted at EMA. As a result, several pieces of meteorological and air quality instrumentation have been acquired. In addition, new techniques for atmospheric measurements are being developed. One of the baseline sets of measurements that are continuously taken is surface weather. In this article, an initial assessment of EMA's baseline meteorological data and instrument performance over a two-month period is presented.

Materials and Methods

EMA is sited on the roof of the Science and Engineering building at USFQ's main campus. The geographical



Figure 1: Location of USFQ's atmospheric measurement station (EMA) (blue balloon) relative to the city of Quito in Ecuador. EMA's geographical coordinates are (0°11'47" S, 78°26'6" W). Altitude is 2391 masl.

cal coordinates of the roof-top facility are (0°11'47" S, 78°26'6" W), and altitude is 2391 masl. The roof is located at 11.5 m from the ground level. A map that shows EMA's location relative to the city of Quito is presented in Figure 1.

Measurements of meteorological variables are performed following technical criteria. Data quality is ensured through continuous monitoring of instrument performance [7].

Temperature and humidity are measured with a Vaisala HUMICAP probe, model HMP 155. The sensor has a radiation shield and is located at 2.40 m above the roof level, on the East side of the roof ledge. Instrument precision is +/- 1% for relative humidity, and +/- 0.2°C for typical ranges of temperature readings.

Direct and hemispherical solar radiation measurements are taken with a Kipp & Zonen pyranometer model CMP3, an ISO certified second class instrument with spectral range from 300 to 3000 nm, output sensitivity of 9.94 $\mu\text{V}/(\text{W m}^{-2})$, and accuracy better than 10%.

For precipitation, a Texas Electronic rain fall sensor model TR-525M with a reading accuracy of +/-1% is used. Surface pressure is measured with a Vaisala BAROCAP sensor with accuracy of +/- 0.3 hPa.

Wind speed and direction were first measured with a temporary Vaisala WM30 cup and vane wind sensor, until arrival of a Young 81000 ultrasonic anemometer on 15 June 2014. Wind measurements acquired with the first sensor were performed with an accuracy better than +/- 2% for speed, and +/- 3° for direction. The rate of acquisition was two data points per minute. In contrast, the Young anemometer takes readings with an accuracy of +/-1% for speed, +/- 2° for direction, and it is set to yield 1-second averages of 10 Hz data. All wind measurements have been taken with the sensor placed on a pole, 8.5 m above the roof level and 20 m above the ground level.

Data logging is being performed on a Vaisala MAWS301 automatic weather station. The sensors and data logger are sun-powered. The logger automatically processes data as 30-second averages and transmits information to the EMA's computer via a 232 communications port. All sensors were in-factory calibrated and delivered with their corresponding calibration certificates.

EMA began operations on 22 May 2014 and run in test mode for the rest of the month of May, until all sensors were online and yielding verified readings. Therefore, a set of 1-minute data averages for the months of June and July has been processed for solar radiation, temperature, pressure, relative humidity, wind speed, and wind direction. The data set consists of 42561 data points in June, and 43584 data points in July. Due to reasons related to EMA's technical operations, there was loss of data for less than half a day in June, and for over half a day in July. Regarding precipitation, the season has been mostly dry for which only one large event is reported on 23 May. In the following sections, time series

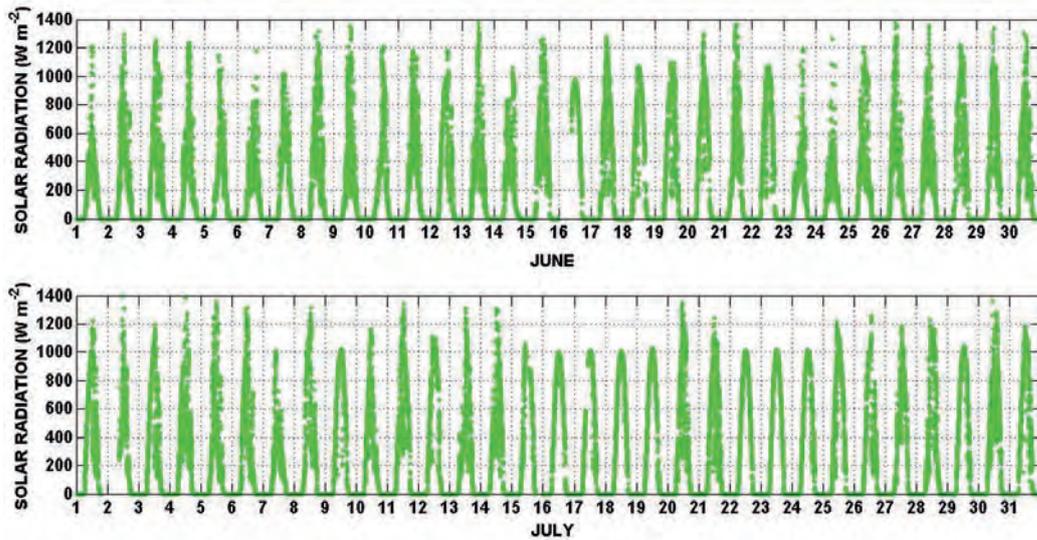


Figure 2: Time series of 1-minute solar radiation flux measured at EMA in Cumbayá, Ecuador, in June (upper panel) and July (bottom panel) 2014.

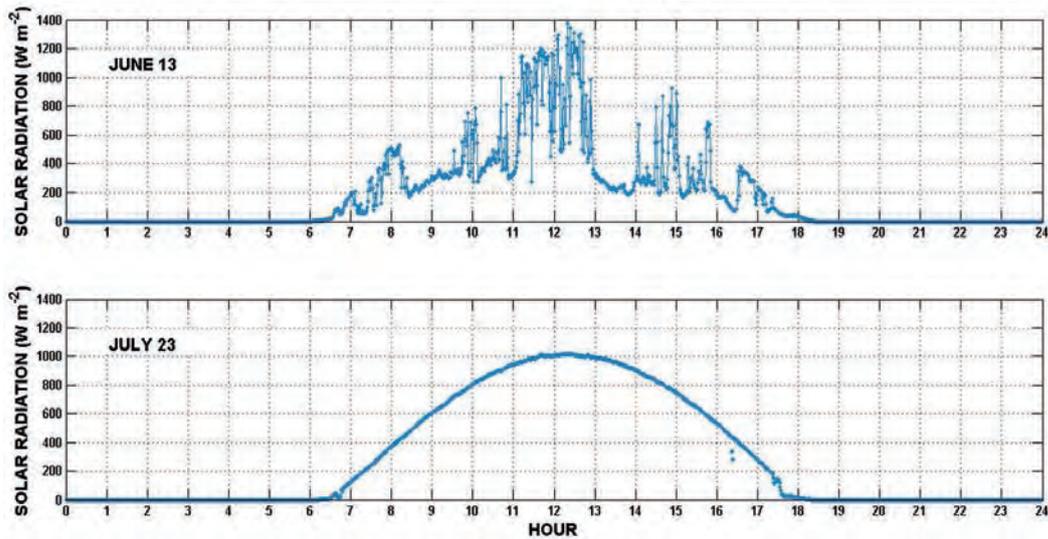


Figure 3: Examples of solar radiation flux diurnal profiles observed on 13 June (top panel) and 23 July (bottom panel). Both panels are zoomed-in graphs from time series in Figure 2.

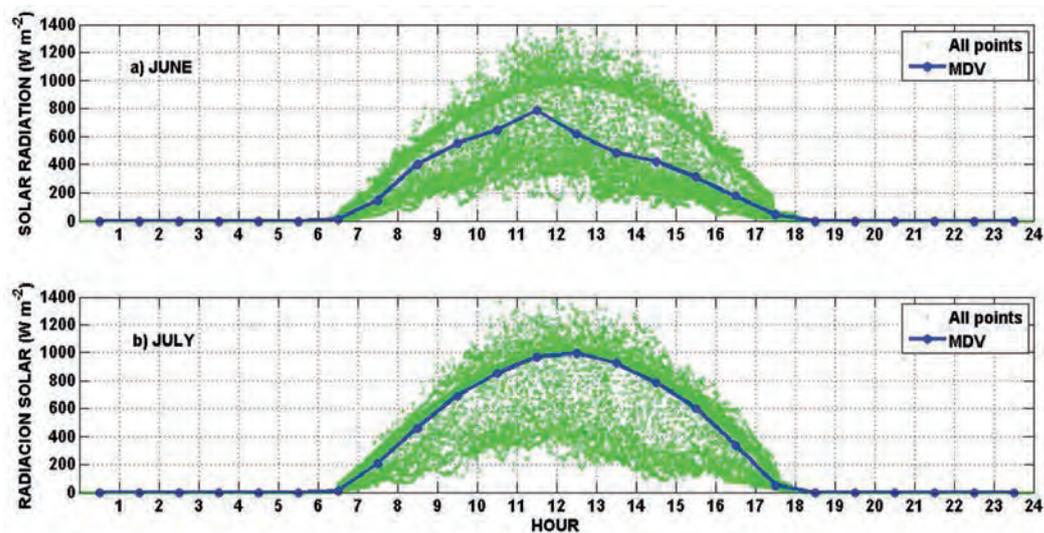


Figure 4: Diurnal profiles of solar radiation flux for a) June and b) July 2014, collected at EMA in Cumbayá, Ecuador. Green points are 1-minute data collected in a month and plotted against the hour of the day. The solid blue line is the monthly 1-hour median diurnal variation (MDV).

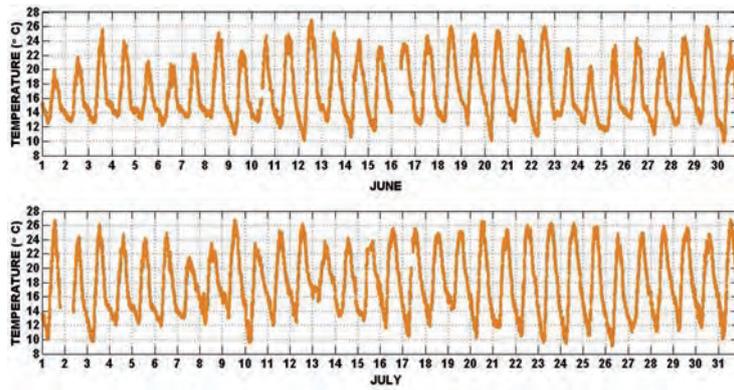


Figure 5: Time series of 1-minute temperature observations taken at EMA in Cumbayá, Ecuador, in June (upper panel) and July (bottom panel) 2014.

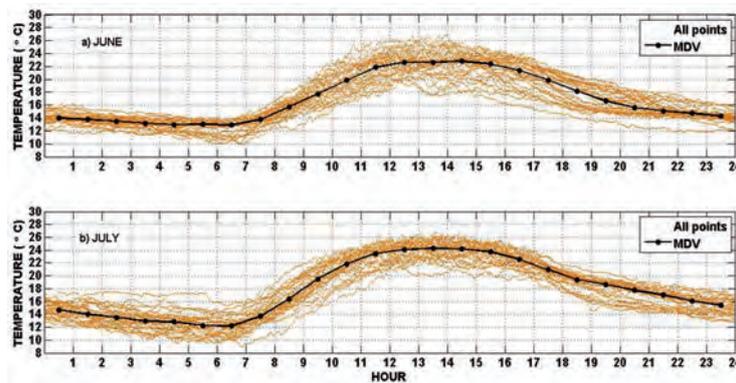


Figure 6: Temperature diurnal profiles for a) June and b) July 2014, collected at EMA in Cumbayá, Ecuador. Maroon points are 1-minute data points collected in one month and plotted against the hour of the day. The solid black line is the 1-hour median diurnal variation (MDV).

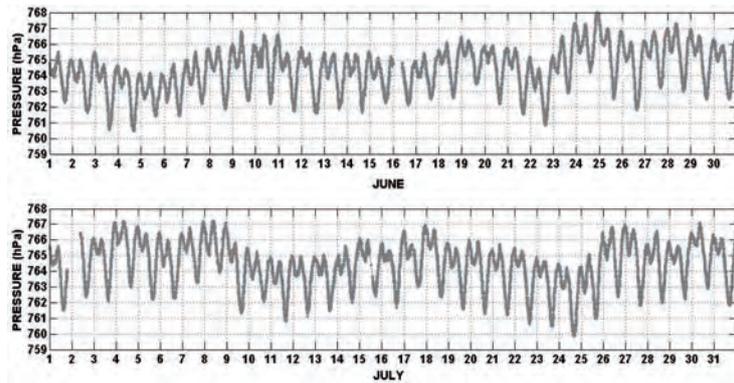


Figure 7: Time series of 1-minute atmospheric pressure observations taken at EMA in Cumbayá, Ecuador, in June (upper panel) and July (bottom panel) 2014.

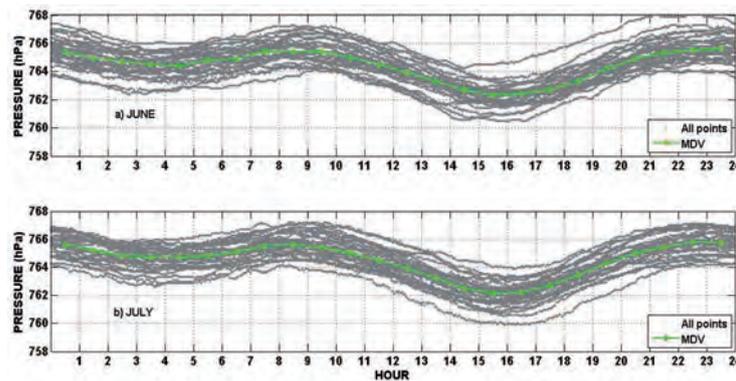


Figure 8: Atmospheric pressure diurnal profiles for a) June and b) July 2014, collected at EMA in Cumbayá, Ecuador. Grey points are 1-minute data points plotted against the hour of the day. The solid green line is the monthly 1-hour median diurnal variation (MDV).

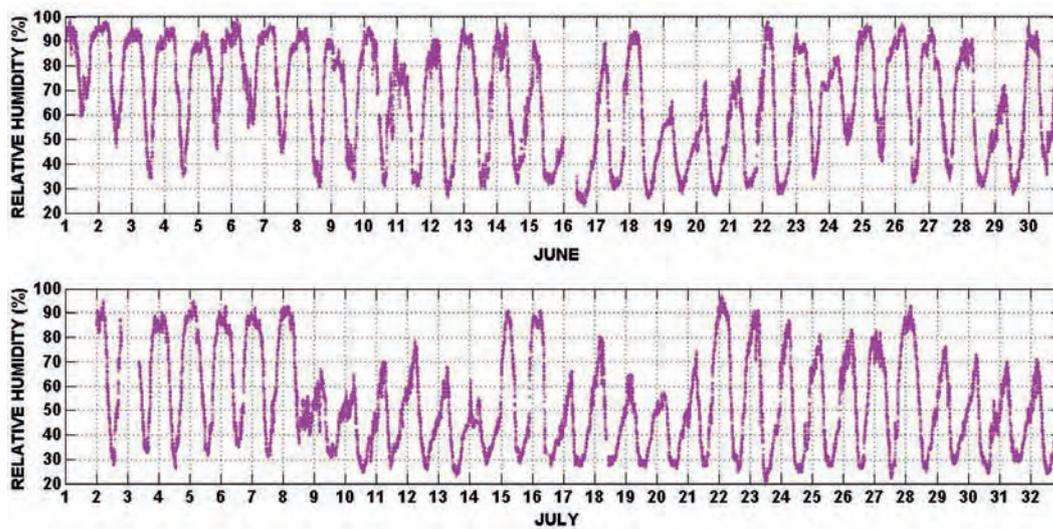


Figure 9: Time series of 1-minute relative humidity observations taken at EMA in Cumbayá, Ecuador, in June (upper panel) and July (bottom panel) 2014.

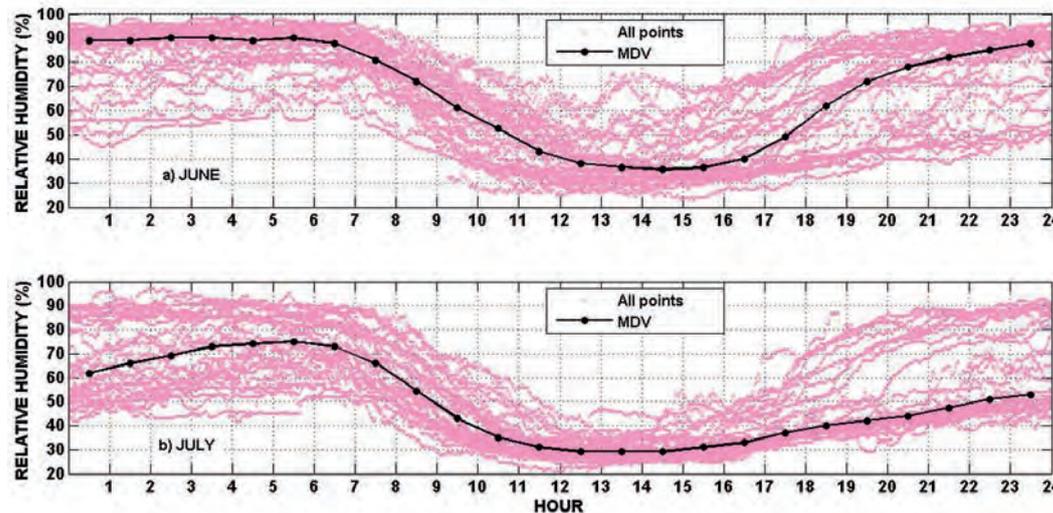


Figure 10: Relative humidity diurnal profiles for a) June and b) July 2014, collected at EMA in Cumbayá, Ecuador. Pink points are overlapped 1-minute averages plotted against the hour of the day. The solid black line is the hourly median diurnal variation (MDV).

and diurnal profiles of physical meteorology variables are presented.

Results and discussion

Solar radiation flux density

Solar radiation is the engine that initiates changes in weather and air pollution related phenomena. The availability of solar radiation flux density at the surface level at a given time, has a seasonal dependence on the solar declination angle, the latitude and the hour of the day [8]. In addition, atmospheric optical filters, cloud coverage, and particles in the atmosphere play a key role as absorption and scattering mechanisms attenuate the amount of light that reaches the surface at a given time. Detailed explanation on the transfer of solar radiation through the atmosphere can be found elsewhere [8, 9].

Time series of solar radiation flux density at the ground level in Cumbayá, during the months of June and July,

are depicted in Figure 2. This measurements correspond to solar declinations going from 22.05° on 1 June at local hour 00h00, through 23.44° on 21 June (Northern Hemisphere summer solstice), to 18.01° on 31 July at local midnight. For the equatorial EMA's latitude ($0^\circ 11' 47''$ S) and at local noon, the solar zenith angle is practically equal to the solar declination angle [8].

Although in June and July there were as many as 10 days with solar radiation flux peaking between 1300 and 1400 Wm^{-2} , June was a cloudier month. Typical cloud structure in June and fair weather conditions in July are presented in Figure 3. For instance, in June there were intense solar radiation flux peaks, but there was also a substantial amount of cloudiness. An example can be observed on the top panel of Figure 3, for 13 June. On the other hand, clear days and days with fair weather clouds prevailed more consistently in July, in particular from the 15th to the 26th. An example of an almost perfect solar radiation profile is depicted for 23 July, on the bottom panel of Figure 3.

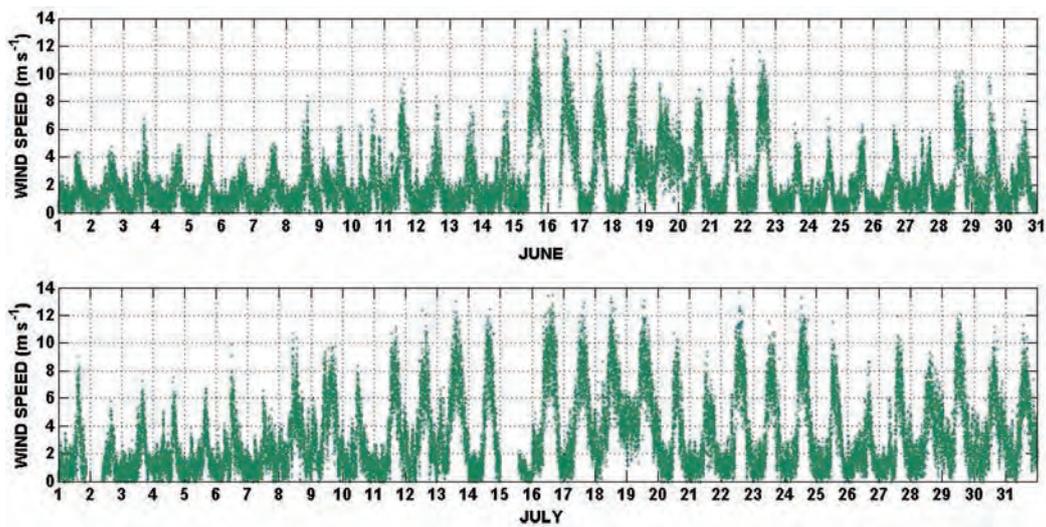


Figure 11: Time series of 1-minute wind speed observations at EMA in Cumbayá, Ecuador, during June (upper panel) and July (bottom panel) 2014.

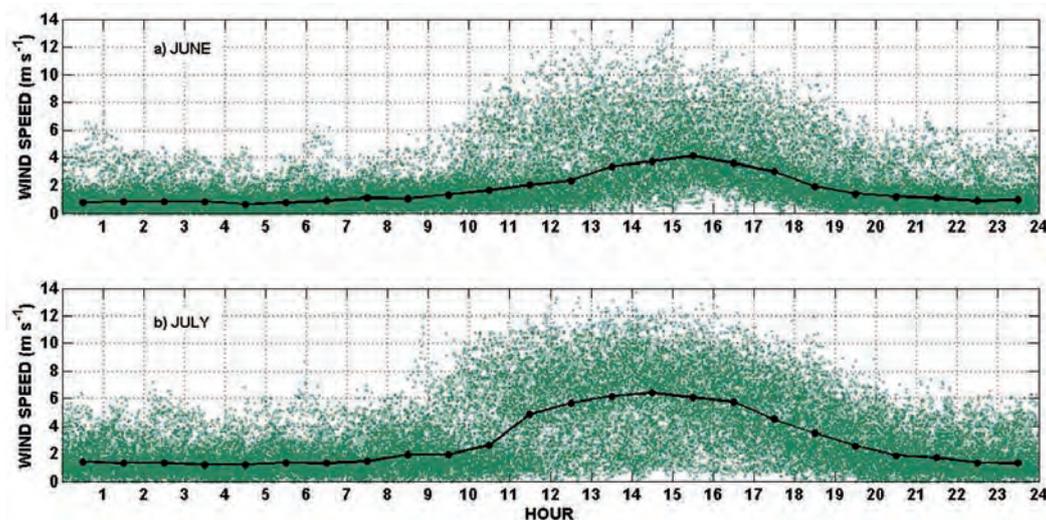


Figure 12: Wind speed diurnal ranges for a) June and b) July 2014, collected at EMA in Cumbayá, Ecuador. Dark green dots are 1-minute averages plotted against the hour of the day. The solid black line is the monthly 1-hour median diurnal variation (MDV).

Median diurnal variations (MDV) for solar radiation flux measurements were obtained overlapping data as function of the hour of the day and extracting the hourly median. Statistically, the median is an appropriate tool to obtain trends in meteorological data sets, since it effectively allows filtering data points that could otherwise bias the trend result. The MDV for June and July are represented with a solid blue line in Figure 4, a) for June, and b) for July. Looking at the MDVs on Figure 4, June cloudiness becomes evident, in particular in the afternoon hours, while the overall fair weather in July is similarly revealed.

Ambient air temperature

Temperature time series of 1-minute data collected at the EMA site during the months of June and July are depicted in Figure 5. In June, there were four days when temperature reached peaks greater or equal to 26°C. The warmest day was 12 June with a peak temperature of 27°C. On the other hand, temperature minima in this

month ranged between 10 to 14°C, with only three days reaching the lowest value.

Further in the season, July turned into a warmer month with a total number of 11 days when the maximum temperature reached or surpassed 26°C. Regarding temperature minima, in July there were early morning temperatures lower than those recorded in June, and thus during seven days in July temperature minima were below 10°C.

Daytime ambient temperatures are correlated to the amount of solar radiation flux available at the surface level. As explained earlier, during the month of July there was less cloud coverage than in the month of June, which translated into higher daytime temperature readings. Similarly, less cloud coverage leads to faster radiative cooling of the surface during nighttime and early morning hours. Therefore, July's clearer skies became the underlying reason for lower temperature peaks during nights and early mornings.

Temperature MDVs for June and July are presented in

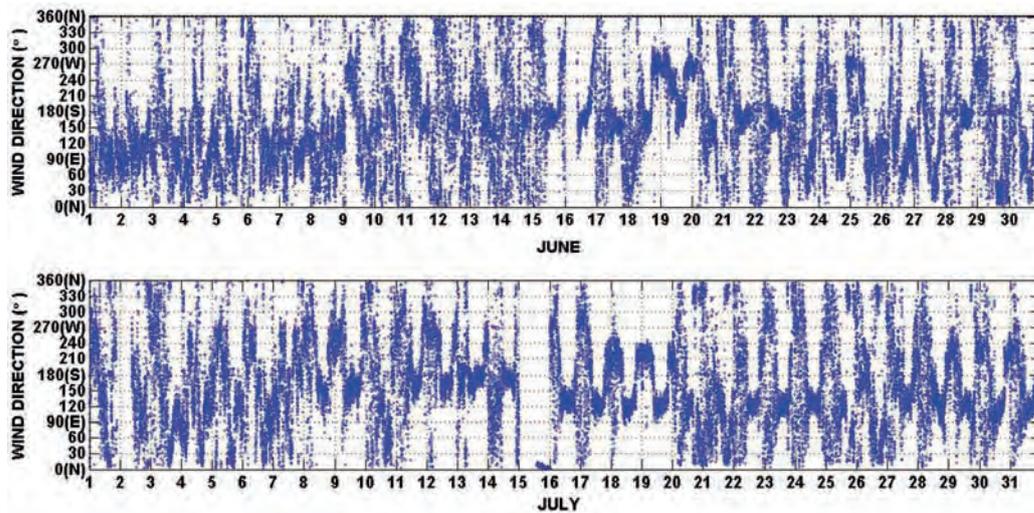


Figure 13: Time series of 1-minute wind direction observations at EMA in Cumbayá, Ecuador, during June (upper panel) and July (bottom panel) 2014.

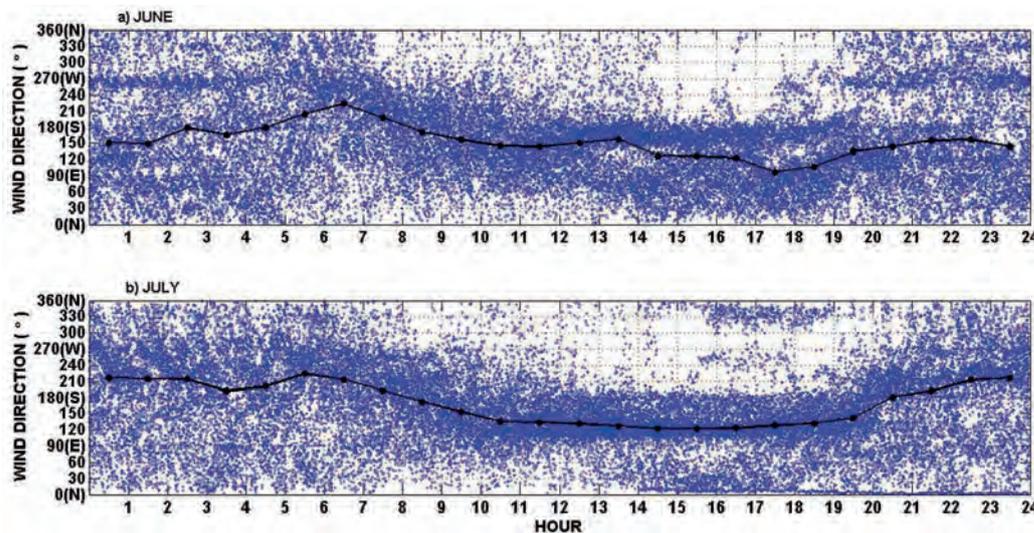


Figure 14: Wind direction diurnal trends for a) June and b) July 2014, collected at EMA in Cumbayá, Ecuador. Blue points are 1-minute data collected in a month and plotted against the hour of the day. The solid black line is the monthly 1-hour median diurnal variation (MDV).

Figure 6, a) and b). In June, packing of the points is less compact than in July, especially during the afternoon. Overall, in June temperature peaked at $22.6^{\circ}\text{C} \pm 2.5^{\circ}\text{C}$ at 14h00 local time, while in July the peak temperature was $24^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, at the same hour.

Surface pressure

Atmospheric pressure variations at the surface level during June and July 2014 are presented in Figures 7 (time series) and 8 (MDVs). Overlapped time series data as a function of the hour of the day (Figure 8) reveal the cyclical atmospheric wave with a period of 12 hours, with troughs at local time 04h00 and 16h00, crests at 09h00 and around 22h00, and mean amplitude of about 1.6 hPa. This behavior reveals the known ground level print of the large scale movement of the atmosphere that yields a surface variation of pressure between 762 hPa to 765 hPa, Figure 8 a) and b), at the observation location.

Relative humidity

Relative humidity daily variations are correlated to temperature and solar radiation flux variations. In the night-time and early morning, relative humidities are higher as temperature decreases in the absence of sunlight. Thermodynamically, lower temperatures shift the equilibrium vapor pressure to lower values, and so water vapor partial pressures divided by lower saturated vapor pressures yield higher relative humidities. Hence, relative humidity peaks occur between midnight and early morning hours, and lowest peaks occur at around 14h00, the time when temperature is maximum. Such diurnal variation can be observed in the time series presented in Figure 9, top and bottom panels for June and July, respectively. In July, the number of days with lower daytime and night-time relative humidities is larger than in June, which relates to the fact that higher solar radiation fluxes at the surface level translate into warmer and drier air. This phenomena extends to some evenings through the night,

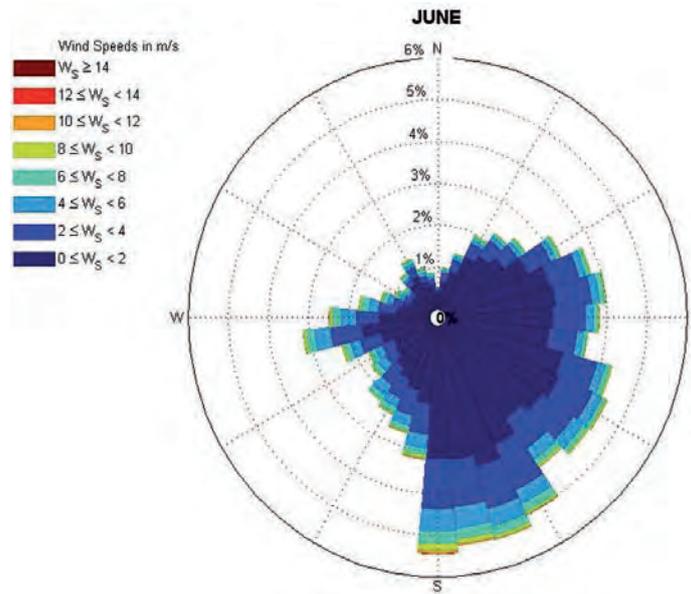


Figure 15: Wind rose plot obtained with 1-minute data for June 2014 collected at the EMA site in Cumbayá, Ecuador. Color palette indicates speed in m/s. Quadrants indicate wind direction. Radial scale indicates percentage of data points per bin.

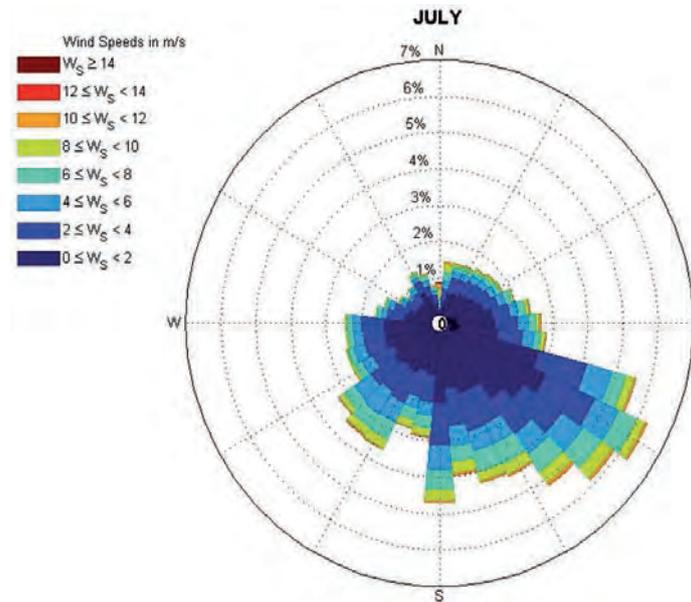


Figure 16: Wind rose plot obtained with 1-minute data for July 2014 collected at the EMA site in Cumbayá, Ecuador. Color palette indicates speed in m/s. Quadrants indicate wind direction. Radial scale indicates percentage of data points per bin.

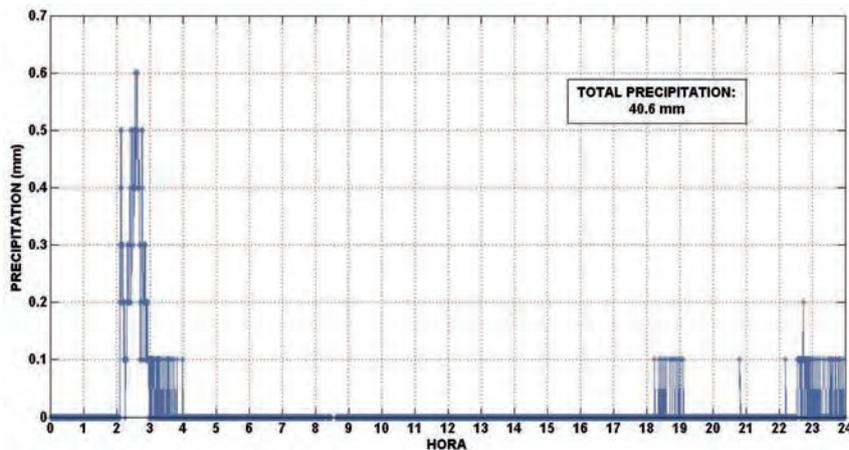


Figure 17: Large precipitation episode recorded at EMA on 23 May 2014 in Cumbayá, Ecuador. Total rainfall was 40.6 mm, out of which 33 mm correspond to the event between 02h06 and 03h35.

in particular between the 8th to the 14th, and between the 16th to the 22nd of July, when relative humidities in hours other than daylight hours were remarkably low. Overall, the hourly MDVs for relative humidity shown in Figure 10, indicate that a) in June the daytime minimum relative humidity was 37%, while b) in July it was 29%. On the other hand, during nighttime and early mornings, relative humidity most of the times was as high as 90% in June, Figure 10 a), while in July early morning relative humidity ranged between 60 and 72%, and reached 50% in the night, Figure 10 b).

Wind speed and direction

Surface observations of the wind field were also recorded for June and July 2014 at the EMA facility. June and July wind speed time series can be observed in Figure 11, top and bottom panels. Wind speeds reached afternoon peaks above 12 m s⁻¹ in as many as 10 days in July, while June was less windy. Daily overlapping of the data shows the wind speed range during the months of June and July. This range is depicted collectively by the green dots in Figure 12, a) and b). Although overlapped points are more dispersed, if compared to the temperature data set, a diurnal profile is still apparent in Figures 12 a) and b). Median diurnal variations were obtained and depicted as solid black lines in Figure 12, even though trend values are statistically less significant than for temperature, due to larger data dispersion. Nevertheless, it is clear that 1) wind speed peaks at the time of peak temperature, and 2) in July wind speeds could be a factor of 1.5 higher than in June.

It is a known global circulation fact that during the Northern Hemisphere summer time, the Intertropical Convergence Zone (ITCZ) meanders a few degrees latitude to the North of the equator, mainly in the month of July [10]. As a result, at the surface level there is a strong meridional component of the wind vector that comes from the South. Combined with the easterlies around the equator, the main wind field during the Northern Hemisphere summer months come from the South East direction (SE), at the observation site. These phenomena is evident from the wind direction data collected at the EMA facility, in spite of the friction that wind is subject to at the ground level. Time series for wind direction during June and July are depicted on the top and bottom panels in Figure 13. Measurements of wind direction correspond to the value of the azimuthal angle, where the wind is blowing from, with the North marked at 0° and advancing clockwise, as the meteorological convention indicates. Monthly overlapped data presented in Figure 14, a) and b), show packing of data between 90° and 180°, mostly during daytime. As a result MDVs on the plots lay on the S, SE tick mark for daylight hours.

Wind speed and direction data were combined into wind rose plots for the months of June and July, as shown in Figures 15 and 16. A color scale was assigned to the magnitude of the wind vector, while direction is easily

read from the corresponding plot quadrant. The radial scale corresponds to the percentage of data points for every blade-like bin. The June wind rose shows a larger overall percentage of data points for calm winds than in the month of July, when winds were more intense. Also the prevailing S, SE directions are clear from both wind roses, as it is seasonally expected.

Precipitation

Regarding rainfall measurements, June and July turned out to be dry summer months. The region received 11.6 mm of accumulated monthly precipitation in June, while in July rainfall was absent. However, on 23 May, the EMA precipitation sensor captured a major rainfall event that is worth mentioning. Figure 17 depicts the rain gauge readings for that event. On this day, a total of 40.6 mm of rain were recorded, out of which 33 mm correspond to a large thunderstorm that took place during the first hours of the day, between 02h06 and 03h35 local time.

Summary and future work

USFQ's EMA facility is acquiring real-time physical meteorology observations at the ground level in Cum-bayá, Ecuador. Analysis of 1-minute data for June and July 2014 shows that at this temporal resolution measurement noise is low enough that further smoothing is unnecessary. From this perspective, baseline meteorology data is proven reliable and thus can be used as a basis for interpretation of additional atmospheric measurements.

From an operational standpoint, acquisition of the sonic anemometer data will be migrated from the Vaisala data logger to an independent and customized system. This step is necessary in order to avoid potential conflicts due to the anemometer's much faster sampling rates.

Seasonal changes of physical variables at the observation site are becoming evident from a first evaluation of the data sets. Continuous monitoring at fine temporal resolutions will allow building data records with substantial statistical significance. In this regard, further work involves coupling ground observations acquired at EMA with numerical weather prediction models. From the quality of the data, the outlook for successful modeling trials is promising.

Acknowledgements

Construction of the roof-top Atmospheric Measurement Station (EMA) at USFQ and acquisition of physical meteorology instrumentation were proposed by principal investigator M. Cazorla and funded by Universidad San Francisco de Quito. William H. Brune from the Department of Meteorology at Penn State University has supported research at EMA through donations and continuous science collaborations. We thank engineer Nelson Herrera for valuable and continuous advice. Engineer

Santiago Vargas provided technical support at the time of instrument setup. Volunteer students from the Department of Environmental Engineering have contributed to EMA's operations through the completion of various tasks.

References

- [1] Daley, R. 1997. "Atmospheric Data Assimilation". *Journal of Meteorological Society of Japan*, 75(1B):209–219.
- [2] Wallace, J.; Hobbs, P. 2006. "Atmospheric Science: an introductory survey". *Academic Press, Second Edition, Burlington*: 459–460.
- [3] Seinfeld, J.; S., P. 2006. "Atmospheric chemistry from air pollution to climate change". *Wiley, Second Edition, USA*: 1092–1133.
- [4] Heard, D. 2006. "Field Measurements of Atmospheric Composition". en "*Analytical techniques for atmospheric measurements*", D. Heard (Ed.), *Blackwell Publishing: Oxford*: 1–71.
- [5] Bey, I.; Jacob, D.; Yantosca, R.; Logan, J.; Field, B.; Fiore, A.; Schultz, M. 2001. "Global modeling of tropospheric chemistry with assimilated meteorology: Model description and evaluation". *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D19):23073–23095.
- [6] Distrito Metropolitano de Quito. 2013. "Informe Anual 2013. Calidad del Aire". <http://190.152.144.74/paginas/articulos.html>.
- [7] Brock, F.; S., R. 2001. "Meteorological Measurement Systems". *Oxford University Press, Inc., New York*.
- [8] Liou, K. 2002. "An Introduction to Atmospheric Radiation". *Academic Press, Second Edition, USA*: 44–50.
- [9] Bohren, C.; Clothiaux, E. 2006. "Fundamentals of Atmospheric Radiation". *WILEY-VCH, Germany*.
- [10] Waliser, D.; Gautier, C. 1993. "A satellite-derived climatology of the ITCZ". *Journal of Climate*, 6(11):2162–2174.

Design and Construction of Small Power Boost Converter with Educational and Research Purposes

Diseño y Construcción de un Convertidor Boost de Pequeña Potencia, con Propósitos Educativos y de Investigación

L. A. D'Alessio¹, L. G. González^{1,2*}, R. O. Cáceres¹

¹Departamento de Electrónica y Comunicaciones, Universidad de Los Andes. Mérida-Venezuela

²Proyecto Prometeo, Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad de Cuenca. Cuenca-Ecuador

*Autor principal/Corresponding author, e-mail: lgerardo@ula.ve

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

Recibido/Received: 02/06/2014. Aceptado/Accepted: 10/09/2014.

Publicado en línea/Published on Web: 19/12/2014. Impreso/Printed: 19/12/2014.

Abstract

This paper presents the design and construction of a DC-DC boost converter for a nominal power of 200W, with an input voltage of 100 V and an output voltage of 200V, on the basis of theoretical analysis with the aim of design and determine all the components associated with the mentioned converter. In this research we use the voltage feedback control with a PI controller tuned by pole placement, and a PWM modulator for the IGBT switching. The converter performance and the control system faced with step changes in the input voltage and the load resistance is verified through computer simulation and then verified by experimental tests using a microcontroller PIC16F877.

Keywords. DC-DC Converter, Boost Converter, Voltaje Feedback Control.

Resumen

Este artículo presenta el diseño y construcción de un convertidor DC - DC boost o elevador de tensión, para una potencia nominal de 200 W, con una tensión de entrada de 100 V y una tensión de salida de 200 V, basándose previamente en un análisis teórico del mismo para así diseñar y determinar todos los componentes asociados a dicho convertidor. En este artículo se utiliza el control por retroalimentación de voltaje con un controlador PI, sintonizado mediante la asignación de polos, además de un modulador PWM (Pulse Width Modulation) para la conmutación del IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). El desempeño del convertidor y del sistema de control ante cambios de tipo escalón en el voltaje de entrada y resistencia carga, es verificado a través de simulación computacional y luego comprobado mediante pruebas experimentales utilizando un microcontrolador PIC16F877.

Palabras Clave. Convertidor DC - DC, Convertidor Boost, Control por Retroalimentación de Voltaje.

Introducción

Los convertidores DC-DC son configuraciones en la electrónica que permiten, a partir de una fuente de tensión determinada, controlar la tensión a la salida del convertidor, es decir, actúan como puentes de transferencia de energía entre fuentes y cargas, ambas de corriente directa. Dentro de las múltiples aplicaciones que tienen estos convertidores están las fuentes de potencia en computadoras, sistemas distribuidos de potencia, sistemas de potencia en vehículos eléctricos, aeronaves, etc. Es así que la importancia de los convertidores DC-DC ha generado un campo propio de investigación en la electrónica de potencia.

Gran parte de la energía eléctrica se procesa a través de convertidores de potencia antes de su uso final. Existen varios tipos de convertidores DC-DC con diferentes propósitos. En algunos la tensión de salida es mayor que la de entrada, mientras que en otros es menor. En la actualidad se tienen, entre otros, los convertidores Boost, Buck, Buck-Boost. De especial interés en esta investigación, se tiene el convertidor Boost, el cual es un elevador de tensión y además su implementación es relativamente sencilla.

En la mayoría de los casos, las aplicaciones del convertidor boost están orientadas a fuentes de potencia o en sistemas de potencia fotovoltaicos como primeras eta-

pas de acondicionamiento. Uno de los principales problemas que presenta este tipo de topologías en su diseño es la estabilidad del sistema frente a perturbaciones de entrada y salida. Esto es debido a que el sistema es de segundo orden y posee un polo doble dominante en bajas frecuencias y dos ceros que predominan en frecuencias altas.

Análisis del Convertidor Boost

En el convertidor elevador o Boost, la tensión de salida es mayor a la tensión de entrada. De acuerdo con la topología de este convertidor, Figura 1, Q es un interruptor unidireccional en tensión y corriente, controlado a ON y a OFF (transistor bipolar, MOSFET, IGBT, etc.). Por su parte, D debe ser un diodo rápido que minimice el fenómeno de recuperación inversa ante la conmutación de alta frecuencia propia del convertidor. En la salida del convertidor se obtiene una tensión continua que presentará un rizado en función de los valores de L y de C, en relación a la frecuencia de conmutación [1].

Para analizar el principio de funcionamiento, se dice que el convertidor funciona en conducción continua cuando la corriente que circula por la inductancia es diferente de cero; En caso contrario se dice que opera en conducción discontinua [2]. Para el presente estudio sólo se trabajará en el modo de conducción continua, el cual se analiza a continuación.

Q representa el interruptor mostrado en la Figura 1, éste es un interruptor controlado que opera en los estados ON y OFF de acuerdo con un ciclo de trabajo que permite regular la tensión de salida. En conducción continua se encuentran dos secuencias de funcionamiento correspondientes a los dos estados posibles del interruptor. Q a ON: Cuando el interruptor conduce, el diodo está polarizado en inversa y permanece bloqueado. Durante esta secuencia la inductancia almacena energía por estar expuesta a la tensión mostrada en la ecuación (1), en tanto que el condensador mantiene la tensión de salida [1].

En este estado, $i_L(t)$ crece siguiendo la ecuación de una recta despreciando las pérdidas asociadas al semiconductor y de la bobina utilizada y cuya pendiente está dada por la ecuación (2):

$$v_L(t) = V_i = \text{constante} = L \cdot \frac{di_L}{dt} > 0 \quad (1)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_i}{L} > 0 \quad (2)$$

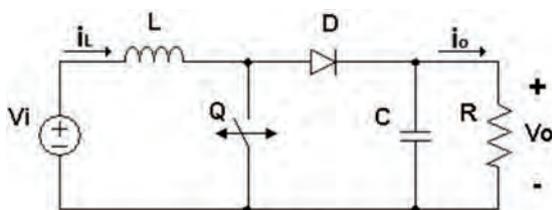


Figura 1: Esquema del convertidor boost.

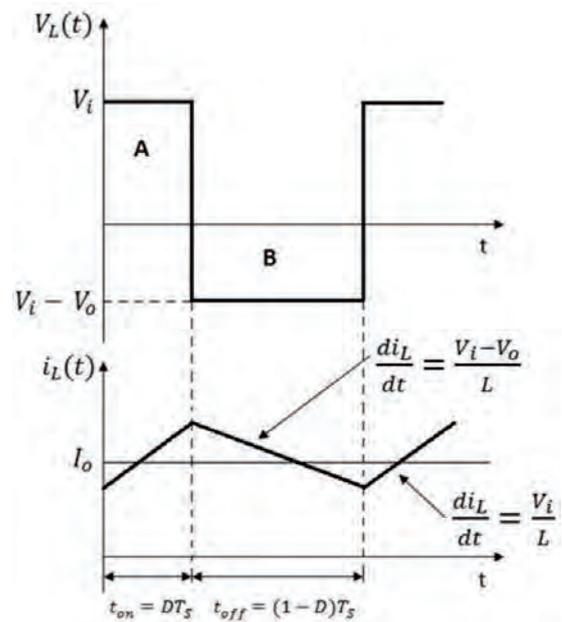


Figura 2: Comportamiento v_L y i_L , Convertidor Boost (Conducción Continua).

Cuando el interruptor no conduce, Q a OFF, la energía almacenada en la bobina, fuerza la conducción del diodo y descarga sobre la salida la energía almacenada en la secuencia anterior, dado que la tensión de salida es superior a la entrada la tensión en la bobina está definida por la ecuación (3). Durante este estado, la corriente en la inductancia decrece con una pendiente definida por la diferencia de tensiones entre la entrada y la salida, ecuación (4):

$$V_i < V_o \rightarrow v_L = V_i - V_o \quad (3)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_i - V_o}{L} < 0 \quad (4)$$

En régimen permanente, la energía almacenada durante un ciclo de conmutación de los elementos pasivos del convertidor es nula, con esta hipótesis, se permite establecer que el valor medio de la tensión en bornes de la bobina es cero, por lo que igualando las áreas A y B, de la Figura 2, se permite establecer la relación de la tensión de entrada y salida mediante la ecuación (5) en el régimen de conducción continua.

$$V_o = V_i \cdot \frac{1}{(1 - D)} \quad (5)$$

Donde D representa el ciclo de trabajo a la frecuencia de conmutación.

Diseño y Construcción del Convertidor Boost

Dimensionamiento de inductor de potencia

En un convertidor de potencia conmutado, el dimensionamiento de los elementos pasivos como los inductores,

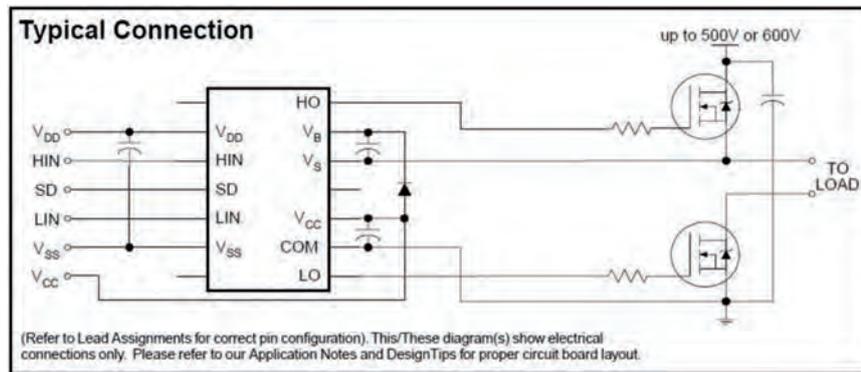


Figura 3: Conexión típica Driver IR2110 [4].

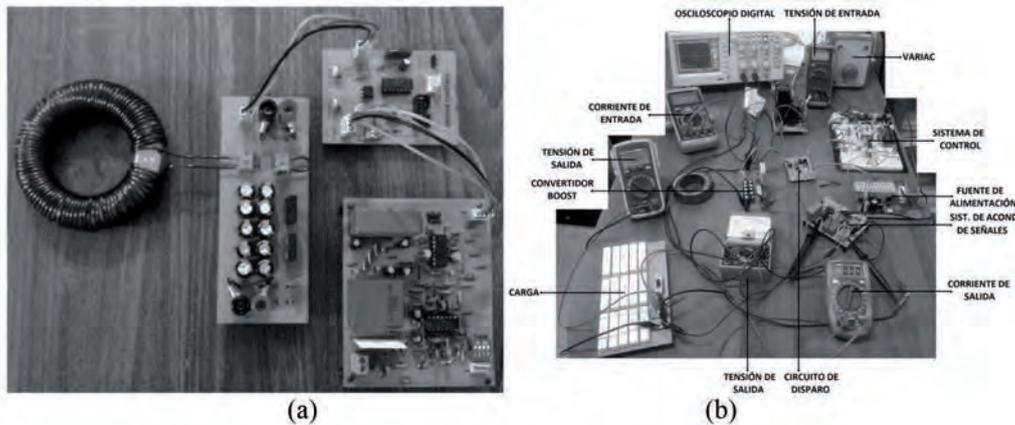


Figura 4: a) Convertidor boost, b) Montaje de experimental de comprobación convertidor.

son de especial importancia debido a que su funcionamiento se basa en un comportamiento ideal, en esta aplicación por la inductancia circula un nivel de corriente DC al que se superpone un rizado triangular, cuya componente fundamental es la frecuencia de conmutación. Los Parámetros del Convertidor se establecen en la Tabla 1.

V_i	V_o	f_{sw}	R
100 V	200 V	10 kHz	200 Ω

Tabla 1: Parámetros Convertidor de Potencia.

De los parámetros mostrados en la Tabla 1, es posible determinar el ciclo de trabajo en régimen permanente mediante la ecuación (5), $D = 0.5$, luego aplicando la ecuación (6), que determina el valor de la inductancia optima ideal, para que el convertidor opere justo en el límite entre conducción continua y discontinua, se obtiene $L_{min} = 1.25$ mH.

$$L_{min} = \frac{D \cdot R \cdot (1 - D)^2}{2 \cdot f_{sw}} \quad (6)$$

Con este valor de inductancia de referencia, bajo las condiciones nominales y dado que el sistema estará expuesto a cambios en la carga al igual que la tensión de entrada, es necesario evitar que el régimen de operación entre en conducción discontinua, para esto es necesario que la inductancia resultante sea superior a la determinada a las condiciones críticas de operación.

Cumpliendo esta condición, se utilizó un inductor cuyo núcleo está compuesto por dos toroides que presentan un campo magnético nominal de $B_{sat}=500$ mT y área efectiva transversal de $A_e=188.8\text{mm}^2$ cada uno, con un número de 115 espiras, y utilizando la ecuación (7), se obtiene una inductancia de $L=7.23\text{mH}$, asumiendo una corriente máxima de $I_{Lmax}=6$ A.

$$L = \frac{N \cdot B_{sat} \cdot A_e \text{ (cm}^2\text{)}}{10^4 \cdot I_{L \text{ máx}}} \quad (7)$$

Determinación del condensador o filtro de salida

La tensión de salida en el convertidor boost está expuesta a variaciones de energía a la frecuencia de conmutación, un criterio utilizado en el diseño, contempla permitir una tensión de rizado de hasta el 2% de la tensión nominal de salida. La ecuación (8) representa una aproximación lineal de descarga del condensador de salida con una carga resistiva de valor R, durante el estado en que el interruptor está en posición ON.

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{R \cdot C \cdot f_{sw}} \quad (8)$$

Utilizando los parámetros nominales expresados en la Tabla 1, la ecuación (8) y permitiendo una tensión de rizado del 1% ($\Delta V_o=0.01 \cdot V_o$), se obtiene $C=25\mu\text{F}$. Con

el fin de reducir el efecto de la resistencia serie del condensador ESR [3], del condensador electrolítico utilizado, se ha utilizado un condensador equivalente de $C_{eq} = 27\mu\text{F}$ conformado por 10 condensadores en paralelo de $2.7\mu\text{F}$ cada uno.

Elementos de conmutación y semiconductores utilizados

En relación a los semiconductores, se utilizó el IGBT IRG4PC40UD, diodo de recuperación rápida RHRG75120, Driver de potencia IR2110 con la configuración mostrada en la Figura 3. Utilizando una resistencia de puerta de 22Ω . Seleccionada por la notas de aplicación asociadas al IR2110 [4].

Otros circuitos electrónicos utilizados para establecer el lazo de control realimentado, son los sistemas de acondicionamiento de señales, compuesto por sensores de efecto hall en la tensión de salida dado que se ha utilizado un sistema de control en modo de tensión, Adicionalmente a la señal aportada por el sensor de voltaje, se ha utilizado un filtro pasa bajo con la configuración de Rauch, con la finalidad de suprimir el ruido de alta frecuencia que pueda perjudicar al lazo de control, este filtro presenta una frecuencia de corte de 300Hz, frecuencia que debe limitar la velocidad de respuesta de lazo de control de voltaje.

Finalmente el montaje experimental del convertidor de potencia construido puede mostrarse en la Figura 4a. y en la Figura 4b, se observa el montaje experimental de mediciones, utilizado para comprobar el funcionamiento experimental de convertidor ante variaciones en la tensión de entrada y carga.

Diseño del sistema de control del convertidor boost

Para obtener una tensión de salida regulada que siga una tensión de referencia, se debe utilizar un lazo de realimentación del punto de referencia, ante variaciones en la tensión de entrada y variaciones en la carga. Existen dos métodos para realizar el control de los convertidores conmutados como son: el control modo tensión y el control por corriente pico, en esta investigación sólo se utiliza el método de control modo tensión [5], en el cual la única variable que se utiliza para realizar el control realimentado del convertidor, es la tensión de salida del mismo. El diagrama de bloques del control modo

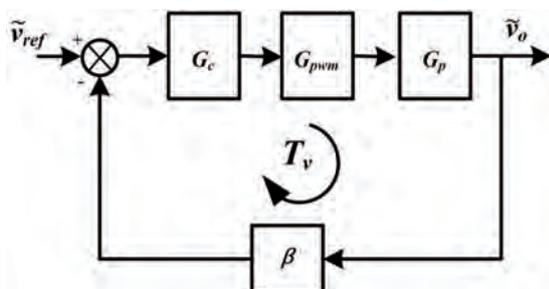


Figura 5: Diagrama de bloques del control modo tensión de un convertidor boost.

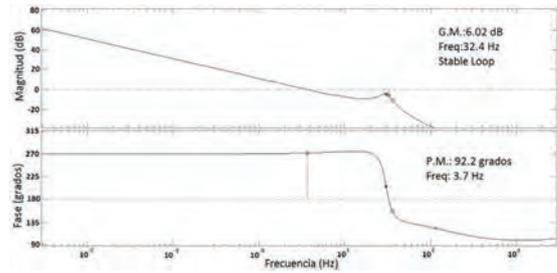


Figura 6: Análisis en frecuencia, Ganancia de lazo abierto.

tensión de un convertidor conmutado se muestra en la Figura 5. [1], similar al utilizado en [6].

Del diagrama de bloques de la figura 5, se obtienen la ganancia de lazo T_v definida por la ecuación (9), con esta ecuación se puede conocer la dinámica del sistema para determinar el tipo del controlador así como el valor de sus coeficientes. En este caso de aplicación se define la ganancia del modulador PWM [7] como $G_{pwm}=1$, la ganancia de sensado de tensión como $\beta=1$ y una función de transferencia simplificada de pequeña señal del convertidor elevador mostrada en la ecuación (10), por la dinámica del producto $G_{pwm} \cdot G_p \cdot \beta$ se utilizó un controlador tipo PI sintonizándolo mediante la asignación de polos de manera que el análisis en frecuencia mediante el diagrama de bode de la ganancia T_v tenga un comportamiento similar al de un integrador [1], mediante lo antes expuesto se obtienen los coeficientes del controlador definidos en la ecuación (11) la cual permiten una respuesta en frecuencia de la ganancia a lazo abierto como la mostrada en la figura 6, de este análisis se infiere una dinámica estable mediante el criterio de estabilidad relativo con un margen de ganancia $MG=6.02\text{dB}$ y margen de fase $MF=92.2^\circ$.

$$T_v = G_c \cdot G_{pwm} \cdot G_p \cdot \beta \tag{9}$$

$$G_p(s) = \frac{V_i}{L \cdot C} \cdot \frac{\left(1 - \frac{L \cdot s}{R \cdot (1-D)^2}\right)}{s^2 + \frac{s}{R \cdot C} + \frac{(1-D)^2}{L \cdot C}} \tag{10}$$

$$G_c(s) = 0,0002506 + 0,05695/s \tag{11}$$

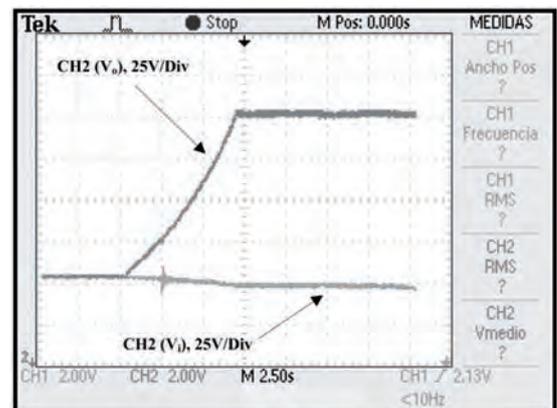


Figura 7: Desempeño, arranque suave en tensión de salida a potencia nominal.

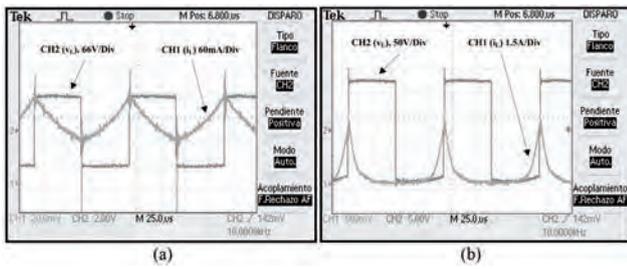


Figura 8: Tensión y corriente en la inductancia v_L , y i_L , (a) $P_{out}=30W$, (b) $P_{out}=200W$.

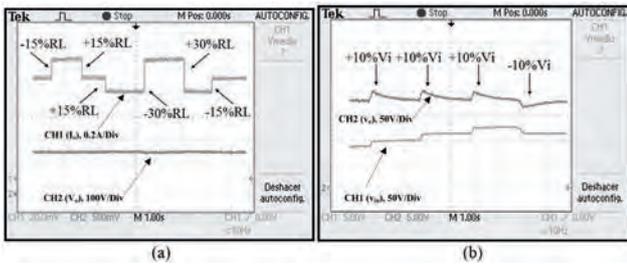


Figura 9: Desempeño de sistema de control, ante perturbaciones, (a) Variaciones en la carga, (b) Variaciones en la tensión de entrada.

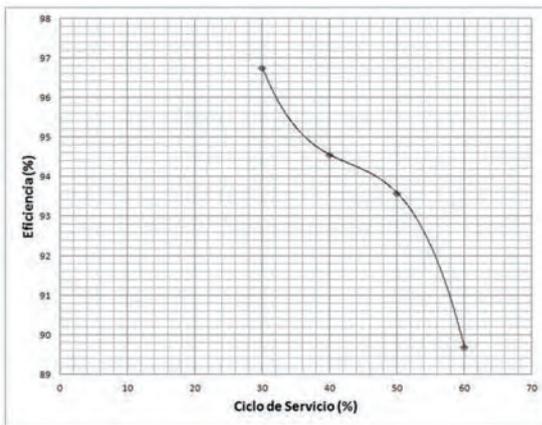


Figura 10: Eficiencia convertidor Boost en régimen estacionario, en función del ciclo de servicio (D).

En el caso de la implementación del controlador, se empleó la transformada bilineal o Tustin para determinar el controlador en el espacio muestral discreto [8], en esta transformación con la ayuda de la función $c2d$ del software Matlab[®] se obtiene el controlador mostrado en la ecuación (12), donde e representa el error característico del lazo de control realimentado definido como $e = (\tilde{v}_o - \tilde{v}_{ref})$ y d representa el ciclo de servicio del modulador PWM.

$$d = 0,0002534e - 0,0002478ez^{-1} + dz^{-1} \quad (12)$$

Desempeño Experimental del convertidor Boost

Una vez construido el convertidor de potencia, con el fin de comprobar el funcionamiento del sistema de control, la Figura 7, muestra el desempeño del sistema a potencia nominal, en el momento de arranque, la tensión de salida aumenta de forma gradual con la velocidad que

le impone el sistema de control hasta llegar a la tensión de referencia sin presentar sobre tensiones que puedan perjudicar los componentes de potencia. Adicionalmente en esta figura se observa el efecto de la impedancia de salida de fuente de alimentación de entrada, dado que a medida que la potencia de salida aumenta, la tensión de entrada disminuye por este efecto.

En la Figura 8. Se aprecia la tensión y corriente en el inductor en régimen permanente. En el proceso de carga y descarga de energía en el inductor, en el caso de la Figura 8a, se presenta un ciclo de trabajo de $D=0.5$, con una potencia de salida de $P_{out}=30W$., en esta figura se observa una tensión cuadrada en la inductancia producto de que el interruptor opera en la regiones de corte y saturación efectivamente, este comportamiento permite una carga y descarga lineal en la inductancia, en cambio en el caso cuando se trabaja a potencia nominal, Figura 8b, la corriente en la inductancia presenta un comportamiento no lineal producto de la saturación magnética del núcleo del toroide utilizado.

En relación al desempeño del sistema de control ante perturbaciones, en la Figura9a, se muestra la tensión de salida ante variaciones en la carga, específicamente se realizaron cambios de tipo escalón en la resistencia de carga de un $\pm 15\%$ y $\pm 30\%$. Ante estas perturbaciones se observa que la tensión de salida permanece sin variaciones significativas en relación a la tensión nominal de salida.

En la Figura 9b, se observa el comportamiento del sistema de control ante cambios de tipo escalón en la tensión de entrada. En ésta se observa que la tensión de entrada parte de 80V, hasta llegar a 140V en escalones de 20V. y el comportamiento de la tensión de salida presenta variaciones en el mismo sentido de la tensión de entrada. Ante estas perturbaciones la respuesta dinámica presenta un comportamiento estable sobre amortiguado.

Con el fin de determinar la eficiencia de operación del convertidor diseñado, en la Figura 10, se presenta el comportamiento del rendimiento en función al ciclo de trabajo en régimen permanente para distintos puntos de operación. En ésta se aprecia, que para el punto de operación nominal ($D=50\%$, $V_i=100V$, $V_o=200V$), presenta una eficiencia del 93.58% , lo que indica un elevado rendimiento para este tipo de aplicaciones.

Conclusiones

En este artículo se detalla el proceso de diseño e implementación del convertidor Boost con carga resistiva, se han dimensionado los componentes que permiten operar con las características de diseño, en este proceso los elementos parásitos se han despreciado. El desempeño del sistema de regulación permite establecer un seguimiento en la tensión de referencia sin errores en estado estacionario ante perturbaciones en la tensión de entrada y la carga. El convertidor diseñado es comprobado de

forma experimental y se permite elevar la tensión de entrada manejando una potencia nominal de 200W, con un rendimiento de transmisión de energía cercana al 90 % en el peor de los casos.

Agradecimientos

El segundo autor, desea agradecer el patrocinio del Proyecto Prometeo de la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación de la República del Ecuador.

Referencias

- [1] Garcera Sanfeliu, G.; Figueres Amoros, E.; Abellan Garcia, A. 1998. "Convertidores conmutados: Circuitos de Potencia y Control". *Universidad Politécnica de Valencia, Servicio de Publicaciones*.
- [2] Rashid, M. 2004. "Electrónica de Potencia. Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones". *Tercera Edición, Pearson Educación*.
- [3] Amaral, A.; Cardoso, A. 2004. "Use of ESR to predict failure of output filtering capacitors in boost converters". *Industrial Electronics, IEEE International Symposium*, 2: 1309–1314.
- [4] International Rectifier. 2014. "Application Note AN-978". www.irf.com/technical-info/appnotes/an-978.pdf
- [5] Liu, X.; Yang, P.; Liu, Y.; Deng, J. 2008. "Modeling and simulation of Parallel Current Mode controlled boost converter". *Industrial Electronics and Applications, 2008. ICIEA 2008. 3rd IEEE Conference*: 2199.
- [6] He, D.; Nelms, R. 2004. "Average current-mode control for a boost converter using an 8-bit microcontroller". *Industrial Electronics, 2004 IEEE International Symposium*, 2:1185–1190.
- [7] Elshaer, M.; Mohamed, A.; Mohammed, O. 2011. "Smart optimal control of DC-DC boost converter for intelligent PV systems". *Intelligent System Application to Power Systems (ISAP), 2011 16th International Conference*: 25–28.
- [8] Buso, S.; Mattavelli, P. 2006. "Digital Control in Power Electronics". *Morgan & Claypool*.

A new system to detect distraction and drowsiness using time of flight technology for intelligent vehicles

Un nuevo sistema para detectar la distracción y la somnolencia utilizando el tiempo de tecnología de vuelo para vehículos inteligentes

Marco Flores Calero^{1*}, Fernando A. Guevara^{1,2}, Oswaldo S. Valencia^{1,3}

¹Departamento de Eléctrica y Electrónica, Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE.
Av. Gral. Rumiñahui s/n, PBX. 171-5-231B Sangolquí (Pichincha), Ecuador.

*Autor principal/Corresponding author, e-mail: mjflores@espe.edu.ec

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

Recibido/Received: 02/04/2014. Aceptado/Accepted: 11/09/2014.

Publicado en línea/Published on Web: 19/12/2014. Impreso/Printed: 19/12/2014.

Abstract

Nowadays, most countries in the world suffer several traffic issues which generate public health problems such as deaths and injuries of drivers and pedestrians. In order to reduce these fatalities, a system for automatic detection of both distraction and drowsiness is presented in this research. Artificial intelligence, computer vision and time of flight (TOF) technologies are used to compute both distraction and drowsiness indexes, in real time. Several experiments have been developed in real conditions during the day, inside a real vehicle and in laboratory conditions, to prove the efficiency of the system.

Keywords. Distraction, drowsiness, traffic accidents, TOF technology, intelligent vehicles.

Resumen

La mayoría de los países en el mundo sufren de varios problemas de tráfico que generan problemas de salud pública, tales como, excesivas muertes y lesiones de los conductores y los peatones. Con el fin de reducir estas cifras de siniestralidad, en esta investigación se presenta un sistema para la detección automática de la distracción y la somnolencia. Las tecnologías de inteligencia artificial, visión por computador y una cámara de tiempo de vuelo (TOF) son utilizadas para calcular los índices de distracción y somnolencia, en tiempo real. Varios experimentos se han desarrollado en condiciones reales durante el día, dentro de un vehículo real y en el laboratorio, para probar la eficiencia del sistema.

Palabras Clave. Distracción, adormecimiento, accidentes de tráfico, tecnología TOF, vehículos inteligentes.

Introduction

At the present time, vehicle security research is focused on driver analysis [2, 10, 11], for this reason, the main objective is to build an intelligent system able to alert the driver about a possible road accident; this technology will increase vehicle safety, anticipating dangerous situations that may arise due to human error while driving. In particular, distraction and drowsiness are studied in depth during this research.

Distraction and drowsiness appears in situations of stress and fatigue in an unexpected and inopportune way, and they may be produced by sleep disorders, certain type of medications, lack of concentration, situations of boredom, such as, driving for long periods of time. Keeping this in mind, the sensation of sleepiness and the distraction

reduce the level of vigilance, and increases risk situations, where a road accident may occur.

Driver's distraction has caused about of 20 % of all traffic accidents [2], i.e., it has generated over 3000 deaths in the United States in 2011. On the other hand, drowsiness causes between 10% and 20% of traffic accidents resulting in both fatal accidents and injured drivers [3], whereas, for truck and lorry drivers, 57% of fatal accidents are a result of drowsiness [1, 4].

This problem is more relevant, for example, in the CAN (Comunidad Andina de Naciones) 314000 traffic accidents were reported in 2010 [9]. In Chile, during the same year there were over 57000 traffic accidents, causing more than 1500 deaths and associated costs are around 355 million dollars. In Ecuador, road accidents became



Figure 1: Driving simulator: (a) scene from a video of an Ecuadorian road, (b) Kinect hardware and the software developed in this research.



Figure 2: Kinect hardware installed over a real vehicle, (a) pickup and (b) hardware and software system.

more important in 2007; this republic was ranked the fourth country in the world to suffer this setback, with associated annual costs amounting to 200 million dollars [7, 8]. In 2012, the National Traffic Agency determined that the human factor causes 89% of the traffic accidents in Ecuador [17].

In South America, death statistics for every hundred thousand inhabitants are: Venezuela 37.2, Ecuador 28, Brazil 22.5, Uruguay 21.5, Paraguay 21.4, Bolivia 19.2, Peru 15.9, Colombia 15.6, Argentina 12.6 and Chile 12.3 [13].

People in a state of distraction and/or drowsiness produce several visual features that can be observed on the human face and head [18], such as: yawning frequency, eye-blinking frequency, eye-gaze movement, facial expressions and head movement. By taking advantage of these visual characteristics, Computer Vision and TOF are the most feasible and appropriate technologies available which can deal with these problems [6].

This article is organized in the following way: The state of the art is presented in Section 2. Section 3 explains the proposed method to detect distraction and drowsiness. Result of several experiments can be found in Section 4. Finally, in Section 5, conclusions and future work are presented.

State of the Art

Several research projects have been developed to analyze the state of the driver during the day and the night. In this research only the first case was studied.

For diurnal lighting conditions, Yekhshatyan and Lee [14] have presented a system which combines both eye glance and vehicle data to detect driver distraction. The auto- and cross-correlations of horizontal eye position and steering wheel angle show that eye movements associated with road scanning produce a low eye-steering

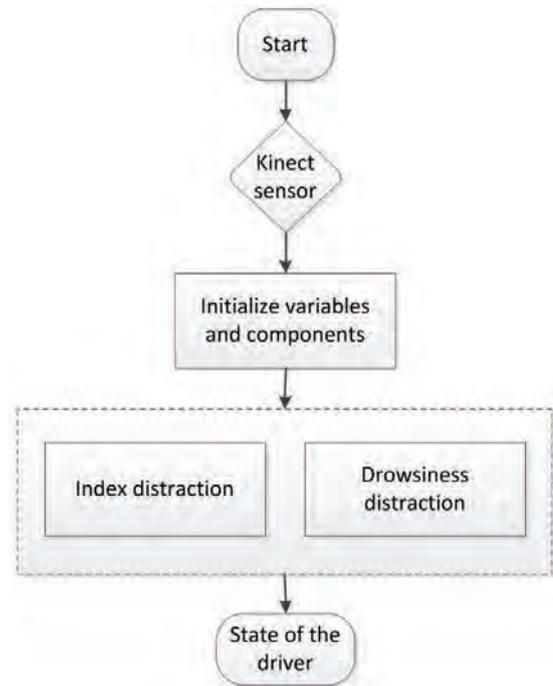


Figure 3: System schema.

correlation which is sensitive to distraction. Gallahan et al. [16] have used the Microsoft Kinect hardware for developing a system to detect driver distraction. This system is able to recognize the reach for a moving object, talking on a cell phone, personal hygiene, and looking at an external object.

For nocturnal lighting conditions, Flores et al. [15] have presented an automatic device for both distraction and drowsiness detection using a monocular camera which locates the eyes using the bright pupil effect produced by the infrared illumination. This system computes the PERCLOS (percentage of eye closure over time) index to drowsiness and a distraction index using the face orientation. Ji et al. [4] have presented a drowsiness detection system based on NIR illumination and stereo vision. This system locates the position of the eye using image differences based on the bright pupil effect. Next, it computes the blind eyelid frequency and eye gaze to build two drowsiness indexes: PERCLOS [5] and AECS (average eye closure speed). Bergasa et al. [1] also have developed a non-intrusive system using infrared light illumination, this system computes the driver's vigilance level using a finite state machine (FSM) with six different eye states that computes several indexes,

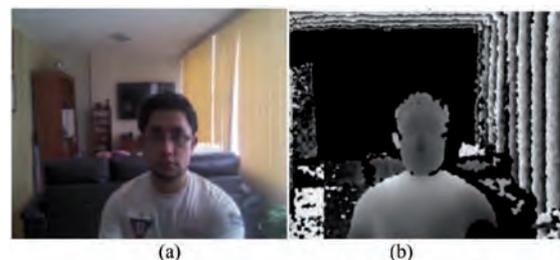


Figure 4: Image of a standard camera (a) and a depth image of a TOF (b).

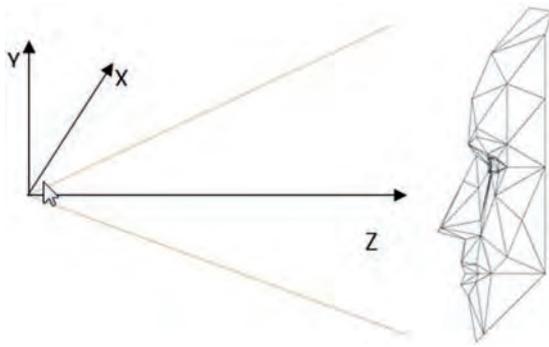


Figure 5: CANDIDE model and 3D coordinate system.

among them, PERCLOS; this system is also capable of detecting inattention considering a facial posture analysis. Systems using NIR illumination work well under stable lighting conditions [1].

System Design For Distraction and Drowsiness Detection

This paper presents a system which detects both visual distraction and drowsiness of the driver by analyzing TOF images taken under daylight illumination, in real driving conditions, over Ecuadorian roads.

Systems overview

This research has been developed in two scenarios: *i*) laboratory conditions and *ii*) real driving conditions. In the first case, a simulator was built where the hardware and the software are installed. Fig. 1 shows this simulator.

The hardware is composed by a core-i7 PC, the Kinect sensor from Microsoft [12], a steering wheel and a screen. The software is the program developed in this research plus the drivers of Kinetic sensor, and several videos of Ecuadorian roads.

In the second case, the Kinect sensor has been mounted over the dashboard of a D-Max Chevrolet pickup, and



Figure 6: New vertices for distraction index.

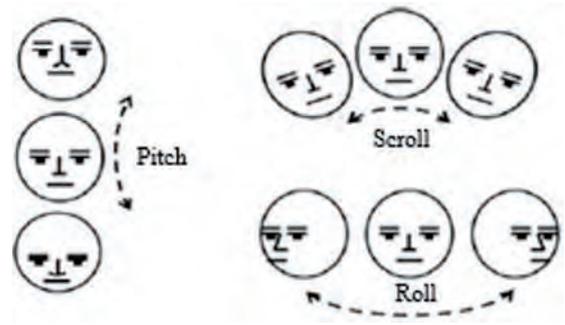


Figure 7: Head and face orientation: roll, pitch and scroll.

the software has been installed in a core-i7 laptop. Fig. 2 depicts this system.

In both cases, the software schema is presented in Fig. 3.

TOF technology and Perception system

Time-of-Flight imaging refers to the process of measuring the depth of a scene by quantifying the changes that an emitted light signal encounters when it bounces back from objects in the scene. A 3D scanner determines the distance of the scene by timing the returning of a pulse of light. A laser diode emits a pulse of light in a lapse of time that is measured from this point to the moment when the light is reflected and captured by a detector. Because the speed of light (c) is constant, the measured lapse of time will determine the distance between the scanner and surface. If T is the total travel time then the distance can be calculated by:

$$d = \frac{cT}{2} \tag{1}$$

Clearly, the efficiency of a laser scanner of Time-of-Flight 3D depends on the accuracy with which time can be measured. 3.3 picoseconds (approx.) is the required time for light to travel 1 millimeter. The distance measurement device only recognizes the distance between specific points and its location. For a complete process, the scanner will change its angular position after each measurement by moving the device or either by deflecting the measuring light through an optical system. This last method is commonly used because the small components of these kind of systems can be easily moved and reach better accuracy.

A typical laser-of-time-of-flight scanner can measure the distances between 10000 or 100000 points per second. With measurements using TOF technology we get among others, the next benefits: no requirement of a specific camera and, no requirement of manual calculus to determine depth. Fig. 4 (b) presents an example of a TOF image using the Kinect sensor [12, 19, 20].

Distraction index

The Kinect sensor uses the TOF technology to generate images in three dimensions, i.e. its depth sensor has

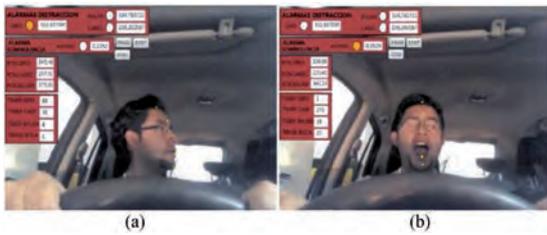


Figure 8: Distraction (a) and fatigue (b) detection in real driving conditions over a real vehicle. The yellow mark indicates the driver state.

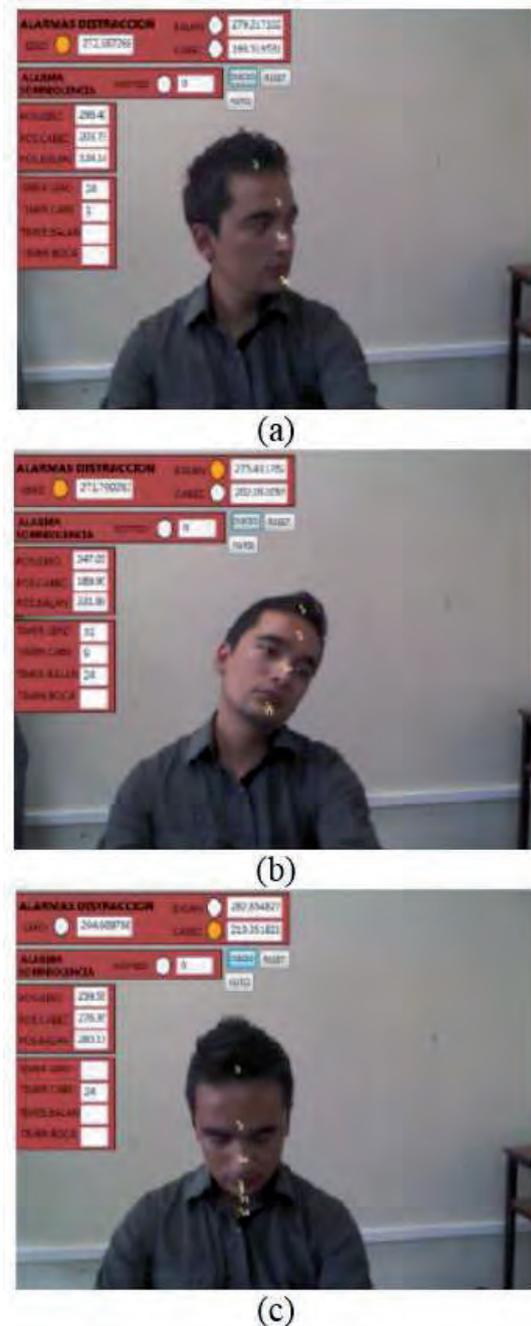


Figure 9: Results of the face orientation analysis: roll (a), scroll (b) and pitch (c). The yellow mark indicates the orientation type.

the unique ability to see in 3D. The Kinect sensor transmits distance values; instead of a typical camera which transmits information of color pixels.

Also, Kinetic sensor contains the CANDIDE model which is a face representation. CANDIDE is a parameterized face mask specifically developed for models based on coding human faces in 3-N vector. Its little number of polygons (around 100) allows fast reconstruction with small computer power. Fig. 5 depicts this parametric model and the coordinate system. The coordinate system has its origin in the optical center of the camera from which the 3D tracking is possible. This model is controlled by global and local action units (GAU and LAU). The GAUs correspond to rotations around three axes. The LAUs control the face movements which can be used to determine different facial expressions.

The model is represented through

$$g(\sigma, \alpha) = \bar{g} + S\sigma + A\alpha \quad (2)$$

where the vector g contains the new coordinates (x,y,z) , S and A are the shape and animations units, and σ and α are the shape and animation parameters.

Adding the rotation, translation and scale to capture the global motion, the model is:

$$g = Rs(\bar{g} + S\sigma + A\alpha) + T \quad (3)$$

where $R = (r_x, r_y, r_z)$ and $T = (t_x, t_y, t_z)$ are the rotation and translation vectors, and s is the scale parameter.

Thus, the geometry of the model is parameterized by

$$p = (\nu, \sigma, \alpha) = (r_x, r_y, r_z, s, t_x, t_y, t_z, \sigma, \alpha) \quad (4)$$

where ν is the vector of global motion parameters.

However, the positions of the mouth and the eyes generated by the CANDIDE model are very unrealistic. To correct these drawbacks, this system adds new vertices that improve the distraction index significantly. Fig. 6 presents these vertices along the vertical axes of the face. To keep the information of the coordinate system on the same scale, a calibration process is performed prior to the operation of the system.

Using this information, the system computes a distraction index, based on the pitch, scroll and roll orientations (see Fig 7).

Drowsiness index

The first symptom of sleepiness is yawning [21]; this was taken as an activation event for the alarm in the algorithm.

When the system detects a driver yawning, it considers that the unit involved in the action of the mouth opening and the time that it was opened.

If the magnitude of the mouth opening is greater than or equal to the average magnitude of yawn the alarm can be activated. The second condition would be the time that the user remains with their mouths open. If this is longer than three seconds, it would be considered yawn, leading to drowsiness alarm activation.

Position	Time (sec.)	Alarm 1	Alarm 2
Pitch	2	Origen +15Y	Origen -15Y
Scroll	2	Origen +50Z	Origen -50Z
Roll	2	Origen +18X	Origen -18X
Drowsiness	3	> 0.3	

Table 1: System parameters for alarm issue.

Experimental results

The experiments have been developed in two scenarios, such as mentioned above. In both cases, the system processes 12 images per second, which is near real time. If the system detects symptoms of distraction or drowsiness then a sound alarm is activated. Table 1 presents the parameters of the system, which were obtained experimentally. Fig. 8 presents an example (roll and yawning) of this system over a vehicle in real driving conditions around the university.

As a final point, Fig. 9 shows an extended example of the three driver's states; this experiment has been developed in our simulator, in laboratory conditions.

Conclusions

Computer vision, Artificial Intelligence and TOF are the technologies that had been used to build a non-intrusive device. This device estimates the driver distraction by analyzing the face orientation (roll, pitch and scroll). Also, it computes an index, for drowsiness, by analyzing the mouth state.

Additionally, this research had developed a system to improve driving safety which does not require any subject-specific calibration and is robust to fast movements and wide head rotations. Finally, it works in real time during the day under real driving conditions.

Acknowledgment

This work was supported partially by the Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE through the Research Project 2012-PIT-003.

References

- [1] Bergasa, L.; Nuevo, J.; Sotelo, M.; Vazquez, M. 2004. "Real Time System for Monitoring Driver Vigilance". *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*.
- [2] Brandt, T.; Stemmer, R.; Mertsching, B.; Rakotomirainy, A. 2004. "Affordable Visual Driver Monitoring System for Fatigue and Monotony". *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 7:6451–6456.
- [3] Friedrichs, F.; Yang, B. 2010. "Camera-based drowsiness reference for driver state classification under real driving conditions". *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 4.
- [4] Ji, Q.; Yang, X. 2002. "Real-Time Eye, Gaze, and Face Pose Tracking for Monitoring Driver Vigilance". *Real Time Imaging, Elsevier Science Ltd*, 8:357–377.
- [5] NHTSA. 1998. "Evaluation of techniques for ocular measurement as an index of fatigue and the basis for alertness management". *Final report DOT HS 808762, National Highway Traffic Safety Administration, Virginia 22161, USA*.
- [6] Wang, Q.; Yang, J.; Ren, M.; Zheng, Y. 2006. "Driver Fatigue Detection: A Survey". *IEEE Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control*, 2:8587–8591.
- [7] El Comercio. 2010. "El arrollamiento de 31 personas se juzga desde ayer". http://www4.elcomercio.com/Judicial/el_arrollamiento_de_31_personas_se_juzga_desde_ayer.aspx.
- [8] El Comercio. 2010. "Los peatones y los conductores no respetan los semáforos". <http://www.elcomercio.com/2010-08-26/Noticias/Quito/Noticia-Principal/EC100826P13SEMAFOROS.aspx>.
- [9] Secretaría General de la Comunidad Andina. 2011. "Accidentes de tránsito en la Comunidad Andina 2010". http://estadisticas.comunidadandina.org/eportal/contenidos/1624_8.pdf.
- [10] Armingol, J.; de la Escalera, A.; Hilario, C.; Collado, J.; Carrasco, J.; Flores, M.; Pastor, J.; Rodríguez, F. 2007. "IVVI: Intelligent Vehicle based on Visual Information". *Robotics and Autonomous Systems*, 55(12):904–916.
- [11] Sabet, M.; Zoroofi, R.; Sadeghniaat-Haghighi, K.; Sabaghian, M. 2012. "A new system for driver drowsiness and distraction detection". *Conference on Electrical Engineering (ICEE)*: 1247–1251.
- [12] Microsoft. 2014. "Kinetic". <http://www.xbox.com/kinect>.
- [13] La Hora. 2013. "Ecuador es el segundo país en muertes por accidentes de tránsito". <http://www.lahora.com.ec/index.php/noticias/show/1101523310#.UnJwOhCtXMs>.
- [14] Yekhshatyan, L.; Lee, J. 2013. "Changes in the Correlation Between Eye and Steering Movements Indicate Driver Distraction". *IEEE Transactions on Intelligent Transport Systems*, 14(1):136–145.
- [15] Flores, M.; Armingol, J.; Escalera, A. 2011. "Driver drowsiness detection system under infrared illumination for an intelligent vehicle". *Intelligent Transport Systems, IET*, 5(4):241–251.
- [16] Gallahan, S.; Golzar, G.; Jain, A.; Samay, A.; Trerotola, T.; Weisskopf, J.; Lau, N. 2013. "Detecting and mitigating driver distraction with motion capture technology: Distracted driving warning system". *IEEE Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS)*: 76–81.
- [17] Agencia Nacional de Tránsito. 2013. <http://www.ant.gob.ec/>.

- [18] Azman, A.; Meng, Q.; Edirisinghe, E. 2010. "Non intrusive physiological measurement for driver cognitive distraction detection: Eye and mouth movements". *IEEE International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE)*, 3:595–599.
- [19] Khoshelham, K.; Oude Elberink, S. 2012. "Accuracy and Resolution of Kinect Depth Data for Indoor Mapping Applications". *Sensors 2012*: 1437–1454.
- [20] Webb, J.; Ashley, J. 2012. "Beginning Kinect programming with the Microsoft Kinect SDK". *Friends of Apress*.
- [21] Abtahi, S.; Hariri, B.; Shirmohammadi, S. 2011. "Driver drowsiness monitoring based on yawning detection". *IEEE Conference on Instrumentation and Measurement Technology (I2MTC)*: 1–4.

Motion control of a robotic arm from a computer using free control software and wireless communication with XBEE modules

Control de los movimientos de un brazo robótico desde un computador utilizando software libre de control y comunicación inalámbrica con módulos X-BEE

C. Vélez^{1*}, F. Orosco¹, M. A. Álvarez²

¹Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación. Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL).
Campus Gustavo Galindo, Km. 30.5 Vía Perimetral.

²Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación, Centro de Visión y Robótica. Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL). Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 Vía Perimetral Guayaquil, Ecuador.

*Autor principal/Corresponding author, e-mail: cavelez@espol.edu.ec

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

Recibido/Received: 27/01/2014. Aceptado/Accepted: 20/03/2014.

Publicado en línea/Published on Web: 19/12/2014. Impreso/Printed: 19/12/2014.

Abstract

This document demonstrates the control of a robotic arm wirelessly by using free software. For this, an operator (user) will be the one giving the orders and actions to be taken, using a computer through various input devices and XBEE modules that are part of our communication channel. The fact that the system includes wireless communication allows distancing the operator from the robot arm and thus can reduce risk when working in addition a large number of wires that may hinder or impede the development of any activity is eliminated. The system has several options for handling the mechanical arm which has developed a free software interface that would maximize all basic input devices of the computer. The software in question is the Processing program which allows the arm to be controlled by keyboard, mouse or even using motion detection through a webcam, and to employ USB output port to transmit data through the modules XBEE. Finally have to say that the results obtained in a complete system prototype robotic arm can serve as a basis for developing several applications including, for example, remote rovers.

Keywords. Processing, robotic arm, wireless communication

Resumen

El presente trabajo muestra el control de un brazo robótico de forma inalámbrica usando software libre. Para esto un operador (usuario) será quien dé las órdenes y acciones a realizar, haciendo uso de un ordenador a través de los diferentes dispositivos de entrada y los módulos XBEE que forman parte de nuestro canal de comunicación. El hecho que el sistema incluya comunicación inalámbrica permite distanciar al operador del brazo robótico y de esta manera se pueda reducir el riesgo al momento de trabajar, además que se elimina una gran cantidad de cables que pueden obstaculizar o dificultar el desarrollo de cualquier actividad.

El sistema tiene varias opciones de manipulación del brazo mecánico para lo cual se ha desarrollado una interfaz en software libre que permita aprovechar al máximo todos los dispositivos de entrada básicos del computador. El software en mención es el programa Processing que permite que el brazo sea controlado por el teclado, el mouse o incluso usando detección de movimiento a través de una cámara web, y emplear un puerto USB como salida para la transmisión de datos a través de los módulos XBEE.

Finalmente queda decir que los resultados del sistema completo obtenidos en un brazo robótico de prototipo pueden servir como base para el desarrollo de varias aplicaciones entre ellas, por ejemplo, telecontrol de robots exploradores.

Palabras Clave. Procesamiento, brazo robótico, comunicación inalámbrica.

Introducción

Los robots telemanipuladores fueron los primeros o progenitores de todos los robots. Desarrollados en un inicio

con transmisión mecánica, el avance de la electrónica y el conocimiento de la teoría de servocontrol permitieron reemplazar la transmisión mecánica por eléctrica y al mismo tiempo consiguiendo mejorar en aspectos

de precisión y control a los robots que empezaron a ser usados tanto en la industria nuclear como la industria submarina o la industria espacial [1].

Los robots manipuladores o brazos robóticos se los puede clasificar según su tipo o uso. Existen brazos robóticos de tipo industrial, tipo comercial y los de diseño propio. Aquellos brazos comprendidos dentro del uso industrial como PUMA o SCARA son elaborados en una arquitectura cerrada y la mayoría de veces programados en su propio entorno de programación, por lo que los costos son elevados. Los brazos que se encuentran dentro del uso comercial como LEGO MINDSTORMS o MECANO son de arquitectura abierta y son muy utilizados en investigación. Por último los pertenecientes al grupo de diseño propio suelen ser también de arquitectura cerrada, de ambiente de programación limitado pero de un reducido costo. Todo lo mencionado se puede resumir en la Tabla 1.

Cuando se trabaja con robots, en especial con brazos robóticos, resulta de mucha importancia y ayuda poder saber o conocer que movimientos debe realizar cada articulación del robot para que el mismo pueda llegar a ubicarse en una posición específica. Una herramienta que permite determinar los movimientos de las articulaciones es el modelo cinemático de un robot.

La cinemática estudia el movimiento del robot con respecto a un sistema de referencia. Existen dos problemas fundamentales a resolver en la cinemática del robot: el primero se conoce como el problema cinemático directo, consiste en determinar cuál es la posición y orientación del extremo final del robot con respecto a un sistema de coordenadas que se toma como referencia (los valores de las articulaciones y los parámetros geométricos de los elementos del robot son conocidos); el segundo, denominado problema cinemático inverso, resuelve la configuración que debe adoptar el robot para una posición y orientación del extremo conocidas.

Cinemática Inversa

El objetivo del problema cinemático inverso consiste en encontrar los valores que deben adoptar las coordenadas articulares del robot para que su extremo se posicione y oriente según una determinada localización espacial [1].

A pesar que el problema cinemático inverso tiene algunas desventajas frente al método cinemático directo, la mayor parte de los robots poseen cinemáticas relativamente simples que facilitan en cierta medida la resolución de un problema cinemático inverso. Por ejemplo, si

Tipo de robot	Tipo industrial	Tipo comercial	Diseño propio
Ejemplos	PUMA	MECANO	Material reciclado
Costo	Alto	Medio	Bajo
Arquitectura abierta	No	Si	No
Programación robusta	No	Si	No
Mantenimiento	Alto costo	Bajo costo	Bajo costo

Tabla 1: Clasificación de robots manipuladores [2].

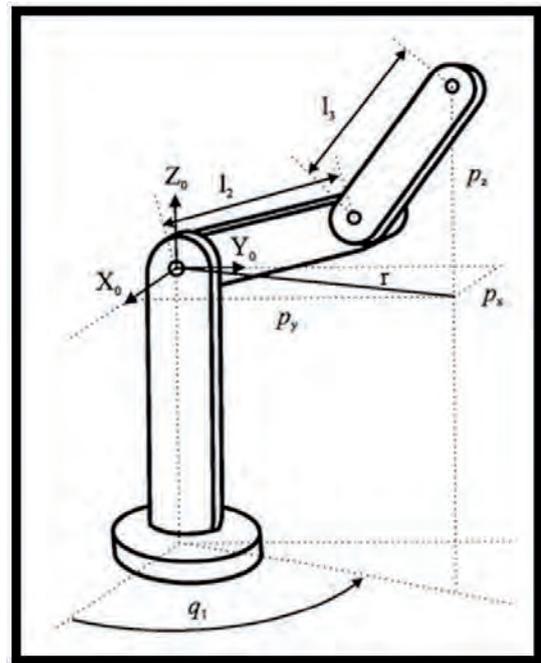


Figura 1: Robot Articular de 3 GDL [4].

se consideran solo los 3 primeros grados de libertad de muchos robots, estos tienen una estructura planar. Esta circunstancia facilita la resolución del problema.

Los métodos geométricos permiten obtener normalmente los valores de las primeras variables articulares que son las que consiguen posicionar el robot. Para ello utilizan relaciones trigonométricas y geométricas sobre los elementos del robot.

Resolución del Problema Cinemático Inverso por Métodos Geométricos

Este procedimiento es adecuado para robots de pocos grados de libertad o para el caso de que se consideran sólo los primeros grados de libertad, dedicados a posicionar el extremo, como el mostrado en la Figura 1.

El valor de q_1 (ángulo a girar la primera articulación del brazo) se obtiene:

$$q_1 = \arctg \left(\frac{p_y}{p_x} \right) \tag{1}$$

donde p_x y p_y son las coordenadas en el eje X y Y de la posición en la cual se quiere ubicar el extremo del brazo.

Considerando que los siguientes elementos se encuentran contenidos en un plano y utilizando el teorema del coseno:

$$p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 = l_2^2 + l_3^2 + 2l_2l_3 \cos q_3 \tag{2}$$

$$\cos q_3 = \frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2l_3} \tag{3}$$

donde p_z es la coordenada en el eje Z de la posición a ubicar el extremo, q_3 es el ángulo a girar la tercera articulación del brazo, l_2 y l_3 son las longitudes del segundo y tercer elemento del brazo, respectivamente.

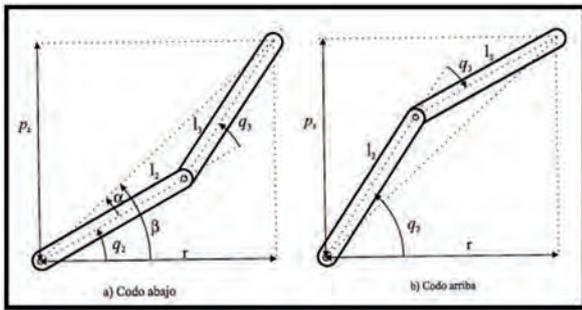


Figura 2: Elementos 2 y 3 del robot de la Figura 1 contenidos en un plano. a) Configuración codo abajo. b) Configuración codo arriba [4].

Esta expresión permite obtener q_3 en función del vector de posición del extremo p . No obstante, y por motivos de ventaja computacional, es más conveniente utilizar la expresión de la arcotangente en lugar del arcoseno.

Puesto que:

$$\sin q_3 = \pm \sqrt{1 - \cos^2 q_3} \tag{4}$$

se tendrá:

$$q_3 = \arctg \left(\frac{\pm \sqrt{1 - \cos^2 q_3}}{\cos q_3} \right) \tag{5}$$

El signo de la solución de la expresión anterior corresponde a la configuración de codo arriba como en la Figura 2a o codo abajo como en 2b.

El cálculo de q_2 (ángulo a girar la segunda articulación del brazo) se hace a partir de la diferencia entre β (ángulo medido entre el plano XY y la ubicación deseada del extremo del brazo) y α (ángulo medido entre la posición del segundo elemento del brazo y la ubicación deseada del extremo del brazo robótico):

$$q_2 = \beta - \alpha \tag{6}$$

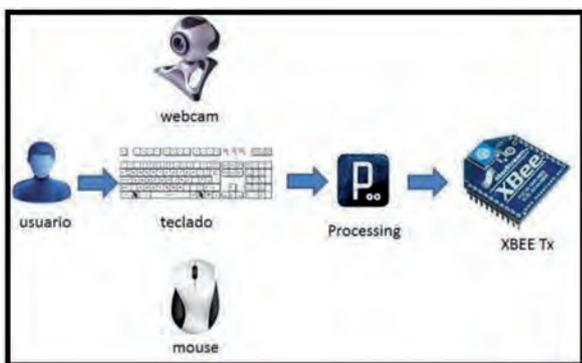


Figura 3: Proceso de generación de instrucciones y envío de la información.



Figura 4: Proceso de recepción de instrucciones y ejecución por parte del brazo robótico.

siendo:

$$\beta = \arctg \left(\frac{p_x}{\pm \sqrt{p_x^2 + p_y^2}} \right) \tag{7}$$

$$\alpha = \arctg \left(\frac{l_3 \sin q_3}{l_2 + l_3 \cos q_3} \right) \tag{8}$$

finalmente:

$$q_2 = \arctg \left(\frac{p_x}{\pm \sqrt{p_x^2 + p_y^2}} \right) - \arctg \left(\frac{l_3 \sin q_3}{l_2 + l_3 \cos q_3} \right) \tag{9}$$

Materiales

El presente trabajo se coloca dentro del grupo de diseño propio donde a pesar de tener una arquitectura cerrada, presenta la ventaja que su programación no es limitada. De hecho por contar con un software libre las interfaces con las cuales se puede manipular al brazo robótico son extensas debido a que las funciones se encuentran implementadas en librerías y al usar software libre es posible programar funciones.

La mayoría de brazos robóticos que existen son manipulados por una unidad de procesamiento robusta como suele ser un computador pero con el limitante que la conexión entre brazo y computador requiere de cables. El proyecto realiza la comunicación del brazo y el computador de manera inalámbrica permitiendo así alejar al operario de una estación de trabajo y ponerlo a mayor distancia de la operación del brazo.

El brazo robótico que se utiliza en el proyecto es un brazo de 4GL (4 Grados de Libertad) elaborado con madera y siguiendo el modelo o estructura en [6]. Dentro de la fabricación del brazo se utiliza servomotores de modelismo (HITEC HS-311), ya que ofrecen la suficiente potencia para los movimientos del brazo y simplifica la operación.

Para el control del brazo se emplea una interfaz desarrollada en el programa PROCESSING que es un software libre. Este programa basado en JAVA cuenta con librerías para comunicación serial y periféricos como el teclado, mouse y cámara web que son el principal uso en el proyecto. La computadora, portátil o de escritorio, debe contar con los periféricos requeridos para la manipulación del brazo.

La comunicación inalámbrica se la realiza por medio de los módulos XBEE que cuentan con el protocolo ZigBee embebido. Estos módulos resultan adecuados para el proyecto porque las instrucciones a enviar no son tramas demasiado largas y la velocidad máxima de 256kbps en la que trabajan son suficientes para la aplicación; además entre otras características destacan: el alcance que ofrecen (100 m en lugares con línea de vista), bajo consumo (menor a 50mA), potentes y precio accesible, convirtiendo de esta manera a los xbee en la

Tecla	Articulación afectada	Movimiento	Servomotor
Y	Hombro	Hacia Arriba	2
B	Hombro	Hacia Abajo	2
G	Pinza	Abrir	4
H	Pinza	Cerrar	4
F	Eje de Rotación	De izquierda a derecha	1
J	Eje de Rotación	De derecha a izquierda	1
T	Codo	Hacia Arriba	3
V	Codo	Hacia Abajo	3

Tabla 2: Funcionamiento brazo robótico.

primera opción a considerar para este tipo de aplicación. La comunicación es punto a punto entre la estación de control (computador) y la estación remota que controla el brazo robótico por medio de un microcontrolador como unidad de procesamiento de las órdenes recibidas.

Las Figuras 3 y 4 describen el esquema de comunicación implementado.

Método

La interfaz gráfica permite operar el brazo robótico con la opción de mouse/teclado o la opción de reconocimiento de movimientos frente a la cámara web. De acuerdo a la opción de movimiento, el funcionamiento del brazo responde a la Tabla 2.

Interfaz Gráfica del Proyecto

Processing es un lenguaje de programación de código abierto basado en JAVA y orientado a los usuarios que desean crear imágenes, animaciones, interfaces e interacciones con diferentes medios o periféricos [3].

¿Por qué usar Processing y no otros lenguajes de programación?

La respuesta viene dada por el gran número de librerías que tiene implementadas; si bien es cierto hay muchos

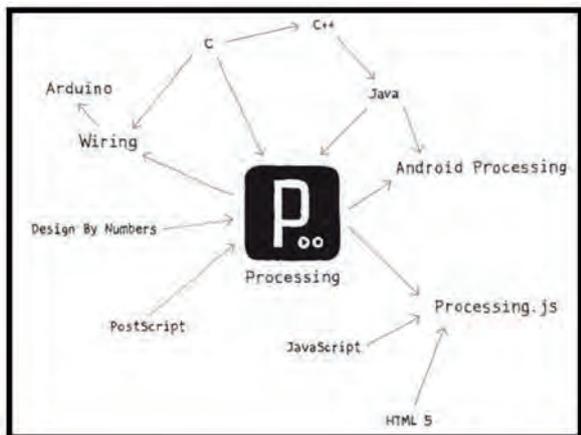


Figura 5: Comparación entre Processing y otros lenguajes de programación [5].

programas que nos proveen opciones similares, Processing tiene la ventaja de ser código abierto, lo que permite modificar las implementaciones ya existentes, además que provee toda capacidad para manipular cualquier dispositivo que se pueda conectar vía USB. Una de las cualidades más interesantes es la portabilidad que ofrece y la facilidad para mover los recursos, pues no se necesita instalar el software y provee compatibilidad entre los sistemas operativos. En la Figura 5 se muestra la comparación entre distintos lenguajes de programación.

Para la creación del proyecto se maneja varias funciones que permiten al usuario manipular de forma exitosa periféricos como mouse, teclado, cámara web y módulos X-BEE.

En la manipulación por mouse, se tiene la función **mousePressed**, la cual indica si en algún momento se ha presionado el mouse (click), retorna un valor booleano que de ser verdadero será true (1) caso contrario false (0). Adicionalmente se usa las funciones **mouseX** y **mouseY**, las cuales nos dan las coordenadas en X y Y de la posición actual del cursor y que son de gran importancia para saber sobre qué cuadrante se encuentra el operario y qué acción debe tomar el robot.

En la manipulación por teclado, se aprovecha la función **Key**, la cual almacena la tecla que el usuario presiona y retorna su código ASCII. Hay varias letras para poder controlar el movimiento del servo-motor como se detalla en la Tabla 2.

Con respecto a la cámara web se efectúa un barrido de imágenes para detectar el movimiento, de la misma forma el programa sondea el cuadrante en donde existe el movimiento y en función de eso el brazo robótico realiza una acción. Para cubrir con este propósito la función **ABlob ab = (ABlob)flob.getABlob(i)** adquiere, utilizando la detección de movimiento combinado con el barrido de imágenes, la posición en que ocurrió el movimiento y la función **image(flob.getSourceImage(), 0, 0, width, height)**, permite mostrar en pantalla la imagen capturada por la cámara web (movimientos del operario).

Las 3 acciones anteriores se ayudan de posiciones o cuadrantes para determinar la acción a tomar. Es importante mencionar que según sea el caso lo que se transmite son letras (en código ASCII) a través de un puerto USB al cual está conectado el Xbee. Para la transmisión de los comando de acción se usa 4 funciones importantes: **println(Serial.list())**, **String portName = Serial.list()** [5], **myPort = new Serial(this, portName,**

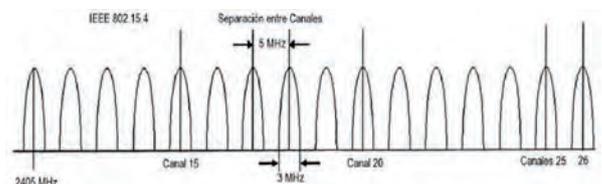


Figura 6: Canales disponibles para el protocolo IEEE 802.15.4 [?].

Canal	Hexadecimal	Frecuencia [GHz]			Comando AT
		Inferior	Central	Superior	
11	0x0B	2,4025	2,4050	2,4075	ATCH0B
12	0x0C	2,4075	2,4100	2,4125	ATCH0C
13	0x0D	2,4125	2,4150	2,4175	ATCH0D
14	0x0E	2,4175	2,4200	2,4225	ATCH0E
15	0x0F	2,4225	2,4250	2,4275	ATCH0F
16	0x10	2,4275	2,4300	2,4325	ATCH10
17	0x11	2,4325	2,4350	2,4375	ATCH11
18	0x12	2,4375	2,4400	2,4425	ATCH12
19	0x13	2,4425	2,4450	2,4475	ATCH13
20	0x14	2,4475	2,4500	2,4525	ATCH14
21	0x15	2,4525	2,4550	2,4575	ATCH15
22	0x16	2,4575	2,4600	2,4625	ATCH16
23	0x17	2,4625	2,4650	2,4675	ATCH17
24	0x18	2,4675	2,4700	2,4725	ATCH18
25	0x19	2,4725	2,4750	2,4775	ATCH19
26	0x1A	2,4775	2,4800	2,4825	ATCH1A

Frecuencia Base 2,405 GHz

Tabla 3: Canales de frecuencia y su respectivo comando AT [5].

9600) y `myPort.write('A')` [4]. La primera permite enlistar los puertos que hay disponibles para establecer la comunicación, la segunda le asigna a una variable el puerto que se desea utilizar, la siguiente establece la comunicación indicándole la velocidad a la que desea transmitir y con la última función se especifica que se va a transmitir.

Comunicación Inalámbrica

Los módulos empleados son los Xbee que tienen embebido en sí el protocolo ZigBee 802.15.4, estándar que define un conjunto de protocolos para la configuración de redes inalámbricas de corta distancia y baja velocidad de datos. Opera en las bandas de 868 MHz, 915 MHz y 2.4 GHz, y puede transferir datos hasta 250Kbps.

Si bien al igual que ZigBee hay otros estándares que se pueden usar en redes de corto alcance tales como el 802.11 y Bluetooth. ZigBee es un estándar ampliamente utilizado para implementar redes de sensores y actuadores que deban operar a batería.

Para el proyecto se emplea los módulos en su modo de operación transparente. En este modo la información que se recibe por el pin Data In se guarda en el buffer de entrada, se la integra a un paquete RF y se transmite. Para el proyecto se selecciona transmitir a una tasa de 9600 baudios que es la velocidad por defecto del

módulo Xbee. En la sección de Resultados se detalla la configuración del hardware.

En la Figura 6 y la Tabla 3 se muestran todos los posibles canales de comunicación del módulo y entre los cuales se debe escoger uno de ellos al configurar los módulos. El seleccionar un canal que esté libre de interferencia permite que la comunicación entre la estación de control y la estación remota sea confiable.

Brazo Robótico

En la fabricación del brazo robótico se usa servomotores de modelismo en cada uno de los 4 grados de libertad. Debido a que los servomotores funcionan con una señal PWM específica, es necesario contar con una señal para cada motor. El cerebro del brazo será un microcontrolador PIC16F887. Este microcontrolador cuenta con 2 fuentes de señal PWM, al no ser suficientes, se emplea las fuentes de señal y se genera la señal PWM que se ajuste a las necesidades del proyecto dentro del microcontrolador. En 4 pines del PIC se coloca la señal PWM para cada uno de los motores.

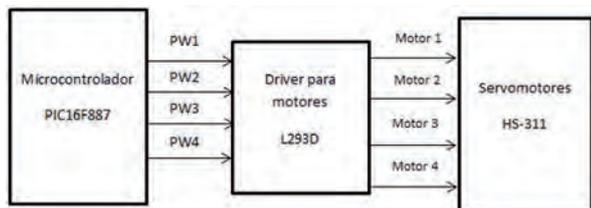


Figura 7: Electrónica empleada entre PIC y motores.

Número de Ejes	4 Incluyendo la pinza
Motores	Servomotores HS-311
Control de los servos	PWM
Altura en reposo	150 mm
Altura máxima	250 mm
Alcance medio	100 mm
Apertura de la pinza	25 mm
Peso sin baterías	300 gramos
Rango de giro por eje	180 °
Precisión en cada eje	5 °
Tensión de los servos	5V nominal
Consumo en reposo	8 mA cada servo.
Consumo en movimiento	200 mA cada servo

Tabla 4: Detalle técnico del brazo robótico.

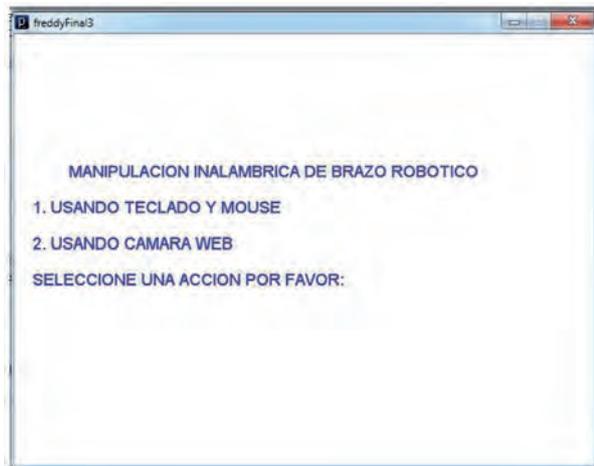


Figura 8: Menú principal de la aplicación.

La generación de las señales PWM se lo hace colocando en nivel alto el pin y luego de un tiempo pasar a nivel bajo que durará un tiempo específico. El tiempo que permanezca en nivel alto el pin dependerá de las instrucciones que reciba el microcontrolador por medio del Xbee. Según la instrucción receptada se aumentará o disminuirá el tiempo en alto de la señal. Esta misma operación se repite en los 4 servomotores, es decir, se requiere de 8 comandos distintos para operar los 4 motores.

Debido a la corriente que consume cada servomotor en funcionamiento, resulta imposible conectar directamente el servomotor a los pines del microcontrolador, motivo por el cual se colocó una etapa de potencia intermedia. Esta etapa son puentes H para cada motor. Se utilizó el L293D, ya que este integrado está conformado por 4 puentes H y es la cantidad que se requiere para los motores. La Figura 7 muestra un diagrama de bloques representando al microcontrolador, puentes H y servomotores con las señales respectivas para cada motor.

Resultados y Discusión

Usando las funciones especificadas en la parte de la explicación del programa Processing en la sección de Mé-

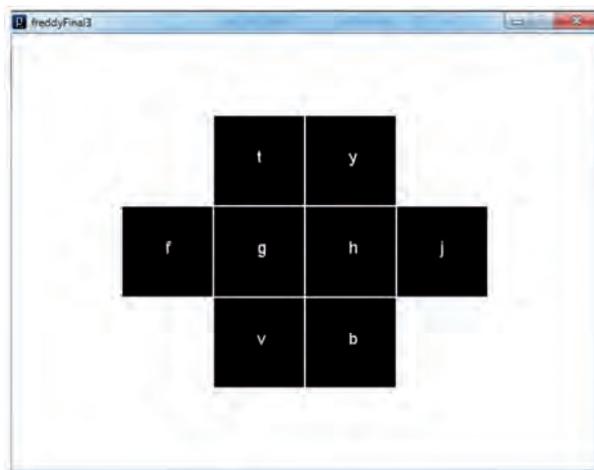


Figura 9: Interfaz cuando se ingresa a la opción de manipulación por teclado o mouse.

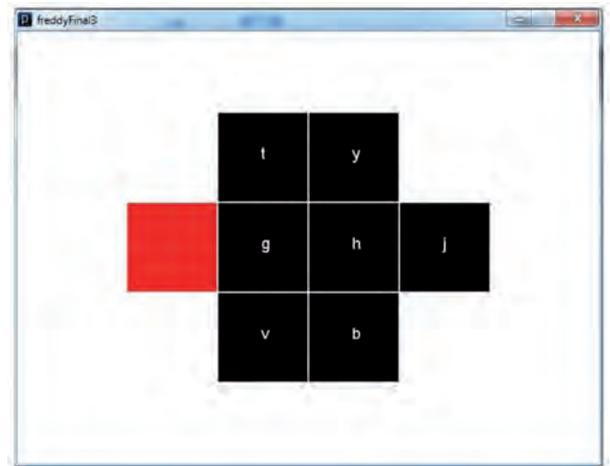


Figura 10: Cambio de color para indicar al usuario que letra se ha presionado.

todo junto con funciones que permiten modificar la estética de la interfaz se obtiene la aplicación de la Figura 8.

Si el usuario presiona la primera opción, el programa desplegará una nueva interfaz tal como se muestra en la Figura 9. Desde aquí el usuario puede presionar la tecla que se indica en la pantalla desde el teclado, o puede dirigir al mouse sobre la cuadrícula correspondiente y darle un click.

Cuando se ingrese alguna letra, ya sea por presionar con el mouse o porque se presionó en el teclado podremos observar cómo se realiza un cambio de color para que el usuario identifique que letra se va a enviar, como se ejemplifica en la Figura 10.

Sin embargo, si la opción que seleccionó el usuario en el menú principal fue la alternativa 2, se muestra una interfaz cuya imagen está determinada por la captura de la cámara en tiempo real, con la adición de cuadrículas para saber hacia dónde dirigir nuestra mano y el robot responda realizando los mismos movimientos, como en la Figura 11.

Si el usuario se encuentra dentro de alguna de las opciones del programa y desea regresar al menú principal



Figura 11: Interfaz para la manipulación por cámara web.

Velocidad de transmisión (baudios)	Tiempo de respuesta usando mouse o teclado (ms)	Tiempo de respuesta usando webcam (ms)
1200	3.8	5.5
2400	3.1	5.3
4800	2.3	3.9
9600	1.5	2.4
19200	<1	1.3

Tabla 5: Tiempos de respuesta al enviar instrucciones.

	Ángulo deseado	Ángulo obtenido	% Diferencia
Mouse o teclado	25°	20-22°	80 - 88 %
	45°	38-41°	84 - 91 %
Webcam	25°	18-20°	72 - 80 %
	45°	36-40°	80 - 88 %

Tabla 6: Comparación entre valores de ángulos esperados y obtenidos.

bastará con presionar alguna tecla distinta de las que se usa para enviar instrucciones al robot en el caso de la interfaz 1, y en el caso de la interfaz 2 puede ser cualquier tecla.

Como se definió en la Tabla 2, cada par de letras controla los movimientos de un motor, una letra provoca que el motor gire en sentido contrario a las manecillas del reloj mientras que otra letra hace que el motor gire en sentido horario.

Conforme se envían las letras “F”, “T”, “G” y “V”, puede observarse que la señal PWM correspondiente empieza a disminuir su ancho de pulso hasta llegar a un valor mínimo de 1ms de tiempo en alto (TA), expresado en (10), que permitirá al servomotor colocarse en su posición más extrema hacia la izquierda. En la Figura 12 se muestra la señal PWM especificada.

$$TA \cong 1ms + (2 * 0) us = 1ms + (2 * (0)) us = 1ms + 0us = 1ms \tag{10}$$

Si selecciona las letras “J”, “Y”, “H” y “B” se puede ver como el ancho de la señal PWM aumenta hasta llegar a un valor máximo de aproximadamente 2ms de TA,

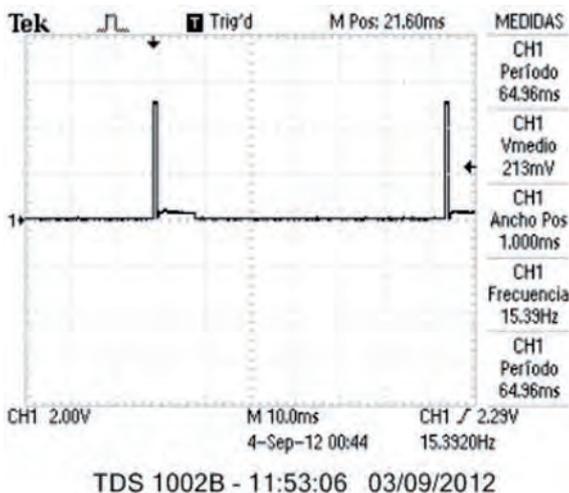


Figura 12: Gráfica de señal PWM para uno de los servomotores con ancho de pulso de 1ms.

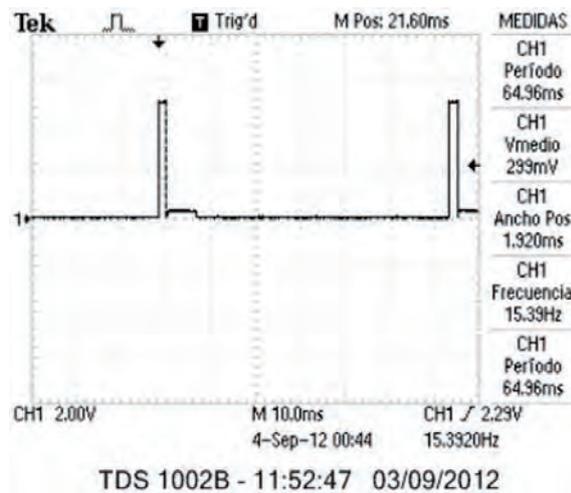


Figura 13: Gráfica de señal PWM para uno de los servomotores con ancho de pulso de 2ms.

expresado en (11), el servomotor tomará como referencia para ubicarse en su posición más extrema hacia la derecha. En la Figura 13 se muestra la señal PWM especificada.

$$TA \cong 1ms + (8 * (100)) us = 1ms + 800us = 1ms + 0,8ms = 1,8ms \tag{11}$$

Para poder seleccionar la tasa de baudios a transmitir se realizan pruebas a distintas velocidades permitiendo medir el tiempo de respuesta entre el envío de la instrucción y la reacción del lado de recepción ante la señal enviada. En la Tabla 5 se muestran los resultados de estas pruebas.

Al revisar los resultados de las pruebas se optó por transmitir a una tasa de 9600 baudios porque ofrecen tiempos pequeños de respuesta, aunque si se desea mejorar o disminuir estos tiempos se puede aumentar la velocidad siempre y cuando los elementos y las configuraciones así lo permitan. En este proyecto el microcontrolador sólo se podía configurar hasta un máximo de 19200 baudios.

Un factor que incidió en la precisión de los movimientos del brazo robótico cuando se empleó la opción de la cámara web fue el computador utilizado. Siempre el procesamiento de imágenes requiere de muchos recursos y el computador utilizado no poseía características óptimas para estas funciones, por ello se tuvo que disminuir la resolución de la pantalla teniendo como consecuencia que los movimientos no fueran tan precisos como podían ser cuando se ejecutaba instrucciones con el teclado o mouse. En la Tabla 6 se presentan las diferencias entre las posiciones a las cuales se deseaba ubicar alguno de los motores y la posición final conseguida.

Es claro que cuando se emplea la cámara web se obtuvo menos precisión en los movimientos como consecuencia del procesamiento de las imágenes, sin embargo se aprecia que el hecho de emplear las funciones del mouse o teclado tampoco permitieron llegar al 100 % de precisión.

Otro factor que influyó en ambas opciones, tanto en operación con webcam como con teclado, fue el diseño del robot. El prototipo desarrollado tenía un sistema de poleas para cada articulación o grado de libertad y al momento de los movimientos que realizaba el brazo las cuerdas obstaculizaban el correcto posicionamiento de los motores en muchas ocasiones viéndose reflejado en la precisión de los movimientos.

Conclusiones

Este trabajo puede ser la base del desarrollo de muchas aplicaciones futuras en cualquier ámbito de la ingeniería en donde se requiera la detección de movimiento, creación de interfaces inteligentes en donde el usuario necesite interactuar con dispositivos remotos.

Los módulos por defecto traen la configuración en el canal "OX0C" pero al encontrar fuentes de interferencia se debe modificar este parámetro hacia otros canales probando si se elimina la interferencia y por tanto quedar en el canal donde se recibe las instrucciones sin problemas y garantizar la confiabilidad en la comunicación.

El diseño del brazo robótico debe ser escogido con la precaución que permita libertad de movimientos además no se dañe ningún componente, en especial los motores, durante la operación. El prototipo empleado tuvo inconvenientes en su diseño y por este motivo se vio comprometida la exactitud, a pesar de aquello, tomando como base los resultados en la Tabla 6 se obtuvo que con teclado o mouse los movimientos del brazo correspondían a un 80-90 % de precisión y con la cámara web el porcentaje decaía a un 70-80 %, que sin embargo sigue siendo un buen resultado.

El presente proyecto ha sido diseñado para poder realizar comunicación inalámbrica desde el computador hacia el controlador con ayuda de módulos Xbee que implementan el protocolo ZigBee. La versión de módulos empleados en el proyecto fue la versión 1. Dicha versión sólo permite crear una conexión punto a punto. La siguiente versión de estos módulos, versión 2, permite conformar una red de sensores en la cual podemos realizar comunicación de tipo broadcast y multicast entre varios dispositivos, o en nuestro caso particular ejercer el control sobre distintos brazos robóticos al mismo tiempo.

Referencias

- [1] Barrientos, A.; Balaguer, C.; Aracil, R.; Peñín, L. 2007. "Fundamentos de Robótica". *McGraw-Hill*.
- [2] Martínez, G.; Jáquez, S.; Rivera, J.; Sandoval, R. 2008. "Diseño propio y Construcción de un Brazo Robótico de 5 GDL". *Revista de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación*. ISSN 1870-9532, 4(1).
- [3] Casey, R.; Fry, B. 2010. "Getting Started with Processing". *O'Reilly Media*.
- [4] Tutorial de Processing. www.processing.org/reference/libraries/.
- [5] Guía del usuario XBEE Serie 1. www.olimex.cl/pdf/Wireless/ZigBee/XBee-Guia-Usuario.pdf
- [6] Fabricación de brazo robótico. <https://sites.google.com/site/proyectosroboticos/fabricar-brazo-robot>.

Terrestrial frogs of the Southeastern Andes of Ecuador II: A new species of spiny green *Pristimantis* of montane forests of Sangay National Park (Anura: Craugastoridae)

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)

Mario H. Yáñez-Muñoz^{1,2*}, Patricia Bejarano-Muñoz.¹, Jorge Brito M. ^{1,3}, Diego Batallas R.^{1,3}

¹ Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales, Instituto Nacional de Biodiversidad, División de Herpetología, calle Rumipamba 341 y Av. de los Shyris, Casilla 17-07-8976, Quito, Ecuador.

² Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Museo de Zoología QCAZ, Escuela de Ciencias Biológicas, Casilla Postal 17-01 2154, Quito, Ecuador.

³ Fundación Naturaleza Kakaram, Santa Rosa 158 BL B Dep. 2, Casilla Postal 17-07-9920, Quito, Ecuador.

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

Editado por / Edited by: Diego F. Cisneros-Heredia PhD(c).

Recibido / Received: 15/10/2014. Aceptado / Accepted: 10/11/2014.

Publicado en línea / Published on Web: 19/12/2014. Impreso / Printed: 19/12/2014.

Zoobank: <http://zoobank.org/6C7DEEDD-B3FB-4C8C-8466-5F456FA7F8B1>

Abstract

We describe a new species of spiny green frog of the genus *Pristimantis* diagnosed by having tympanum, cranial crest, large conical tubercles on the posterior and anterior limbs, and by its uniform cream ventral coloration. Bioacoustics information about the warning and courtship calls and detailed comparisons of the new species with similar species from the Andes of Ecuador are provided. The new species is part of a particular ecotype of about 12 species of terrestrial frogs from montane forests in Ecuador grouped into at least four *Pristimantis* paraphyletic groups. The condition of frontoparietal cranial crest with high edges suggests a close relationship of the new species with the *P. devillei* species group.

Keywords. Terrarana, Andes, Ecuador, *Pristimantis roni* sp. nov.

Resumen

Describimos una nueva especie de rana verde espinosa del género *Pristimantis* diagnosticada por presentar tímpano, cresta craneal, tubérculos cónicos grandes en las extremidades posteriores y anteriores y por su coloración ventral crema. Se presenta información acústica sobre los llamados de advertencia y cortejo y comparaciones detalladas de la especie nueva con algunas especies similares de los Andes de Ecuador. La nueva especie forma parte de un particular ecotipo de aproximadamente 12 especies de ranas terrestres de los bosques montanos de Ecuador agrupadas en por lo menos cuatro grupos parafiléticos de *Pristimantis*. La condición de cresta craneal con bordes frontoparietales elevados, sugiere una relación cercana de la nueva especie con el grupo-de-especies *P. devillei*.

Palabras Clave. Terrarana, Andes, Ecuador, *Pristimantis roni* sp. nov.

Introducción

Los bosques montanos circunscritos al área del corredor y parques nacionales Llanganates-Sangay están habitados por una elevada riqueza de ranas terrestres del género *Pristimantis*, el cual concentra a tres cuartas partes de las especies de anfibios de la región [1–4]. Varias exploraciones han identificado que la zona Llanganates-Sangay es un punto de alta biodiversidad en las estribaciones de los Andes de Ecuador y aglutina a un considerable número de especies de anfibios y reptiles endémicos [5–12]. Este artículo presenta la descripción de una nueva especie de *Pristimantis* verde espinosa de los bosques montanos del Parque Nacional Sangay. Por su morfología externa, esta nueva especie es comparada con varias especies que actualmente per-

tenecen a grupos-de-especies —considerados aquí como parafiléticos— de *Pristimantis* de los Andes de Ecuador que exhiben tubérculos cónicos en el cuerpo y coloración dorsal verde.

Materiales y Métodos

La descripción sigue el formato estandarizado propuesto por Lynch y Duellman [16]. La clasificación sistemática de la familia y grupos-de-especies siguen la propuesta de Padial et al. [13]. 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 por características sexuales secundarias (almohadillas nupciales y tamaño) y por inspección directa de



Figura 1. Vista dorsal, ventral y de perfil de *Pristimantis roni* sp. nov., DHMECN 11313, hembra, holotipo. (MYM).

gónadas a través de incisiones dorsales. Se tomó las siguientes medidas siguiendo la metodología propuesta por Duellman y Lehr [17]: distancia órbita-narina (DON), longitud cefálica (LC), ancho cefálico (AC), distancia interorbital (DIO), distancia internarinal (DIN), longitud rostro-cloacal (LRC), longitud de la tibia (LT), longitud del pie (LP), longitud de la mano (LM), diámetro horizontal del tímpano (DT), longitud horizontal del ojo (DO), y ancho del párpado (AP). Las medidas fueron tomadas con un calibrador electrónico con precisión de ± 0.01 mm y redondeadas al 0.1 mm más cercano. Las medidas se reportan como la media \pm la desviación estandar. Se analizó la normalidad del LRC de machos y hembras utilizando el test de Shapiro-Wilks y se contrastaron sus medias con el test paramétrico *t*. Los datos se tabularon y analizaron con el programa *Past* [18]. 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 notas de campo de los colectores tomadas con un GPS. En el texto se hace uso de las siguientes siglas para los créditos fotográficos e información asociada: Diego Batallas R. (DBR), Patricia Bejarano M. (PBM), Raquel Betancourt Y. (RBY), Jorge Brito M. (JBM), Santiago R. Ron (SRR), Eric N. Smith (ENS), Juan P. Reyes (JPR), Juan C. Sánchez (JCS), Verónica Urgilés (VU) y Mario H. Yáñez-Muñoz (MYM). 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).

Los llamados se registraron con una grabadora digital Olympus WS-802 conectada a un sistema modular Sennheiser K6-C y acoplada a un micrófono de cabezal Sennheiser ME 66. La temperatura ambiente fue tomada con un termómetro Digital Pocket Thermometer. Para los análisis acústicos se utilizó el programa Adobe Audition 6.0 a una frecuencia de muestreo de 44.1 kHz y 16 bits de resolución [19], para la diagra-

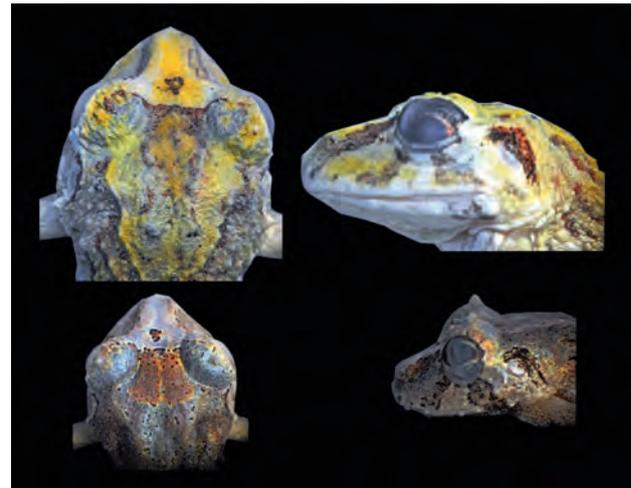


Figura 2. Detalle de la cabeza en vista dorsal, de perfil de *Pristimantis roni* sp. nov.. Parte superior DHMECN 11313, hembra, Holotipo; Parte inferior DHMECN 11314, macho, Paratopotipo. (MYM).

mación del oscilograma y sonograma se utilizó el programa Raven 1.4 [20] a 256 puntos de resolución de la transformación rápida de Fourier (FFT). Grabaciones in situ (especimen DHMECN 11322, temperatura 15.6°C) fueron obtenidas el 20 de junio del 2014 por JBM y DBR. Grabaciones de un macho cautivo (DHMECN 11321, temperatura 16.4°C) fueron registradas en una bolsa plástica luego de que dicho macho se separó del amplexus con una hembra (DHMECN 11313) y emitió llamados para atraer y reanudar el amplexus. Los parámetros analizados fueron: (1) Frecuencia dominante: frecuencia de mayor energía medida a lo largo de toda la llamada; (2) frecuencias armónicas: frecuencias más altas que son múltiplo de la frecuencia fundamental; (3) notas/llamado: número de unidades acústicas de un determinado patrón de amplitud reconocido en los llamados; (4) llamados/minuto: repetición de los llamados en el lapso de un minuto; (5) duración de los llamados: tiempo desde el inicio hasta el final de un llamado, medido con el analizador de forma de onda, (6) duración de las notas: tiempo desde el inicio hasta el final de una nota, medido con el analizador de forma de onda, (7) intervalos entre llamados: tiempo transcurrido entre llamado y llamado, (8) intervalos entre notas: tiempo transcurrido entre nota y nota. Las definiciones y mediciones realizadas en los parámetros acústicos siguen las definiciones presentadas por Batallas y Brito [19], Duellman y Pyles [21], Cocroft y Ryan [22], Angulo et al. [23] y Díaz y Cádiz [24]. Los parámetros bioacústicos se reportan como la media \pm la desviación estandar.

Resultados

Pristimantis roni sp. nov.

Fig. 1–13

Holotipo: DHMECN 11313, hembra adulta colectada en Loma Cormorán (02°04'07.1"S, 78°12'41.9"O, 1900 m), complejo lacustre Sardinayacu, Parque Nacional Sangay, parroquia Sinaí, cantón Morona, provincia de Morona-Santiago, República del Ecuador, el 18 de junio de 2014 por JBM, DBR, PBM, Hernán Orellana y Germán Tenecota.

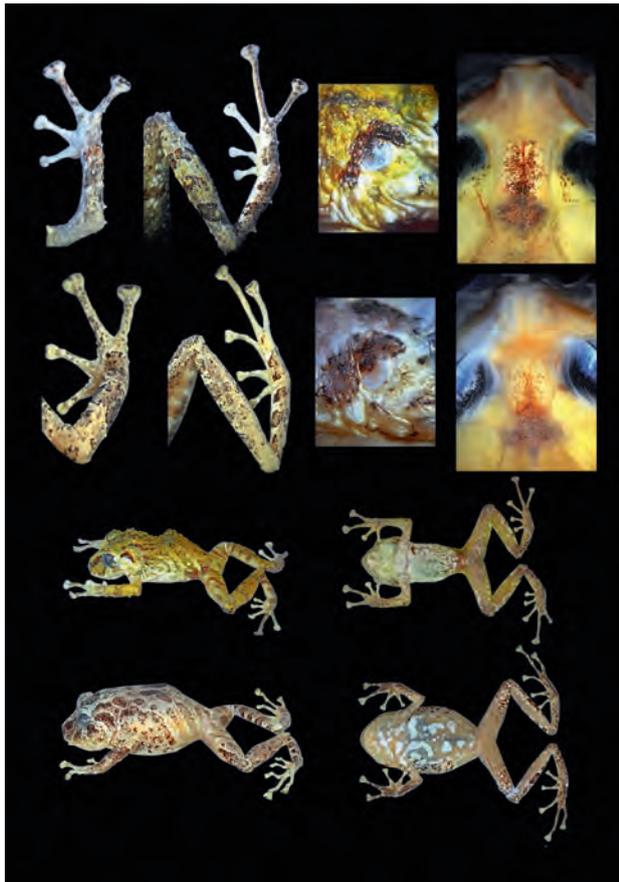


Figura 3. Caracteres comparativos entre *Pristimantis roni* sp. nov. y *P. katoptroides*. Primera fila: hileras de tubérculos en antebrazos, piernas, tímpano y cráneo de *Pristimantis roni* sp. nov. DHMECN 11313, hembra, holotipo; Segunda fila hileras de tubérculos en antebrazos, piernas, tímpano y cráneo de *Pristimantis katoptroides* DHMECN 10155; Tercera fila: vista dorsal y ventral de *Pristimantis roni* sp. nov., DHMECN 11313, hembra holotipo; Cuarta fila: vista dorsal y ventral de *Pristimantis katoptroides* DHMECN 10155. (MYM).

Paratopotipos: DHMECN 11314–18, hembras; DHMECN 11319–27, machos, con los mismos datos del holotipo.

Etimología: El epíteto específico es un patronímico en honor a Santiago R. Ron, Curador del Museo de Zoología de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Santiago Ron ha impulsado e influenciado a varias generaciones de estudiantes ecuatorianos. Sus investigaciones, publicaciones científicas, libros de divulgación y fotografías naturalistas han incluido variadas temáticas como evolución, biogeografía, declinación de especies, ecología de poblaciones, sistemática y taxonomía; destacando su pasión por los caimanes y por las ranas, en especial, las túngaras (*Engystomops*), las ranas arborícolas (Hyllidae) y las ranas terrestres (*Pristimantis*).

Nombres comunes sugeridos: Cutín de Ron / Ron's Robber Frog

Diagnos: Una especie de *Pristimantis* caracterizada por: (1) textura del dorso finamente granular, desde parcialmente cubierto por pequeñas verrugas hasta densamente granular con verrugas elevadas; vientre areolado; pliegue discoidal presente; pliegues dorsolaterales ausentes; (2) tímpano presente, 36–41% del diámetro del ojo, redondeado a ligeramente ovalado,

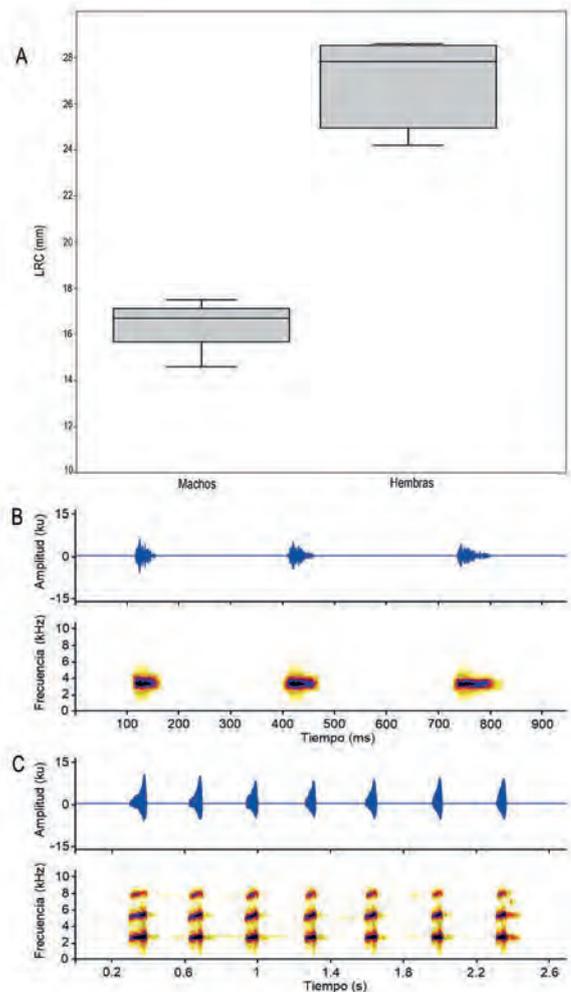


Figura 4. (A) Diagramas de caja para el rango de LRC entre machos y hembras de *Pristimantis roni* sp. nov. (B–C) Oscilogramas y espectrogramas de los llamados de *Pristimantis roni*. (B) Llamado de advertencia, ejemplar DHMECN 11322; (C) llamado de cortejo, ejemplar DHMECN 11321.

anillo timpánico cubierto por mitad de membrana supratimpánica en hembras y completa en machos; con tubérculos postrictales; (3) hocico redondeado en vista dorsal y de perfil; (4) párpado superior con un tubérculo cónico grande y de 2 a 5 tubérculos subcónicos; igual al ancho de la DIO; un tubérculo cónico interorbital y otro entre las narinas; cresta craneal presente; (5) odontóforos de contorno triangular con 4 a 7 dientes; (6) machos con hendiduras bucales, con saco gular y almohadillas nupciales presentes; (7) dedo manual I más pequeño que dedo manual II, discos expandidos en dedos manuales II-III-IV, con discos truncados más anchos que el dígito; (8) dedos con rebordes cutáneos laterales, débilmente crenulados en dedos manuales III y IV; (9) tubérculos ulnares cónicos presentes; (10) talón con dos a tres tubérculos cónicos grandes, tubérculos cónicos en borde externo de pierna, rodilla y tarso; pliegue tarsal interno ausente; (11) tubérculo metatarsal interno oval, más de cinco veces que tubérculo metatarsal externo pequeño subcónico; tubérculos supernumerarios presentes bajos; (12) dedos del pie con rebordes cutáneos laterales, sin membranas interdigitales; dedo pedial V más largo que dedo pedial III y alcanza al tubérculo subarticular del dedo pedial



Figura 5. Variación dorsal y ventral en la serie tipo de machos en *Pristimantis roni* sp. nov. Primera y segunda fila (de izquierda a derecha): DHMECN 11326, DHMECN 11319, DHMECN 11323. Tercera y cuarta fila (de izquierda a derecha): DHMECN 11324, DHMECN 11321, DHMECN 11320. (MYM).

IV; (13) coloración dorsal desde verde claro hasta verde oscuro grisáceo con marcas dispersas en dorso café rojizas o grises, superficie de extremidades posteriores con barras café y gris; superficies ocultas de muslos con manchas crema verdosas en hembras (amarillo rojizas en machos); flancos con barras diagonales verde oscuro en hembras (café oscuro en machos) con manchas blancas; barras suboculares, cantal y supra timpánica café a café rojizo; vientre y garganta crema verdoso finamente salpicado con manchas grises en hembras (vientre grisáceo con marcas blancas en machos); superficies ocultas de ingles con fondo verde anaranjado (café rojizo en machos); banda cantal-timpánica café oscuro o negro (café rojizo o negro en vida); superficies posteriores de muslos con marcas café oscuro o rojizo; iris fuertemente reticulado en hembras y homogéneamente cobrizo en machos; (14) LRC en hembras 24,2–28,5 mm ($\bar{x} = 27,02 \pm 2,8, n = 6$); machos 14,6–17,5 mm ($\bar{x} = 16,4 \pm 1,5 n = 9$).

Comparación con especies similares: *Pristimantis roni* difiere de otras especies de ranas terrestres de coloración verde y aspecto espinoso de los Andes de Ecuador por la presencia de tímpano, cresta craneal, tubérculos cónicos grandes en las extremidades posteriores y anteriores (en los bordes externos del tarso, la pierna e incluyendo la rodilla, con tubérculos cónicos conspicuos) y por la coloración ventral homogéneamente crema sin despigmentación.

Entre todas las especies de *Pristimantis*, *Pristimantis roni* (caracteres de esta especie entre paréntesis) es más similar a *Pristimantis katoptroides* (Flores) que habita

en los bosques montano bajos de la vertiente oriental de los Andes del centro-sur de Ecuador hasta el norte de Perú. Ambas especies presentan patrones de coloración dorsal verde, vientre crema, iris en vida reticulada y tubérculos sobre el párpado y talón (Fig. 7). Sin embargo, *Pristimantis katoptroides* [25] tiene una LRC máxima en hembras de 38,9 mm (LRC máxima de 27,4 mm), el tímpano está oculto (presente), no tiene cresta craneal (bordes frontoparietales elevados, queratinizados y externamente visible), los tubérculos ulnares no son cónicos, el borde externo del tarso está cubierto por tubérculos subcónicos, no presenta tubérculos cónicos en el borde externo de la pierna y rodilla (todos cónicos), talón con dos tubérculos cónicos (más de tres tubérculos), la coloración ventral es crema con grandes parches de despigmentación en preservado (sólidamente pigmentado) y superficies ocultas de las ingles azules en hembras (con manchas verde anaranjadas en hembras) (Fig. 2–3, 7, 9).

Otros *Pristimantis* verdes espinosos de las estribaciones orientales de los Andes de Ecuador incluyen a: *Pristimantis inusitatus* (Lynch y Duellman), *P. eriphus* (Lynch y Duellman), *P. bellae* Reyes-Puig y Yáñez-Muñoz, *P. galdi* (Jiménez de la Espada) y *P. gualacenio* Urgilés et al. (Fig. 7–8). *Pristimantis eriphus* e *P. inusitatus* son fácilmente diferenciables de *P. roni* por la ausencia de cresta craneal. Adicionalmente *Pristimantis inusitatus* presenta los bordes externos de la pierna y el tarso con tubérculos calcares, procesos vomerinos odontóforos oblicuos con 2–4 dientes, superficies ocultas de las ingles amarillas en hembras e iris dorado con finas reticulaciones café (Fig. 7, 9–10). *Pristimantis eriphus* difiere por tener procesos vomerinos odontóforos oblicuos en contorno con 2–4 dientes, tubérculos ulnares subcónicos, iris rojo sin reticulaciones. *Pristimantis galdi* se diferencia por tener cresta craneal con margen lateral y rama óptica del escamoso aserrado o tuberculado, superficies ocultas de las ingles verde e iris verde (Fig. 7, 9–10). *Pristimantis bellae* y *P. gualacenio* carecen de cresta craneal, su tamaño corporal máximo es de 25,8 mm, las superficies ocultas de las ingles exhiben contrastantes coloraciones ingui-

	Hembras				Machos			
	<i>min</i>	<i>max</i>	\bar{x}	\pm	<i>min</i>	<i>max</i>	\bar{x}	\pm
LRC	24,2	28,6	27,03	1,86	14,6	17,5	16,44	0,94
LC	9,2	11,6	10,9	0,90	5,7	7,2	6,67	0,45
AC	9,9	12,1	11,27	0,87	5,7	6,9	6,61	0,38
DIO	3,1	3,7	3,30	0,23	1,8	2,2	1,97	0,14
AP	2,4	3,5	3,00	0,43	1,6	2,2	1,99	0,22
DO	3,1	3,8	3,52	0,25	2,2	3,0	2,53	0,23
ON	2,9	4,2	3,63	0,46	1,7	2,1	1,94	0,13
EN	2,3	2,7	2,53	0,16	1,6	2,0	1,83	0,12
DT	1,2	1,9	1,45	0,26	0,6	1,6	0,91	0,31
LT	14,3	16,5	15,42	0,78	9,0	10,4	9,99	0,43
LP	13,4	15,7	14,45	0,90	7,8	9,4	8,71	0,53
LM	8,7	10,1	9,28	0,56	5,0	5,9	5,66	0,29

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

nales negro con marcas blancas o amarillas en hembras y las coloraciones del iris tienen bandas medias rojizas (Fig. 7, 9–10).

Otros *Pristimantis* que tienen una apariencia similar a *P. roni* pero que habitan la ladera occidental de los Andes ecuatorianos y carecen de cresta craneal son: *Pristimantis rufoviridis* (Valencia et al.) que tiene un conspicuo patrón de coloración formado por marcas café rojizas en los bordes dorsolaterales, y en forma de “V” invertida en el dorso, iris verde pálido a dorado, vientre café grisáceo y manchas crema (Fig. 7, 10); *P. appendiculatus* (Werner) que presenta un conspicuo apéndice nasal en forma de probóscide e iris con línea media rojiza (Fig. 8, 10); *Pristimantis crucifer* (Boulenger) que además tiene pequeños tubérculos cónicos en el talón y antebrazo e ingles azules (Fig. 7, 9); y *P. verecundus* (Lynch y Burrowes) que tiene marcas inguinales rojas y coloración dorsal usualmente café (Fig. 8). Adicionalmente, *Pristimantis quinquagesimus* (Lynch y Trueb) es similar a *P. roni* al tener una cresta craneal (siendo la única especie espinosa con esa característica en la ladera occidental de los Andes) pero no es verde y presenta un distintivo pliegue interorbital (Fig. 8).

Descripción del holotipo: Hembra adulta, cabeza ligeramente más ancha que larga; hocico redondeado en vista dorsal y de perfil; distancia ojo-narina 14,0% de LRC, con papila en punta del hocico y un tubérculo cónico pequeño en la punta del hocico; canto rostral recto, definido, región loreal ligeramente cóncava, cubierta por algunos tubérculos subcónicos; narinas protuberantes, dirigidas lateralmente, con un tubérculo cónico en el medio; área interorbital plana, con un tubérculo cónico, ligeramente estrecho en relación al párpado superior, párpado superior equivale a 106% de la distancia interorbital; cresta craneal presente, en forma de U, con bordes frontoparietales queratinizados; párpado superior con un tubérculo cónico, con 2 a 3 tubérculos subcónicos y rodeado de pequeñas verrugas elevadas; membrana timpánica diferenciada de piel que la rodea, anillo timpánico evidente y redondeado, con margen superior cubierto hasta la mitad por un pliegue supratimpánico anterodorsalmente, tímpano visible dorsalmente, diámetro del tímpano 40% del diámetro del ojo, pliegue timpánico cubierto por tubérculos prostriciales subcónicos y cónicos; coanas



Figura 6. Variación dorsal y ventral en la serie tipo de hembras en *Pristimantis roni* sp. nov. Primera y segunda fila (de izquierda a derecha): DHMECN 11313, holotipo, DHMECN 11314, DHMECN 11316. Tercera y cuarta fila (de izquierda a derecha): DHMECN 11317, DHMECN 11315, DHMECN 11316. (MYM).

pequeñas, triangulares de contorno, no cubiertas por piso palatal del maxilar; procesos de los odontóforos vomerinos presentes, de contorno triangular con 5–6 dientes; lengua más ancha que larga, de forma acorazonada, 3/4 adherida al piso de la boca. Borde externo de la mandíbula inferior con pequeños tubérculos cónicos.

Textura del dorso y flancos finamente granular, densamente cubierto por verrugas elevadas, vientre areolado, sin pliegues dorsolaterales, con pliegue dérmico occi-

Parámetro	Llamados de advertencia n= 12	Llamados de cortejo n= 9
Frecuencia Dominante (kHz)	3,14–3,35 (3,32 ± 0,06)	2,58–2,62 (2,59 ± 0,02)
1er Armónico (kHz)	–	5,08–5,18 (5,18 ± 0,09)
2do Armónico (kHz)	–	7,60–7,75 (7,70 ± 0,05)
Notas por Llamado	1–5	3–10
Llamados/minuto	6,73–12,44 (8,79 ± 1,76)	4,58–13,19 (8,17 ± 3,02)
Duración de los Llamados (ms)	40–1247 (493,09 ± 341,67)	733–2850 (1672,22 ± 783,11)
Duración de las notas (ms)	29–45 (36,84 ± 4,68, n=50)	50–111 (85,41 ± 15,11, n=37)
Intervalos entre Llamados (ms)	2093–7928 (6126,56 ± 1714,69)	2493–11547 (6268,83 ± 2986,84)
Intervalos entre Notas (ms)	175–298 (249,56 ± 35,91, n=50)	149–299 (236,55 ± 32,95, n=37)

Tabla 2. Resumen de los análisis acústicos de los llamados de advertencia y cortejo de *Pristimantis roni*. De los valores calculados se detalla mínima, máxima, media y desviación estándar. Las abreviaciones utilizadas corresponden a: n= número de llamados y notas analizadas, kHz= Kilohertzios, ms= milisegundos, (promedio y desviación estándar).



Figura 7. Hembras de ranas *Pristimantis* espinosas de los Andes de Ecuador utilizadas en la comparación de *Pristimantis roni* sp. nov. Desde arriba y de izquierda a derecha, primera fila: *P. roni*, DHMECN 11313, holotipo, (JMB); *P. katoptroides*, DHMECN 10155, (RBY); *P. eriphus*, DHMECN 5209, (MYM); segunda fila: *P. inusitatus*, QCAZ 37959, (SRR); *P. galdi*, DHMECN 9640, (MYM); *P. bellae*, DHMECN 5211, paratipo (MYM); tercera fila: *P. gaulaceno*, DHMECN 10748, hembra, paratipo (VU); *P. crucifer*, DHMECN 5915, hembra, (MYM); *P. rufoviridis*, FHGO 6959, hembra, holotipo, (RBY).

pital en forma de ‘)(’ compuesto por tubérculos subcónicos. Pliegue discoidal presente, conspicuo, se extiende desde la inserción de los brazos, hasta región ventral; cloaca rodeada por varias verrugas elevadas. Brazos esbeltos con tubérculos cónicos en superficie dorsal y ventral del antebrazo, borde externo del antebrazo con tubérculos ulnares cónicos; dedos con rebordes cutáneos laterales, débilmente crenulados en todos los dedos, tubérculo palmar acorazonado, tubérculo tenar ovalado; tubérculos subarticulares redondos prominentes, con tubérculos supernumerarios, todos los dedos expandidos con almohadillas definidas por surcos circunmarginales.

Extremidades posteriores esbeltas, longitud de la tibia 54,3% de LRC, tubérculos cónicos en la superficie dorsal y ventral de la tibia, tubérculos cónicos en borde externo de pierna, rodilla y tarso; pliegue tarsal interno ausente; talón con 3 tubérculos cónicos grandes; dedos del pie con rebordes cutáneos laterales, sin membranas interdigitales; tubérculos subarticulares redondos prominentes; tubérculo metatarsal interno ovalado, 5 veces el tamaño del externo que es subcónico; tubérculos supernumerarios presentes, bajos; discos expandidos en todos los dedos; dedo pedial V mayor al III y alcanza la base del tubérculo subarticular distal del dedo pedial IV.

En preservado, coloración dorsal en fondo crema grisáceo, pliegue dérmico en forma de ‘)(’ es gris oscuro, varias verrugas circundantes a los pliegues también están pigmentadas de gris oscuro; flancos crema con dos líneas transversales gris pálido; mancha cantal, barra supratimpánica, dos marcas suboculares y barra interorbital de color gris oscuro; tubérculo en la región frontal crema grisáceo con borde triangular irregular negro; superficies de extremidades anteriores y posteriores con barras transversales gris oscuro; superficies posteriores de muslos con barras café grisáceos más estrechos que espacios de color crema grisáceo, porción posterior de muslos con solidas marcas crema



Figura 8. Machos de ranas *Pristimantis* espinosas de los Andes de Ecuador utilizadas en la comparación de *Pristimantis roni* sp. nov. Desde arriba y de izquierda a derecha, primera fila: *P. roni*, DHMECN 11322, macho, Paratipo, (JBM); *P. katoptroides*, DHMECN-MYM 3280, (MYM); *P. eriphus*, DHMECN 05210, (MYM); *P. inusitatus*, QCAZ 40150, (SRR); *P. galdi*, DHMECN 9639 (MYM); *P. bellae*, QCAZ 46253, Paratipo, (SRR); *P. quinquagesimus*, DHMECN7064, (MYM); *P. appendiculatus*, DHMECN 7578, (MYM); *P. vercundus*, no colectado, macho, (MYM).

de borde irregular; triangulo anal gris pálido. Ventralmente crema con débiles reticulaciones gris oscuro hacia la parte inferior del vientre, ingles, parte inferior del pliegue discoidal y superficie anterior de los muslos y tibias des pigmentadas.

Medidas del holotipo (mm): LRC= 27,8; LT= 15,1; LP= 14,3; LM= 8,9; LC= 11,3; AC= 11,9; DIO= 3,2; DO= 3,5; AP= 3,4; DIN= 2,4; DON= 3,9; DT= 3,5.

Variación: Las variaciones morfométricas de la serie tipo son presentadas en la Tabla 1. *Pristimantis roni* presenta un marcado dimorfismo sexual en la LRC; los machos son significativamente más pequeños que las hembras ($t= 15.52, p= <0.005$) (Fig. 4). La cresta craneal está mejor definida en hembras y puede ser observada externamente. Algunos patrones de coloración en vida son contrastantes entre los dos sexos: la coloración del iris es fuertemente reticulado en hembras (con finas reticulaciones en machos), los machos presentan llamativas coloraciones amarillas en las ingles (puntos blancos en fondo amarillento en hembras), las hembras en su mayoría presentan coloraciones dorsales verdosas (café en machos) y ventralmente presentan vientre homogéneamente crema (crema grisáceos a homogéneamente gris en machos). Las principales variaciones observadas entre hembras correspondieron a los patrones de coloración dorsal (Fig. 6) y al tamaño de los tubérculos subcónicos en los flancos, es así que los individuos DHMECN 11314–16 presentaron conspicuos tubérculos cónicos en los flancos a diferencia del holotipo. Mientras tanto, los machos al igual que las hembras, difirieron principalmente en el patrón de coloración dorsal y en el patrón de coloración ventral (Fig. 5). El ejemplar DHMECN11320 presentó una banda dorsal grisácea disruptiva (Fig. 5).

Coloración en vida: (Descripción basada en la fotografía del holotipo en vida) La coloración dorsal es predominantemente verde, las líneas cantal, supra-



Figura 9. Patrones de coloración inguinal de ranas *Pristimantis* espinosas de los Andes de Ecuador: (A) *P. roni*, DHMECN 11321, macho, paratipo (JBM); (B) *P. inusitatus*, QCAZ 37959, hembra, (SRR); (C) *P. katoptroides*, DHMECN 10155, hembra, (RBY); (D) *P. crucifer*, DHMECN 5915, hembra, (MYM); (E) *P. eriphus*, DHMECN 5210, hembra, (MYM); (F) *P. bellae*, DHMECN 5211, hembra, paratipo, (MYM); (G) *P. gualaceno*, no colectado, hembra, (JCS); (H) *P. galdi*, DHMECN 5907, hembra, (ENS).

timpánica, interorbital, borde del tubérculo en la región frontal y parte anterior del pliegue ‘)’ (‘ conspicuamente café rojizo; flancos con barras verde oscuro separado por interespacios verde claro con manchas solidas blancas, superficies posteriores de ingles verde anaranjado; superficies dorsales de extremidades anteriores y posteriores con barras transversales café rojizas; vientre crema; iris café cobrizo fuertemente reticulado de negro.

Un ejemplar macho (DHMECN 11322) presentó dorsalmente en su parte media vertebral una coloración café rojiza, con flancos verde claro, barras diagonales café oscuro, superficies inguinales con manchas amarillo rojizo en fondo café rojizo; vientre café oscuro. Líneas cantal, supratimpánica, interorbital y borde del tubérculo en la región frontal gris oscuro (ejemplar DHMECN 11321 con café rojizo). Superficies dorsales de las extremidades posteriores con barras transversales café oscuras, barra del antebrazo verde grisáceo. Iris café cobrizo con finas reticulaciones negras (ejemplar DHMECN 11321 con línea media café rojiza).

Bioacústica:

Los llamados de advertencia se caracterizan por ser de frecuencia modulada, con frecuencia dominante de $3,32 \pm 0,06$ kHz (Fig. 1A). Los llamados tienen una duración de $493,09 \pm 341,67$ ms, con intervalos de $6126,56 \pm 1714,69$ ms, emitiendo $8,79 \pm 1,76$ llamados/minuto. Están conformados por 1–5 notas, las mismas que presentan una duración de $36,84 \pm 4,68$ ms, con intervalos de $249,56 \pm 35,91$ ms (Tabla 2). Sus llamados son emitidos desde vegetación herbácea y arbustiva, siendo una especie de baja actividad vocal. Uno de los llamados de advertencia generó 12 notas, siendo menores en los valores temporales de sus intervalos que van de 175–240 ms; este llamado con intervalos en sus notas de menor tiempo se dio cuando en el

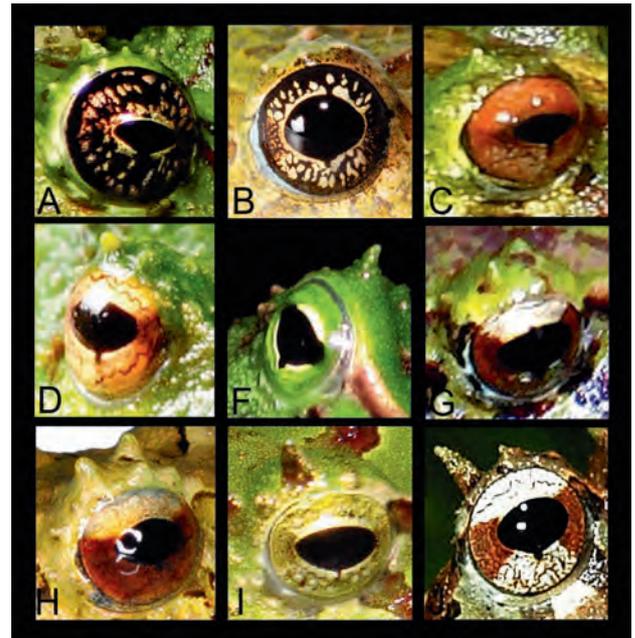


Figura 10. Patrones de coloración del iris de ranas *Pristimantis* espinosas de los Andes de Ecuador: (A) *P. roni*, DHMECN 11313, hembra, holotipo, (JBM); (B) *P. katoptroides*, QCAZ 52502, hembra, (SRR); (C) *P. eriphus*, DHMECN 05208, macho, (MYM); (D) *P. inusitatus*, QCAZ 37959, hembra, (SRR); (E) *P. galdi*, DHMECN 9639, hembra, (MYM); (F) *P. bellae*, DHMECN 4812, hembra, paratipo, (SRR); (G) *P. gualaceno*, DHMECN 10748, hembra, holotipo, (VU); (H) *P. rufoviridis*, FHGO 6959, hembra, holotipo, (RBY); (I) *P. appendiculatus*, ejemplar no colectado, hembra, (MYM).

proceso de búsqueda se aproximaba al individuo emisor, siendo generada esta variación probablemente ante el anuncio de un peligro. Las grabaciones in situ de *Pristimantis roni* corresponden a llamados de advertencia o anuncio al presentar una estructuración constante en sus variables espectrales y temporales [34, 35]. La variación identificada (llamado de 12 notas) en las grabaciones de *P. roni* no implica que se trate de una variación intraespecífica, sino una variación del llamado de advertencia como tal, ya que algunas especies presentan diferentes patrones en las estructuras de notas y pulsos en sus cantos de advertencia [36, 37], los cuales responden a características etológicas específicas como alerta, peligro o stress [8, 19].

Los llamados de cortejo se caracterizan por ser de frecuencia modulada, su frecuencia dominante es $2,59 \pm 0,02$ kHz; presenta dos armónicos de los cuales el primero tiene una frecuencia de $5,18 \pm 0,09$ kHz y el segundo una frecuencia de $7,70 \pm 0,05$ kHz (Fig. 4). Los llamados tienen una duración de $1672,22 \pm 783,11$ ms, con intervalos de $6268,83 \pm 2986,84$ ms, emitiendo $8,17 \pm 3,02$ llamados/minuto. Están conformados por 3–10 notas, las mismas que presentan una duración de $85,41 \pm 15,11$ ms, con intervalos de $236,55 \pm 32,95$ ms (Tabla 2). Los llamados de cortejo difieren de los de advertencia o anuncio por sus frecuencias más bajas, tonalidades más graves, mayor número de notas y mayor duración en sus variables temporales (duración de llamados, notas, e intervalos) (Fig. 4; Tabla 2), siendo corroborados como llamados de cortejo por su naturaleza de emisión (cuando un macho en amplexus se bajó de la hembra fortuitamente emitiendo estos llamados para reanarlo). Los llamados de cortejo son una variación vocal que se dan cuando el macho se encuentra cerca de la hembra, modificando sus llamados de ad-



Figura 11. Parte superior: pareja en amplexus de *Pristimantis roni* (DHMECN 11313, hembra; DHMECN 11321, macho); nótese el detalle de la coloración inguinal en la hembra (JBM). Parte inferior derecha: pareja de *Pristimantis roni* mostrando el detalle de amplexus céfalico; nótese la variación del iris entre macho y hembra (JBM). Parte inferior izquierda: hembra de *Pristimantis roni*, junto a una masa de huevos depositada en cautiverio (PBM).

vertencia [38]; este comportamiento se evidenció en un macho de *Pristimantis roni*, el cual modificó espectral y temporalmente sus llamados al ser separado del amplexus con una hembra. Wells & Schwartz [26], Wells [38], Klump & Gerhardt [39], mencionan que muchas especies de anuros machos en presencia de hembras, responden a este estímulo con llamados de mayor duración y con una estructuración más compleja en sus notas, lo cual se demostró en los análisis de cantos de *P. roni*, corroborando que esta variación vocal corresponde a llamados de cortejo.

Distribución y ecología: La especie es conocida únicamente de la localidad tipo en el complejo lacustre Sardinayacu, Parque Nacional Sangay, provincia de Morona-Santiago, Ecuador (Fig. 12). El piso zogeográfico donde habita *Pristimantis roni* pertenece al Sub-Tropical Oriental [26]; el ecosistema corresponde al Bosque siempreverde montano del sur de la cordillera Oriental de los Andes [27], el cual está caracterizado por árboles con troncos y ramas nudosas donde albergan gran cantidad de orquídeas y bromelias. La altura de la vegetación emergente alcanza hasta 30 m de altura. *Pristimantis roni* fue colectado en el interior de un bosque maduro dominado por árboles de romerillo (*Prumnopitys montana*) y palma real (*Dictyocaryum lamarckianum*), el sotobosque presentaba dominancia de herbáceas de las familias Araceae y Marantaceae y el suelo tenía pequeñas cochas de agua dándole un aspecto pantanoso. Los individuos de la especie nueva fueron encontrados perchados en la vegetación herbácea en alturas de 70 a 160 cm. *Pristimantis roni* estuvo en simpatria con *Pristimantis ganonotus*, *P. galdi*, *P. sp.*, *Noblella personina* y *Osteocephalus verruciger*. Algunos individuos machos fueron observados y escuchados vocalizando en la vegetación herbácea del sotobosque. En junio del 2014 una pareja fue colectada en amplexus (DHMECN 11313, 11321) cuando perchaba una hoja de ciclantácea a 130 cm de altura; el macho fue observado y grabado vocalizando cautivo, mientras

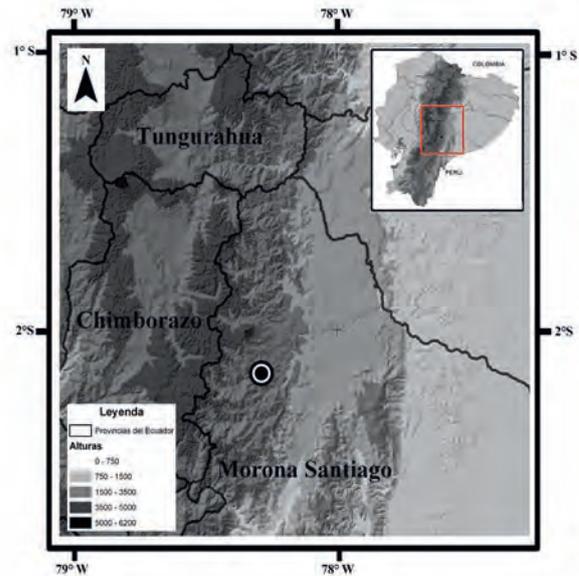


Figura 12. Mapa de Distribución de *Pristimantis roni*, mostrando la localidad tipo.

la hembra en estado avanzado de gravidez depositó al día siguiente 21 huevos de coloración crema y recubiertos por sustancia gelatinosa transparente (notas de campo JBM). *Pristimantis roni* muestra un amplexus céfalico y no axilar como en otras especies de *Pristimantis* (Fig. 11).

Discusión

Nuestro trabajo en *Pristimantis* en los Andes de Ecuador se ha basado en análisis morfológicos y hemos evitado asignar nuevas especies descritas a grupo-de-especies al no contar con evidencia que permita hipotetizar sus relaciones filogenéticas [9, 10, 12, 13] y al continuo cambio que ha experimentado la sistemática del clado Terrarana en los últimos 14 años. Aun cuando los análisis filogenéticos basados en caracteres moleculares se han incrementado y potenciado sustancialmente desde hace nueve años [13–15, 28–31], el entendimiento general y manejo taxonómico de los grupos de especies es todavía confuso e inestable para el 80% de las especies descritas para el género [13] y los taxónomos todavía no han realizado una detallada revisión que identifique caracteres morfológicos congruentes con los linajes inferidos molecularmente.

No asignaremos a *Pristimantis roni* a un grupo-de-especies pero si presentamos las siguientes consideraciones sobre su posible relación entre especies:

- 1) *Pristimantis roni* forma parte de un particular ecotipo de aproximadamente 12 especies de ranas terrestres de los bosques montanos de Ecuador que exhiben un aspecto espinoso, caracterizados externamente por: tamaños corporales con LRC máximas entre 22,5 a 45,8 mm; tubérculos cónicos, subcónicos o calcares que incluyen el talón, borde externo del tarso, antebrazo, ojos, postrictrales y borde de la mandíbula inferior; superficies ocultas de ingles y muslos con coloraciones distintivas. Nueve de las doce especies (*Pristimantis roni*, *P. katop-*

troides, *P. galdi*, *P. eriphus*, *P. inusitatus*, *P. crucifer*, *P. gualaceno*, *P. bellae* y *P. rufoviridis*) exhiben distintivos patrones de coloración dorsal verde. En su mayoría, estos ecotipos se distribuyen altitudinalmente sobre los 1200 m y llegan hasta los 3200 m de elevación, en el interior de los bosques montanos; cinco de ellos habitan la vertiente occidental (*Pristimantis quinquagesimus*, *P. rufoviridis*, *P. crucifer*, *P. appendiculatus* y *P. verecundus*) y siete (*P. roni*, *P. galdi*, *P. katoptroides*, *P. eriphus*, *P. inusitatus*, *P. bellae*, *P. gualaceno*) en la vertiente oriental de la cordillera de los Andes de Ecuador.

- 2) La información disponible sugiere que este ecotipo está representado por al menos cuatro linajes parafiléticos de *Pristimantis* que incluyen a los grupos-de-especies de *P. devillei* (sensu Padial et al. [13]), *P. galdi* (sensu Hedges et al. [15]), *P. unistrigatus* (sensu Hedges et al. [15]) y *Pristimantis myersi* (sensu Padial et al. [13]). La presencia de cresta craneal está restringida a tres especies del ecotipo de ranas terrestres espinosas de los Andes de Ecuador (*Pristimantis roni*, *P. quinquagesimus* y *P. galdi*); sin embargo, la condición de cresta craneal con bordes frontoparietales elevados (sin bordes escuamales aserrados), sugeriría una relación más cercana de *P. roni* al grupo de especies de *P. devillei*, que al grupo de *P. galdi*.
- 3) Al menos cinco especies del ecotipo que carecen de cresta craneal, forman parte del grupo de especies de *Pristimantis unistrigatus* (sensu lato Hedges et al. [15]): *Pristimantis katoptroides*, *P. eriphus*, *P. inusitatus*, *P. crucifer* y *P. appendiculatus*. Aunque no han sido asignadas a algún grupo putativo, tres especies recientemente descritas (*P. bellae*, *P. gualaceno* y *P. rufoviridis*) podrían estar relacionadas o han requerido comparación con *P. appendiculatus*, *P. eriphus* e *P. inusitatus* [10, 12, 32, 33]. Aunque *P. roni* presenta la condición C del V dedo del pie creemos que esta característica no es diagnóstica para asociarla al grupo de especies *P. unistrigatus*. Consideramos que la presencia de cresta craneal podría ser un carácter morfológico más informativo, por ejemplo, análisis moleculares de *Pristimantis thymalopsoides* han determinado que esta especie aun cuando presenta la condición del dedo del pie C (característica bajo la cual Lynch y Duellman [16] la asignaron al grupo *P. unistrigatus*) su relaciones filogenéticas son más cercanas al grupo de *P. devillei*, caracterizados por la presencia de cresta craneal [13–15, 28–31].

Las expediciones realizadas en los últimos cinco años a los bosques montanos del Parque Nacional Sangay PNS nos han permitido acumular solamente cuatro puntos de muestro en bandas altitudinales comprendidas entre los 1500 a 3000 m de elevación, las cuales coinciden con varios puntos de fácil acceso al PNS. No obstante, los primeros resultados en este período de investigación han generado un listado preliminar de 25 especies de Terrarana, dos de las cuales han sido publicadas como nuevas [7, 8] y cerca de media docena son especies candidatas en espera de ser descritas. Los si-

tios por explorar en el PNS todavía son numerosos, sin embargo consideramos que debe haber un mayor énfasis de muestreo por cubrir los sectores comprendidos entre las microcuencas de los ríos Upano y Palora y en la confluencia de los ríos Upano y Paute. Estas áreas presentan características topográficas contrastantes, por un lado el sector Upano-Palora presenta grandes planicies pantanosas que corren desde los 1200 a 2300 m. de elevación; mientras que el sector Upano-Paute, se caracteriza por una topografía de pendientes pronunciadas que resguarda grandes extensiones de bosque prístino debido al difícil acceso a estas remotas áreas. Estas condiciones podrían favorecer una mayor disponibilidad de microhábitats, que incrementarían sustancialmente la riqueza de especies de ranas terrestres.

Agradecimientos

Dejamos constancia de nuestro agradecimiento a toda la gente e instituciones que hicieron posible esta investigación. El proyecto “Diversidad de pequeños vertebrados en dos áreas del Parque Nacional Sangay” de JBM y DBR cuenta con el apoyo institucional del Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales y la Fundación Naturaleza Kakaram. Agradecemos a Germán Tenecota, guardaparque del sector Sardinayaku del PNS y a Víctor León, por facilitar la logística de las expediciones de campo. El Ministerio del Ambiente otorgó la autorización de investigación 005-2014-I-B-DPMS/MAE/FAUNA para la colección de especímenes. El trabajo de MYM es parte del Programa de investigación Red Terrana Ecuador, respaldado por el MECN. A Santiago Ron, Pablo Venegas y Diego F. Cisneros-Heredia por los comentarios recibidos sobre la descripción de esta nueva especie. Dejamos un especial agradecimiento a nuestras familias que constantemente apoyan nuestras largas ausencias.

Referencias

- [1] Reyes-Puig, J.; Ramírez, S.; Yáñez-Muñoz, M.; Morales, M.; Recalde, L. 2013. “Bosque Protector Cerro Candelaria: una isla de biodiversidad entre las nubes”. En: MECN, JOCOTOCO y ECOMINGA. 2013. 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-Ecuador, 196–213.
- [2] Reyes-Puig, J.; Tobar-Suárez, C.; Yáñez-Muñoz, M.; Morales, M.; Recalde, L. 2013. “Reserva Ecológica Río Anzú: de los Sacha Llanganates a las cabeceras de la Amazonia Central del Pastaza”. En: MECN, JOCOTOCO y ECOMINGA. 2013. 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-Ecuador, 214–229.

- [3] Yáñez-Muñoz, M.; Reyes-Puig, J.; Morales, M. 2013. "Reserva Ecológica Río Zuñag: El puente entre la selva nublada y la selva subtropical amazónica". En: MECN, JOCOTOCO y ECOMINGA. 2013. 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-Ecuador, 232-247.
- [4] Yáñez-Muñoz, M.; Reyes-Puig, J.; Morales, M. 2013. El Sistema de Reservas Ecominga: Reserva Ecológica Río Zuñag: su rol en la conservación de la Herpetofauna en la Cuenca Alta del Río Pastaza y el Corredor Ecológico Llanganates-Sangay. En: MECN, Jocotoco y Ecominga. 2013. 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-Ecuador, 29-39.
- [5] Brito, J.; Pozo-Zamora, G. 2013. "Una nueva especie de rana terrestre del género *Pristimantis* (Amphibia: Craugastoridae), de la Cordillera de Kutukú, Ecuador". *Papeis Avulsos de Zoologia* 53:315-325.
- [6] Sheehy, C.; Yáñez-Muñoz, M.; Valencia, J.; Smith, E. 2014. "A new species of *Siphlophis* (Serpentes: Dipsadidae: Xenodontinae) from the eastern Andean slopes of Ecuador". *South American Journal of Herpetology* 9(1):30-45.
- [7] Batallas, D. y Brito, J. 2014. "Nueva especie de rana del género *Pristimantis* del grupo lacrimosus (Amphibia: Craugastoridae) del Parque Nacional Sangay, Ecuador". *Papeis Avulsos de Zoologia* 54:51-62.
- [8] Harvey, M.B; Almendáriz, A; Brito, J. & Batallas, D. 2013. "A new species of *Noblella* (Anura: Craugastoridae) from the Amazonian slopes of the Ecuadorian Andes with comments on *Noblella lochites* (Lynch)". *Zootaxa*, 3635:1-14.
- [9] 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.
- [10] Reyes-Puig, J.; Yáñez-Muñoz, M. 2012. "Una nueva especie de *Pristimantis* (Anura: Craugastoridae) del corredor ecológico Llanganates-Sangay, Andes de Ecuador". *Papeis Avulsos de Zoologia*. 52 (6): 81-91.
- [11] Páez-Moscoso, D., Guayasamin, J; Yáñez-Muñoz, M. 2011. "A new species of Andean toad (Bufonidae, *Osornophryne*) discovered using molecular and morphological data, with a taxonomic key for the genus". *Zootaxa* 108:73-97.
- [12] 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*, 2010, Vol. 3, Pags. B28-32.
- [13] 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.
- [14] Pyron, R.; Wiens, J. 2011. "A large Scale phylogeny of Amphibia including 2,800 species, and revised classification of extant frogs, salamanders, and caecilians". *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 61:543-583.
- [15] 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.
- [16] Lynch, J. D. y 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
- [17] Duellman, W.; Lehr, E. 2009. "Terrestrial-breeding frogs (Strabomantidae) in Peru". *Natur- und Tier-Verlag, Naturwissenschaft. Münster. Germany*.
- [18] Hammer, Ø., Harper, D.A.T., Ryan, P.D. 2001. "PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis". *Palaeontologia Electronica* 4(1): 9pp. http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm.
- [19] Batallas, D.; Brito, J. 2014. "Descripción del llamado de advertencia de *Noblella lochites* (Anura: Craugastoridae)". *Avances en Ciencias e Ingenierías*, 6(1):B6-B8.
- [20] Charif, R.; Waack, A.; Strickman, L.M. 2010. "Raven Pro 1.4 User's Manual". *Cornell Lab of Ornithology, Ithaca, NY*.
- [21] Duellman, W.; Pyles, R. 1983. "Acoustic Resource Partitioning in Anuran Communities". *Copeia*, 1983(3):639-649.
- [22] Cocroft, R.; Ryan, M. 1995. "Patterns of advertisement call evolution in toads and chorus frogs". *Animal Behaviour*, 49: 283-303.
- [23] Angulo, A.; 2006. "Fundamentos de bioacústica y aspectos prácticos de grabaciones y análisis de cantos". In: Angulo, A.; Rueda-Almonacid, J.V.; Rodríguez-Mahecha J.V. & E. Marca.

- (Eds). *Técnicas de inventario y monitoreo para los anfibios de la Región Tropical Andina. Conservación Internacional, Serie Manuales de Campo, Bogotá, Colombia, 93–134.*
- [24] Díaz, L.; Cádiz, L. 2007. “Guía descriptiva para la identificación de las llamadas de anuncio de las ranas cubanas del género *Eleutherodactylus* (Anura: Leptodactylidae)”. *Herpetotropicos*, 3:100–122.
- [25] Flores, G. 1988. “Two new species of Ecuadorian *Eleutherodactylus* (Leptodactylidae) of the *E. crucifer* assembly”. *Journal of Herpetology* 22: 34–41.
- [26] Albuja, L.; Almendáriz, A.; Barriga, R.; Cáceres, F.; Montalvo, L.; Román, J. 2012. “Fauna de Vertebrados del Ecuador. Escuela Politécnica Nacional”. *Editorial Ariel 12. Quito, Ecuador.*
- [27] Guevara, J.; Josse, C. 2013. “Bosque siempreverde piemontano del Sur de la Cordillera Oriental de los Andes”. In: Ministerio del Ambiente del Ecuador 2012. Sistema de Clasificación de los Ecosistemas del Ecuador Continental. Ministerio del Ambiente del Ecuador. Quito. Pg: 117-119.
- [28] Canedo, C.; Haddad, C. 2012. “Phylogenetic relationships within anuran clade Terrarana, with emphasis on the placement of Brazilian Atlantic rainforest frogs genus *Ischnocnema* (Anura: Brachycephalidae)”. *Molecular Phylogenetics and Evolution* 65: 610–620.
- [29] Pinto-Sanchez, N. R., Ibanez, R., Madrinan, S., Sanjur, O. I., Bermingham, E. y Crawford, A. J. 2012. “The Great American Biotic Interchange in frogs: multiple and early colonization of Central America by the South American genus *Pristimantis* (Anura: Craugastoridae)”. *Molecular Phylogenetics and Evolution* 62:954–72.
- [30] Heineicke, M. P.; Duellman, W.; Hedges, B. 2007. “Major Caribbean and Central American frog faunas originated by ancient oceanic dispersal”. *Proceedings of the National Academy of Sciences (USA)*, 104, 10092–10097.
- [31] Frost D.; Grant T.; Faivovich J.; Bain R.; Haas A.; Haddad C.; De Sá R.; Channing A.; Wilkinson M.; Donnellan S.; Raxworthy C.; Campbell, J.; Blotto B.; Moler P.; Drewes R.; Nussbaum R.; Lynch J.; Green D.; Wheeler W. 2006. “The Amphibian Tree of Life”. *Bulletin American Museum Natural History* 297: 1–370.
- [32] Valencia, J.; Yáñez-Muñoz, M.; Betancourt-Yépez, R.; Terán-Valdéz, A.; Guayasamín, J., 2010. “Una llamativa nueva especie de *Pristimantis* (Anura: Terrana: Strabomantidae) de las estribaciones noroccidentales de los Andes de Ecuador”. *Avances*, 2010, Vol. 3, Pags. B41-B45.
- [33] Urgilés, V.; Sánchez-Nivicela, J.; Nieves, C.; Yáñez-Muñoz, M.; 2014. “Ranas terrestres en los ecosistemas surandinos de Ecuador I: Dos nuevas especies de *Pristimantis* (Anura: Craugastoridae) de la ladera oriental”. *Avances en Ciencias e Ingenierías* 6:B51-B59.
- [34] Narins, P.; Lewis, E.; McClelland, B. 2000. “Hyperextended call note repertoire of the endemic Madagascar treefrog *Boophis madagascariensis* (Rhacophoridae)”. *Journal of Zoology, London*. 250: 283-298.
- [35] Gerhardt, H.; Huber, F. 2002. “Acoustic Communication in Insects and Anurans”. *Chicago: University of Chicago Press.*
- [36] Wells, K.; Schwartz, J. 2007. “The behavioral ecology of anuran communication”. In: Narins, P. M., A. S. Feng, R. R. Fay, y A. N. Popper (Eds). *Hearing and Sound Communication in Amphibians. New York: Springer, 44–86.*
- [37] Wells, K. 1988. “The effects of social interactions on anuran vocal behavior”. In: Frittsch B, Wilczynski W, Ryan MJ, Hetherington T, Walkowiak W (eds) *The Evolution of the Amphibian Auditory System. New York: Wiley, 433–454.*
- [38] Wells, K.D. 2007. “The Ecology and Behavior of Amphibians”. *University of Chicago Press. Chicago.*
- [39] Klump, G.; Gerhardt, H. 1987. “Use of non-arbitrary acoustic criteria in mate choice by female gray tree frogs”. *Nature* 326:286–288.

APÉNDICE I. Especímenes examinados

Pristimantis appendiculatus ECUADOR: Provincia de Pichincha: Bosque protector Río Guajalito DHMECN 7578; *Pristimantis bellae* ECUADOR: Tungurahua Bosque Protector Cerro La Candelaria DHMECN 4812-4810; Río Verde QCAZ 46253; *Pristimantis crucifer* ECUADOR: Provincia Pichincha: DHMECN 5915-17, 5948 La Unión-Río Cinto; *Pristimantis eriphus* ECUADOR: Tungurahua: Reserva Ecológica Río Zuñac DHMECN 5209-5210. *Pristimantis galdi* Provincia Tungurahua: Reserva Biológica Zuñac DHMECN 5192-98, Río Verde DHMECN 5607; Provincia Zamora Chinchipe: El Pangui, Valle de Río Blanco, QCAZ32362-65, 32367-68, 32371, 32373-74; Reserva Biológica Tapichalaca DHMECN 1743-45, 1944, 2430-32, 2445-47, 2449-50, 2452-53 3010, 3047-48; DHMECN 5907, 9639. *Pristimantis gualaceño* ECUADOR: Morona Santiago: Área Ecológica de Conservación Municipal Tinajillas -Río Gualaceño, DHMECN 10747-49; *Pristimantis inusitatus* ECUADOR: Napo: Oyacachi, QCAZ 40150; Reserva Yanayacu, QCAZ 37959. *Pristimantis katoptroides*: ECUADOR: Napo: Embalse Coca Codo Sinclair, DHMECN-MYM 3280; Pastaza: Reserva Ecológica Río Anzu, DHMECN 4869-70; 7054; Tungurahua: Reserva Río Zuñac, QCAZ 52502; Zamora Chinchipe: Cordillera del Cóndor, DHMECN 10155, 11202. *Pristimantis quinquagesimus* ECUADOR: Provincia Pichincha: MECN 4910-11 Bosque La Victoria; MECN 7064-65 Reserva Bellavista; Palmito FHGO 1837, 1864, Yunguilla; *Pristimantis rufoviridis* ECUADOR: Provincia de Carchi: QCAZ 39962, 39986, 39996, 40000, QCAZ 39967, 39977, 39987, 39990, 39995-97, 39999, Chilma bajo; Provincia de Imbabura: FHGO 6956-58 Urbina; *Pristimantis verecundus* ECUADOR: Provincia Pichincha: MECN 1927, Curipugio; MECN 1928, 2023, Estación Experimental "La Favorita"; MECN 5918 La Unión-Río Cinto; MECN 5945 Lloa Mindo-San Carlos; MECN 7399-413, 7415, 7437-39 Zaragoza-Río Cinto.

APÉNDICE II. Sumario de caracteres utilizados para la diferenciación de *Pristimantis roni* con 11 especies de ranas espinosas de los Andes de Ecuador.

Especie	Grupo putativo de especies	LRC máxima en mm.	Cresta craneal	Tímpano	Tubérculos en el párpado
<i>roni</i>	No asignado	28,5	Presente, con bordes frontoparietales elevados	Presente	Un cónico grande y varios tubérculos subcónicos pequeños
<i>quinquagesimus</i>	<i>devillei</i>	40,1	Presente, con bordes frontoparietales y fontanela parietal con tubérculos óseos	Presente	Ausentes
<i>Galdi</i>	<i>galdi</i>	45,8	Presente, Frontoparietales aserrados con escamosales	Presente	Un cónico
<i>katoptroides</i>	<i>unistrigatus</i>	38,88	Ausente	Parcialmente oculto	Tres a cuatro tubérculos subcónicos pequeños
<i>eriphus</i>	<i>unistrigatus</i>	29,0	Ausente	Prominente	Con uno cónico
<i>inuitatus</i>	<i>unistrigatus</i>	26,0	Ausente	Presente	Con uno cónico
<i>crucifer</i>	<i>unistrigatus</i>	34,5	Ausente	Presente	Varios cónicos pequeños
<i>appendiculatus</i>	<i>unistrigatus</i>	35,0	Ausente	Presente	Un cónico alargado
<i>bellae</i>	No asignado	25,85	Presente	Presente	Con uno o dos cónicos Prominentes y pequeños a su alrededor
<i>rufoviridis</i>	No asignado	31,8	Ausente	Presente	Con un cónico prominente y pequeños alrededor
<i>gualaceno</i>	No asignado	23,8	Ausente	Presente	Tres subcónicos prominentes y varios subcónicos pequeños
<i>verecundus</i>	<i>myersi</i>	22,5	Ausente	Presente	Con tubérculos cónicos

APÉNDICE II: continuación .

Espece	Tubérculos Ulnares	Tubérculos en el talón	Tubérculos en el borde externo del tarso	Condición del dedo V del pie	Coloración distintiva
<i>roni</i>	Cónicos	Dos a tres tubérculos cónicos	Presentes, cónicos	C	flancos con bandas amarillas, vientre crema y negro
<i>quinquagesimus</i>	Cónicos	Calcar	Presentes cónicos	B	Superficies posteriores de los muslos café chocolate con flecos blancos,
<i>galdi</i>	Cónicos	Cónicos	Cónicos	B	Vientre blanco con ingles verdes.
<i>katoptroides</i>	Presentes, poco definidos no cónicos	Dos tubérculos cónicos	Presentes, subcónicos	C	Flancos crema con ténues marcas negras en forma de barras
<i>eriphus</i>	Presentes, cónicos a subcónicos	Cónicos, pequeños	Presentes, pequeños cónicos	C	Flancos con bandas café oscuro interrumpidas
<i>inuitatus</i>	Presente, calcareas	Un tubérculo calcar	Presentes, cónicos	C	Dorso verde con barras café en las extremidades, vientre homogéneamente blanco
<i>crucifer</i>	Cónicos	Cónico	Cónicos	C	Ingles y superficie oculta de los muslos azul.
<i>appendiculatus</i>	Cónicos	Cónicos	Cónicos	B	Vientre gris azulado con marcas negras.
<i>bellae</i>	Cónicos	Cónicos	Cónicos	C	Vientre negro con manchas blancas
<i>rufoviridis</i>	Cónicos	Cónicos	Cónicos	C	Vientre grisáceo con grandes manchas crema
<i>gualaceno</i>	Subcónicos y redondeados	Subcónico	Subcónicos	C	Vientre crema amarillento con marcas negro
<i>verecundus</i>	Dos cónicos largos	Cónico	Pequeños cónicos	C	Garganta con marcas en forma de "Y" invertido

APÉNDICE II: continuación. (BM= Bosque Montano, BMB= Bosque montano Bajo).

Especie	Coloración del iris	Distribución en los Andes	Elevación (m)	Tipo de ecosistema	Fuente
<i>roni</i>	Café reticulado con negro	Tras-Andina	2000-2300	BM	Este artículo
<i>quinquagesimus</i>	Café chocolate o café rojizo	Cis-Andina	1410-2710	BMB, BM	Lynch y Duellman, 1997
<i>galdi</i>	Verde delineado de amarillo	Tras-Andina	1000-2700	BMB, BM	Lynch y Duellman, 1980
<i>katoptroides</i>	Café reticulado con negro	Tras-Andina	1400-2700	BMB, BM	Ron et al. 2014
<i>inusitatus</i>	Dorado	Tras-Andina	1300-2160	BMB, BM	Lynch y Duellman, 1980
<i>crucifer</i>	Iris rojo oscuro centralmente bronce	Cis-Andina	1200-1800	BMB	Lynch y Duellman, 1997
<i>appendiculatus</i>	Verde grisáceo. con flecos negros y una línea media horizontal rojiza o anaranjada	Cis-Andina	1460-2800	BMB, BM	Lynch y Duellman, 1997
<i>bellae</i>	Bicolor, gris con línea media rojiza.	Tras-Andina	1800-2300	BMB, BM	Reyes y Yáñez, 2012
<i>rufoviridis</i>	Verde pálido a dorado	Cis-Andina	1800-2237	BMB, BM	Valencia et al. 2010
<i>gualaceno</i>	Bicolor, gris azulado y rojo cobrizo	Tras-Andina	3200	BMA	Urgilés et al. 2014
<i>verecundus</i>	Naranja cobrizo	Cis-Andina	900-1800	BMB	Lynch y Duellman, 1997

Three new species of terrestrial frogs *Pristimantis* (Anura: Craugastoridae) from the upper basin of the Pastaza River, Ecuador

Tres nuevas especies de ranas terrestres *Pristimantis* (Anura: Craugastoridae) de la cuenca alta del Río Pastaza, Ecuador

Juan Pablo Reyes-Puig^{1,2}, Carolina Reyes-Puig^{1,2,3}, Salomón R. Ramírez-Jaramillo², María B. Pérez L.² y Mario H. Yáñez-Muñoz^{2,3*}.

¹ Fundación Ecominga-Red de Protección de Bosques Amenazados / Fundación Oscar Efrén Reyes, calle 12 de Noviembre N° 270 y calle Luis A. Martínez, Baños, Ecuador.

² Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales, Instituto Nacional de Biodiversidad, División de Herpetología, calle Rumipamba 341 y Av. de los Shyris, Casilla 17-07-8976, Quito, Ecuador.

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

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

Editado por / Edited by: Diego F. Cisneros-Heredia PhD(c).

Recibido / Received: 15/10/2014. Aceptado / Accepted: 10/11/2014.

Publicado en línea / Published on Web: 19/12/2014. Impreso / Printed: 19/12/2014.

Zoobank: <http://zoobank.org/F69CDBBD-8398-409E-B70A-D76AB04704D5>

Abstract

We describe three new species of terrestrial frogs *Pristimantis* from the evergreen montane forests surrounding the Tungurahua Volcano in the Upper Pastaza River Basin, eastern foothills of Ecuador. The first species is distinguished by the distinctive shape of its digits (elongated, narrow and only slightly wider than finger discs); the second presents cranial crest and body size smaller than 31 mm; and the third is spiny and exhibits a distinctive pattern with red-wine finely delineated by cream.

Keywords. evergreen montane forests, *Pristimantis marcoreyesi* sp. nov., *Pristimantis punzan* sp. nov., *Pristimantis puruscafeum* sp. nov., Terrarana, Tungurahua Volcano.

Resumen

Describimos tres nuevas especies de ranas terrestres *Pristimantis* de los bosques siempreverde montanos circundantes al Volcán Tungurahua en la cuenca alta del Río Pastaza, estribaciones orientales de Ecuador. La primera especie se diferencia por la distintiva forma de sus dígitos (alargados, estrechos y con discos solo un poco más anchos que los dedos); la segunda exhibe cresta craneal y presenta tamaño corporal menor a 31 mm; y la tercera es espinosa y exhibe un distintivo patrón de coloración rojo-vino finamente delineado con crema.

Palabras Clave. bosques siempreverde montanos, *Pristimantis marcoreyesi* sp. nov., *Pristimantis punzan* sp. nov., *Pristimantis puruscafeum* sp. nov., Terrarana, Volcan Tungurahua.

Introducción

Desde el 2008 hemos estudiado la fauna anfibia de los ecosistemas adyacentes al Volcán Tungurahua [1] y hasta el momento hemos documentado una sorprendente diversidad, en su mayoría ranas terrestres *Pristimantis* [2,3,4,5]. Recientemente presentamos información detallada sobre los anfibios presentes en el área del Volcán Tungurahua en una banda altitudinal comprendida entre los 1800 y 3800 m de elevación [6] e identificamos a este género como el componente más diverso de anfibios, concentrando el 70% de la riqueza de anuros en la región. Sin embargo, el 55% de estas ranas terrestres todavía no posee un estatus taxonómico definido. En esta publicación describimos tres nuevas especies de *Pristimantis* de los bosques montanos circundantes al volcán y a la cuenca alta del Río Pastaza.

Materiales y Métodos

La descripción de las especies sigue el formato estandarizado propuesto por Lynch y Duellman [7]. La clasificación sistemática de la familia sigue la propuesta de Padial et al. [8] y de los grupos putativos de especies a Hedges et al. [9] y Padial et al. [8]. 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 por características sexuales secundarias (almohadillas nupciales y tamaño) y por la inspección directa de las gónadas a través de incisiones dorsales. Se tomó las siguientes medidas siguiendo el formato de Duellman y Lehr [9]: distancia órbita-narina (DON), longitud cefálica (LC), ancho cefálico (AC), distancia interorbital (DIO), distancia internarinal (DIN), longitud rostro-cloacal (LRC), longitud de la tibia (LT); longitud del pie (LP), longitud de la mano



Figura 1. Vista dorsal, ventral y de perfil de *Pristimantis marcoreyesi* sp. nov., DHMECN 11343, hembra, holotipo. (MYM).

(LM), diámetro horizontal del tímpano (DT), longitud horizontal del ojo (DO), ancho del párpado (AP). Las medidas fueron tomadas con un calibrador electrónico con precisión ± 0.01 mm y redondeados al 0.1 mm más cercano. 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 de los colectores tomadas con un GPS. En todo el texto se hacen uso de las siguientes siglas para los créditos fotográficos e información asociada: Juan P. Reyes-Puig (JPR), Carolina del Pilar Reyes-Puig (CRP), Salomón Ramírez J. (SRJ) y Mario H. Yáñez-Muñoz (MYM). 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 marcoreyesi sp. nov

Pristimantis sp. Reyes-Puig et al. [11]

Fig. 1–3, 11

Holotipo: DHMECN 11343, hembra adulta colectada en el Río Alisal ($1^{\circ}15'32.70''S$, $78^{\circ}24'29.43''W$, 3131 m), parroquia El Triunfo, cantón Patate, provincia de Tungurahua, República del Ecuador, por JPR y Mauricio Iglesias, el 14 de marzo de 2014.

Paratipos: Hembras adultas colectadas en Nahuazo Runtón ($1^{\circ}25'39.05''S$, $78^{\circ}25'30.25''W$, 2720 m de elevación), cantón Baños, provincia de Tungurahua, DHMECN 4816, el 21 de noviembre del 2006, DHMECN 4819, el 3 abril de 2007, DHMECN 4822, el 24 de abril del 2007, por JPR, SRJ, Guillermo Sánchez; hembras adultas colectadas en las vertientes orientales del volcán Tungurahua, San Antonio, Río Pucayacu ($1^{\circ}26'17.15''S$, $78^{\circ}25'0.53''W$, 2500 m), cantón Baños,



Figura 2. *Pristimantis marcoreyesi* sp. nov. (A) Detalle de las extremidades (mano DHMECN 11343, Holotipo; pie DHMECN 4822, Paratipo); (B) Detalle de la cabeza en vista de dorsal y de perfil, DHMECN 11343, holotipo. (MYM).

provincia de Tungurahua, DHMECN 4825, el 28 de abril de 2007, DHMECN 4830, el 3 de abril de 2008, por JPR, SRJ y Nelson Palacios; hembras adultas colectas en Bosque Protector Cerro Candelaria ($01^{\circ}26'23.9''S$, $78^{\circ}17'59.4''$, 2700 m), parroquia Río Verde, cantón Baños, provincia de Tungurahua, DHMECN 4818, el 2 de abril de 2007, DHMECN 4823 el 24 de abril 2007, DHMECN 4824 el 26 de abril de 2007, DHMECN 5084, por JPR, SRJ, Stalin Caceres, Luis Recalde e Israel Valencia; macho adulto DHMECN 4817 colectado en Pondoá ($1^{\circ}25'54.81''S$, $78^{\circ}26'41.00''W$, 3100 m), cantón Baños, provincia de Tungurahua el 31 de marzo del 2007, por JPR, SRJ y Juan Merino; macho adulto DHMECN4828, en la misma localidad del DHMECN 4816, el 29 de agosto de 2007 por JPR; machos adultos colectados en la misma localidad del DHMECN 4825, DHMECN 4820–21 el 6 de abril de 2007, DHMECN 4827 el 1 de mayo del 2007, de por JPR, SRJ; macho adulto DHMECN 5082, en la misma localidad de 4830, el 11 de mayo de 2008, por JPR, SRJ.

Etimología: El epíteto específico es un patronímico en homenaje a nuestro colega, amigo y hermano Marco Miguel Reyes Puig. Marco fue uno de los investigadores más influyentes de la División de herpetología del Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales y su trabajo investigativo contribuyó significativamente en esta institución, así como en la Fundación Oscar Efrén Reyes y en la creación de la Estación Científica Chamana. Como biólogo de la conservación impulsó actividades de conciencia ambiental entre la juventud, así como en el desarrollo de investigaciones independientes y eventos de formación biológica, promoviendo constantemente expediciones de campo. Marco falleció a sus 35 años, dejando un gran vacío su familia y amigos. Este es un reconocimiento a su legado como investigador y ser humano.

Nombres comunes sugeridos: Cutín de Marco Reyes / Marco Reyes's Robber Frog

Diagnosis: *Pristimantis marcoreyesi* se diferencia de otras especies de *Pristimantis* por la siguiente combi-

	<i>P. marcoveyesi</i>		<i>P. punzan</i>		<i>P. puruscafeum</i>	
	Machos n=14	Hembra n=6	Machos n=3	Hembra n=1	Machos n=3	Hembra n= 1
LC	13,6 – 22,2	22,84 – 30,81	19,90 – 21,80		12,29 – 13,91	
R	(17,6 ± 2,6)	(26,13 ± 2,9)	(21,1 ± 0,22)	30,1	(13,28 ± 0,87)	19,31
ON	13,5 – 3	2,04 – 3,40	2,34 – 2,76		1,30 – 1,87	
	(2,3 ± 0,5)	(3,24 ± 0,23)	(2,48 ± 0,24)	3,75	(1,55 ± 0,29)	2,38
LC	5,3 – 9,5	8,85 – 11,90	8,16 – 9,26		5,92 – 6,62	
	(7,6 ± 1,3)	(10,32 ± 1,06)	(8,76 ± 0,56)	11,78	(6,21 ± 0,35)	8,79
AC	4,9 – 8,5	8,63 – 10,58	7,30 – 7,45		4,95 – 5,71	
	(6,5 ± 1,1)	(9,58 ± 0,65)	(7,38 ± 0,08)	11,23	(5,37 ± 0,39)	7,89
DIO	1,4 – 2,8	2,91 – 3,93	2,68 – 2,75		1,71 – 1,82	
	(2,2 ± 0,4)	(3,47 ± 0,35)	(2,71 ± 0,04)	3,6	(1,78 ± 0,06)	2,68
DIN	1,4 – 2,4	2,30 – 2,64	2,55 – 2,80		1,67 – 1,78	
	(1,9 ± 0,3)	(2,47 ± 0,13)	(2,70 ± 0,13)	2,9	(1,72 ± 0,06)	2,29
LT	7,5 – 13,4	13,27 – 16,44	9,75 – 11,80		7,25 – 8,48	
	(10,2 ± 1,8)	(14,52 ± 1,14)	(10,58 ± 1,08)	19,25	(7,67 ± 0,70)	11,19
LP	6,8 – 12,7	11,39 – 15,57	9,25 – 10,60		7,70 – 7,78	
	(8,9 ± 1,7)	(13,68 ± 1,37)	(9,97 ± 0,68)	15,8	(7,31 ± 0,55)	11,06
LM	3,6 – 7,1	7,33 – 8,72	6,00 – 6,85		4,63 – 4,97	
	(5,2 ± 1)	(8,01 ± 0,54)	(6,32 ± 0,46)	9,6	(4,79 ± 0,17)	6,77
DT	0,9 – 0,2	1,42 – 1,76	0,85 – 1,10		0,80 – 1,07	
	(1,2 ± 0,2)	(1,58 ± 0,15)	(0,98 ± 0,13)	1,75	(0,97 ± 0,15)	1,55
DO	2,1 – 3,3	3,51 – 3,97	2,94 – 3,06		2,13 – 2,52	
	(2,7 ± 0,4)	(3,72 ± 0,17)	(2,98 ± 0,07)	3,29	(2,35 ± 0,20)	3, 19
AP	1,3 – 2,1	1,80 – 2,22	1,94 – 2,06		1,21 – 1,73	
	(1,7 ± 0,2)	(1,94 ± 0,16)	(2,00 ± 0,06)	2,4	(1,47 ± 0,26)	1, 83

Tabla 1. Medidas morfométricas de la serie tipo de tres especies nuevas de *Pristimantis* del Volcán Tungurahua. Rango de medidas (media ± desviación estándar).

nación de caracteres: (1) piel del dorso finamente granular, con o sin numerosas verrugas redondeadas dispersas, más pronunciadas en los flancos; vientre areolado; pliegues dorsolaterales débilmente definidos; pliegue discoidal débilmente definido hacia la parte ventral; (2) tímpano presente, equivalente al 45% del diámetro del ojo; tubérculos postrictales subcónicos; (3) hocico largo, subacuminado en vista dorsal, angular de perfil; (4) párpado superior con dos o más tubérculos aplanados a subcónicos, más angosto que espacio interorbital; sin crestas craneales; (5) vomerinos odontóforos presentes, oblicuos de contorno, con 6 a 8 dientes; (6) machos sin hendiduras bucales, ni cojinetes nupciales; (7) dedo manual I más pequeño que dedo manual II; discos ligeramente más anchos que los dedos, expandidos en los dedos manuales II, III y IV; (8) dedos manuales con finos rebordes cutáneos laterales; (9) pequeños tubérculos ulnares aplanados; (10) talón con tubérculos redondeados; borde externo del tarso con tubérculos redondeados, débilmente definidos; (11) dos tubérculos metatarsales, el interno oval de 2 a 3.5 veces el tamaño del externo que es subcónico; (12) dedos del pie con débiles rebordes cutáneos laterales, sin membranas interdigitales; sin tubérculos supernumerarios plantares; dedo pedial V más largo que el III y sobrepasa el tubérculo subarticular del dedo pedial IV; (13) coloración dorsal variable en preservado, con varios tonos de gris, café oscuro, con machas claras y oscuras difuminadas, esparcidas en el dorso, en algunos individuos bandas dorsolaterales cla-

ras y otros con banda media dorsal; extremidades posteriores y anteriores bandeadas; con bandas cantal, supratimpánicas y labiales café oscuro; vientre variable de fondo crema a gris con manchas oscuras difuminadas o reticulaciones café oscuro, ocasionalmente individuos totalmente melánicos. Iris con banda media café oscuro, bronce, bordes externos con reticulaciones oscuras en fondo crema y tonos azul verdoso; (14) LRC en hembras 22,8–30,8 mm (\bar{x} = 26,13, n = 6); machos 14,3–22,2 mm (\bar{x} = 17,64, n = 14).

Comparación con especies similares: *Pristimantis marcoveyesi* se diferencia de otras especies de *Pristimantis* de los bosques montanos de la cuenca alta del Pastaza por la distintiva forma de sus dígitos (alargados, estrechos y con discos solo un poco más anchos que los dedos), que contrasta con la mayoría de especies en esta zona andina de Ecuador que exhiben dedos relativamente pequeños con terminaciones digitales usualmente el doble de ancho de los dígitos.

Pristimantis marcoveyesi (caracteres de esta especie entre paréntesis) es semejante a *P. tungurahua* Reyes et al. que presenta llamativas coloraciones inguinales rojas (ausentes), terminaciones digitales con el doble de ancho de los dedos (estrechos) y pliegues dorsolaterales finamente definidos (débiles y formados por hileras de tubérculos). Aunque nuestra nueva especie tiene un tamaño corporal menor a 31 mm, puede resultar semejante a algunos miembros del grupo de especies de *P.*

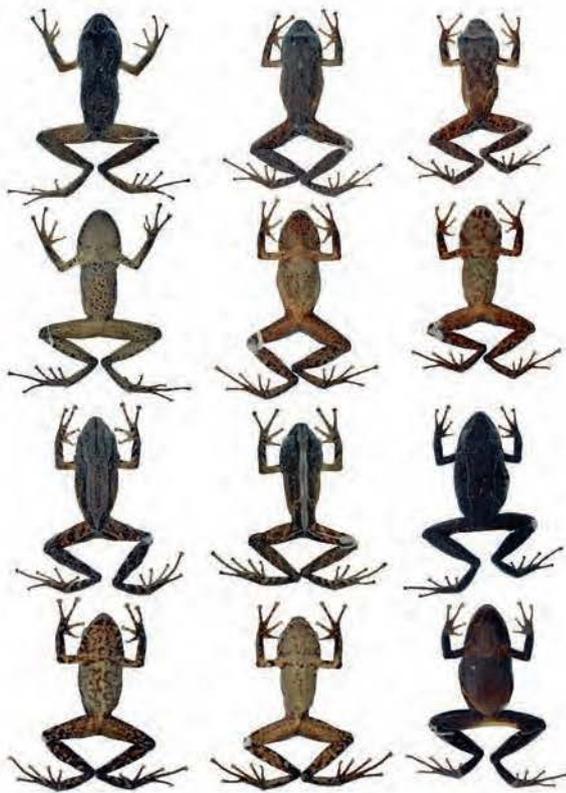


Figura 3. Variación dorsal y ventral en la serie tipo de *Pristimantis marcoreyesi* sp. nov. Primera y segunda fila: DHMECN 11343, hembra, holotipo; DHMECN 4822, hembra, paratipo; DHMECN 4823, macho, paratipo. Tercera y cuarta fila: DHMECN 4819, hembra, paratipo; DHMECN 4828, macho, paratipo, DHMECN 4830, hembra, paratipo. (MYM)

myersi [8,10] con digitos estrechos. Sin embargo, varias especies del grupo como *Pristimantis festae* (Perracca), *Pristimantis floridus* (Lynch y Duellman), *P. leoni* (Lynch), *P. phyrromerus* (Lynch), *P. sirnigeli* Yáñez-Muñoz et al. tienen llamativas coloraciones inguinales de color rojo o salmón (ausentes en *P. marcoreyesi*), tamaños corporales menores a 28 mm y largo relativo de los dedos de las manos y pies más pequeños que *P. marcoreyesi*.

Descripción del holotipo: Hembra adulta, cabeza ligeramente más larga que ancha; hocico subacuminado en vista dorsal y angular de perfil (Fig. 2); distancia ojo-narina 11,03% de LRC; canto rostral ligeramente cóncavo, región loreal cóncava; narinas protuberantes, dirigidas lateralmente, con tres tubérculos redondeados en medio (Fig. 2); área interorbital plana, más ancha que el párpado superior, que equivale al 56% la distancia interorbital; cresta craneal ausente; párpado superior con dos a tres tubérculos aplanados (Fig. 2); membrana timpánica diferenciada de la piel que la rodea, anillo timpánico evidente y ovalado, con el margen superior cubierto hasta la mitad por un pliegue supratimpánico anterodorsalmente, tímpano visible dorsalmente, diámetro del tímpano 40,55% el diámetro del ojo, tubérculos postritales subcónicos y cónicos pequeños ubicados anterior al tímpano (Fig. 2); coanas pequeñas, redondas de contorno, no cubiertas por el piso palatal del maxilar; procesos de los odontóforos vomerinos presentes, de contorno oblicuos con 6-9 dientes; lengua más larga que ancha, de forma ligera-

mente ovalada, 3/4 adherida al piso de la boca.

Textura del dorso finamente granular con pequeñas verrugas redondeadas dispersas, más pronunciadas en los flancos, vientre areolado con pequeñas pústulas elevadas, con pliegues dorsolaterales débilmente definidos se extienden desde la porción posterosuperior del tímpano hasta los flancos posteriores, los pliegues están formados por verrugas alineadas (Fig. 1). Pliegue discoidal presente, débilmente definido hacia la parte ventral; cloaca rodeada por pequeñas verrugas. Brazos esbeltos con tubérculos ulnares aplanados; dedos con finos rebordes cutáneos laterales, en los dedos II-IV, tubérculo palmar acorazonado, tubérculo tenar ovalado (Fig. 2); tubérculos subarticulares redondos prominentes, sin tubérculos supernumerarios; terminaciones digitales estrechas, sólo un poco más anchas que los dedos III y IV, con almohadillas definidas por surcos circummarginales (Fig. 2).

Extremidades posteriores esbeltas, longitud de la tibia 53,35% de la LRC, con pequeños tubérculos redondeados en el talón, borde externo del tarso con tubérculos débilmente definidos; pliegue tarsal interno ausente; dedos del pie con débiles rebordes cutáneos laterales, sin membranas interdigitales; tubérculos subarticulares redondos prominentes; el interno oval de 2 a 3.5 veces el tamaño del externo que es subcónico; sin tubérculos supernumerarios plantares en la base del pie (Fig. 2); discos estrechos ligeramente dilatados en los desde II-IV; dedo V mayor al III y alcanza la base del tubérculo subarticular distal el dedo IV (Fig. 2).

Coloración en preservado del holotipo: Coloración dorsal homogéneamente gris con bandas débilmente definidas en las extremidades anteriores y posteriores, triángulo anal débilmente definido de café oscuro, superficies anteriores de las extremidades posteriores con manchas blancas rodeadas de café oscuro, ventralmente en fondo café grisáceo con marcas café oscuras, con línea cantal gris oscura débilmente definida, banda supratimpánica café oscuro, con una barra labial café oscura.

Coloración en vida: Dorsalmente variable, desde café verdoso, café grisáceo hasta gris claro; algunos individuos presentan línea media dorsal café oscura o beige; especímenes con patrón dorsal café verdoso, con una distintiva marca occipital redondeada de color beige. Bandas cantal, supratimpánica, labial, barras de las extremidades negras y marca occipital en forma de W de color negro. Vientre en fondo crema grisáceo hasta crema amarillento, con reticulaciones negras y café oscuras, flancos homogéneamente café oscuro hasta gris pálido, con distintivas barras diagonales negras o crema. Todos los individuos llevan triángulo anal negro o café, y las superficies posteriores de los muslos con barras negras o café oscuras separadas por interespacios crema a gris. Iris bronce compuesto por banda media café oscuro, bordes externos con reticulaciones oscuras en fondo crema y tonos azul verdoso (Fig. 11).

Medidas del holotipo: LCR= 30,81; ON= 3,4; LC= 11,9; AC= 10,58; DIO= 3,93; DIN= 2,3; LT= 16,44; LP= 15,57; LM= 8,46; DT= 1,61; DO= 3,97; AP= 2,22.

Variación: Variación morfométrica de la serie tipo es presentada en la Tabla 1. *Pristimantis marcoreyesi* presenta una amplia variación en su patrón de coloración dorsal, un ejemplar (DHMECN 4830) es homogéneamente melánico, los ejemplares (DHMECN 4821, 4820, 4828 y 4817) presentaron marcas medio dorsales pálido grisáceas; otro patrón característico observado en los especímenes (DHMECN 4973, 4825, 4823, 4082, 5083 y 4827) son marcas café en forma de W; especímenes DHMECN 4818 y 5084 con bandas dorsolaterales pálidas. La mayoría de la serie tipo presenta barras en las extremidades de color café separadas por interespacios crema. Ventralmente la mayoría de individuos examinados presentan un patrón de coloración crema grisáceo salpicado con manchas café oscuras; no obstante los individuos DHMECN 4825 y 4826 son predominantemente cremas, mientras que los ejemplares DHMECN 4820, 4821 y 5084 son homogéneamente café oscuros (Fig. 3).

Distribución e historia natural: *Pristimantis marcoreyesi*, es conocido únicamente de seis localidades, en la cuenca alta del Pastaza, al norte y sur de dicha cuenca, la mayoría de localidades entre el volcán Tungurahua y el Cerro Candelaria entre 2400 y 3131 m de altitud (Fig. 4). Ha sido reportada como una especie frecuente en los ecosistemas de bosque siempreverde montano, con predominancia de suro (*Chusquea* sp), posado en hojas y ramas de esta especie, así como en hierbas y helechos hasta 150 cm. sobre el suelo [16]. El holotipo (DHMECN 11343), así como el resto de hembras de la serie tipo presentaron oviductos con huevos, en diferentes meses del año, lo cual podría sugerir que la especie presenta una reproducción continua. *Pristimantis marcoreyesi* ha sido registrado en simpatria con *P. modipeplus*, *P. pastazensis*, *P. tungurahua*, *P. unistrigatus*, *P. punzan* y dos especies no descritas del género [16]. Especímenes colectados en los flancos del volcán Tungurahua estuvieron parasitados por ácaros de la familia *Epidermoptidae*.

Comentarios taxonómicos: Nosotros no asignamos a esta nueva especie de rana terrestre a ninguno de los grupos putativos de *Pristimantis* propuestos por Lynch y Duellman [7], Hedges et al., [9] o Padial et al., [8], sin embargo, la morfología externa de *Pristimantis marcoreyesi* hace que lo asociemos al grupo de especies *Pristimantis myersi*, por presentar un tamaño corporal relativamente pequeño y especialmente por sus característicos dígitos estrechos y largos. Las únicas especie del grupo de *Pristimantis myersi* (*P. floridus* y *P. sirnigeli*, Yáñez-Muñoz et al.) con dígitos largos y estrechos están presentes en el occidente de Ecuador, por lo tanto, *P. marcoreyesi* podría ser la primera especie del grupo con esta característica en los bosques montanos de las laderas orientales de los Andes. Sin embargo advertimos que hasta no contar con evidencias moleculares nuestras ideas son preliminares.

Pristimantis punzan sp. nov.

Pristimantis aff. *lividus* Reyes-Puig et al. [6]

Fig. 5–7, 11

Holotipo: DHMECN 4854, hembra adulta, colectada en las vertientes orientales del volcán Tungurahua, San

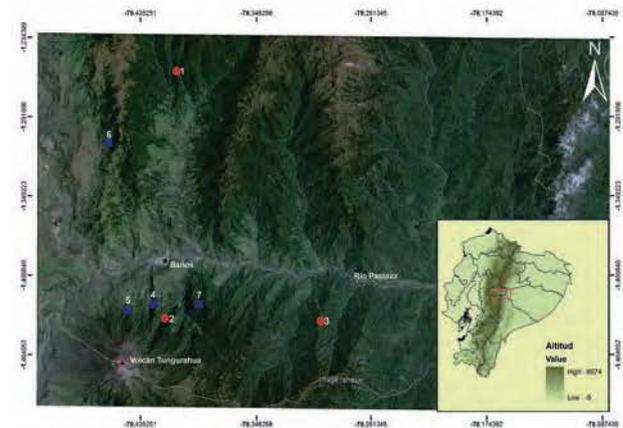


Figura 4. Mapa de localidades mencionadas en el texto. Los puntos rojos representan las localidades tipo de *Pristimantis marcoreyesi*, *P. punzan* y *P. puruscafeum*; 1) Río Alisal-El Triunfo, 2) San Antonio de Punzan, 3) Bosque Protector Cerro La Candelaria. Los cuadrados azules representan las localidades de paratipos y registros sin colecta; 4) Nahuazo-Runtún, 5) Pondoza, 6) Patate, 7) Reserva Chamanapamba.

Antonio de Punzan, Río Pucayacu ($1^{\circ}26'17.15''S$, $78^{\circ}25'0.53''W$, 2500 m de elevación), Cantón Baños, provincia de Tungurahua, República del Ecuador, colectado por JPR, SRJ y Nelson Palacios el 10 de diciembre del 2007.

Paratipos: DHMECN 4850, 4852–53, machos adultos, colectados en Nahuazo Runtún ($1^{\circ}25'39.05''S$, $78^{\circ}25'30.25''W$, 2720 m de elevación), cantón Baños, provincia de Tungurahua, el 7 de diciembre del 2007 por JRP, SRJ y Guillermo Sánchez.

Material referido: DHMECN 4851, 4855, juveniles con los mismos datos de los paratipos.

Etimología: El epíteto específico *punzan* hace referencia a la localidad tipo de la especie, San Antonio de Punzan en los flancos orientales del Volcán Tungurahua, como reconocimiento al apoyo prestado por los habitantes de Punzan para el descubrimiento de esta especie y la conservación de su hábitat.

Nombres comunes sugeridos: Cutín de Punzan /Punzan's Robber Frog

Diagnosis: *Pristimantis punzan* se caracteriza por la siguiente combinación de caracteres: (1) piel del dorso finamente granular, especialmente hacia los flancos, vientre granular areolado, pliegue discoidal presente, evidente en machos, pliegues dorsolaterales débilmente definidos; (2) tímpano presente, circular, equivalente al 35% del diámetro del ojo, tubérculos postrictales subcónicos; (3) hocico subacuminado en vista dorsal y redondeado en vista lateral; (4) párpado superior con un tubérculo subcónico, más angosto que el espacio interorbital, crestas craneales presentes, evidente en hembras; (5) presenta vomerinos odontóforos de contorno oblicuo, de 4 a 6 dientes; (6) machos sin hendiduras bucales; (7) dedo manual I más pequeño que el dedo II, discos más anchos que los dígitos, expandidos en los dedos II, III y IV, tubérculos supernumerarios presentes; (8) dígitos de la mano con finos rebordes cutáneos laterales; (9) pequeños tubérculos ulnares presentes aplanados a subcónicos; (10) con dos o más tubérculos subcónicos en el talón, borde externo del



Figura 5. Vista dorsal, ventral y de perfil de *Pristimantis punzan* sp. nov., DHMECN 4854, hembra, holotipo. (CRP).

tarso con tubérculos redondeados; (11) con dos tubérculos metatarsales, el interno es oval, 4 a 5 veces más grande que el externo que es subcónico; (12) dedos del pie con rebordes cutáneos laterales, sin membranas interdigitales, tubérculos supernumerarios plantares presentes, dedo V más largo que el dedo III y no sobrepasa el tubérculo subarticular distal del dedo IV; (13) dorso de coloración variable en preservado, en varias tonalidades de gris hasta café oscuro, con o sin banda longitudinal dorsal grisácea, con o sin franja interorbital crema; las extremidades posteriores presentan bandas café transversales, extremidades anteriores presentan bandas oscuras en el antebrazo; bandas cantal y supratimpánica café oscura. Coloración del vientre variable, de crema salpicado con puntos negros hasta café oscuro con finas reticulaciones crema; iris café claro cobrizo con finas reticulaciones negras; (14) LRC en una hembra 30,1 mm; machos 19,9–21,8 mm (\bar{x} = 21, n = 3).

Comparación con especies similares: *P. punzan* es la especie con cresta craneal con menor tamaño corporal (<31 mm) en los bosques montanos de la Cuenca Alta del Pastaza (MYM obs. pers.). Es similar en su morfología externa a *Pristimantis yumbo* Yáñez-Muñoz et al., de las laderas occidentales de los Andes de Ecuador, con quien comparte el patrón de coloración dorsal, tamaño corporal pequeño (<22 mm) y presencia de cresta craneal. No obstante, *Pristimantis yumbo* (caracteres de *P. punzan* entre paréntesis) presenta tubérculos cónicos en el párpado y talón (subcónicos), manchas inguinales crema amarillentas (café oscuras), vientre crema amarillento (crema salpicado de puntos negros), pliegues dorsolaterales presentes y definidos (débilmente definidos), iris dorado con parte media café cobriza (café claro cobrizo con finas reticulaciones negras).

Pristimantis punzan podría resultar similar a *P. atratus* (Lynch) de las estribaciones de los Andes sur de Ecuador, sin embargo, *P. atratus* carece de cresta craneal (presente) y presenta superficies posteriores de los muslos e ingles negras (manchas grisáceas y con barras). De igual forma, *Pristimantis punzan* es similar a



Figura 6. *Pristimantis punzan* sp. nov., DHMECN 4854, hembra, holotipo. (A) Detalle de las extremidades; (B) Detalle de la cabeza en vista de dorsal y de perfil (CRP).

una nueva especie no descrita del Parque Nacional Sangay (J. Brito com. pers.) caracterizada por su distintiva coloración de iris rojo (café claro cobrizo con finas reticulaciones negras) y sin cresta craneal (presente).

Descripción del holotipo: Hembra adulta, cabeza ligeramente más larga que ancha; hocico subacuminado en vista dorsal y redondeado de perfil (Fig. 6); ON 12% de la LRC; canto rostral ligeramente cóncavo, región loreal cóncava; narinas débilmente protuberantes, dirigidas lateralmente; área interorbital plana, más ancha que el párpado superior, el párpado superior equivale al 66% la DIN; cresta craneal presente (Fig. 6); párpado superior con un tubérculo subcónico; membrana timpánica diferenciada de la piel que la rodea, anillo timpánico evidente y redondeado, con pliegue supratimpánico, tímpano visible dorsalmente, diámetro del tímpano 53% del diámetro del ojo, con dos tubérculos postritales subcónicos (Fig. 6); coanas pequeñas, redondas de contorno, no cubiertas por el piso palatal del maxilar; procesos de los odontóforos vomerinos presentes, de contorno oblicuos con 4–5 dientes; lengua más larga que ancha, de forma acorazonada, 1/2 adherida al piso de la boca.

Textura del dorso finamente granular, más pronunciadas en los flancos, vientre areolado, con pliegues dorsolaterales débilmente definidos que se extienden desde la porción posterosuperior del tímpano, hasta 3/4 del dorso (Fig. 5). Pliegue discoidal débilmente definido hacia la parte ventral; cloaca con pequeños tubérculos aplanados. Brazos esbeltos con tubérculos ulnares débilmente definidos; dedos con finos rebordes cutáneos laterales, en los dedos I–IV, tubérculo palmar redondeado, tubérculo tenar ovalado; tubérculos subarticulares redondos prominentes, con tubérculos supernumerarios; terminaciones digitales dilatadas, más anchas que los dígitos, en los dedos II y IV, con almohadillas definidas por surcos circummarginales (Fig. 6).

Extremidades posteriores esbeltas, longitud de la tibia 64% de la LRC, con dos tubérculos subcónicos en el

talón, borde externo del tarso con tubérculos débilmente definidos; pliegue tarsal interno presente, se extiende más de $\frac{3}{4}$ de la longitud del tarso; dedos del pie con rebordes cutáneos laterales, sin membranas interdigitales; tubérculos subarticulares redondos prominentes; tubérculos metatarsales presentes, el interno oval de 4 a 5 veces el tamaño del externo que es subcónico; con tubérculos supernumerarios plantares; discos dilatados en todos los dedos; dedo V mayor al III solo alcanza la base del tubérculo subarticular distal el dedo IV (Fig. 6).

Coloración en preservado del holotipo: Dorsalmente gris salpicado con pequeñas manchas café oscuro, con dos líneas paravertebrales, incompletas, débilmente definidas de color café oscuro; bandas cantal y supratimpánica, café oscura, con una ligera banda diagonal subocular café oscuro; ventralmente crema salpicada por puntos negros. Extremidades posteriores con bandas transversales débilmente definidas de color gris; superficies de las ingles con pequeñas manchas irregulares café oscuras.

Coloración en vida: Coloración dorsal beige con marcas paravertebrales incompletas café oscuras, flancos finamente salpicados de puntos café oscuros. Las barras cantal y supratimpánica café oscuro, con dos puntos interoculares crema amarillentos, vientre crema amarillento salpicado de puntos negros. Iris café claro cobrizo con finas reticulaciones negras (Fig. 11).

Medidas del holotipo: LCR= 30,1; ON= 3,75; LC= 11,78; AC= 11,23; DIO= 3,6; DIN= 2,9; LT= 19,25; LP= 15,8; LM= 9,6; DT= 1,75; DO= 3,29; AP= 2,4.

Variación: Variación morfométrica de la serie tipo es presentada en la Tabla 1. *Pristimantis punzan* en su patrón de coloración dorsal puede variar desde gris hasta café oscuro (DHMECN 4850), con o sin bandas longitudinales dorsales y franja interorbital (DHMECN 4852-53). La serie tipo de machos (DHMECN 4850, 4852-53) presentan dos tubérculos occipitales subcónicos. Las superficies posteriores de los muslos varían en coloración desde fondo gris claro hasta café oscuros, con débiles bandas gris a patrón variegado café oscuro. Ventralmente, desde de crema salpicado con puntos negros (DHMECN 4852-54) hasta café oscuro con finas reticulaciones crema (DHMECN 4850) (Fig. 7). Los machos, presentan el hocico, así como tubérculos cónicos, más puntiagudos y cónicos que las hembras.

Distribución e historia natural: *Pristimantis punzan*, es conocido únicamente de dos localidades, en los flancos orientales del volcán Tungurahua entre 2500 y 2720 m de altitud (Fig. 4). Los ejemplares fueron encontrados perchando en hojas de hierbas y helechos entre 20 a 85 cm del suelo. De acuerdo con Reyes-Puig et al. [6] es una especie rara en los ecosistemas de bosque siempreverde montanos. *Pristimantis punzan* ha sido registrado en simpatria con *P. marcoreyesi*, *P. pastazensis*, *P. tungurahua*, [6].

Comentarios taxonómicos: La presencia de cresta craneal en *P. punzan* podría sugerir una cercana relación con *P. yumbo* de las estribaciones occidentales de los Andes de Ecuador, sin embargo, hasta no contar con evidencia moleculares, hemos decidido no asignar



Figura 7. Variación dorsal y ventral en la serie tipo de *Pristimantis punzan* sp. nov. Primera y segunda fila (de izquierda a derecha): DHMECN 4854, hembra, holotipo; DHMECN 4850, macho, paratipo; DHMECN 4852, macho, paratipo; DHMECN 4853, macho, paratipo. (CRP).

a esta especie a ninguno de los grupos putativos propuestos para ranas *Pristimantis* [7,8,9]; de igual forma la presencia de cresta craneal sugeriría que a pesar de su similar aspecto externo con *P. atratus* no serían especies relacionadas.



Figura 8. Vista dorsal, ventral y de perfil de *Pristimantis puruscafeum* sp. nov., DHMECN 4981, hembra, holotipo. (CRP).

***Pristimantis puruscafeum* sp. nov.**

Pristimantis sp. 3 Reyes-Puig et al. [11]

Fig. 8–11

Holotipo: DHMECN 4981 hembra, adulta, colectada en Bosque Protector Cerro La Candelaria (1°26'23.91"S, 78°17'59.45"W, 3100 m de elevación), parroquia Río Verde, cantón Baños, provincia de Tungurahua, República del Ecuador, colectada por JRP, SRJ, Stalin Cáceres, Luis Recalde e Israel Valencia el 11 de mayo del 2008.

Paratopitipos: DHMECN 4879–80, DHMECN 5085, machos adultos con los mismos datos del holotipo.

Etimología: El epíteto específico proviene de las raíces latinas *purus*=puro y *cafeum*=café, el cual hace relación a la Empresa Puro Coffee, que trabaja como socio de World Land Trust, incentivando la producción de café orgánico para la conservación de bosques lluviosos en Latinoamérica. Puro Coffee a través de sus donaciones ha contribuido a la conservación del hábitat de esta nueva especie con la creación del Bosque Protector Cerro La Candelaria.

Nombre comunes sugeridos: Cutín Puro Café /Pure Coffee's Robber Frog

Diagnosis: *Pristimantis puruscafeum* se diferencia de las demás especies de *Pristimantis* de la cuenca alta del Pastaza, por la siguiente combinación de caracteres: (1) piel del dorso finamente granular con pequeños tubérculos subcónicos hacia los flancos; vientre areolado, pliegue discoidal presente, pliegues dorsolaterales presentes, formados por pequeñas verrugas; (2) tímpano presente, redondo, equivalente al 44% del diámetro del ojo, tubérculos postrictales cónicos; (3) hocico subacuminado en vista dorsal, redondeado en vista lateral; (4) párpado superior con un tubérculo cónico y dos o más o subcónicos, más angosto que el espacio interorbital, con un tubérculo subcónico interorbital, cresta craneal ausente; (5) vomerinos odontóforos presentes con 6 a 8 dientes triangulares de contorno; (6) machos

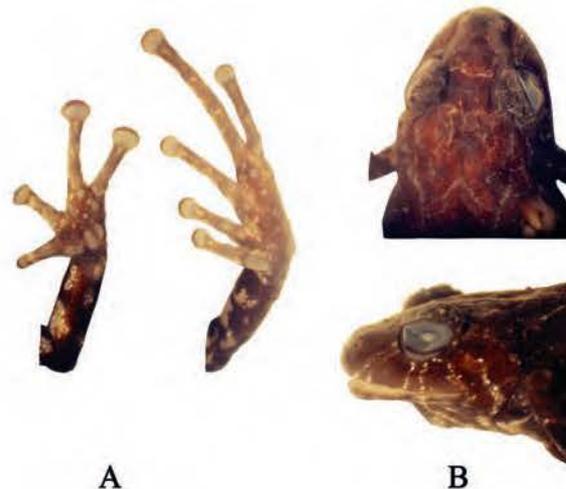


Figura 9. *Pristimantis puruscafeum* sp. nov., DHMECN 4981, hembra, holotipo. (A) Detalle de las extremidades; (B) Detalle de la cabeza en vista de dorsal y de perfil. (CRP).

sin hendiduras bucales ni cojinetes nupciales, (7) dedo I de la mano más pequeño que el dedo II, discos de los dedos ampliamente expandidos en los dedos, III y IV; (8) dedos de la mano con débiles rebordes cutáneos laterales, (9) pequeños tubérculos cónicos; (10) talón con un tubérculo cónico presente; borde externo del tarso con hilera de tubérculos cónicos (11) dos tubérculos metatarsales, el interno es oval 3 veces mayor que el externo, que es redondeado. (12) dedos del pie con evidentes rebordes cutáneos presentes, sin membranas interdigitales; con tubérculos supernumerarios plantares bajos; dedo V más largo que el dedo III, no alcanza al tubérculo subarticular distal del dedo IV; (13) coloración dorsal café oscuro (rojo vino en vida), con patrón de tenues bandas crema en forma de W en la región occipital, en forma de bandas en las extremidades posteriores y anteriores, líneas diagonales hacia los flancos y delineando la barra interorbital; vientre en fondo café oscuro, con marcas color crema a manera de reticulaciones en el vientre y en la garganta en forma de "V" irregular; iris de color gris hacia los bordes superior e inferior con una banda cobriza en el medio; (14) LRC en una hembra 19,31 mm, machos 12,29–13,91 mm (\bar{x} =13,28, n=3).

Comparación con especies similares: *Pristimantis puruscafeum* es la única especie de rana terrestre espinosa de las estribaciones orientales de los Andes de Ecuador, que exhibe un distintivo patrón de coloración rojo vino finamente delineado con crema. En su morfología externa puede ser similar a *P. bellae* Reyes-Puig y Yáñez-Muñoz de los bosques montano de la cuenca alta del Pastaza. Ambos comparten distintivos tubérculos cónicos sobre el talón y párpado, no obstante, *Pristimantis bellae* (caracteres de *P. puruscafeum* entre paréntesis) presenta un conspicuo pliegue dérmico en la región escapular en forma de "V" invertida continuo hacia las tres cuarta partes posteriores del dorso (pliegues dorsolaterales formados por pequeñas verrugas), el vientre es areolado (con verrugas elevadas y dirigidas hacia los flancos), además de exhibir una distintiva coloración inguinal con marcas blancas (superficie de las ingles en fondo café oscuro, con pequeñas marcas crema), su tamaño corporal es mayor al de *P. puruscafeum* (25.85 mm vs. 19.31 mm). Otras



Figura 10. Variación dorsal y ventral en la serie tipo de *Pristimantis puruscafeum* sp. nov. Primera y segunda fila (de izquierda a derecha): DHMECN 4981, hembra, holotipo; DHMECN 4979, macho, paratopotipo; DHMECN 4980, macho, paratopotipo; DHMECN 5085, macho, paratipo (CRP).

especies de ranas espinosas de las estribaciones orientales del Ecuador son fácilmente distinguibles de *Pristimantis puruscafeum* por presentar distintivas coloraciones verdes (e.g. *P. eriphus*, *P. inusitatus*) y algunas especies (*P. galdí*) la cresta craneal está presente (ausente en *P. puruscafeum*).

Descripción del holotipo: Hembra adulta, cabeza ligeramente más larga que ancha; hocico subacuminado en vista dorsal y redondeado de perfil (Fig. 9); ON 12.32% de la LRC; canto rostral ligeramente cóncavo, región loreal cóncava, cubierta por numerosos tubérculos diminutos, la mandíbula inferior con algunos tubérculos subcónicos pequeños; narinas débilmente protuberantes, dirigidas lateralmente, con un tubérculo aplanado en la parte frontal; área interorbital plana, más ancha que el párpado superior, con un tubérculo subcónico en el medio (Fig. 9), el párpado superior equivale al 80% la DIN; cresta craneal ausente; párpado superior con un tubérculo cónico y con varios tubérculos aplanados diminutos; membrana timpánica diferenciada de la piel que la rodea, anillo timpánico redondeado y evidente en sus $\frac{3}{4}$ partes, excepto en su cuarto superior, cubierto ligeramente por pliegue timpánico, tímpano visible dorsalmente, diámetro del tímpano 48.5% del diámetro del ojo, con dos tubérculos postrictales debajo del tímpano y uno detrás de este (Fig. 9); coanas medianamente desarrolladas, triangulares de contorno, más grandes que los procesos vomerinos odontóforos, no cubiertas por el piso palatal del maxilar; procesos vomerinos odontóforos triangulares de contorno, de 6-8 dientes; lengua ligeramente más larga que ancha, de forma oval, $\frac{1}{4}$ adherida al piso de la boca.

Textura del dorso finamente granular más pronunciada en los flancos, con tubérculos subcónicos detrás de los párpados y en la región occipital y escapular, región pélvica cubierta por pequeños tubérculos aplanados (Fig. 8); vientre areolado, con verrugas elevadas y dirigidas hacia los flancos; pliegues dorsolaterales finamente delineados, formados por pequeños tubérculos subcónicos, que se extienden desde la parte posterior de los párpados hasta el coxis, pliegue discoidal presente; cloaca rodeada por pequeños tubérculos subcónicos. Brazos esbeltos con tubérculos ulnares cónicos, con un tubérculo cónico en el codo, con dos a tres tubérculos cónicos en la parte anterior del cúbito; dedos con débiles rebordes cutáneos laterales, más evidente en el borde externo del dedo IV, tubérculo palmar acoirazado, tubérculo tenar ligeramente elongado; tubérculos subarticulares redondeados y débilmente elevados, con pocos tubérculos supernumerarios en la base y palma de la mano; terminaciones digitales dilatadas más anchas que los dígitos, evidentes en los dedos II-IV, con almohadillas definidas por surcos circummarginales (Fig. 9).

Extremidades posteriores esbeltas, longitud de la tibia 58% de la LRC, con un tubérculo cónico en el talón, borde externo del tarso con tubérculos subcónicos (Fig. 9), superficie de la tibia con pequeños tubérculos subcónicos esparcidos y con un pequeño tubérculo subcónico en la rodilla; pliegue tarsal interno ausente; dedos del pie con rebordes cutáneos laterales, sin membranas interdigitales; tubérculos subarticulares redondos ligeramente elevados; tubérculos metatarsales presentes, el interno oval de 3 veces el tamaño del externo que es redondeado y ligeramente elevado; con tubérculos supernumerarios plantares presentes; discos dilatados en todos los dedos, más pequeños que los de



Figura 11. Lado izquierdo: coloraciones en vida de tres especies nuevas de *Pristimantis* de la Cuenca Alta del Pastaza: *Pristimantis marcoreyesi* (parte superior), DHMECN 4819, hembra, paratipo, LRC= 22,84 mm (JPR); *Pristimantis puruscafeum* (parte media), DHMECN 4981, hembra, holotipo, LRC= 19,31 mm (JPR); *Pristimantis punzan* (parte inferior), DHMECN 4854, hembra, holotipo, LRC= 30,1 mm. Lado derecho: Marco M. Reyes-Puig † (1978–2013), en una de sus varias expediciones en la Amazonía de Ecuador con un espécimen de *Enyaliodes laticeps*. Nosotros nombramos a *Pristimantis marcoreyesi*, como un reconocimiento a su legado como investigador y ser humano, ante su prematura muerte.

la mano; dedo V mayor al III, no alcanza al tubérculo subarticular distal el dedo IV (Fig. 9).

Coloración en preservado del holotipo: Coloración dorsal café oscuro, con patrón de tenues bandas crema en forma de W en la región occipital, en forma de bandas en las extremidades posteriores y anteriores; dedo I de la mano, y dedo del I al III del pie mayoritariamente pigmentados de crema; finas líneas suboculares crema; líneas diagonales hacia los flancos y delineando la barra interorbital; vientre en fondo café oscuro, con marcas color crema a manera de reticulaciones en el vientre y en la garganta en forma de “V” irregular; superficies posteriores de los muslos finamente delineadas con crema, superficie de las ingles en fondo café oscuro, con pequeñas marcas crema.

Coloración en vida: Dorsalmente color rojo vino, finamente delineado con crema en el dorso en los flancos; superficie ventral rojo vino con marcas crema. Iris de color gris hacia las bordes superior e inferior con una banda cobriza en el medio (Fig. 11).

Medidas del holotipo: LCR= 19,31; ON= 2,38; LC= 8,79; AC= 7,89; DIO= 2,68; DIN= 2,29; LT= 11,19;

LP= 11,06; LM= 6,77; DT= 1,55; DO= 3,19; AP= 1,83.

Variación: Variación morfológica de la serie tipo es presentada en la Tabla 1 y muestran que la única hembra conocida es considerablemente más grande que los machos reportados. La serie tipo de machos (DHMECN 4879–80) presenta coloraciones dorsales mucho más claras que la hembra, con bandas anchas cremas en las superficies posteriores de los muslos y extremidades (Fig. 10).

Distribución e historia natural: *Pristimantis puruscafeum*, es conocido únicamente de su localidad tipo en el Bosque Protector Cerro La Candelaria; todas estas localidades en los bosques siempreverde montanos de la cuenca alta del Río Pastaza a 3100 m de altitud (Fig. 4). Esta especie ha sido registrada en el estrato bajo de vegetación desde 20 cm hasta 110 cm de altura, sobre vegetación herbácea, arbustiva, helechos y dentro de bromelias. El holotipo hembra colectada el 11 de mayo del 2008, contenía 5 huevos fertilizados. *Pristimantis puruscafeum* ha sido encontrado en simpatria con *P. eriphus* y dos especies no descritas del género [11]. Algunos de los individuos de la serie tipo estuvieron

parasitados por ácaros de la familia *Epidermoptidae* en sus flancos.

Comentarios taxonómicos: *Pristimantis puruscafeum* por su morfología externa podría estar asociado con *Pristimantis bellae*, sin embargo, las relaciones filogenéticas de esta especie no están definidas. Al igual que Reyes-Puig y Yáñez-Muñoz [4], hemos decidido no asignar a esta especie ningún grupo putativo de especies de *Pristimantis*, hasta contar con evidencias moleculares que permitan esclarecer sus relaciones de ancestro descendencia.

Agradecimientos

Dejamos constancia de nuestro agradecimiento a todos quienes hicieron posible esta investigación. Las primeras exploraciones al volcán Tungurahua de JRP y CRP fueron financiadas por el Programa de Becas de Especies Amenazadas de Ecociencia, Conservación Internacional y la Real Embajada de los Países Bajos. Posteriormente la iniciativa de JRP sería complementada por el apoyo recibido de Fundación Ecominga, especialmente a Lou Jost, Nigel Simpson y Javier Robayo, y La Fundación Oscar Efrén Reyes de Baños. Agradecemos a Nelson Palacios y su familia de San Antonio, Manuel Chapungal de Chamana, Guillermo Sánchez de Runtún, Juan Merino de Pondoá, así como nuestros amigos de Baños, Marcelo Villafuerte, Alfonso Joaki y Gorki Ríos Alvear por todo el apoyo recibido para las expediciones de campo. El Ministerio del Ambiente otorgó las autorizaciones de investigación: 001-08 IC-FAU-DNB-PVS/MA y 02-14IC-FAU-FLO-DHNB/MA para la colección de especímenes y facilitó el apoyo de Ángel Palacios, Bernardo Huisha y Miguel Acuña del Parque Nacional Sangay. El trabajo de MYM es parte del Programa de investigación Red Terrana Ecuador, respaldado por el MECN. JRP y CRP agradecen especialmente a Marco Reyes Torres y Mercedes Puig por haberlos incentivado en sus primeras caminatas al Tungurahua, y a Elías Reyes y Dante Reyes por seguir motivando los sueños de conservación de los bosques montanos del Volcán Tungurahua.

Referencias

- [1] Reyes-Puig, J. 2008. Patrones de diversidad y Estado de conservación en los ensamblajes de ranas *Eleutherodactylus* (Anura:Brachycephalidae) en el flanco septentrional del Volcán Tungurahua. *Tesis de Licenciatura. Universidad Central del Ecuador. Pp: 1-134.*
- [2] 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.*
- [3] 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.*
- [4] 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.*
- [5] 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.*
- [6] Reyes-Puig, M.; Reyes-Puig, J.; Ríos-Alvear, G.; Reyes-Puig, C.; Velásquez-Alomoto, F. 2014. Ranas y Sapos en las estribaciones del Tungurahua. *Revista Nacional de Cultura, Letras, Artes y Ciencias del Ecuador. 26: 31-60.*
- [7] Lynch, J. D. y 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*
- [8] 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.*
- [9] 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.*
- [10] Duellman, W.; Lehr, E. 2009. Terrestrial-breeding frogs (Strabomantidae) in Peru. *Natur- und Tier-Verlag, Naturwissenschaft. Münster. Germany.*
- [11] Reyes-Puig, J.; Ramírez, S.; Yáñez-Muñoz, M.; Morales, M.; Recalde, L. 2013. Bosque Protector Cerro Candelaria: una isla de biodiversidad entre las nubes. Pp: 196-213 *En: MECN, JOCOTOCO y ECOMINGA. 2013. 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-Ecuador.*

APÉNDICE I

Especímenes examinados: *Pristimantis atratus* ECUADOR: Zamora Chinchipe: Reserva Biológica Tapichalaca, 2500m, MECN 2433 -43, 1658, 3045, 3046, 5269 -77. *Pristimantis floridus* ECUADOR: Pichincha: Reserva Orquideológica Pahuma, 1900 - 2700m, MECN 4168 -70, 5502 -09; Reserva Biológica Verdecocha, 2400-3200m, MECN 4249; La victoria, 2200-2403m, MECN 4935 -59. *Pristimantis bellae*: ECUADOR: Tungurahua DHMECN 4812-4810, Bosque Protector Cerro La Candelaria, 2000 m. *Pristimantis festae* ECUADOR: Napo: DHMECN 1891-1893, Embalse Salve Faccha, 3910 M. *Pristimantis leoni* ECUADOR: Carchi: Los Encinos, 3030-3040m, MECN 2284 -91. Pichincha: Reserva Biológica Yanacocha, 2328m, MECN 2523, 4232 -37. Carchi: Morán, 2700m, MECN 3810, 3811; Reserva Biológica Verdecocha, 2400-3200m, MECN 4243 -45. Carchi: El Chamizo, 3250m, MECN 4653, 4654, 4660, -62. Sucumbios: La Bonita, 2614m, MECN 6372 -87, 6391 -6412, 6441 -82, 6491. *Pristimantis pyrrhomerus* ECUADOR: Imbabura: Santa Rosa, Reserva Alto Chocó, 2500-2900m, MECN 2330 -2334. Pichincha: Reserva Biológica Verdecocha, 2400-3200m, MECN 4250; Bosque Protector Tandacato, 2048-3083m, MECN 4907; Cordillera del Salolla, 2751m, MECN 6803; Reserva Bellavista, 2375m, MECN 6804 -22. *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 tungurahua* ECUADOR: Tungurahua: DHMECN 4831, 4833-35, Nahuazo, Volcán Tungurahua, 2720 m; DHMECN 4832, Río Pucayacu, 2500 m. *Pristimantis yumbo* ECUADOR: Pichincha: DHMECN 04991, 4894, 4889-90, Bosque Protector Tandacato, 2048-3083m; DHMECN 4124-25, Lomas de Guatunpungo, Reserva Maquipucuna, 2400 m.

Rare birds in Ecuador: Second annual report of the Committee for Ecuadorian Records in Ornithology (CERO)

Aves exóticas en Ecuador: Segundo informe anual del Comité Ecuatoriano de Registros Ornitológicos (CERO)

Jonas Nilsson^{1,2,*}, Juan F. Freile^{1,3}, Roger Ahlman^{1,4}, Dušan M. Brinkhuizen^{1,5}, Paul J. Greenfield^{1,6}, Alejandro Solano-Ugalde^{1,7}

¹ Comité Ecuatoriano de Registros Ornitológicos. E-mail: cero.ecuador@gmail.com

² Calle Leonardo da Vinci 239 y calle Rafael Sanzio, edif. Oberer, Cumbayá, Ecuador.

³ Casilla Postal 17-12-122, Tumbaco, Ecuador.

⁴ Calle Juan de Illánz, edif. Double Diamond, Quito, Ecuador.

⁵ Casilla Postal 17-07-9345, Quito, Ecuador

⁶ Mindo Cloud Forest Foundation, urb. El Bosque, 2da etapa, calle Sexta #161, edif. El Parque, Quito, Ecuador.

⁷ Fundación Imaymana, calle Paltapamba 476, San Pedro del Valle, Nayón, Ecuador.

* Corresponding author/Autor principal, e-mail: jonas@wildsumaco.com

Editado por / Edited by: Diego F. Cisneros-Heredia PhD(c).

Recibido / Received: 15/10/2014. Aceptado / Accepted: 10/11/2014.

Publicado en línea / Published on Web: 19/12/2014. Impreso / Printed: 19/12/2014.

Abstract

We summarize bird species records submitted to the Committee for Ecuadorian Records in Ornithology (CERO) from July 2013 to March 2014. CERO compiles Ecuador's official country checklist and updates it annually. We present four new country records (*Amazonetta brasiliensis*, *Porzana albicollis*, *Haematopus ater*, *Chroicocephalus philadelphia*), one new country record that antedates earlier records (*Vireo flavifrons*), first voucher documentation for four species (*Larus californicus*, *Tangara guttata*, *Conirostrum bicolor*, *Cardellina pusilla*), and 26 significant range extensions or records of rare and poorly known species (*Oceanodroma leucorhoa*, *Oceanodroma hornbyi*, *Sula leucogaster*, *Phalacrocorax bougainvillii*, *Butorides virescens*, *Ardea herodias*, *Egretta rufescens*, *Egretta caerulea*, *Eudocimus albus*, *Eudocimus ruber*, *Anas clypeata*, *Anas cyanoptera*, *Aythya affinis*, *Gallinago delicata*, *Limosa fedoa*, *Larus delawarensis*, *Hydroprogne caspia*, *Glaucidium griseiceps*, *Chloroceryle aenea*, *Platyrinchus saturatus*, *Myiarchus crinitus*, *Tyrannus niveigularis*, *Knipolegus poecilurus*, *Doliornis remseni*, *Setophaga castanea*, *Lonchura malacca*). Three records are from the Galapagos Islands (*Oceanodroma leucorhoa*, *Butorides virescens*, *Egretta caerulea*), while all others were obtained in mainland Ecuador. Six species are eliminated from the Ecuadorian list (*Geotrygon violacea*, *Topaza pella*, *Attila bolivianus*, *Pachyrhamphus rufus*, *Pachyrhamphus validus*, *Lonchura atricapilla*). Two additional records were postponed for further expert revision (*Thalassarche cauta*) or for additional evidence (*Neomorhynchus pucheranii*) and three submitted records were rejected (*Patagioenas oenops*, *Hydropsalis maculicaudus*, *Colaptes rupicola*). This information updates our knowledge of the distribution and status of poorly known species in Ecuador, as well as the national bird checklist that currently reaches 1673 species (1608 confirmed with voucher documentation, 65 hypothetical).

Keywords. Distribution, status, birds, Ecuador.

Resumen

Presentamos los registros de aves enviados al Comité Ecuatoriano de Registros Ornitológicos (CERO) entre Julio 2013 y Marzo 2014. CERO recopila la lista oficial de aves del Ecuador y la actualiza anualmente. Presentamos cuatro registros nuevos para el país (*Amazonetta brasiliensis*, *Porzana albicollis*, *Haematopus ater*, *Chroicocephalus philadelphia*), un registro nuevo que antecede a otros previamente publicados (*Vireo flavifrons*), la primera documentación en el país de cuatro especies (*Larus californicus*, *Tangara guttata*, *Conirostrum bicolor*, *Cardellina pusilla*) y 26 extensiones significativas de distribución o registro de especies raras (*Oceanodroma leucorhoa*, *Oceanodroma hornbyi*, *Sula leucogaster*, *Phalacrocorax bougainvillii*, *Butorides virescens*, *Ardea herodias*, *Egretta rufescens*, *Egretta caerulea*, *Eudocimus albus*, *Eudocimus ruber*, *Anas clypeata*, *Anas cyanoptera*, *Aythya affinis*, *Gallinago delicata*, *Limosa fedoa*, *Larus delawarensis*, *Hydroprogne caspia*, *Glaucidium griseiceps*, *Chloroceryle aenea*, *Platyrinchus saturatus*, *Myiarchus crinitus*, *Tyrannus niveigularis*, *Knipolegus poecilurus*, *Doliornis remseni*, *Setophaga castanea*, *Lonchura malacca*). Tres registros provienen de las islas Galápagos (*Oceanodroma leucorhoa*, *Butorides virescens*, *Egretta caerulea*), mientras que todos los demás provienen del Ecuador continental. Se eliminan seis especies del listado nacional (*Geotrygon violacea*, *Topaza pella*, *Attila bolivianus*, *Pachyrhamphus rufus*, *Pachyrhamphus validus*, *Lonchura atricapilla*). Dos registros adicionales se pospusieron para revisiones más detalladas (*Thalassarche cauta*) o evidencias adicionales (*Neomorhynchus pucheranii*) y se rechazan los reportes de tres especies (*Patagioenas oenops*, *Hydropsalis maculicaudus*, *Colaptes rupicola*). Esta información actualiza nuestro conocimiento sobre la distribución y estado de especies de aves poco conocidas en Ecuador, así como el listado nacional de aves que actualmente incluye 1673 especies (1608 confirmadas y documentadas, 65 hipotéticas).

Palabras Clave. Distribución, estado, aves, Ecuador.

Record Number	Species	Locality, province	Date	Notes
2014-002	Peruvian Pigeon <i>Patagioenas oenops</i>	Chito, Zamora-Chinchipe	20 September 2007	Deficient documentation
2013-056	Spot-tailed Nightjar <i>Hydropsalis maculicaudus</i>	Gareno Lodge, Napo	9 September 2008	Misidentified Blackish Nightjar <i>Nyctipolus nigrescens</i>
2013-066	Andean Flicker <i>Colaptes rupicola</i>	Laguna Llaviuco, Azuay	14 June 2013	Deficient description

Table 1. Summary of rejected records submitted to the Committee for Ecuadorian Records in Ornithology (CERO) between 2013 and 2014.

Introduction

In CERO's first annual report [1] we briefly summarized the history and recent growth in Ecuadorian ornithology. In recent years, ornithological activity in the country has grown substantially, with the addition of at least 17 species for the country over the last four years, two new subspecies, a multitude of range extensions and an increase in significant new data concerning species that had previously been regarded as vagrants [1,2]. More and more reports are being received by CERO for revision and we would like to take the opportunity here to summarize a few important issues to take into account when finding a reportable bird species (see "Materials and Methods" below).

The best way to document any observation of a rare or noteworthy bird is either with a photograph/video, an audio recording or a voucher specimen. Permits are required for collecting birds in Ecuador. When using a camera, it is important to get as many different photos from various angles and as close as possible. Flight pictures are often conclusive. Audio recordings are just as important, especially for cryptic but vocal species, e.g., ovenbirds, antbirds, antpittas, tapaculos and flycatchers. Observers who do not carry a camera or recording equipment should try to provide as accurate and precise field notes and sketches as possible, preferably taken *in situ* during or right after the observation. A thorough and accurate description sent to CERO can be as acceptable as a photograph/video, audio recording or voucher specimen. Important things to consider when filling out a report are the following:

- Your own personal observation is what counts. Don't copy field marks or descriptions from a field guide. Different individuals of the same species often vary to some extent, but a combination of basic observed field marks often reveals the identification of a species [3].
- Important to look at and describe as many details and field characteristics as possible. A good way to become an avid birder is to learn the different anatomical and topographical parts of a bird. These are usually described in most field guides.

- Behaviour, size, moult and vocalizations are just as important as plumage; describe these as accurately as possible. Direct comparison with other accompanying species is very helpful as is taking into account other similar species that 'your bird' could be confused with. Moulting feather tracts is very important for identifying migrants. If you are not carrying recording equipment, a simply written description of the vocalizations heard can be very useful.
- A picture says more than a 1000 words. A sketch or field drawing (e.g., black-and-white or in color) can be extremely helpful in determining the identity of a species. Even if you are not particularly artistic, a simple sketch that highlights the most important characters you observed can do the trick.

A fairly recent method of keeping track of your bird observations and at the same time contributing to science is to report your observations to eBird (<http://ebird.org>). As more and more information accumulates in this database, possible patterns of distribution and migration might be revealed and this information can also be used for statistical research [4].

In this second report, CERO presents submissions received from July 2013 through March 2014, with records dating back to July 2007. Forty-six out of 51 records were accepted (from 35 species), two records are pending further discussion and three were considered insufficient for acceptance (Table 1). Further, we reviewed ten records of species to be removed from the Ecuador list (invalidate records), of which six were accepted.

Materials and Methods

CERO currently receives and reviews record forms of rare species, new country records, or significant range extensions. These records are voluntarily submitted by their authors through CERO's e-mail address (cero.ecuador@gmail.com) and webpage (<http://ceroecuador.webs.com/>), where the national country checklist and a list of 'most-wanted' species are also published. New country records since 2007 were evaluated and accepted by unanimous vote, while

first documentation, undocumented records of previous hypothetical species and major range extensions were accepted by majority vote. Taxonomy and species sequence follows August 2014 version of SACC [5]. Most sound-recordings were deposited by observers at the xeno-canto online archive (<http://www.xeno-canto.org/>), for which a XC code is provided in the species accounts. Photographs are deposited at CERO digital archives, and most are published in this report. Some photographs are low-resolution files and/or poor images, but published herein due to their relevance as voucher documentation. Figures 1-3 below show photographic documentation for records arranged by categories (new country records, first documentation, rare species, and significant range extensions). Locality coordinates and elevation are provided in Table 2. An asterisk is used to indicate the first observer. Record numbers represent a unique, sequential numerical code.

Species accounts

Leach's Storm-petrel *Oceanodroma leucorhoa*

Record no. 2014-022: Province of Galápagos, between Española and San Cristóbal islands (photo), 14 November 2012 (D. Brinkhuizen).

One individual was photographed at sea, flying east between Española and San Cristóbal islands (Figure 3a). So far there are only a few sight records from Ecuador, all from Galápagos, but at least two were apparently obtained en route between Guayaquil and Galápagos [6]. The species possibly remains overlooked [7]. Determining subspecies might prove essential, as more than one species could be involved [8,9].

Ringed Storm-petrel *Oceanodroma hornbyi*

Record no. 2014-010: Province of Manabí, between Puerto López and La Plata Island (photo), 31 July 2007 (A. Woodall).

A single individual was photographed when it landed next to the observer's boat en route to Isla de la Plata (Figure 3b). There are very few documented records of this species off the coast of Ecuador [1] with one specimen recently deposited at the ornithological collection of the Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales, Quito (MECN 8637): a dead bird found by J. Illanes at Ecuasal, Mar Bravo, on 7 September 2007.

Brown Booby *Sula leucogaster*

Record no. 2013-058: Province of Santa Elena, La Chocolatera (photo), 17-18 August 2013 (B. Haase* and R. Ahlman).

An immature bird was seen on several occasions and photographed (Figure 3c) at La Chocolatera. Most likely the same individual was seen until late September 2013 (B. Haase, *in litt.*, October 2013). There have been previous records of adult *S. leucogaster* at this site and it seems plausible that the species occurs annually along Ecuador's coast [1].

Guanay Cormorant *Phalacrocorax bougainvillii*

Record no. 2014-031: Province of El Oro, near Isla Santa Clara, 19 December 2013 and 20 February 2014 (photo) (F. Sornoza* and J. Nilsson).

On 19 December 2013, a group of 28 individuals was first seen and photographed on a sandbank (Bajo del Burro) adjacent to Santa Clara Island by F. Sornoza (*in litt.*, January 2014). Another six birds (including an immature) were observed and photographed on rocky pillars adjacent to Santa Clara Island (Figure 3d). There are still very few records of the species in Ecuador, all from the southwest [10,11].

Green Heron *Butorides virescens*

Record no. 2013-061: Province of Galápagos, Santa Cruz Island, Black Turtle Cove (photo), 14 November 2012 (R. Ahlman).

An adult was observed at close range at a coastal mangrove lagoon at the northern part of the island (Figure 3e). This is the second record for the Galápagos Islands (but the first published photograph); it was first reported from the highlands of Floreana on 28 March 1996 [12].

Great Blue Heron *Ardea herodias*

Record no. 2014-005: Province of Orellana, Hotel La Misión, Coca, Napo River (photo), 24 January 2014 (P. Willoughby).

Record no. 2014-035: Province of Esmeraldas, Las Peñas (photo), 24–31 December 2013 (J. Nilsson).

The Napo River record (Figure 3f) involves the first published record for eastern Ecuador and the Amazon basin [10]. At Las Peñas, the species was first reported in December 2010 (D. Brinkhuizen and B. de Bruin, unpubl. data), with up to five individuals being seen annually in marshy areas north of town [1] and thus, CERO no longer requires reports from this area.

Reddish Egret *Egretta rufescens*

Record no. 2014-013: Province of Santa Elena, Pacoa salt pans north of San Pablo (photo), 14 November 2013 (B. Haase*, D. Brinkhuizen and J. Nilsson).

A dark-morph sub-adult was discovered on 14 November 2013 in a pond at the Pacoa salt pans complex (Figure 3g). It was observed several weeks earlier but was, at the time, regarded as an atypical Little Blue Heron *Egretta caerulea*. The individual was still present on 6 September 2014 (J. Nilsson, B. Olson and J. Olson, unpubl. data). It involves Ecuador's second record, with the previous being a white morph in Amazonia [1].

Locality, province	Latitude/Longitude	Elevation (m)
Atacames, Esmeraldas	00°52'N/79°50'W	0
Bahía de Caráquez, Manabí	00°35'S/80°25'W	0
Buenaventura, El Oro	03°33'S/79°59'W	1000
Cabañas San Isidro, Napo	01°35'S/77°55'W	2000
Canta Gallo, Sucumbíos	00°17'N/76°18'W	280
Cerro Mongus, Carchi	00°27'N/77°52'W	3400
Chanduy, Santa Elena	02°24'S/80°41'W	0
Chito, Zamora Chinchipe	04°56'S/79°03'W	c. 950
Coca, Orellana	00°27'S/76°58'W	250
Cuyabeno River, Sucumbíos	00°04'N/76°12'W	200
Ecuasal salt pans, Santa Elena	02°14'S/80°57'W	0
Entrance to Silanche Bird Sanctuary, Pichincha	00°14'N/79°22'W	c. 450
Española-San Cristóbal Islands, Galápagos	01°08'S/89°36'W	0
Estación Científica Yasuní, Orellana	00°40'S/76°23'W	220
Gareno Lodge, Napo	01°02'S/77°23'W	400
Jardín Botánico, Quito, Pichincha	00°11'S/78°29'W	2780
La Chocolatera, Santa Elena	02°11'S/81°00'W	0
La Sabalera, Lita, Carchi	00°52'N/78°28'W	650
La Segua, Manabí	00°42'S/80°11'W	10
La Selva Lodge, Sucumbíos	00°29'S/76°22'W	250
La Tola, Esmeraldas	01°12'N/79°03'W	0
Lagartococha, Sacha Lodge, Sucumbíos	00°27'S/76°27'W	240
Lago Agrio-Tarapoa road, Sucumbíos	00°02'S/76°34'W	260
Lago de Tilapia fishponds, Lago Agrio, Sucumbíos	00°12'/76°51'W	300
Las Peñas, Esmeraldas	01°06'N/79°09'W	0
Llaviuco Lake, Azuay	02°52'S/79°05'W	2800
Manglares-Churute (15 km north of), Guayas	02°19'S/79°38'W	10
Mataje, Esmeraldas	01°21'N/78°43'W	50
Pacoa salt pans, Santa Elena	02°06'S/80°43'W	5
Playa del Oro, Esmeraldas	00°52'N/78°48'W	200
Puerto Hualtaco, El Oro	03°26'S/80°13'W	5
Puerto Jelí, Santa Rosa, El Oro	03°27'S/79°58'W	10
Puerto López-La Plata Island, Manabí	01°25'S/80°57'W	0
Quebrada Honda, Zamora-Chinchipe	04°30'S/79°10'W	1600–2400
Rio Suno (mouth of), Sucumbíos	00°44'S/77°12'W	300
San Pablo estuary, Santa Elena	02°08'S/80°46'W	5
San Pablo Lake, Imbabura	00°13'N/78°12'W	2660
Santa Clara Island, El Oro	03°10'S/80°25'W	0
Santa Cruz Island, Galápagos	00°29'S/90°16'W	0
Tundaloma, Esmeraldas	01°10'S/78°45'W	c. 35
Valle del Santiago, Morona Santiago	04 27 S, 77 38 W	700–800
Wildsumaco Lodge, Napo	00°40'S/77°36'W	1500
Yahuarcocha Lake, Imbabura	00°22'N/78°05'W	2200
Yarina Lodge, Orellana	00°28'S/76°45'W	800
Zamora, Zamora-Chinchipe	04°04'S/78°05'W	1000

Table 2. Localities of records submitted to the Committee for Ecuadorian Records in Ornithology (CERO) between 2013 and 2014.

Little Blue Heron *Egretta caerulea*

Record no. 2014-038: Province of Galápagos, Academy Bay, Puerto Ayora, Santa Cruz Island (photo), 3 March 2014 (J. Toyra).

A single adult was photographed on a rocky shore-line and represents the fourth published record for the Galápagos Islands [11] (Figure 3h).

White Ibis *Eudocimus albus*

Record no. 2014-021: Province of Sucumbíos, 14 km east of Lago Agrio on the road to Tarapoa (photo), 10–24 March 2014 (J. Nilsson*, J. Olson*, B. Olson*, T. Seimola and D. Brinkhuizen).

A single immature bird, moulting to adult plumage, was observed on 10 March 2014 at a fish farm complex east of Lago Agrio (Figure 3i). The bird was observed amongst a flock of 4–6 Scarlet Ibis *Eudocimus ruber* (see below). It is the first record for eastern Ecuador [10]. Although the species is fairly common in the west [10], the origin of the flock observed is most likely from eastern Colombia [13].

Scarlet Ibis *Eudocimus ruber*

Record no. 2014-030: Province of Sucumbíos, 14 km east of Lago Agrio on the road to Tarapoa (photo), 10–24 March 2014 (J. Nilsson*, J. Olson*, B. Olson*, T. Seimola and D. Brinkhuizen).

A maximum of six birds (one adult and five immatures), together with an immature White Ibis *Eudocimus albus* (see above), were observed and photographed at a fish farm complex east of Lago Agrio (Figure 3j). Two birds (one adult and one immature) were previously reported from the same site [1]. It is unclear if their presence is seasonal (both observations are from March, during the dry season) and if the adult in question is the same individual observed a year earlier.

Northern Shoveler *Anas clypeata*

Record no 2013-062: Province of Esmeraldas, Las Peñas (photo), 4 October 2013 (R. Ahlman).

A single adult female was seen and photographed in the wetlands north of Las Peñas. Three individuals were photographed at the same site on 3 November 2013 (D. M. Brinkhuizen, unpubl. data). It seems that the species is a 'regular' visitor to this area during boreal winter, but as only a few records exist [1], CERO would like to further monitor its occurrence here and elsewhere in Ecuador.

Cinnamon Teal *Anas cyanoptera*

Record no 2013-065: Province of Santa Elena, Ecuasal salt pans, Salinas (photo), 15–16 August 2013 (B. Haase*, R. Ahlman).

Record no 2014-007: Province of Esmeraldas, Atacames (photo), 22 March 2014 (R. Ahlman).

Record no 2014-037: Province of El Oro, Puerto Hualtaco, N of Huaquillas, 26 July 2013 (J. Nilsson, D. Brinkhuizen).

Record no 2014-039: Province of El Oro, along the road to Puerto Jeli west of Santa Rosa (photo), 10–11 September 2013 (J. Nilsson).

Two adult males, two immature males and two females were seen in a saltpan complex at Salinas, but was not relocated on 17 August. A single immature male together with Blue-winged Teals *Anas discors* were seen close to Atacames (Figure 3k). One male and two females were seen in a shrimp pond east of Puerto Hualtaco, close to the Peruvian border. Finally, a group of five pairs were seen and photographed in a shrimp pond west of Santa Rosa, which is the largest number recorded so far in Ecuador.

First records for Esmeraldas and Santa Elena provinces. The subspecific affinity is still not clear but birds seen during austral winter in southwest coastal Ecuador might belong to *A. c. orinomus*, which is common in western Peru [14]. The record from Esmeraldas could pertain to the northern migrant *A. c. septentrionalium* given the date and that it consorted with *A. discors*. There is also a recent published record of three birds shot in Manabí province [15]. It seems likely that *A. cyanoptera* is becoming a regular austral migrant in small numbers to the southwest coast. It remains unclear, though, if it was overlooked here before or if it has in fact increased in number.

Brazilian Teal *Amazonetta brasiliensis*

Record no 2014-006: Province of Sucumbíos, north of Lago Agrio (photo), 5 March 2014 (R. Ahlman).

First record for Ecuador. A male (possibly an immature given the somewhat dusky bill) was seen and photographed at "Lago de Tilapia", a large expanse of fishponds 15 km N of Lago Agrio (Figure 1a). The observer suspects that this bird was a migrant or wandering individual that had been pushed down by heavy rain during the night/early morning. It was searched for in the afternoon when the rain had stopped but not relocated. It is likely that it originated from the llanos of Colombia, possibly straying to new areas after deforestation in the Amazon, similar to other species [1].

Lesser Scaup *Aythya affinis*

Record no 2014-011: Province of Santa Elena, Pacoa salt pans N of San Pablo (photo), 16 November 2012 (B. Haase).

Record no 2014-033: Province of Manabí, La Segua marshes, W of Chone (photo), 5 January 2014 (J. Nilsson).

First record for the province of Santa Elena [11] involves one individual seen and photographed at the saltpan complex at Pacoa. At La Segua, 25 individuals were observed and photographed, matching numbers seen in January 2013 (Figure 3l). The 2013 flock grew to 95 individuals in February [1]; unfortunately we have no reports from February 2014. Number of records

and the number of birds in each record have notably increased over the last years [1,10], but CERO will continue to receive reports of this species to further document its occurrence in the country.

Ash-throated Crake *Porzana albicollis*

Record no 2014-018: Province of Sucumbios, Sacha Lodge (photo, recording), 17 January 2014 (R. Vic-kers*, M. Lysinger, J. Nilsson).

First record for Ecuador. Several territorial pairs of what apparently is a breeding resident population were found at Laguna Lagartococha, Sacha Lodge on 17 January 2014 (Figure 1b). Lagartococha is an old oxbow lake overgrown with grass, scattered trees and bushes, where the lodge keeps a small canal open for canoeing. As there are a few pairs here, it seems likely that it will be found elsewhere in marshy habitat in northern Amazonian Ecuador.

Blackish Oystercatcher *Haematopus ater*

Record no 2013-057: Province of Santa Elena, Chanduy (photo), 20 June 2013 (G. E. Wallace*, H. Freifeld*, R. Ahlman).

First record for Ecuador. A juvenile was discovered at Chanduy village and remained until at least 9 August 2014 (R. Ahlman). It was seen and photographed by several observers (Figure 1c). During low tide it fed on exposed rocks just off the fishing port while during high tide it rested on sandy beaches. This record could involve a post-breeding dispersal of a juvenile that fledged in northern Peru [14], or possibly an overshooting austral migrant. During its stay at Chanduy the bird moulted from juvenile to adult plumage.

Wilson's Snipe *Gallinago delicata*

Record no 2014-004: Province of Imbabura, Lago San Pablo (photo), 23 January 2014 (R. Ahlman).

A flock of three was found at a water treatment plant on the west side of the lake. The birds were photographed and heard calling (Figure 3m). This represents the fifth record for Ecuador but only the second documented. Two birds were found here during the boreal winter of 2013 [1]. See Freile *et al.* [1] for a detailed discussion of previous observations.

Marbled Godwit *Limosa fedoa*

Record no 2014-040: Province of Manabí, Bahía de Caráquez, 1 January 2014 (J. Nilsson).

Twenty-one individuals were seen in the Chone river estuary near the new bridge between Bahía de Caráquez and San Vicente. This is a known wintering site since it was first discovered in 2007 [1]. CERO no longer requires written reports from this area. However, as only a handful of records exist from Ecuador [1,10], new localities will provide a more thorough understanding of the species' migration in Ecuador.

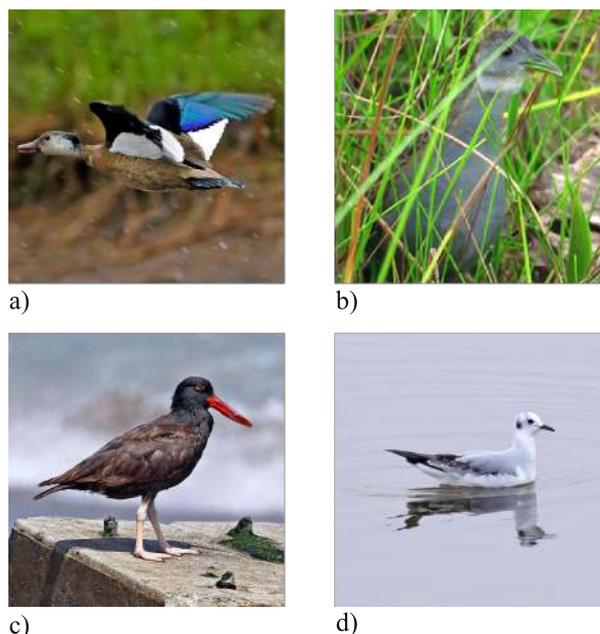


Figure 1. New country records for Ecuador. a) Brazilian Teal *Amazonetta brasiliensis* (R. Ahlman); b) Ash-throated Crake *Porzana albicollis* (J. Nilsson); c) Blackish Oystercatcher *Haematopus ater* (R. Ahlman); d) Bonaparte's Gull *Chroicocephalus philadelphia* (D. M. Brinkhuizen).

Ring-billed Gull *Larus delawarensis*

Record no. 2013-064: Province of Esmeraldas, La Tola (photo), 3–4 October 2013 (R. Ahlman).

A single bird in second winter plumage was observed and photographed on a shrimp pond (Figure 3n), resting and feeding together with Laughing Gull *Leucophaeus atricilla* and Grey-hooded Gull *Chroicocephalus cirrocephalus*. It was last seen and photographed on 2 November 2013 (J. Nilsson). This represents the second confirmed record from Ecuador, the first being photographed at La Libertad, Province of Santa Elena in 1991 [10]. Haase [11] reports several unconfirmed sightings from Ecuador and Monteverde but precludes validation, owing to identification uncertainty.

California Gull *Larus californicus*

Record no. 2014-008: Province of Imbabura, Yahuarcocha (photo), 14 February 2014 (K. Terán Portelles, E. Guevara, R. Hipo, D. Pozo and L. Salagaje).

A single bird in first winter plumage was first located on 14 February 2014 while resting on floating material and on a nearby dock. Other observers later relocated it, with last observations on 5 March 2014 (R. Ahlman). This is the first documented record for South America [5], and the second Ecuadorian record (Figure 2a). Ridgely & Greenfield [10] report a sighting from Ecuador, Province of Santa Elena. R. S. Ridgely (*in litt.* 2011) considers the sighting from Ecuador as valid since observers (Davis Finch and he) saw the bird for a protracted time period and took detailed field notes.

Bonaparte's Gull *Chroicocephalus philadelphia*

Record no. 2014-015: Province of Santa Elena, San Pablo estuary (photo), 12–14 November 2013 (B. Haase*, J. Nilsson and D. Brinkhuizen).

First record for Ecuador. A bird in first winter plumage was first located on the morning of 12 November 2013 swimming and foraging in a phalarope-like manner. It remained in the same channel at San Pablo estuary for the next two days when photographed (Figure 1d), foraging together with Grey-hooded Gull *Chroicocephalus cirrocephalus* and Franklin's Gull *Leucophaeus pipixcan*.

Caspian Tern *Hydroprogne caspia*

Record no. 2014-032: Province of Manabí, La Segua marsh (photo), 5 January 2014 (J. Nilsson).

Seven birds of undetermined age and sex were located and photographed on a muddy lakeshore of a small, fairly open lake with small floating 'islands', surrounded by marshy vegetation and muddy beaches (Figure 3o). This record, which is the largest concentration of the species in Ecuador to date, is from the same area previously reported by CERO [1], and suggests that the wetlands between Chone and San Vicente are possibly a regular stopover/wintering site for the species.

Central American Pygmy-owl *Glaucidium griseiceps*

Record no. 2014-003: Province of Carchi, La Sabalera, near Lita, 15 August 2008 (P. Moscoso* and J. Freile).

A single bird was observed in the daytime, roosting in a tree hole c. 1.6 m above the ground, inside tall primary forest. It remained motionless for 3 min, slowly moving its head sideways. There are few records of this species in Ecuador [16] and the species' natural history, distribution, status, and even taxonomic affinities in Ecuador remain poorly known [10].

American Pygmy Kingfisher *Chloroceryle aenea*

Record no 2014-026: Province of Pichincha, Jardín Botánico de Quito (photo), 13–15 July 2013 (R. Ahlman, S. Woods).

A female-plumaged bird was photographed and seen by various observers at a small pond surrounded by lush bushes and smaller trees in northern Quito (2750 m elevation) (Figure 3p). This constitutes the first Ecuadorian highlands record [10], with few observations from the Mindo area (A. Solano-Ugalde and J. Freile, unpubl. data). It is reported as casual in the Bogotá (Colombia) area, at 2600 m elevation [13,17].

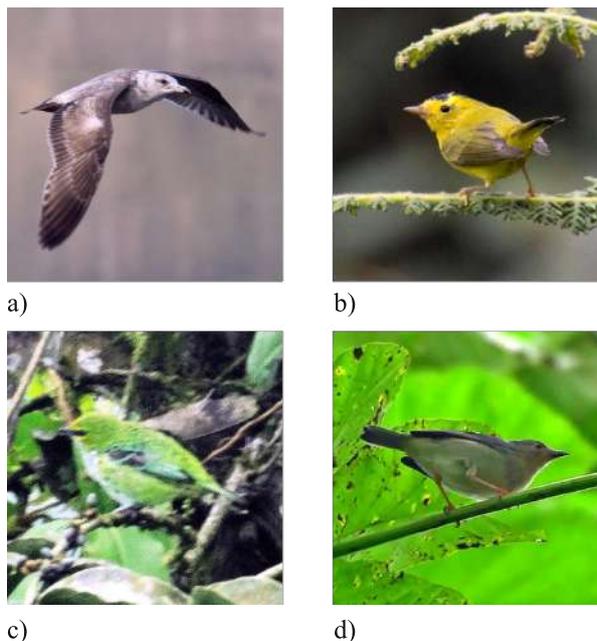


Figure 2. First documented records of birds previously regarded as hypothetical occurrences in Ecuador. a) California Gull *Larus californicus* (D. M. Brinkhuizen); b) Wilson's Warbler *Cardellina pusilla* (D. M. Brinkhuizen); c) Speckled Tanager *Tangara guttata* (J. Nilsson); d) Bicolored Conebill *Conirostrum bicolor* (J. Nilsson).

Cinnamon-crested Spadebill *Platyrinchus saturatus*

Record no 2013-059: Province of Sucumbíos, Canta Gallo, N of San Miguel River, 21 September 2013 (J. Nilsson).

A single individual was seen at mid strata inside selectively logged old growth (*terra firme*) with open understory, accompanying a small mixed species flock. This is only the second record for Ecuador; the first record being a male mist-netted and collected in the same area 20 years earlier, on 9 Aug 1993 [10].

Great Crested Flycatcher *Myiarchus crinitus*

Record no 2013-060: Province of Pichincha, Jardín Botánico de Quito (photo), 17 October 2012 (R. Ahlman).

Record no 2014-027: Province of Esmeraldas, Playa del Oro, 17 January 2014 (I. Ellis, J. Nilsson, G. Ellis).

Record no 2014-028: Province of Esmeraldas, Mataje (photo), 29 December 2013 (J. Nilsson, I. Ellis, G. Ellis).

Record no 2014-029: Province of Esmeraldas, Tunda Loma (photo), 19 January 2014 (I. Ellis, J. Nilsson, G. Ellis).

A juvenile was seen and photographed in a lush area with trees and bushes in northern Quito (2750 m elevation). This is the third record for the Ecuadorian highlands, the first and second records coming from the same locality [1]. It is known at up to 2600 m on the

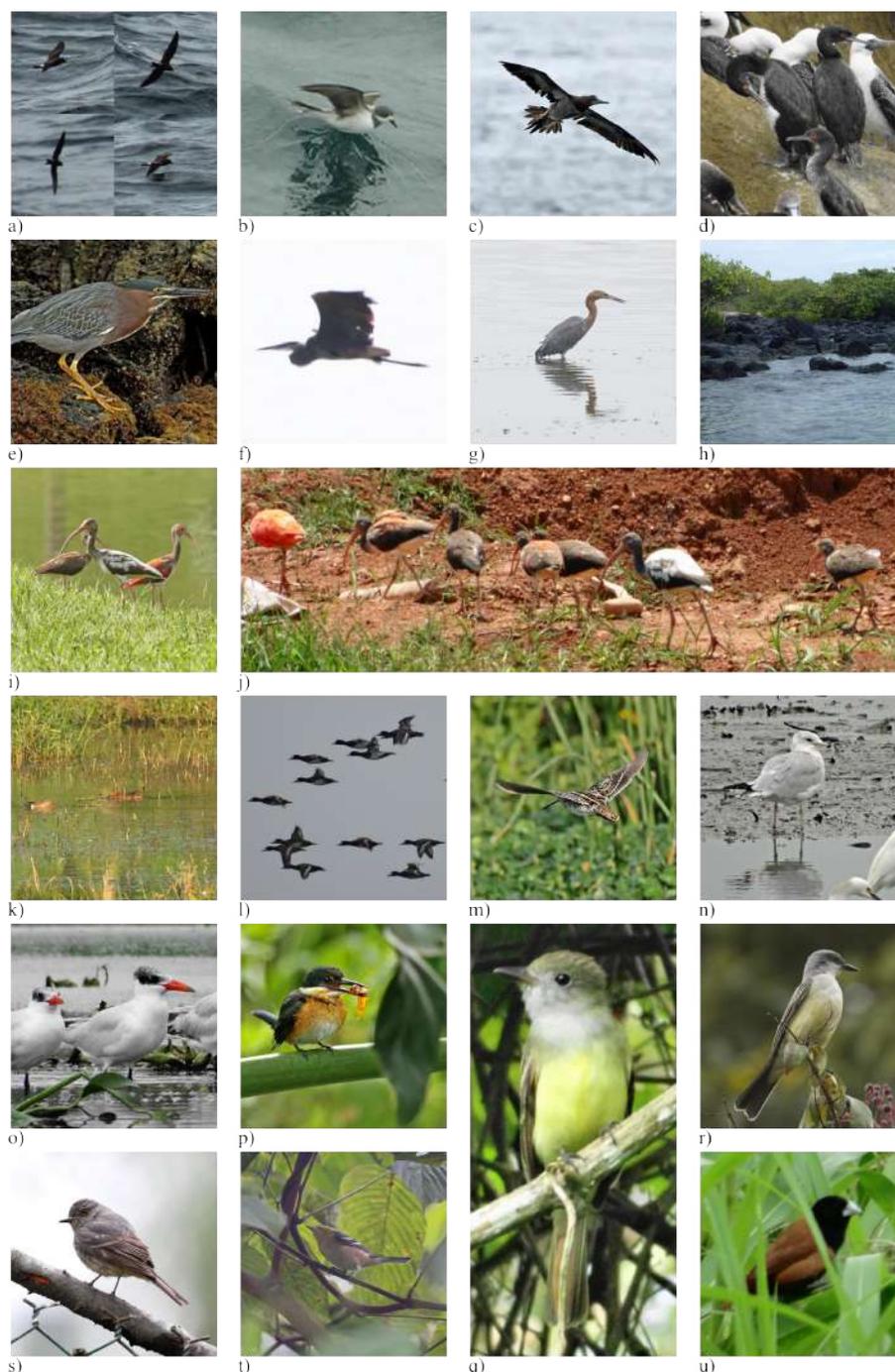


Figure 3. Rare birds and major distributional extensions recorded in Ecuador from July 2007 to March 2014. a) Leach’s Storm-Petrel *Oceanodroma leucorhoa* (D. M. Brinkhuizen); b) Ringed Storm-Petrel *Oceanodroma hornbyi* (J. Topham); c) Brown Booby *Sula leucogaster* (R. Ahlman); d) Guanay Cormorant *Phalacrocorax bougainvillii* (J. Nilsson); e) Green Heron *Butorides virescens* (R. Ahlman); f) Great Blue Heron *Ardea herodias* (Paul J. Willoughby); g) Reddish Egret *Egretta rufescens* (D. M. Brinkhuizen); h) Little Blue Heron *Egretta caerulea* (J. Toyra); i) White Ibis *Eudocimus albus* (D. M. Brinkhuizen); j) Scarlet Ibis *Eudocimus ruber* (D. M. Brinkhuizen); k) Cinnamon Teal *Anas cyanoptera* (R. Ahlman); l) Lesser Scaup *Aythya affinis* (J. Nilsson); m) Wilson’s Snipe *Gallinago delicata* (R. Ahlman); n) Ring-billed Gull *Larus delawarensis* (R. Ahlman); o) Caspian Tern *Hydroprogne caspia* (J. Nilsson); p) American Pygmy Kingfisher *Chloroceryle aenea* (R. Ahlman); q) Great Crested Flycatcher *Myiarchus crinitus* (J. Nilsson); r) Snowy-throated Kingbird *Tyrannus niveigularis* (D. M. Brinkhuizen); s) Rufous-tailed Tyrant *Knipolegus poecilurus* (R. Ahlman); t) Bay-breasted Warbler *Setophaga castanea* (S. Sæther); u) Tricolored Munia *Lonchura malacca* (J. Nilsson).

Bogotá Savanna in Colombia [17] and it is recorded as far south as N Peru [14]. One individual was seen and heard in the canopy of tall old growth, c. 1.5 km E of Playa del Oro village, along the Pueblo Trail. It responded well to playback of its own species. Two individuals were seen along a forest trail west of the

village of Mataje on two different occasions: 29 December 2013 and 20 January 2014. Lastly, one bird was seen and photographed a few km SE of Tunda Loma Lodge (Figure 3q). There is only one earlier documented record from the west slope [1]. Considering that four individuals were seen within three weeks in

species	tarsus	culmen length	culmen width	culmen depth	tail	wing chord
<i>P. homochrous</i>	22.2	16.2	9.2	7.6	68	87.9
<i>P. validus</i>	25.5	17.5	9.6	8.3	75.1	101.5
MECN 7225	23.4	15.4	8.1	6.6	66.5	89.5

Table 3: Measurements of museum specimens of *Pachyramphus homochrous*, *P. validus* and specimen MECN 7225, from southern Ecuador, incorrectly identified as *P. validus*. Data for *P. homochrous* is the mean obtained from 15 specimens studied in MECN and MUMSM. Data for *P. validus* is mean of two specimens studied in MUMSM. Data in cm.

the same general area (extreme northwest Ecuador) we suggest that the species might be more regular here during boreal winter than previously thought.

Snowy-throated Kingbird *Tyrannus niveigularis*

Record no 2014-023: Province of Pichincha, Jardín Botánico de Quito (photo), 4 March 2014 (D. Brinkhuizen).

Two individuals were seen and photographed in a lush area with trees and bushes in northern Quito (2750 m elevation) (Figure 3r) and at least one individual was still present in October 2014. This represents the first Ecuadorian highlands record as well as the first high Andes record [10,17].

Rufous-tailed Tyrant *Knipolegus poecilurus*

Record no 2014-024: Province of Pichincha, Jardín Botánico de Quito (photo), 22 April 2011 (R. Ahlman).

Record no 2014-025: Province of Pichincha, Jardín Botánico de Quito (photo), 19 November 2010 (R. Ahlman).

One adult was seen and photographed on two separate occasions (November 2010 and April 2011) while foraging in bushes and small trees as well as on the ground, at 2750 m elevation (Figure 3s). This represents the first record for the Ecuadorian Interandean valleys [10]. Elsewhere the species is known to range up to 3100 m [14, 17]. It remains to be determined where these birds come from. The main population in Ecuador ranges mainly from 1000-2000 m in the east Andean slopes, but there is at least one record of a breeding pair in the extreme northwest (J. Nilsson, unpubl. data) [18], and it is known from Nariño in southwest Colombia [13].

Chestnut-bellied Cotinga *Doliornis remseni*

Record no. 2014-036: Province of Carchi, Cerro Monagus (photo), 22 January 2014 (M. Cabrera, J. Nilsson, I. Ellis, G. Ellis).

At least three individuals, presumably an adult male, an adult female and an immature were observed in dense elfin forest just below treeline. The male was spreading its crest while vocalizing. Although there are several earlier records from this type locality [19], we report the first ever recording of its vocalizations (xeno-canto XC 165648, 165650), which is almost identical to Bay-vented Cotinga *Doliornis sclateri* (see

xeno-canto XC 41676). The presence of a young bird represents a hint towards the basically unknown breeding biology of the genus *Doliornis* [20]. A photographic record was recently published from a new locality in Ecuador for the species (Quebrada Río Plata, Llanganates National Park) [21].

Yellow-throated Vireo *Vireo flavifrons*

Record no. 2013-054: Province of Napo, Wildsumaco Lodge, Coopmans' trail, 10 February 2008 (J. Nilsson).

A single adult was found foraging for insects 7 m up in an open tree in tall secondary forest, close to a mixed species flock. Nilsson et al. [22] reported this as the first Ecuadorian record, antedating observations from the provinces of Esmeraldas and Imbabura presented in CERO's first annual report [1].

Wilson's Warbler *Cardellina pusilla*

Record no. 2014-001: Province of Napo, Cabañas San Isidro (photo), 8 December 2013 (H. Brieschke*, M. Lysinger and C. Bustamante).

An adult male was observed and photographed at close range in secondary forest edge in the lodge gardens (Figure 2b). It was continuously seen until 13 February 2014 (D. Brinkhuizen). This is the first photo-documented record for the country and the first for the eastern Andes. There are at least three previous observations known to CERO from the provinces of Pichincha and Loja [23].

Bay-breasted Warbler *Setophaga castanea*

Record no. 2014-012: Province of Esmeraldas, Playa de Oro, 22 February 2012 (L. Seitz).

Record no. 2014-020: Province of Pichincha, Km. 126 Calacalí-La Independencia Road (photo), 4 February 2014 (D. Brinkhuizen, J. Gustad, S. Sæther, K. Sæther, C. Kamsvåg, K. Hendseth).

A single observation from Playa de Oro was posted on eBirds, but no details were provided. A photo from the same site was later submitted by N. Athanas, which corroborates the identification. In Pichincha, one immature male was observed and photographed in secondary forest edge at the entrance to Río Silanche Bird Sanctuary (Figure 3t). It was loosely associated with a mixed species flock, occasionally uttering a *tjek* call reminiscent of Backpoll Warbler *Setophaga striata*.

Speckled Tanager *Tangara guttata*

Record no. 2013-055: Province of El Oro, Buenaventura Reserve, Piñas (photo), 18 July 2012 (L. Navarrete).

Record no. 2014-014: Province of El Oro, edge of Buenaventura Reserve, old hummingbird garden, Piñas (photo), 16 February 2014 (J. Nilsson).

First record involves two birds, presumably adults, observed (one of them photographed) in tall second growth while following a mixed tanager flock dominated by Beryl-spangled Tanager *Tangara nigroviridis*. Second record involves a single adult observed and photographed at the edge of primary forest canopy, adjacent to the highway (Figure 2c). It was seen briefly joining a mixed species flock that included other tanager species, Scarlet-rumped Cacique *Cacicus uropygialis* and other birds attracted by swarming termites. The species was first observed in this area by P. J. Greenfield on December 2003 and by M. Lysinger on February 2004 [18]. The taxonomy of this population, which is separated by more than 650 km from the nearest population in Colombia (*T. guttata tolimae*) [24], remains unclear. It may well represent an isolated population of *T. g. tolimae* or a new taxon [18]. Specimens are needed to confirm its identity.

Bicolored Conebill *Conirostrum bicolor*

Record no. 2014-016: Province of Sucumbíos, unnamed young river island near Sani Isla, Napo River (photo), 6 March 2014 (A. Solano-Ugalde*, J. Nilsson, B. Olson, J. Olson).

A single adult male was observed, videotaped, sound recorded and photographed by J. Nilsson, B. Olson and J. Olson, while foraging acrobatically, clinging upside-down, in subcanopy of a *Cecropia* sp. stand (Figure 2d). This represents the first documented record of the species in Ecuador, where a single previous observation exists [10]. A month earlier the species was observed at the same locality (A. Solano-Ugalde, *in litt.* March 2014), and C. Vogt last saw it on 25 September 2014.

Tricolored Munia *Lonchura malacca*

Record no. 2014-034: Province of Guayas, 10-20 km north of Manglares-Churute (photo), first found in December 2004 (O. Carrión*, M. Gurney, J. Nilsson, P. Coopmans, A. Solano-Ugalde, D. M. Brinkhuizen).

On 21 February 2014 some 70 birds were observed and photographed feeding on seeding grass at the edge of a dirt road through vast sugar cane fields (Figure 3u). Also seen flying with dry grass in their beaks, most likely nesting material. This record further confirms the presence of an established feral population of this species along the central coastal lowlands of Ecuador [25], where apparently first found by M. Gurney in December 2004 at Rio Palenque, province of Los Ríos, and the late P. Coopmans in January 2005 at Puerto Inca, province of Guayas. Additional sightings since 2007 include: photos taken at the eastern edge of Quevedo city (*vide* J. M. Carrión), one observed near La Concor-

dia, province of Esmeraldas (A. Solano-Ugalde), one photographed near Las Golondrinas (D. M. Brinkhuizen) and further observations in the Manglares-Churute region (see Chestnut Munia *L. atricapilla* account below).

Invalidated records

Some species have been erroneously assigned to the Ecuadorian avifauna by different authors over the years [10,26]. Here, we review some species that merit elimination from the country bird list owing to: 1) misidentification; 2) erroneous location of collecting/recording sites; 3) taxonomic changes or distribution revisions. Further revisions of species not actually occurring in Ecuador, but reported in literature will continue to be published in forthcoming CERO reports.

Violaceous Quail-Dove *Geotrygon violacea*

Record no. 2014-x02: Province of Sucumbíos, Cuyabeno (audio-recording), 2-10 August 1992.

Three birds were reported, one of them seen and tape-recorded inside terra firme forest near the edge of a lagoon [10]. Tape recordings were later reviewed by N. Krabbe who reidentified them as Grey-fronted Dove *Leptotilla rufaxilla*. Later on, the observer himself told N. Krabbe that he believed that his records involved misidentified *L. rufaxilla*.

Crimson Topaz *Topaza pella*

Record no. 2014-x010: Province of Sucumbíos, mouth of Suno River (specimen), 1899.

Oberholser [27] reported three specimens collected at the mouth of Rio Suno, which are the type specimens of the subspecies *Topaza pella pampreta*. However, Hu *et al.* [28] concluded that this taxon is not valid, being a synonym of *T. pella smaragdula* from the Guianan shield, more than 1,500 km away from Amazonian Ecuador, and suggested that mislabelling would explain Ecuadorian records. Ridgely & Greenfield [10] already suggested eliminating this species from the country list.

Dull-capped Attila *Attila bolivianus*

Record no. 2014-x01: Province of Orellana, Yarina Lodge and Estación Científica Yasuni (photo), 13 August 1998 and December 2001; Province of Sucumbíos, Sacha Lodge, 7 June 1995.

Observations at Yarina and Sacha Lodge by the same observer [10] of “attilas with white eyes” were first identified as this species. A photographic record from Yasuni Research Station was first identified as *A. bolivianus* and published in 2003 [29]. Howell [30] suggested the (remote?) possibility of an undescribed white-eyed form of *A. spadiceus* that resembles *A. bolivianus*. Boano & Janni [31] presented evidence of a white-eyed form of Bright-rumped Attila (*Attila spadiceus*). A later revision of the Yasuni photo by J. Freile

confirmed its identity as *A. spadiceus* (wing bars, no duller cap, bright yellow rump). Meanwhile, N. Athanas stated that the first observer apparently retracted his earlier observations (*in litt.* to P. Coopmans). Given that *A. bolivianus* is not known to migrate or perform long seasonal movements [32], and that the nearest records in Amazonian Peru are more than 500 km southeast of the reported Ecuadorian sites [14], we believe all Ecuadorian observations pertain to white-eyed variants of *A. spadiceus*.

Cinereous Becard *Pachyramphus rufus*

Record no. 2014-x06: Province of Zamora Chinchipe, Zamora (specimen), 1896-1897; Province of Morona Santiago, Valle del Santiago (specimen), 1896-1897.

Two specimens collected by E. Festa and held at Museo Regionale di Scienze Naturali of Turin, Italy [10] are the only records of the species in Ecuador. Ridgely & Greenfield [10] already questioned the identification of these specimens given that the separation of female *P. rufus* and Chestnut-crowned Becard *P. castaneus* was not clearly understood at that time. Janni & Pulcher [33] revised the Torino specimens separately and reidentified them as *P. castaneus* owing to a very obvious grey postocular line, richer chestnut crown, and duskier loreal stripe.

Crested Becard *Pachyramphus validus*

Record no. 2014-x07: Province of Zamora Chinchipe, Quebrada Honda (specimen), 13 January 1998.

A single specimen, identified as an immature male *P. validus*, collected at Quebrada Honda and deposited at Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales (MECN 7225), is the only record of the species in Ecuador [10]. A thorough revision of specimen MECN 7225 revealed that it is a One-colored Becard *Pachyramphus homochrous*. Another specimen (MECN 3833) is identical in plumage to MECN 7225 but identified as *P. homochrous*. Measurements of tarsus, culmen length, culmen width, culmen depth, tail and wing chord (Table 3) of these two specimens are similar to measurements of 15 other specimens of *P. homochrous* held at MECN, but significantly smaller compared to measurements of two specimens of *P. validus* taken at Museo de Historia Natural Javier Prado, Universidad Mayor San Marcos (MUMSM), in Lima, Peru. Pattern and color tone of the crown in specimens MECN 7225 and 3833 differ from specimens held at MUMSM and from illustrations in Schulenberg *et al.* [14] and Fitzpatrick *et al.* [34], as follows: 1) crown is more blackish rather than sooty in MECN 7225 and 3833; 2) blackish is restricted to crown in MECN 7225 and 3833, whereas sooty area descends to, or even below, ocular line in proper *P. validus*; 3) dorsal parts of proper *P. validus* are rustier than in MECN 7225 and 3833 (Figure 4). Also, moulting pattern of immature *P. validus* apparently differs from that shown by these specimens. There are several recent records of *P. homochrous* from the Andean highlands, even from the central valleys above 2700 m elevation, suggesting that this species moves seasonally along this altitudinal gradient.



Figure 4. Specimens of *Pachyramphus homochrous*, *P. validus* and MECN 7225, from southern Ecuador, incorrectly identified as *P. validus*. Specimen MECN 7225 on the extreme left in photo A; second from left to right in photo B. Photo C corresponds to specimens of *P. validus* at MUMSM for comparison of crown color and pattern (J. Freile).

Chestnut Munia *Lonchura atricapilla*

Record no. 2014-x04: Provinces of Guayas, Los Ríos and Santo Domingo de los Tsáchilas, several localities, several dates between 1998-2012.

Carrión *et al.* [25] reported a number of observations dating back to 1998 from nearly 30 localities between Manglares-Churute region northwards through Santo Domingo area. These observations were first assigned to *Lonchura atricapilla jagori* but a later revision of photographs (including record no. 2014-34 presented herein) by R. Restall [35] confirmed that all pertain to cinnamon-bellied and cinnamon-flanked variants of Tricolored Munia *L. malacca*. According to R. Restall,

there are no confirmed records of *L. atricapilla* from South America, with only a handful of reports from some Caribbean islands.

Rejected records

Three records were rejected (Table 1) due to insufficient information for accurately assessing them. Rejected records include one species that lacks documentation in the country (*Patagioenas oenops*), one species recorded only once (*Hydropsalis maculicaudus*), and a significant range extension (*Colaptes rupicola*). Two additional records were postponed for further expert revision (*Thalassarche cauta*) or for additional evidence (*Neomorphus pucheranii*).

Acknowledgements

This report is dedicated to the late Juan Carlos Matheus and Fernando Ortiz Crespo, who pioneered Ecuadorian birding and ornithology in many ways. We offer our sincere thanks to all observers who submitted records to CERO, and to N. Krabbe and R. Restall for external advice. We also acknowledge B. Haase, F. Sornoza, R. S. Ridgely, R. Vickers, M. Lysinger, C. Vogt, J. M. Carrión, O. Carrión, and N. Athanas for sharing information and unpublished data. C. Garzón and L. Salinas allowed us to review specimens at MECN (Quito) and MUMSM (Lima), respectively. Special appreciation goes to Telis Navarrete and Robert Ridgely as active members of CERO until recently, and for their continuing support to CERO as external reviewers. Thanks to our institutions and birding tour operators for providing us with the opportunity to work in the field again and again, and to so many fellow field ornithologists and birders for their companionship throughout the four corners of this wonderful country. We welcome our new committee member: Mitch Lysinger.

References

- [1] Freile, J.; Ahlman, R.; Brinkuizen, D.; Greenfield, P.; Solano-Ugalde, A.; Navarrete, L.; Ridgely, R. 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.
- [2] Solano-Ugalde, A.; Freile, J. F. 2012. "A decade of progress (2001-2010); overview of distributional bird records in mainland Ecuador". *Ornithología Neotropical*, 23(suppl.): 29–35.
- [3] Sibley, D. 2010. "Aves: guía básica de identificación". *Serie Biodiversidad, Corbidi: Lima*.
- [4] Lebbin, D. 2009. "Sharing your bird sightings to help conservation". *Neotropical Birding*, 4: 13–18.
- [5] Remsen, J.; Cadena, C.; Jaramillo, A.; Nores, M.; Pacheco, J.; Robbins, M.; Schulenberg, T.; Stiles, F.; Stotz, D.; Zimmer, K. 2014. "A classification of the bird species of South America", Link: <http://www.museum.lsu.edu/~Remsen/SACCBaseline.html>, *American Ornithologists' Union, South American Classification Committee*. Access date: 5 October 2014.
- [6] Wiedenfeld, D. 2006. "Aves, the Galapagos Islands". *Check List*, 2: 1–27.
- [7] Swash, A.; Still, R. 2000. "Birds, mammals, and reptiles of the Galapagos Islands, an identification guide". *Yale University Press: New Haven, New Jersey*.
- [8] Onley, D.; Scofield, P. 2007. "Albatrosses, petrels, and shearwaters of the world". *Helm Field Guides: London*.
- [9] Howell, S.; McGrath, T.; Hunefield, W.; Feenstra, J. 2009. "Occurrence and identification of the Leach's Storm-Petrel (*Oceanodroma leucorhoa*) complex off southern California". *North American Birds*, 63: 540–549.
- [10] Ridgely, R.; Greenfield, P. 2001. "The Birds of Ecuador". *Cornell University Press: Ithaca, New York*.
- [11] Haase, B. 2011. "Aves marinas de Ecuador continental y acuáticas de las piscinas artificiales de Ecuasal". *Aves & Conservación, BirdLife International and Ecuasal S. A.: Guayaquil*.
- [12] Vargas, H. 1996. "First record of Green Heron (*Butorides virescens*) in the Galapagos Islands". *Noticias de Galápagos*, 57: 5–6.
- [13] Hilty, S.; Brown, W. 1986. "A guide to the birds of Colombia". *Princeton University Press: Princeton, New Jersey*.
- [14] Schulenberg, T.; Stotz, D.; Lane, D.; O'Neill, J.; Parker, T. 2007. "Birds of Peru". *Helm Field Guides: London*.
- [15] Camacho, C.; Wilson, R. 2011. "New record of Cinnamon Teal *Anas cyanoptera* in Ecuador". *Bulletin of the British Ornithologists Club*, 131(1): 69–71.
- [16] Freile, J.; Castro, D. 2013. "New records of rare screech owls (*Megascops*) and pygmy owls (*Glaucidium*), with taxonomic notes and a conservation assessment of two globally imperilled species in Ecuador". *Cotinga*, 35: 7–12.
- [17] Fjeldså, J.; Krabbe, N. 1990. "Birds of the high Andes". *Apollo Books: Copenhagen*.
- [18] Ridgely, R.; Greenfield, P. 2006. "Aves del Ecuador". *Academia de Ciencias de Philadelphia and Fundación Jocotoco: Quito*.
- [19] Robbins, M.; Rosenberg, G.; Sornoza, F. 1994. "A new species of cotinga (Cotingidae: *Doliornis*) from the Ecuadorian Andes, with comments on plumage sequences in *Doliornis* and *Ampeleon*". *Auk*, 111(1): 1–7.

- [20] Kirwan, G.; Green, G. 2011. "Cotingas and manakins". *Helm Identification Guides: London*.
- [21] Soria-Robalino, A. 2012. "*Doliornis remseni* Chesnut-bellied Cotinga – Cotinga Cresticastaña". *Boletín Sociedad Antioqueña de Ornitología* 21: 58–60.
- [22] Nilsson, J.; Solano-Ugalde, A.; Freile, J.; García-Domínguez, J. 2013. "First records of Yellow-throated Vireo *Vireo flavifrons* in Ecuador". *Cotinga*, 35: 74–78.
- [23] Solano-Ugalde, A.; Pérez, V.; Ahlman, R. 2007. "Primeros registros de la Reinita Gorrinegra (*Wilsonia pusilla*) en Ecuador". *Boletín Sociedad Antioqueña de Ornitología* 17: 59–62.
- [24] Isler, M.; Isler, P. 1999. "The tanagers: natural history, distribution, and identification". *Smithsonian Institution Press: Washington, D.C.*
- [25] Carrión, O.; Bohórquez, C.; Álava, J. 2012. "Primeros registros confirmados y distribución preliminar de la Monjita Castaña (*Lonchura atricapilla jagori*) en Ecuador: ¿especie introducida o arribo extralímite?". en: "*Memorias – III Reunión Ecuatoriana de Ornitología*", J. Freile, E. Guevara, T. Santander (Eds.), *Aves y Conservación, Fundación Numashir, Universidad San Francisco de Quito, Ecuador Experience: Quito*.
- [26] Freile, J.; Ahlman, R.; Greenfield, P.; Solano-Ugalde, A.; Brinkuizen, D.; Navarrete, L.; Ridgely, R. 2014. "Lista oficial de las aves del Ecuador". Link: <http://www.cerowebs.com>, *Comité Ecuatoriano de Registros Ornitológicos*. Access date: 5 October 2014.
- [27] Oberholser, H. 1902. "Catalogue of a collection of hummingbirds from Ecuador and Colombia". *Proceedings of the U.S. National Museum*, 24: 309–342.
- [28] Hu, D.; Joseph, L.; Agro, D. 2000. "Distribution, variation, and taxonomy of *Topaza* hummingbirds (Aves: Trochilidae)". *Ornitología Neotropical*, 11(2): 123–142.
- [29] de Vries, T. 2002. "Birds of Ecuador, un libro interesante, útil, pero..." *Nuestra Ciencia*, 4: 54–55.
- [30] Howell, S. 2002. "Additional information on the birds of Ecuador". *Cotinga*, 18: 62–65.
- [31] Boano, G.; Janni, O. 2008. "Rufous-morph Bright-rumped Attila *Attila spadiceus* with white eyes: photographic evidence from Peru". *Boletín Sociedad Antioqueña de Ornitología* 18: 16–19.
- [32] Ridgely, R.; Tudor, G. 2009. "Field guide to the songbirds of South America, the Passerines". *University of Texas Press: Austin*.
- [33] Janni, O.; Pulcher, C. 2007. "Reidentification of Ecuadorian specimens of *Pachyramphus rufus* as *P. castaneus*". *Bulletin of the British Ornithologists Club* 127(3): 246–247.
- [34] Fitzpatrick, J.; Bates, J.; Bostwick, K.; Caballero, I.; Clock, B.; Farnsworth, A.; Hosner, P.; Joseph, L.; Langham, G.; Lebbin, D.; Mobley, J.; Robbins, M.; Scholes, E.; Tello, J.; Walther, B.; Zimmer, K. 2004. "Family Tyrannidae (Tyrant-Flycatchers), species accounts". en: "*Handbook of the birds of the world, vol. 9*", J. del Hoyo, A. Elliot, D. Christie (Eds.), *Lynx Edicions: Barcelona*.
- [35] Restall, R. 1996. "Munias & Mannikins". *Pica Press: Robertsbridge*.

Preliminary study of land snails in San Cristobal Island, Galapagos Estudio preliminar de caracoles terrestres en la Isla San Cristóbal, Galápagos

Isabel Villarruel Oviedo^{1*}, Stella de la Torre¹

¹Universidad San Francisco de Quito, Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales. Calle Diego de Robles y Vía Interoceánica, Campus Cumbayá. Casilla Postal 17-1200-841, Quito, Ecuador.

*Autor principal/Corresponding author, e-mail: maria.villarruel@estud.usfq.edu.ec

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

Recibido/Received: 16/09/2014. Aceptado/Accepted: 21/10/2014.

Publicado en línea/Published on Web: 19/12/2014. Impreso/Printed: 19/12/2014.

Abstract

About 120 endemic species of endemic terrestrial snails have been recorded in the Galapagos Islands. Snails have colonized all the large islands and can be found in most vegetated areas. However, their distribution ranges are diminishing and some species are disappearing due to human impacts. We carried out a preliminary, non-invasive, evaluation of the effects of land use change on the diversity of snails in San Cristóbal Island. We surveyed four habitats in the island: a coffee plantation, a guava and pasture plantation, an urban area and an area reforested with native plants. We analyzed the diversity of snails in each habitat identifying the species with photographs. We identified three native and two introduced species; additionally, three species (or groups of species) were identified to the genus level. The greatest diversity of snails was found in the reforested area. This result suggests that the presence of native plants is important for the conservation of snails. Future research should focus on understanding the impact of introduced snail species on the native snail populations as well as on the dynamics of the ecosystems. This study was carried out with the research permit of PC-30-11 of the Parque Nacional Galápagos to Stella de la Torre.

Keywords. Land use change, diversity, snails, introduced species, Galapagos Islands.

Resumen

En las Islas Galápagos se han registrado alrededor de 120 especies de caracoles endémicos terrestres. Los caracoles han colonizado todas las islas grandes y se los puede encontrar en la mayoría de las zonas de vegetación. Sin embargo, se ha visto que su distribución es cada vez menor y muchas especies ya han desaparecido debido a la colonización humana. En este estudio hicimos una evaluación preliminar del impacto del cambio en el uso del suelo sobre la diversidad de los caracoles de la isla San Cristóbal. Para ello, realizamos censos no-invasivos en cuatro hábitats diferentemente afectados por actividades humanas en los cuales identificamos los caracoles registrados, con base en fotografías, para estimar y comparar su diversidad en cada uno de los hábitats: sembrío de café, sembrío de guayaba y pasto, área urbana y área de reforestación con especies nativas. Se identificaron tres especies nativas y dos especies introducidas de caracoles; adicionalmente tres especies (o grupos de especies) se identificaron a nivel de género. La mayor diversidad de especies de caracoles se encontró en el hábitat de reforestación. Esto sugiere que la presencia de plantas nativas es importante para la conservación de los caracoles en las islas. Futuros estudios deben enfocarse en entender el impacto de las especies introducidas de caracoles sobre las especies nativas y las funciones de los ecosistemas. Este estudio se realizó con el permiso de investigación PC-30-11 del Parque Nacional Galápagos para Stella de la Torre.

Palabras Clave. Cambios en el uso de suelo, diversidad, caracoles, especies introducidas, Islas Galápagos.

Introducción

En las islas Galápagos se han registrado 135 taxa de caracoles terrestres endémicos (alrededor de 120 especies pues en algunas especies se registran subespecies) [1]. Los caracoles han colonizado todas las islas grandes y

se los puede encontrar en la mayoría de las zonas de vegetación. Sin embargo, se ha visto que su distribución es cada vez menor y que incluso, muchas especies ya han desaparecido debido a la colonización humana [2]. En la actualidad 57 de estas especies se encuentran en alguna categoría de amenaza según la UICN (Unión Interna-

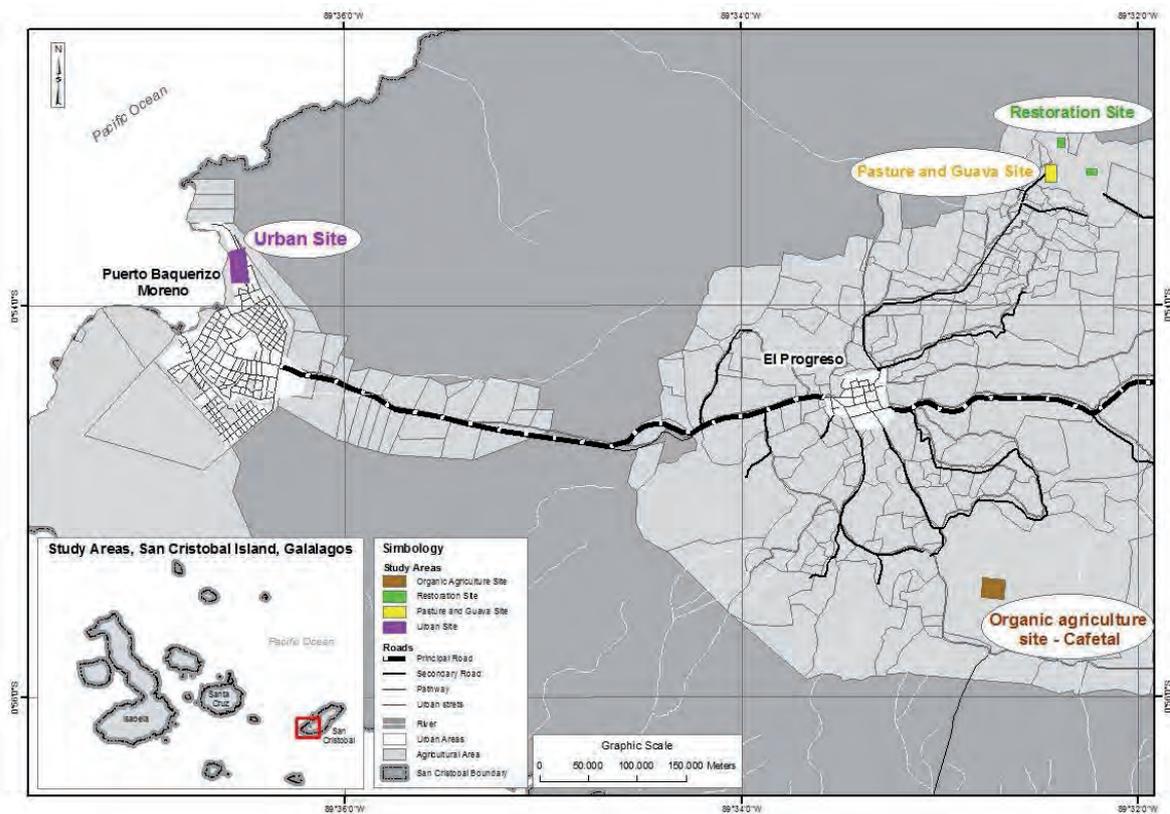


Figura 1: Ubicación de las áreas de estudio (tomado de la Torre 2013).

cional para la Conservación de la Naturaleza) ya que su rango de distribución es muy limitado y las poblaciones están perdiendo su hábitat debido a la destrucción y a la introducción de nuevas especies, tales como las hormigas rojas (*Wasmannia auropunctata*) y las ratas (*Rattus rattus*) que han agravado su estado de amenaza [3, 4].

Los caracoles cumplen una función muy importante en el suelo, ya que se encargan de desmenuzar y disminuir el tamaño de la hojarasca, fragmentándola y promoviendo su descomposición [5]. En el estudio de Parent y Crespi [5], sobre los caracoles de Galápagos, se pudo ver que éstos habitan en casi todas las zonas bioclimáticas de San Cristóbal. Se los encontró en vegetación y en el suelo y si bien no son específicos para ningún tipo de planta, hay poblaciones que responden a ciertos tipos de suelo, especie de planta y nivel altitudinal. El aumento de diversidad de plantas, a mayor altitud y humedad, permite que se creen microhábitats que son espacios ecológicos que los caracoles pueden colonizar [6]; de allí la importancia de conservar la vegetación en las islas.

En los últimos 16 años, la población humana en las Islas Galápagos ha aumentado en un 123 % [7]. El incremento poblacional es una amenaza permanente que crea presión sobre los recursos naturales [8]. Según el Consejo de Gobierno de Galápagos, el 71 % de la cobertura vegetal de la zona agrícola ha cambiado desde el año 1987. Además se presenta un alto grado de semi-abandono o

das (como la mora y la guayaba) y porque el mercado del turismo es una actividad más segura económicamente [10].

En este contexto, como parte de una investigación que busca evaluar el impacto del uso del suelo sobre la estructura de las comunidades biológicas y las funciones de los ecosistemas de San Cristóbal [11], en este estudio hicimos una evaluación preliminar del impacto del cambio en el uso del suelo sobre la diversidad de los caracoles de esta isla. Para ello, realizamos censos no invasivos (sin coleccionar especímenes) en cuatro hábitats diferentemente afectados por actividades humanas en los cuales identificamos los caracoles registrados en fotografías para estimar y comparar su diversidad en cada uno de los hábitats.

Metodología

Área de estudio

La isla San Cristóbal tiene una superficie de 788 200 ha. El área rural, que se encuentra en la zona húmeda, es donde se intensifica la actividad agrícola [12]. Para el estudio se escogieron cuatro áreas que varían en el uso que se está dando al suelo (Fig. 1). La primera zona fue la hacienda El Cafetal ubicada en el área del Progreso, recinto El Socavón, a una altitud aproximada de 260 msnm. Cuenta con una extensión de 500 hec-

Especie	Cafetal	Reforestación	Guayaba	Urbana
<i>Helicina nesiotica</i>	X	X		
<i>Tornatellides chathamensis</i>		X		X
<i>Euconulus galapaganus</i>	X			
<i>Subulina octona</i>	X	X	X	X
<i>Zonitoides arboreus</i>	X	X		
<i>Succinea</i> sp.		X		X
<i>Retinella</i> sp.	X			X
<i>Bulimulus (Naesiotus) spp.</i>	X	X	X	X

Tabla 1: Registros (presencia = X) de caracoles en las áreas de estudio.

truducidas incluyendo *Cedrela odorata* (cedro español), *Solanum quitoense* (naranja) y *Rubus niveus* (mora).

En la Hacienda Tranquila, en el recinto La Soledad, se ubicaron las áreas de estudio 2 y 3, a una altitud aproximada de 370 msnm. El área de estudio 2 correspondió a un cultivo de *Psidium guajava* (guayaba) y Poaceae (pasta), en este terreno también se encontró ganado vacuno y equino. El área de estudio 3 fue una zona dedicada a la reforestación con especies nativas como *Zanthoxylum fagara* (uña de gato), *Tournefortia rufifolia*, *Lecocarpus darwinii*, *Asclepias curassavica*, *Scaevola taccada* y *Croton scouleri*. El crecimiento de mora y de guayaba en esta área se controla con corte directo para llegar a su exterminación total.

La cuarta área de estudio fue en el sector urbano. Este es el lugar más seco, de menor altitud (15 msnm) y donde habita la mayor cantidad de personas. En esta área se puede ver vegetación introducida y nativa. Las plantas que son nativas están adaptadas a climas secos y con alto grado de salinidad, entre ellas se destacan: *Piscidia carthagenensis* (matazarno), *Bursera graveolens* (palo santo), *Parkinsonia aculeata* (palo verde), *Acacia insularis* (acacia), *Gossypium darwinii* (algodoncillo), *Maytenus octogona* (arrayancillo) y *Cryptocarpus pyritormis* (monte salado).

Métodos

La metodología de censos fue aplicada en todas las áreas de estudio y consistió en el establecimiento de un sistema de transectos y cuadrantes y en el muestreo no invasivo (sin colecciones) e identificación de especies / géneros de caracoles dentro de los cuadrantes. Los transectos fueron marcados con una piola de 50 metros, cada 10 metros se marcó un punto de monitoreo potencial. En cada transecto, dos de estos puntos fueron escogidos aleatoriamente como unidades de muestreo y se marcaron con cinta. Se tuvo un total de 14 unidades de muestreo en cada uno de los hábitats. La distancia mínima entre unidades de muestreo fue de 15 metros, con excepción del hábitat urbano en el que la distancia mínima fue de 10 metros.

En cada unidad de muestreo se ubicó un cuadrante de 1m x 1m. Cada censo de caracoles se hizo en dos subcuadrantes de 25 X 25 cm ubicados dentro de cada cuadrante. Los censos se hicieron entre las 10h00 y 16h00 utilizando la técnica de barrido de un extremo al otro

en la hojarasca y en la superficie del suelo hasta una profundidad de 5 cm. Cada censo tuvo una duración de 20 a 30 minutos. Los censos se realizaron en agosto-septiembre 2011 y diciembre 2012-enero 2013, en la época seca y lluviosa respectivamente. Se realizaron dos censos por cada cuadrante por cada época climática. En cada censo, se registró el número total de individuos de este orden, pero no fue posible registrar el número de individuos de cada especie pues su identificación taxonómica se realizó posteriormente con base en las fotografías que se tomaron de todas las potenciales morfoespecies encontradas. Después de cada censo, tanto los individuos vivos como las conchas, se dejaron en el mismo sitio donde fueron encontrados. Las familias, géneros y especies de caracoles fueron identificados por el Dr. Ángel Correoso, de la Escuela Politécnica del Ejército, con base en las fotografías tomadas en el campo.

Análisis de datos

A través del registro fotográfico se realizó una lista de especies y géneros de caracoles encontrados. Además se investigó bibliográficamente cuáles de las especies registradas son introducidas y cuáles son nativas. Para el cálculo de la diversidad de caracoles de cada cuadrante se utilizó el índice de Margalef [13]. Para comparar los índices de diversidad entre áreas de estudio y épocas climáticas se realizaron ANOVAs multifactoriales de medidas repetidas con los índices transformados (ln). Sin embargo, en los Resultados se presentan los valores reales de los índices.

Resultados y Discusión

En los censos realizados durante la época seca, se registró un total de 1809 caracoles en todas las áreas de estudio. En la época lluviosa el total registrado en todos los censos fue de 1085 individuos. La mayor abundancia de caracoles, tanto en la época seca como en la lluviosa, se registró en el hábitat de cafetal (1298 caracoles registrados en la época seca, 510 caracoles registrado en la época lluviosa).

Se identificaron las siguientes especies de caracoles:

1. *Helicina nesiotica*: especie endémica de la isla [14]. Se la encontró viva únicamente en la zona del cafetal. En el hábitat de reforestación se vieron algunas conchas.

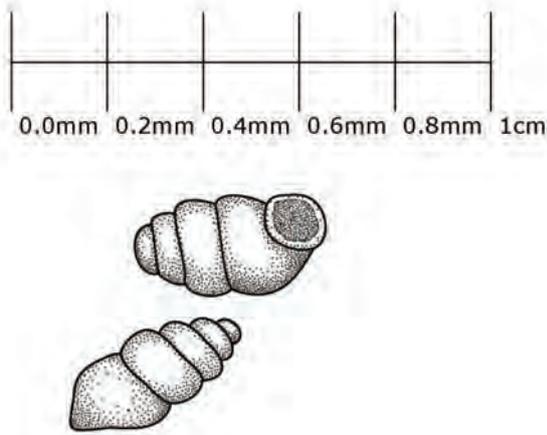


Figura 2: *Tornatellides chathamensis*.

2. *Tornatellides chathamensis*: especie endémica de la isla [15]. No se registró ningún individuo vivo, sus conchas fueron encontradas en el hábitat urbano y en el hábitat de reforestación (Fig.2).
3. *Euconulus galapaganus*: especie endémica de las Islas Galápagos [15]. De presencia muy escasa, se registraron individuos vivos en el hábitat del cafetal.
4. *Subulina octona*: especie introducida, presente en la Isla Isabela y en la Isla San Cristóbal [16]. Fue abundante en el hábitat del cafetal. En el hábitat de guayaba fue prácticamente la única especie. También se encontraron conchas en la zona urbana.
5. *Zonitoides arboreus*: especie introducida, se encuentra únicamente en la Isla San Cristóbal [17]. Muy abundante en el hábitat del cafetal, en menor cantidad se la vio en el hábitat de reforestación.
6. *Succinea* sp.: este género podría estar presente con dos especies que no se lograron identificar con claridad (una de ellas podría ser *S. producta*). Son nativas de las Islas Galápagos [18]. No se encontró ningún espécimen vivo. Sus conchas fueron vistas principalmente en el hábitat del urbano, muy pocas fueron encontradas en el hábitat de reforestación.
7. *Retinella* sp.: género nativo [1], fue registrado en el hábitat del cafetal. Algunas conchas se observaron en el hábitat urbano.
8. *Bulimulus (Naesiotus)* spp.: se los observó en los cuatro hábitats estudiados. Se cree que puede haber entre tres a cuatro especies, entre ellas *N. darwini* y *N. ventrosus* (Fig. 3).

Una comparación de esta lista de especies con la lista elaborada por Parent y colaboradores en el 2014 para todo el archipiélago se dificulta por el hecho de que en las dos listas existen taxa que no están definidos hasta el nivel de especies [1]. Sin embargo, de manera general,

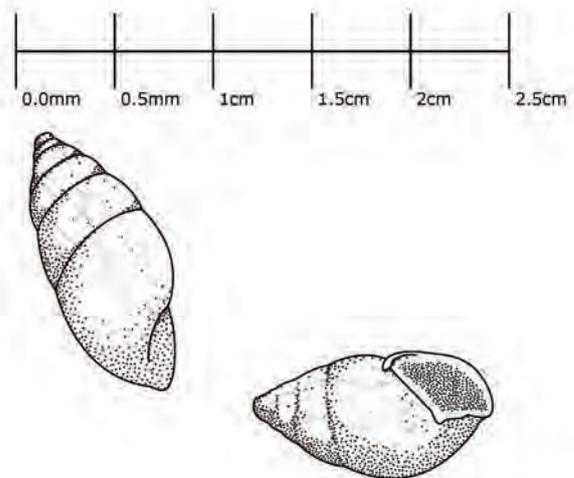


Figura 3: *Bulimulus (Naesiotus)* spp.

de los 14 taxa (especies) que están reportados para San Cristóbal [1], en nuestro estudio registramos 7. Registramos también 3 o 4 especies de *Bulimulus (Naesiotus)*, género que no había sido registrado antes en San Cristóbal [1]. En este análisis, es importante recalcar que el nuestro no fue un estudio taxonómico, de allí que no colectáramos especímenes y que basáramos la identificación en fotografías; nuestro objetivo fue hacer una evaluación preliminar de la diversidad de morfoespecies de caracoles en áreas con distintos usos del suelo. En ese contexto, la lista que presentamos debe ser confirmada en futuros estudios que incluyan colecciones de especímenes.

La diversidad de caracoles, calculada con el índice de Margalef, no dependió de la estacionalidad; sin embargo, sí difirió significativamente entre hábitats ($F_{3,52}=4.644$; $p=0.006$) (Fig. 4). En las dos épocas climáticas, la mayor diversidad se encontró en el hábitat de reforestación (diversidad $\bar{x}_{seca}=0.748$; ± 0.678) (diversidad $\bar{x}_{lluviosa}=0.626$; ± 0.417). En el área de reforestación hay abundancia de plantas nativas y un control permanente de especies vegetales introducidas, como la mora y la guayaba. Esto podría explicar la mayor diversidad de caracoles en este hábitat, pues se conoce que los caracoles en Galápagos tienen una relación estrecha con las plantas nativas [6]. Por otro lado, el hecho de que en

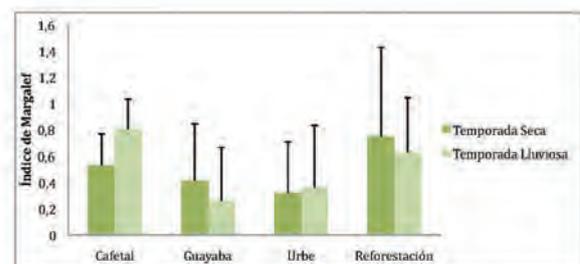


Figura 4: Promedio de la diversidad de caracoles (índice de Margalef \pm desviación estándar) en las áreas de estudio.

el hábitat urbano, con bajos índices de diversidad, solo se encontraron conchas y no caracoles vivos apunta a la importancia de la humedad para este grupo de invertebrados terrestres, tanto por restricciones fisiológicas (piel permeable y producción de mucus), cuanto por una mayor disponibilidad de biomasa vegetal en ambientes húmedos [19].

Nuestros resultados sugieren que existen especies que utilizan hábitats específicos. *Euconulus galapaganus*, por ejemplo, se registró únicamente en el cafetal, mientras que otras, como la introducida *Subulina octona*, parecen ser generalistas y se encuentran en todos los hábitats muestreados (Tabla 1). Un análisis cualitativo preliminar sugiere que hay más caracoles introducidos que endémicos en todos los hábitats.

En este estudio registramos dos especies introducidas de caracoles, *Subulina octona* y *Zonitoides arboreus*. Estas fueron abundantes, frecuentes y podrían estar colonizando nuevos espacios, compitiendo con especies nativas, y posiblemente, contribuyendo a su desaparición. Los caracoles introducidos pueden llegar a convertirse en plagas, causando gran impacto agrícola al afectar a cultivos de frutas, verduras, cultivos forestales y plantas ornamentales [20]. En las Islas Galápagos aún no se conoce cómo estas especies introducidas están afectando a la dinámica de los nutrientes en el suelo y a la diversidad de la vegetación y de las comunidades animales. Futuras investigaciones deben enfocarse en entender el rol ecológico de las especies que ocurren en los diferentes hábitats, así como en determinar las interacciones que existen entre las especies nativas e introducidas de caracoles que comparten un mismo hábitat.

Agradecimientos

Dejamos constancia de nuestro agradecimiento a Ángel Correo por su valiosa ayuda con la identificación de las fotografías, y a Esteban Suárez y Carlos Valle, por sus comentarios a versiones anteriores de este manuscrito. Al Parque Nacional Galápagos por otorgar el permiso de investigación, a todo el equipo del Galapagos Science Center por el apoyo logístico en todas las fases de la investigación y a Giovanni Sarigu de la hacienda Tranquila y Nicolás Balón de la hacienda El Cafetal por permitir y facilitar nuestra investigación en estas áreas y a un revisor anónimo por sus valiosos comentarios. Este estudio fue financiado por una GAIAS Grant de la Universidad San Francisco de Quito.

Referencias

- [1] Parent, C.; Miquel, S.; Coppoie, G. 2014. "CDF Checklist of Galapagos Terrestrial and brackish water snails.- Lista de Especies de Galápagos de la Fundación Charles Darwin". *Fundación Charles Darwin, Puerto Ayora, Galápagos*. <http://www.darwinfoundation.org/datazone/checklists/terrestrial-invertebrates/gastropoda/>.
- [2] Coppoie, G. 2004. "Invertebrate research overview: 2. The endemic land snails". *Habitat*: 1–6.
- [3] Parent, C.; Caccione, A.; Petren, K. 2008. "Colonization and diversification of Galápagos terrestrial fauna: a phylogenetic and biogeographical synthesis". *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 363.
- [4] Smith, C.; Challinor, D. 1976. "Noticias de Galápagos". *The Charles Darwin Foundation for the Galapagos Isles*, (25).
- [5] Brown, G.; Fragoso, C.; Barois, I.; Rojas, P.; Patrón, J.; Bueno, J.; Moreno, A.; Lavelle, P.; Ordaz, V.; Rodríguez, C. 2001. "Diversidad y rol funcional de la macrofauna edáfica en los ecosistemas tropicales mexicanos". *Acta Zoológica Mexicana. Instituto de Ecología*: 79–110.
- [6] Parent, C.; Crespi, B. 2009. "Ecological opportunity in adaptive radiation of Galápagos endemic land snails". *The American Naturalist*, 173(6):898–905.
- [7] INEC. 2009-2010. "Encuesta de condiciones de vida Galápagos". *Quito, Ecuador*.
- [8] Amador, E.; Bliemsrieder, M.; Cayot, L.; Cifuentes, M.; Cruz, E.; Cruz, F.; Rodríguez, J. 1996. "Plan de Manejo del Parque Nacional Galápagos". *Servicio Parque Nacional Galápagos, Instituto Ecuatoriano Forestal y de Áreas Naturales y Vida Silvestre*.
- [9] Villa, A.; Segarra, P. 2010. "El cambio histórico del uso del suelo y cobertura vegetal en el área rural de Santa Cruz y San Cristóbal". *Consejo de Gobierno de Galápagos. En: Informe Galápagos 2009-2010. Puerto Ayora, Galápagos, Ecuador*.
- [10] Arriagada, V. 2011. "Fortalecimiento del Sistema de Cuarentena". *Ministerio del Medio Ambiente del Ecuador*.
- [11] de la Torre, S. 2013. "Research in Agricultural and Urban Areas in Galapagos: A Biological Perspective. Science and Conservation in the Galapagos Islands". *S. Walsh y C. Mena (eds). Springer, New York*, 1:185–198.
- [12] Gordillo, J.; Work, A. 1989. "Noticias de Galápagos, Isla San Cristóbal". *A Biannual News Publication about Science and Conservation in Galapagos, the Galapagos National Park Service, and the Charles Darwin Research Station*.
- [13] Magurran, A. 1988. "Ecological diversity and its measurement". *Princeton University Press*: 11–79.
- [14] Dall, W. 1900. "Additions to the Insular land-shell faunas of the pacific coast, especially of the Galapagos and Cocos Islands". *Proceedings of the academy of Natural Sciences of Philadelphia*: 88–103.
- [15] Dall, W. 1896. "Diagnosis of new species of mollusks from the west coast of America". *Proceedings of the United States National Museum*. http://checklists.datazone.darwinfoundation.org/media/lists/download/2012May20_Parent_et_al_Galapagos_Gastropoda_Checklist.pdf.

- [16] Odhner, N. 1951. "Studies on Galápagos bulimulids". *Journal de Conchyliologie*, 90(4):253–268.
- [17] Baker, H. 1941. "Zonitid snails from Pacific Islands". *Parts 3-4 Bulletin Bernice P. Bishop Museum*. http://checklists.datazone.darwinfoundation.org/media/lists/download/2012May20_Parent_et_al_Galapagos_Gastropoda_Checklist.pdf, 166:205–370.
- [18] Simbaña, W.; Tye, A. 2009. "Reproductive biology and response to threats and protection measures of the total population of a Critically Endangered Galápagos Plant, *Linum cratericola* (Lineaceae)". *Botanical Journal of the Linnean Society*, 161:89–102.
- [19] Moreno Rueda, G.; Ruiz Ruiz, A.; Collantes, M.; Arrébola, J. 2009. "Relative importance of humidity and temperature on microhabitat use by land snails in arid versus humid environments". *En: Arid Environments and Wind Erosion*. A. Fernandez Bernal y M. De la Rosa (eds). *Nova Science Publishers, Inc*: 331–343.
- [20] Monge-Nájera, J. 2003. "Introducción: un vistazo a la historia natural de los moluscos". *Revista de Biología Tropical*, 51(3):1–3.

Identification of Diptera nematoceran of medical interest in areas surrounding the construction of the Represa Hidroeléctrica Toachi-Pilatón

Identificación de Dípteros Nematóceros de interés médico en zonas aledañas a la construcción de la Represa Hidroeléctrica Toachi-Pilatón

Renato León^{1*}, Leonardo Ortega^{2,5}, Moisés Gualapuro¹, Francisco Morales³, María Isabel Rojas¹, Mauricio Espinel^{1,4}

¹Universidad San Francisco de Quito. Laboratorio de Entomología Médica & Medicina Tropical (LEMMT). Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales. Calle Diego de Robles y Vía Interoceánica, Campus Cumbayá, Edif. Darwin 102. Casilla Postal 17-1200-841, Quito, Ecuador.

²Institute of Biodiversity, Animal Health and Comparative Medicine, College of Medical, Veterinary and Life Sciences, University of Glasgow, Glasgow G12 8QQ UK.

³Vrije Universiteit Brussels. Center of Molecular Immunology (CMIM). Brussels, Belgium.

⁴Universidad San Francisco de Quito. Colegio de Ciencias de la Salud. Escuela de Salud Pública. Calle Diego de Robles y Vía Interoceánica, Campus Cumbayá, Edif. Newton. Casilla Postal 17-1200-841, Quito, Ecuador.

⁵Universidad Regional Amazónica IKIAM, Parroquia San Juan de Muyuna, Cantón Tena. Napo - Ecuador.

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

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

Recibido/Received: 05/03/2014. Aceptado/Accepted: 13/03/2014.

Publicado en línea/Published on Web: 19/12/2014. Impreso/Printed: 19/12/2014.

Abstract

The presence of hydroelectric dams has been associated with major environmental changes and may have an effect in the transmission of parasitic and vector-borne diseases such as malaria, leishmaniasis, onchocerciasis, several arboviruses and other consequences in health. In 2009, the construction of the Toachi-Pilatón dam started in Ecuador and herein we report a pilot entomological surveillance of the Nematoceran Dipterans of medical interest collected at various localities close to the construction site. The presence of at least two anopheline species (*Anopheles neivai* and *An. albimanus*) and one sand fly species (*Lutzomyia trapidoi*), that have been previously incriminated as vectors of malaria and leishmaniasis respectively, suggests a potential risk of disease transmission. Several species of the biting midge of the genus *Culicoides* were also found. The abundance of blackflies of the genus *Simulium* found close to rivers and running water constitute a real nuisance to field workers and inhabitants of the area. Results from pilot questionnaires in two nearby communities (Praderas del Toachi and Palo Quemado) indicate that although most of the inhabitants are aware of the presence of these insects, few of them know about the diseases that they could potentially transmit and very few people tend to use bed nets. We recommend to follow up on this pilot surveillance with new studies in the future to measure possible effects of the presence of the dam on the transmission of vector-borne diseases and on vector populations.

Keywords. Hydroelectric dams, malaria, leishmaniasis, *Anopheles neivai*, *Lutzomyia trapidoi*, ecohealth, health impact assessment, vector ecology.

Resumen

La presencia de represas hidroeléctricas ha sido asociada a grandes alteraciones ambientales y pueden tener un efecto en la transmisión de enfermedades parasitarias y vectoriales como la malaria, la leishmaniasis, la oncocercosis, enfermedades arbovirales y otras consecuencias para la salud. En el 2009, se inicia la construcción de la central hidroeléctrica Toachi-Pilatón y en este estudio reportamos un muestreo entomológico preliminar de insectos Dípteros Nematóceros de interés médico colectados en varias localidades cerca de la construcción de la represa. La presencia de al menos dos especies de anofelinos (*Anopheles neivai* y *An. Albimanus*) y de al menos una especie de flebotomos (*Lutzomyia trapidoi*), incriminados en el pasado como vectores de malaria y leishmaniasis respectivamente, indican el riesgo potencial de transmisión de estas enfermedades. Algunas especies de las arenillas del género *Culicoides* también están presentes. La abundancia de moscas negras del género *Simulium* cerca de ríos y riachuelos constituyen una real molestia a los trabajadores del campo y habitantes por sus picaduras. Los resultados de una encuesta epidemiológica piloto en dos poblaciones cercanas (Praderas del Toachi y Palo Quemado) indican que aunque la mayoría de los habitantes conocen de estos insectos, pocos están al tanto de las enfermedades que pueden transmitir y muy pocos utilizan mosquiteros. Se recomienda hacer seguimiento de estos resultados con nuevos estudios en el futuro para medir el efecto de la presencia de esta represa en la transmisión de enfermedades vectoriales y en las poblaciones de vectores en la zona.

Palabras Clave. Represas hidroeléctricas, malaria, leishmaniasis, *Anopheles neivai*, *Lutzomyia trapidoi*, ecosalud, evaluación de impacto en salud, ecología vectorial.

Introducción

El cambio global que se refiere a la alteración de hábitos como consecuencia de la actividad humana es uno de los factores más importantes que afectan a la distribución de enfermedades parasitarias y/o transmitidas por insectos vectores [1]. Entre los cambios más importantes se encuentran la deforestación y el reemplazo de bosques primarios con zonas de cultivo y pastizales lo que también favorece la formación de charcos y redistribución de depósitos naturales de agua, la colonización y construcción de carreteras, la migración humana, la implementación de actividades agrícolas, mineras, proyectos hidroeléctricos (construcción de represas) y termoeléctricos (construcción de pozos petroleros e infraestructura para el transporte de crudo) [2, 3]. La construcción de represas hidroeléctricas puede ocasionar cambios en el medio ambiente [4–6] y en la transmisión de enfermedades [7–9]. Su efecto en la transmisión de enfermedades vectoriales ha sido principalmente reportado en malaria [10–14], pero también en arbovirus [15, 16], oncocercosis [17] leishmaniasis y otras enfermedades [18–21]. La Comisión Mundial de Represas produjo un reporte en el año 2000 en donde se revisó las consecuencias de cientos de represas en el mundo, y se alerta sobre los graves impactos que pueden tener generando múltiples recomendaciones en relación a la construcción y operación de represas [22].

En el Ecuador, desde el año 1994 el Consejo Provincial de Pichincha plantea llevar a cabo el Proyecto Hidroeléctrico Toachi-Pilatón, contrato que se concreta hacia mediados del 2009 cuando la Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC EP - HIDROTOAPI) inicia la construcción de dos represas llamadas Pilatón - Sarapullo y Toachi - Alluriquín en las sub-cuencas hidrográficas de los ríos Pilatón y Toachi, en la vertiente occidental de la Cordillera de los Andes. La obra propone la reversión de las aguas del río Pilatón y del río Toachi para instalar una potencia total de 254,4 MW [23]. Las dos represas en construcción se localizan en la cercanía de las poblaciones humanas de Praderas del Toachi, Palo Quemado, Santa Rosa, Mirabad y el recinto La Esperia, en la carretera principal Quito-Santo Domingo de los Tsáchilas. Los estudios de impacto ambiental (EsIA) y planes de manejo ambiental (PMA) previos a la construcción de la obra se realizaron y se concede la licencia ambiental para la construcción de la obra. Sin embargo, los estudios no abordan en profundidad información acerca de las enfermedades transmitidas por vectores y el potencial efecto de la construcción del proyecto en el riesgo epidemiológico que este pueda causar en la transmisión de enfermedades. Ciertamente, esta información es limitada o inexistente. Para la leishmaniasis, existen pocos reportes acerca de un monitoreo por parte de las autoridades de salud. En el caso de la malaria, a pesar de la persistencia de los vectores, la casuística de los últimos años ha evidenciado una significativa tendencia a la baja; sin embargo, a pesar de su limitada transmisión persiste el riesgo de un brote en el futuro [24].

El presente estudio piloto pretende complementar esta información con un monitoreo entomológico de los Dípteros Nematóceros de interés médico presentes en la zona y una encuesta epidemiológica piloto que recoleccione información acerca de si los habitantes reconocían a los mosquitos anofelinos como causantes de la malaria y a los flebotomos como causantes de la leishmaniasis. Esta información servirá de base para comparación con estudios futuros cuando las represas hidroeléctricas estén terminadas y operando. Además, se podrá evidenciar el efecto que la obra pueda tener en la diversidad de estos insectos, su abundancia y su influencia en brotes epidemiológicos de enfermedades vectoriales.

Métodos

El presente estudio se realizó desde Abril a Agosto del 2010 e incluyó una fase de monitoreo entomológico y otra de encuestas a los moradores de la zona. A la fecha del presente estudio, la represa Toachi-Pilatón se encontraba a inicios de su construcción. Actualmente continúa en construcción y está previsto que se inicien operaciones en 2015.

Sitio de estudio

Los sitios en donde se realizaron los monitoreos entomológicos fueron: (1) Recinto La Hesperia, (2) Bosque protector La Hesperia, (3) bosque aledaño a la vía Alóag - Santo Domingo (zona del ingreso a la represa en construcción), (4) zona cercana a la población de Praderas del Toachi, (5) zona cercana a la población de Palo Quemado y (6) zona cercana a la población de Santa Rosa (Fig 1). Las encuestas se llevaron a cabo en las poblaciones de Praderas del Toachi y Santa Rosa por ser las poblaciones más cercanas a la represa, exceptuando Mirabad pues ésta se encuentra en la loma de una colina donde existen fuertes corrientes de viento que pueden ser un factor limitante para la presencia de vectores. Debido al tiempo y financiamiento disponibles, la encuesta abarcó un número limitado de individuos (N=29).

Colección de datos

El monitoreo entomológico se realizó en 3 visitas a la zona durante el período de estudio mencionado previamente y los métodos de colección empleados fueron el uso de trampas entomológicas de luz "CDC miniature light traps" [25], con o sin cebo de dióxido de carbono (CO₂ sachets) y, complementariamente, cebo humano protegido sobre los investigadores donde los insectos fueron capturados con aspiradores antes de la picadura.

Las colectas con trampas CDC se llevaron a cabo en zonas de bosque y pastizales donde permanecían funcionando durante toda la noche. Este método fue empleado para la captura de estadios adultos de individuos de las familias Culicidae, Psychodidae, y Ceratopogonidae. Los adultos de las familias Culicidae y Psychodidae fueron también colectados con cebo humano protegido al amanecer o al anochecer durante dos horas en

zonas de filo de bosque. Individuos adultos de la familia Simuliidae fueron colectados por una sola vez durante quince minutos en la mañana con cebo humano en una zona cercana a un riachuelo.

El muestreo de larvas de Culicidae se realizó durante la mañana en zonas cercanas a riachuelos y fuentes de agua así como en charcos y depósitos de agua estancada. Para la captura de especímenes se utilizó “dippers” y una captura consistió en 20-30 muestreos en una misma zona de agua. Los especímenes fueron almacenados en tubos de vidrio o recipientes plásticos con etanol al 75 % y llevados al laboratorio para su identificación.

La identificación de especies se llevó a cabo utilizando claves dicotómicas para Culicidae [26–29], para Ceratopogonidae [30–33], para Psychodidae [34–36] y claves generales [37]. En el caso de individuos de la familia Psychodidae, sólo las hembras fueron identificadas hasta nivel de especie en base a la morfología de la espermateca, observada mediante disección del abdomen.

Resultados

Los siguientes Dípteros Nematóceros fueron solamente identificados hasta familia o género: Mosquitos, excepto anofelinos, hasta familia (Culicidae), flebotomos machos (Psychodidae) y moscas negras (Simuliidae) hasta género. Los mosquitos *Anopheles*, las hembras de flebotomos y las arenillas (Ceratopogonidae) fueron identificados hasta especie. Los resultados de la identificación taxonómica se muestran en la Tabla 1.

La identificación morfológica de los especímenes adultos anofelinos colectados indica que todos corresponden a *Anopheles neivai*, Howard, Dyar and Knab 1913. Adicionalmente, se localizaron dos posibles criaderos de larvas de *An. (Nysorrhynchus) albimanus* Wiedemann, C.R.G. 1820, en la carretera en construcción de la población de Mirabad hacia la represa y se lograron coleccionar siete larvas que fueron luego identificadas como *An. albimanus*.

Se encontraron 35 individuos de la familia Simuliidae, todos ellos pertenecientes al género *Simulium*. Durante la captura, se pudo evidenciar el alto grado de molestia de estos insectos debido a su picadura, obteniendo así una tasa promedio de 2.3 picaduras por minuto.

En el caso de flebotomos, pertenecientes a la familia Psychodidae, se colectaron un total de 80 individuos (49 hembras y 31 machos). Las hembras identificadas pertenecen a ocho especies diferentes, siendo las más abundantes *Lutzomyia hartmanni* (32.6 %) y *Lu. serrana* (34.7 %).

De los individuos pertenecientes a la familia Ceratopogonidae, comúnmente conocidos como “arenillas”, se obtuvieron un total de 519 especímenes del género *Culicoides* Latreille 1809. Su identificación es preliminar y se encontraron al menos 6 especies: Subgénero no

Vector	Enfermedad asociada	Número de especímenes
<i>Anopheles neivai</i>	Malaria	45
<i>Anopheles albimanus</i>	Malaria	7
Culicidae	Arbovirus	54
<i>Simulium spp.</i>	Oncocercosis	35
<i>Culicoides spp.</i>	Lengua azul, otros arbovirus	519
* <i>Lutzomyia hartmanni</i>	Leishmaniasis	16
* <i>Lutzomyia trapidoi</i>	Leishmaniasis	4
* <i>Lutzomyia serrana</i>	Leishmaniasis	17
* <i>Lutzomyia camposi</i>	-	1
* <i>Lutzomyia shannoni</i>	-	1
* <i>Lutzomyia (Psychodopygus)</i>	Leishmaniasis	1
* <i>Lutzomyia aclydifer</i>	-	5
* <i>Lutzomyia dreishbachi</i>	-	4

*Especímenes hembras identificados en base a la forma de la espermateca.

Tabla 1: Identificación de especímenes y potenciales vectores de enfermedades en el estudio.

ubicado, Grupo de Especies *fluvialis*: *Culicoides balsapambensis* Ortiz & León, 1955. *C. castillae* Fox, 1946. *C. fluvialis* Macfie, 1940a. Subgénero no ubicado, Grupo de Especies *limai*: *C. limai* Barretto, 1944. *C. vernoni* Wirth & Blanton, 1973. Subgénero *Psychophaena* *C. venezuelensis* Ortiz & Mirsa, 1950.

Los resultados de las encuestas epidemiológicas se muestran en la Tabla 2. Aunque la población analizada es pequeña y no es posible realizar un análisis estadístico exhaustivo, cabe recalcar que apenas una fracción minoritaria de las dos poblaciones encuestadas (11 % en Praderas del Toachi y 20 % en Santa Rosa) acostumbra a utilizar toldo para evitar picaduras nocturnas de insectos.

Discusión

El hecho de que todos los especímenes anofelinos fueron identificados como *Anopheles neivai* concuerda con la distribución de la especie al Noroccidente de los Andes pero es un nuevo registro geográfico de esta especie para esa zona. Los especímenes fueron colectados al crepúsculo en filo de bosque cerca de Praderas del

Información solicitada	Praderas del Toachi (n=19)	Santa Rosa (n=10)
¿Se utilizan toldos en su casa?	11 % (n=2)	20 % (n=2)
¿Hay presencia de mosquitos en su casa?	68 % (n=13)	90 % (n=9)
¿Puede reconocer usted las larvas de mosquito?	11 % (n=2)	20 % (n=2)
¿Puede reconocer usted las arenillas?	84 % (n=16)	90 % (n=9)
¿Puede reconocer usted las mantas blancas?	74 % (n=14)	40 % (n=4)
¿Ha tenido malaria?	32 % (n=6)	0 % (n=0)
¿Ha tenido leishmaniasis?	5 % (n=1)	0 % (n=0)

Tabla 2: Detalle de las encuestas piloto en dos poblaciones aledañas a la construcción de la represa Toach-Pilatón.

Toachi y en potreros cerca del ganado en Santa Rosa. *An. (kerteszia) neivai* ha sido incriminado en la transmisión de malaria en la costa Pacífica de Colombia [38] y ha sido encontrado infectado con el virus de Guaroa en Colombia [39]. La presencia de larvas de *An. albimanus* representa otra evidencia de presencia de vectores de malaria en la zona. Se han reportado anteriormente larvas de esta especie en la carretera desde la Unión del Toachi hacia Palo Quemado (L. Pinault, Com pers). *An. (Nysorrhynchus) albimanus* es considerado el principal vector de malaria en la costa del Ecuador [40]. Estas dos especies deben ser monitoreadas en el futuro pues la zona podría estar en riesgo de presentar casos de malaria especialmente si las poblaciones de vectores se ven afectadas por la construcción de la represa.

Otra especie de interés médico es el mosquito *Aedes aegypti* Linnaeus 1762, vector principal de la fiebre del dengue. Según los habitantes de Praderas del Toachi, se presentó un pequeño brote de dengue en el pasado, pero, a pesar de haberse encontrado dos criaderos con agua dentro de llantas abandonadas y larvas de mosquitos, no se encontró *Ae. aegypti* en este estudio. Esta especie de mosquito habita en zonas urbanas; sus poblaciones persisten en grandes ciudades de la costa como Guayaquil, Machala y Portoviejo en donde el dengue es endémico. Sin embargo, recientemente se ha encontrado la presencia de *Aedes aegypti* en pequeñas poblaciones en zonas rurales en donde se ha reportado brotes epidémicos de dengue [41]. El control de esta especie adquiere aún más importancia recientemente por ser vector del virus de Chikungunya que constituye un serio problema de salud en las Américas de donde se han reportado miles de casos y está presente en el Perú y en Colombia. El primer caso en el Ecuador se reporta en Octubre 2, 2014 [42].

En referencia a las “moscas negras”, la bibliografía indica varios estudios en la provincia de Esmeraldas que revelan la presencia de *Simulium exiguum s. l.* y *S. quadrivittatum* [43], ambas especies implicadas en la transmisión de oncocercosis en la zona del río Santiago. La oncocercosis es un serio problema de salud pública presente en 6 países en América Latina (Colombia, Brasil, Venezuela, México, Guatemala y Ecuador), sin embargo gracias a campañas anuales de nodulectomías y tratamiento de pacientes con Ivermectina (Mectizan®), el Ecuador ha podido controlar la transmisión de la enfermedad [44]. Observaciones preliminares y conversaciones con los colonos y campesinos del lugar sugieren que estos insectos hematófagos también constituyen un problema por sus picaduras obligando a que campesinos y trabajadores frecuentemente se protejan con ropa especial y malla en su cara y cuerpo, entre otros. También estos insectos se alimentan ávidamente del ganado y otros animales domésticos y constituyen posiblemente la plaga más molesta del lugar. Sería pertinente realizar un estudio taxonómico a nivel de especie en este grupo para evidenciar su biodiversidad en la zona y aclarar si *S. exiguum* y/o *S. quadrivittatum* están presentes en el

área de este estudio.

Los flebotomos son vectores de leishmaniasis, sin embargo, al tener estadios inmaduros terrestres no están directamente asociados a zonas de agua; más bien se encuentran en bosques y filos de bosques. Sin embargo, tanto la composición de especies como su abundancia pueden verse afectadas por la alteración de hábitats terrestres causada por la construcción de la represa. La presencia de *Lutzomyia trapidoi*, Fairchild & Hertig, 1952 de amplia distribución en la costa y estribaciones occidentales de los Andes corroboran el riesgo de transmisión de leishmaniasis en la zona y han sido reportados como los vectores principales de *Leishmania (Viannia) panamensis* [45]. La información de los pobladores de Mirabad, y Praderas del Toachi sugiere pocos casos pasados de leishmaniasis cutánea, aunque dicha información debe ser verificada en estudios futuros.

Respecto a las arenillas de la familia Ceratopogonidae, este grupo taxonómico ha sido muy poco estudiado en el Ecuador, por lo que se esperaría el descubrimiento de muchas especies nuevas en el futuro. La identificación hasta especie de los especímenes colectados es preliminar y debe ser confirmada. La presencia de *Culicoides vernoni* de confirmarse su identificación, sería un registro nuevo para el Ecuador. En general, estos insectos hematófagos se caracterizan por tener un tamaño diminuto, cuerpo de color claro, café o negro y las alas con diferentes patrones maculares. Están asociados a zonas de potreros con ganado del que se alimentan ávidamente especialmente temprano en la mañana. Constituyen una molestia para el ganado y moradores de estas zonas. Algunas especies son consideradas vectores del virus de Blue Tongue (BTV) de interés veterinario, virus de Oropuche y otros que afectan al ser humano, además de filarias del género *Manzonella* y *Dipetalonema*. Hasta nuestro conocimiento el virus BTV no ha sido reportado en el Ecuador y el virus de Oropuche solamente reportado en pocos casos febriles de la Amazonía Ecuatoriana [46]. El cambio de hábitat generado por el proyecto hidroeléctrico podría convertir zonas boscosas en pastizales, aumentando el área óptima para la cría y desarrollo de estos insectos. Los efectos epidemiológicos que este hecho pudiera tener son inciertos considerando que las arenillas al momento no han sido reportadas como vectores de ninguna enfermedad en el país, pero si son considerados una molestia por sus picaduras para los habitantes de la zona.

En referencia a la encuesta que se realizó a la población local acerca de su percepción y hábitos con respecto a prevenir las enfermedades transmitidas por insectos, el análisis de los resultados sugieren que el uso de toldos durante la noche para evitar picaduras no es una práctica común entre los moradores encuestados, a pesar de que en su mayoría reportaron la presencia de mosquitos al interior de las casas. Se sugiere promover una mayor concientización sobre la importancia del uso de toldos, el uso de repelentes y fumigación de las casas, lo que se

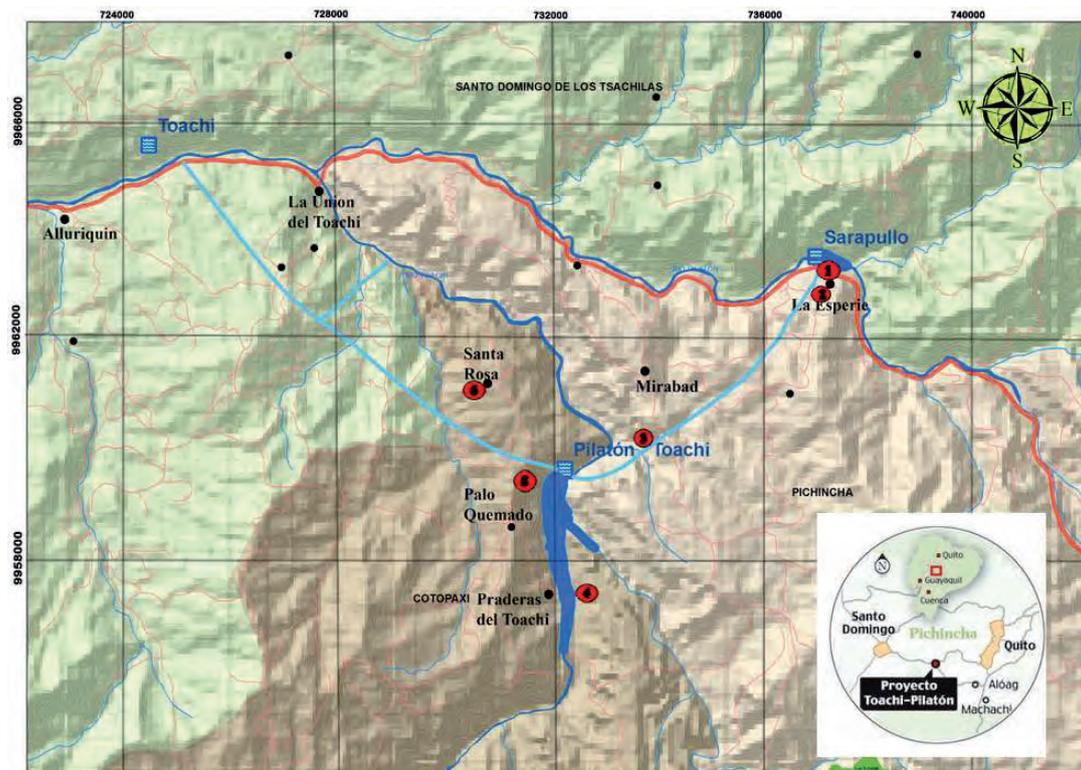


Figura 1: Mapa del área de la construcción de la represa Toachi-Pilatón y sitios de monitoreo entomológico (en círculos rojos).

ha visto, puede prevenir en gran medida la transmisión de enfermedades transmitidas por vectores [47, 48].

Conclusiones

Aunque el presente estudio presenta limitaciones importantes a nivel de tamaño de muestra y una toma extensa de datos, es un reporte preliminar interesante sobre la presencia de insectos Dípteros Nematóceros de interés médico en seis de las zonas aledañas a la represa hidroeléctrica Toachi-Pilatón y sobre la percepción de los moradores locales sobre los vectores presentes y las enfermedades potenciales que éstos transmiten. Este estudio constituye un punto de partida importante para investigaciones más extensas. La influencia de las represas hidroeléctricas en la incidencia de enfermedades vectoriales ha sido ampliamente demostrada en la bibliografía. Se sugiere implementar como parte del plan de manejo de la represa un programa de monitoreo de las poblaciones de Dípteros Nematóceros de importancia médica y una vigilancia continua, en coordinación con las autoridades locales de salud, de las enfermedades transmitidas por vectores prevalentes en la zona. En caso de que las poblaciones de insectos vectores aumenten o cambien, será importante la concientización a la gente sobre, la importancia del uso de toldo, de repelentes y fumigaciones, de medidas para evitar la presencia de insectos hematófagos dentro de las casas y en el peridomicilio. Por ejemplo, se debe evitar mantener agua estancada dentro o cerca de las viviendas y promover la identificación y eliminación de los criaderos naturales de larvas de mosquitos. Todas estas podrían ser alter-

nativas importantes para prevenir brotes epidémicos de estas enfermedades en el futuro.

Agradecimientos

Este estudio fue posible gracias al financiamiento de Chancellors Grant, Universidad San Francisco de Quito. Agradecemos al Ing. Juan Pablo Játiva del bosque Protector La Esperia y Proyecto Hidrotoapi y al Sr. Mario Meza por su ayuda en la coordinación y logística del trabajo de campo. Un especial agradecimiento a las hermanas Siervas de la Caridad de la Población de Palo Quemado por su ayuda para el alojamiento. Al Dr. Denis Augot de la Universidad de Reims y a la Dra Sonia Zapata del Instituto de Microbiología de la USFQ por su ayuda en la identificación preliminar de los Ceratopogonidos del género *Culicoides*.

Referencias

- [1] Sutherst, R. 2004. "Global Change and Human Vulnerability to Vector-Borne Diseases". *Clinical Microbiology Reviews*, 17(1):136-173.
- [2] Bueno-Marí, R.; Jiménez-Peydró, R. 2013. "Global change and human vulnerability to vector-borne diseases". *Front. Physiol*, 4:158.
- [3] Patz, J.; Graczyk, T.; Geller, N.; Vittor, A. 2000. "Effects of environmental change on emerging parasitic diseases". *International Journal for Parasitology*, 30:1395-1405.
- [4] Rosenberg, D.; Berkes, F.; Bodaly, R.; Hecky, R.; Kelly, C.; Rudd, J. 1997. "Large-scale impacts of hydroelectric development". *Environmental Reviews*, 5:27-54.

- [5] Baxter, R. 1977. "Environmental effects of dams and impoundments". *Annual Review of Ecology and Systematics*, 8:255–283.
- [6] Fearnside, P. 2001. "Environmental impacts of Brazil's Tucuruí dam: Unlearned lessons for hydroelectric development in Amazonia". *Environmental Management*, 27(3):377–396.
- [7] Sow, S.; de Vlas, S.; Engels, D.; Gryseels, B. 2002. "Water-related disease patterns before and after the construction of the Diama dam in northern Senegal". *Ann Trop Med Parasitol*, 96(6):575–586.
- [8] A., Z.; Petney, T.; Grundy-Warr, C.; Andrews, R.; Baird, I.; et al. 2013. "Dams and Disease Triggers on the Lower Mekong River". *PLoS Negl Trop Dis*, 7(6):e2166.
- [9] Hunter, J.; Rey, L.; Scott, D. 1983. "Man-made lakes - man-made diseases". *World Health Forum*, 4:177–182.
- [10] Keiser, J.; De Castro, M.; Maltese, M.; Bos, R.; Tanner, M.; Singer, B.; Utzinger, J. 2005. "Effect of irrigation and large dams on the burden of malaria on a global and regional scale". *Am. J. Trop. Med. Hyg*, 72(4):392–406.
- [11] Vasconcelos, C.; Leão de Moraes Novo, E.; Donalísio, M. 2006. "Use of remote sensing to study the influence of environmental changes on malaria distribution in the Brazilian Amazon". *Cad. Saúde Pública*, 22(3):517–526.
- [12] Guimaraes, A.; Gentile, C.; Alencar, J.; Lopes, C.; Mello, R. 2004. "Ecology of anopheline (Diptera, Culicidae), malaria vectors around the Serra de Mesa Reservoir, State of Goiás, Brazil. 1-Frequency and climatic factors". *Cadenos de Saúde Pública*, 20(1):291–302.
- [13] Tubaki, R.; Menezes, R.; Cardoso Junior, R.; Bergo, E. 2004. "Studies on entomological monitoring: Mosquito species frequency in riverine habitats of the Igarapava Dam, Southern Region, Brazil". *Revista do Instituto de Medicina Tropical de São Paulo*, 46(4):223–229.
- [14] Yewhalaw, D.; Legesse, W.; Van Bortel, W.; Gebre-Selassie, S.; Kloos, H.; Duchateau, L.; Speybroeck, N. 2009. "Malaria and water resource development: the case of Gilgel-Gibe hydroelectric dam in Ethiopia". *Malar J*, 29(8):21.
- [15] Dégallier, N.; Travassos de Rosa, A.; Hervé, J.; Vasconcelos, P.; Travassos de Rosa, J.; Sa' Filho, G.; Pinheiro, F. 1989. "Modifications of arbovirus eco-epidemiology in Tucuruí, Para, Brazilian Amazonia, related to the construction of a hydroelectric dam". *Proceedings of the 5th Symposium on Arbovirus Research in Australia*, 1:124–135.
- [16] Dégallier, N.; Travassos Da Rosa, A.; Vasconcelos, P.; Herve, J.; Sá Filho, G.; Travassos Da Rosa, J.; Travassos Da Rosa, E.; Rodrigues, S. 1992. "Modifications of arbovirus transmission in relation to construction of dams in Brazilian Amazonia". *Journal of the Brazilian Association for the Advancement of Science*, 44:124–135.
- [17] Ebomoyi, E.; Omonisi, M. 1991. "Human Ecology and Behavior in Onchocerciasis Control Isolated Villegas of Kwara State, Nigeria". *Ambio*, 20(1):43–47.
- [18] Barata, R.; Ursine, R.; Nunes, F.; Morais, D.; Araujo, H. 2012. "Synanthropy of mosquitoes and sand flies near the Aimorés hydroelectric power plant, Brazil". *J Vector Ecol*, 37(2):397–401.
- [19] Ferreira, V.; Martinez, C.; Versiani, R. B. Santos. 2011. "Human health externalities studies derived from hydro-power plants reservoirs". *Eng Sanit Ambient*, 16(2):149–156.
- [20] Fryauff, D.; Modi, G.; Mansour, N.; Kreutzer, R.; Soliman, S.; Youssef, F. 1993. "Epidemiology of cutaneous leishmaniasis at a focus monitored by the multinational force and observers in the northeastern Sinai Desert of Egypt". *Am J Trop Med Hyg*, 49(5):598–607.
- [21] Rezende, H.; Sessa, P.; Ferreira, A.; Dos Santos, C.; Leite, G.; Falqueto, A. 2009. "Effects of the installation of the Rosal hydroelectric power station, Itabapoana River, States of Espírito Santo and Rio de Janeiro, on anophelinae, planorbidae and phlebotominae". *Rev Soc Bras Med Trop*, 42(2):160–164.
- [22] Anónimo. 2014. "The World Commission on Dams". *Enlace: <http://www.internationalrivers.org/campaigns/the-world-commission-on-dams>*.
- [23] Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC EP. 2014. "Información general Hidrotoapi". *Enlace: <https://www.celec.gob.ec/hidrotoapi/index.php/toachipilaton/informacion-general>*.
- [24] Sistema Informático de Vigilancia Epidemiológica del Ministerio de Salud Pública del Ecuador (ViEpi-MSP). 2014.
- [25] Sudia, W.; Chamberlain, R. 1962. "Battery operated light traps, an improved model". *Mosq. News*, 22:126–129.
- [26] Faran, M. 1980. "Mosquito studies (Diptera: Culicidae) XXXIV. A revision of the *Albimanus* Section of the subgenus *Nyssorhynchus* of *Anopheles*". *Contrib Am Entomol Inst*, 15(7):1–215.
- [27] Faran, M.; Linthicum, K. 1981. "A handbook of the Amazonian species of *Anopheles* (Diptera: Culicidae)". *Mosq Syst*, 13:1–81.
- [28] Linthicum, K. 1988. "A revision of *Argyritarsis* Section of the subgenus *Nyssorhynchus* of *Anopheles*". *Mosq Syst*, 20:98–271.
- [29] Wilkerson, R.; Strickman, D. 1990. "Illustrated key to the female anopheline mosquitoes of Central America and Mexico". *Journal of Mosquito Control Association*, 6(1):7–13.
- [30] Ortiz, I.; León, L. 1955. "Los *Culicoides* (Diptera: Ceratopogonidae) de la República del Ecuador". *Boletín de Informaciones Científicas Nacionales*, 7:564–590.
- [31] Borkent, A. 2012. "World Species of Biting Midges (Diptera: Ceratopogonidae)". *<http://www.inhs.uiuc.edu/research/FLYTREE/CeratopogonidaeCatalog.pdf>*, Salmon Arm: British Columbia.

- [32] Borkent, A.; Spinelli, G. 2007. “*Neotropical Ceratopogonidae (Diptera: Insecta) (Vol. 4)*”. J. Adis, J. Arias, G. Rueda-Delgado, & K. Wanssen, Edits. Sofia, Bulgaria: Pensoft.
- [33] Mihn Hoan, T. 2010. “Contribution a l’étude des Ceratopogonidae de nouveau monde: le genre *Culicoides* Latreille, 1809 (Diptera: Ceratopogonidae) morphologie, importance médicale et vétérinaire, description des espèces de la Guyane Française”. *Universite Paris: Paris*.
- [34] Young, D.; Duncan, M. 1994. ‘Guide to the identification and geographic distribution of *Lutzomyia* sand flies in Mexico, the West Indies, Central and South America (Diptera: Psychodidae)’. *Memoirs of the American Entomological Institute, 54, Associated Publishers-American Entomological Institute: Gainesville*.
- [35] Young, D.; Duncan, M. 1994. “Guide to the identification and geographic distribution of *Lutzomyia* sandflies in Mexico, the West Indies, Central and South America (Diptera: Psychodidae)”. *Mem Ann Entomol Institut, 54: 1–881*.
- [36] Galati, E. 2010. “Phlebotominae (Diptera, Psychodidae) Classificação, Morfologia, Terminologia e Identificação de Adultos. Apostila Disciplina HEP 5752 Bioecologia e Identificação de Phlebotominae. Vol. I”. *Departamento de Epidemiologia Faculdade de Saúde Pública Universidade de São Paulo: São Paulo*.
- [37] Bland, R.; Jaques, H. 1978. “How to know the insects”. 3rd edition. Wm. C. Brown Company Publishers, Dubuque, Iowa, USA.
- [38] Solarte, Y.; Hurtado, C.; Gonzalez, R.; Alexander, B. 1996. “Man-biting activity of *Anopheles (Nyssorhincus) albimanus* and *An. (kerteszia) neivai* (Diptera: Culicidae) in the Pacific lowlands of Colombia”. *Mem Inst. Oswaldo Cruz, 21(2):141–146*.
- [39] Lee, V.; Sanmartin, C. 1967. “Isolations of Guaroa virus from *Anopheles (kerteszia) neivai* in the Pacific lowlands of Colombia”. *Am J. Trop. Med Hyg, 16(6):778–781*.
- [40] Pinault, L.; Hunter, F. 2012. “Characterization of larval habitats of *Anopheles albimanus*, *Anopheles pseudopunctipennis*, *Anopheles punctimacula*, and *Anopheles oswaldoi s.l.* populations in lowland and highland Ecuador”. *Journal of Vector Ecology, 37(1):124–136*.
- [41] León, R.; Grupo investigación de la UTMACH; Stewart-Ibarra, A.; Arteaga, V.; Beltrán, E. 2014. “Monitoreo del mosquito vector *Aedes aegypti* en Palmares, localidad rural Ecuatoriana del cordón fronterizo Ecuador-Perú, durante una epidemia de dengue en Enero- Abril del 2014”. *Poster al III Encuentro Nacional de Investigación en Enfermedades Infecciosas y Medicina Tropical, Centro de Investigación en Enfermedades Infecciosas (CIEI), Universidad Católica del Ecuador*.
- [42] Ministerio de Salud Pública del Ecuador. 2014. “Se presenta caso importado de chikungunya en Ecuador”. <http://www.salud.gob.ec/se-presenta-caso-importado-de-chikungunya-en-ecuador/>.
- [43] Vieira, J.; Brackenboro, L.; Porter, C.; Basañez, M.; Collins, R. 2005. “Spatial and temporal variation in biting rates and parasite transmission potentials of *Onchocerciasis* vectors in Ecuador”. *Trans Royal Soc. Trop Med Hyg, 99:178–195*.
- [44] La Hora Onco. 2010. “Periódico producido por el Programa de la eliminación de la Oncocercosis en Ecuador (PNEO-E)”. *Impreso en colaboración con el Programa para la Eliminación de la Oncocercosis en las Américas (OEPA)*.
- [45] Le Pont, F.; Leon, R.; Guerrini, F.; Gantier, J.; Mouchet, J.; Echeverria, R.; Guderian, R. 1994. “Leishmaniose en Equateur. 3. *Lutzomyia trapidoi*, vecteur de *Leishmania panamensis*”. *Ann. Soc. belge Med. Trop, 74:23–28*.
- [46] Manock, S.; Jacobsen, K.; De Bravo, N.; Russell, K.; Negrete, M.; Olson, J.; Sanchez, J.; Blair, P.; Smalligan, R.; Quist, B.; Espín, J.; Espinoza, W.; MacCormick, F.; Fleming, L. 2009. “Etiology of acute undifferentiated febrile illness in the Amazon basin of Ecuador”. *Am J Trop Med Hyg, 81(1):146–151*.
- [47] Okumu, F.; Kiware, S.; Moore, S.; Killeen, G. 2013. “Mathematical evaluation of community level impact of combining bed nets and indoor residual spraying upon malaria transmission in areas where the main vectors are *Anopheles arabiensis* mosquitoes”. *Parasites & Vectors, 6:17*.
- [48] Ávila, G.; Araujo, R.; Leontsini, E.; Orellana, G.; y Fernández, E. 2012. “Un programa escolar para el control del dengue en Honduras: del conocimiento a la práctica”. *Revista Panamericana de Salud Pública, 31(6): 518–522*.

Short review and detection of *Leishmania* parasites in skin biopsies from patients coming from Echeandía, Bolívar Province, Ecuador

Breve reseña y detección de parásitos *Leishmania* en biopsias de piel de pacientes procedentes de Echeandía, provincia de Bolívar, Ecuador

Renato León^{1*}, Christina Erkelenz¹, Carlos Reck², Rommy Terán³

¹Universidad San Francisco de Quito (USFQ). Laboratorio de Entomología Médica & Medicina Tropical (LEMMT). Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales. Calle Diego de Robles y Vía Interoceánica, Campus Cumbayá, Casilla Postal 17-1200-841, Quito, Ecuador.

²Medical University of Vienna. Department of Pediatric Surgery. NEdergasse 10 1190 Vienna Austria.

³Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ciencias Químicas, calle Francisco Viteri y Gatto Sobral, Quito Ecuador.

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

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

Recibido/Received: 03/05/2014. Aceptado/Accepted: 04/04/2014.

Publicado en línea/Published on Web: 19/12/2014. Impreso/Printed: 19/12/2014.

Abstract

Leishmaniasis is an important neglected tropical disease and the cause of significant morbidity in endemic countries such as Ecuador. It is transmitted by the bite of infected sand flies (Diptera Psychodidae) and has been reported from at least 22/24 provinces in the country including the foothills of the Andean mountains. Herein, we report the detection of *Leishmania* parasites, using PCR assays, in skin biopsies taken from ulcers of leishmaniasis patients from Echeandía in the province of Bolívar, Ecuador. These results suggest that most of the patients were infected with parasites from the braziliensis complex that among other species, includes *Leishmania (Viannia) panamensis* which is the most common species that causes cutaneous leishmaniasis in the Pacific coast, and *Leishmania (V.) braziliensis*, the cause of mucocutaneous lesions and significant patient disfigurement. More studies are needed to further identify the parasite species present in this area and address aspects of the parasite's life cycle and transmission dynamics. Our preliminary results showed that the R174 and R798 18 S ribosomal DNA primers used in this study are effective to amplify *Leishmania* DNA and would be a useful tool to molecularly detect New World parasites causing tegumentary leishmaniasis.

Keywords. PCR, Echeandia, leishmaniasis, skin biopsies.

Resumen

La leishmaniasis es una importante enfermedad tropical desatendida y es la causa de significativa morbilidad en países endémicos como el Ecuador. La enfermedad es transmitida por la picadura de flebotomos (Diptera:Psychodidae) infectados y ha sido reportada en al menos 22/24 provincias del Ecuador incluyendo las estribaciones de la cordillera de los Andes. En esta publicación reportamos la detección de parásitos de *Leishmania* mediante ensayos de PCR en biopsias de piel de pacientes con diagnóstico de leishmaniasis provenientes de la zona de Echeandía en la Provincia de Bolívar, Ecuador. Los resultados sugieren que la mayoría de los pacientes fueron infectados por parásitos pertenecientes al complejo braziliensis que incluye entre otras especies a *Leishmania (Viannia) panamensis*, el parásito más abundante en la costa Pacífica y causa de leishmaniasis cutánea y *Leishmania (V.) braziliensis*, la causa de lesiones mucocutáneas y significativa desfiguración del paciente. Más estudios son necesarios para identificar las especies del parásito que circulan en esta zona y abordar otros aspectos de los ciclos naturales de cada especie del parásito y la dinámica de transmisión. Los resultados preliminares muestran que los cebadores R174 and R798 del ADN 18 S ribosomal usados en este estudio son efectivos para amplificar ADN de *Leishmania* y pueden ser una herramienta útil en la detección de parásitos del Nuevo Mundo que causan leishmaniasis tegumentaria.

Palabras Clave. PCR, Echeandia, Leishmaniasis, biopsias de piel.

Introduction

Leishmaniasis is a tropical disease caused by obligate intracellular protozoan parasites of the genus *Leishmania* and transmitted in the New World by the bite of infected sand fly females of the genus *Lutzomyia* (Diptera:

Psychodidae). Cases of leishmaniasis occur mainly in the tropics and subtropics and disease burden is considered greatly underestimated; reports of the disease are only mandatory in 32 of the 88 countries affected and, according to the World Health Organization (WHO) 2010, is one of the most important neglected vector-borne dis-

eases worldwide causing significant morbidity and even mortality. It has been estimated that approximately 2 million cases occur every year with approximately 1.5 million cases of cutaneous leishmaniasis and 12 million people infected globally [1].

In the past, *Leishmania* parasites have been grouped based on the clinical manifestations into cutaneous (CL), mucocutaneous (MC), visceral (VL) and other less typical clinical forms (diffuse cutaneous and recidiva cutis), classification that has been especially useful for physicians and medical personnel. The parasites have also been grouped in a previous classification into the *Leishmania braziliensis*, *Leishmania mexicana* and the *Leishmania donovani* complexes of species. In the 1980's Lainson and Shaw proposed grouping the parasites into Suprapylaria, Peripylaria and Hypopylaria based on where the parasites were found in the vector's alimentary canal. Currently, the latest classification and the one currently accepted describes two subgenera within the genus *Leishmania*: *Viannia* and *Leishmania*. The first include species from the *braziliensis* complex whereas the second includes species from the *mexicana* complex of species.

In Ecuador, the first reported cases of the disease dated back to the beginning of the last century in 1920 [2]. Various other studies were published in local medical journals in the 1950's [3, 4] and the first and only unconfirmed report of VL was reported in 1949 [5]. This information has been listed chronologically in other publications [6] and has been reviewed elsewhere [7]. More recently, since the 1990s, several scientists have contributed to the knowledge of the parasites [8–11], the vectors [12–16], the clinical forms [17–20], prevention and treatment strategies [21–23] and other aspects of the disease in Ecuador, many studies compiled in a series of book publications [24–31]. The most recent reports referred to annotations of the presence of mucocutaneous forms at the Pacific coast [32], the presence of *Leishmania naiffi* [33], the topical treatment of cases with leishmaniasis recidiva cutis [34], and a description of patients with Chiclero's ulcer [35]. In Ecuador, at least 22/24 provinces have reported cases of the disease which is endemic in the warmer Pacific lowland where *Leishmania (V.) panamensis* is the most common parasite causing CL [36]. Nevertheless, transmission of the disease has also been well characterized in a few foci at the highlands [37, 38] and has been documented at the Amazon basin where *Le. (V.) braziliensis* is also present and the potential cause of the mucocutaneous form which is more difficult to treat and highly disfiguring [8, 39, 40].

Currently, CL is the most common clinical form in Ecuador. It produces skin ulcers with raised borders which may last for months or years if not treated and cause significant patient disfigurement due to the scars that never completely disappear [7, 41].

The novel advances in molecular techniques are an invaluable tool to address more accurately parasite and

vector taxonomic and phylogenetic issues. In the past decades, the Polymerase Chain Reaction (PCR) has been widely implemented and a variety of DNA sequences have been used to develop primers for these assays. Some of the most recent publications that use PCR in Ecuadorian studies molecularly detected *Leishmania* parasites from sand flies at the Andean region [42], at the Amazon region [43] and using molecular mass screening [44]. Due to the variety of *Leishmania* parasite species worldwide and the presence of at least 7 parasite species in Ecuador, the extensive testing of the different primer sequences using human and vector samples is crucial to evaluate their specificity and sensibility and improve parasite detection methods. For this short report, we have used two PCR assays to detect *Leishmania* infection in skin biopsies taken from patients with microscopically confirmed leishmaniasis from the area of Echeandía in the province of Bolívar, Ecuador. To our knowledge this is the first time that this 18S rRNA PCR primers have been used to detect *Leishmania* parasites from Ecuador.

Materials and Methods

Human samples

Tissue samples were taken from 11 patients, with symptoms of leishmaniasis and positive microscopic diagnosis that were admitted to the Echeandía health center in the town of Echeandía, Bolívar province (Figure 1) between August 2003 and February 2004. Patient's name will not be cited in this report, but is kept as part of the medical records in the health center at Echeandía. Tissue samples were taken from the ulcer border using local anesthetic and the smear from biopsy material placed in a glass slide was stained using Giemsa. (Table 1). The rest of the tissue was stored in L6 buffer in a 1.5 ml eppendorf tube and sent to the USFQ laboratory for further analysis. Biopsies were taken primarily with a diagnosis purpose only in the cases where diagnosis based on clinical manifestations or microscopic examination of ulcer material taken routinely from scrapping the ulcer border using a scalpel was not conclusive. This explains the limited number of samples analyzed using molecular analysis. Procedures were carried out by a physician at the health center of Echeandía under the supervision of Dr. Carlos Reck strictly following safety procedures followed by the Echeandía health center.

DNA isolation and PCR Assays

For all the PCR assays, DNA was extracted from the biopsy samples using a DNeasy tissue kit (Quiagen®) following the manufacturer's instructions. For the PCRs, two different assays were used to detect Ecuadorian *Leishmania* parasites: (1) An assay based on a multiplex PCR [45] which uses one forward primer (Lu 5A) common to all *Leishmania* species and three reverse primers (LB-3C, LM 3A, LC3L) specific to species belonging to the *Leishmania braziliensis*, *Leishmania mexicana* and *Leishmania donovani* parasite complexes which amplify PCR

Preliminary results - Date: April 12/04						
Patient	Gender	Age	+Giemsa	Place	RNA mini exon	18S RNA
3	male	14	17-Jan-04	Face	braziliensis complex	+
5	male	6	15-Jan-04	Leg	-	-
6	female	10	12-Jan-04	Ankle	braziliensis complex	+
7	male	67	11-Dec-03	Arm	-	-
8	male	30	10-Dec-03	Leg	-	-
10	male	7	04-Dec-03	Leg	braziliensis complex	+
11	male	24	27-Nov-03	Leg	braziliensis complex	-
12	male	40	19-Nov-03	Face	braziliensis complex	+
13	male	42	13-Nov-03	Leg	braziliensis complex	+
15	female	1	6-Nov-03	Leg	braziliensis complex	+
16	female	20	6-Nov-03	Leg	-	+

Table 1: Information from patients with Microscopic diagnosis (Giemsa) of Leishmaniasis and results from two molecular detection PCRs (RNA mini exon PCR assay and 18S Ribosomal DNA PCR assay).

products as detailed below and (2) an assay specific to the genus *Leishmania* [46] that targets a portion of the 18 S ribosomal gene and was evaluated at the Royal Tropical Institute, KIT Medical Research (primers were kindly provided by Dr H. Schallig). In both cases, procedures described in the bibliography were modified and DNA amplification was done using PCR Ready to go Beads (Amersham Pharmacia®), a commercially available product that is easy to use where all the reagents for the PCR reaction come ready to use compacted in a solid bead inside a small eppendorf tube.

RNA mini exon gene PCR Assay

Based on a multiplex PCR assay, the RNA mini exon gene repeats were used to detect all three New World complexes of *Leishmania* parasites. The PCR primers used were as follows: the forward primer (Lu - 5A, 5'- ttt att ggt atg cga aac ttc - 3'), reverse primers (LB - 3C, 5'- cgt c/gcc gaa ccc cgt gtc - 3') specific for the braziliensis complex of *Leishmania* species amplifying a fragment of 146 - 149 bp or dimers of 375bp length as reported in the bibliography, reverse primer (LM - 3A, 5' - gca ccg cac cgg a/gcc ac - 3'), specific for the mexicana complex that produced segments of 218 - 240 bp long and reverse primer (LC - 3L, 5'- gcc cgc gc/tg tca cca ca t - 3') specific for the donovani complex that

produced fragments of 351 - 397 bp length. PCR reactions for each *Leishmania* complexes were conducted separately using the same forward primer and different reverse primers under the same thermal cyclers conditions: 95 °C for 5 minutes followed by 35 cycles of 95 °C for 30 sec, 54 °C for 45 sec, 72 °C for 30 sec with a final extension of 72 °C for 5 min.

PCR assay with 18 S ribosomal DNA primers

For the PCR reaction, 2.5 µl of DNA were amplified in a final volume of 25 µl with primers (R174, 5'- ggt tcc tt cct gat tta cg - 3') and (R798, 5'- ggc cgg taa agg ccg aat ag - 3') to yield a fragment of 600 bp length. The thermal cycling conditions used were as follows: 50 °C for 5 min, 94 °C for 10 min and 40 cycles of 94 °C for 75 sec, 60 °C for 1 min, 72 °C for 2 min with a final extension of 72 °C for 50 min.

For both assays, PCR products were analyzed by gel electrophoresis using 2% Ultra Pure or MetaPhor® agarose for the fine separation of small DNA fragments and visualized under a UV light following standard procedures. Interpretation of the patterns was based on the size and on the presence or absence of amplified DNA bands.

Results and Discussion

From the tissue biopsies analyzed for the presence of *Leishmania* parasites using PCR, only 6 (54.5%, n=11) were positive as tested with the two sets of primers used in this study as reported in Table 1. Electrophoresis from the PCR products using Ultra Pure Agarose using the RNA mini exon PCR assay showed poorly-defined bands but with clear signs of DNA amplification. MetaPhor® agarose prepared gels showed evidently more defined and clear bands of 149 bp confirming the presence of parasites from the braziliensis complex (Figure 2). Presence of additional bands of 375 bp possibly corresponded to dimers of two linked DNA fragments, that were previously reported in the bibliography [45].

Electrophoresis from samples 5, 7 and 8 revealed an unknown pattern of 4 bands using the RNA mini exon

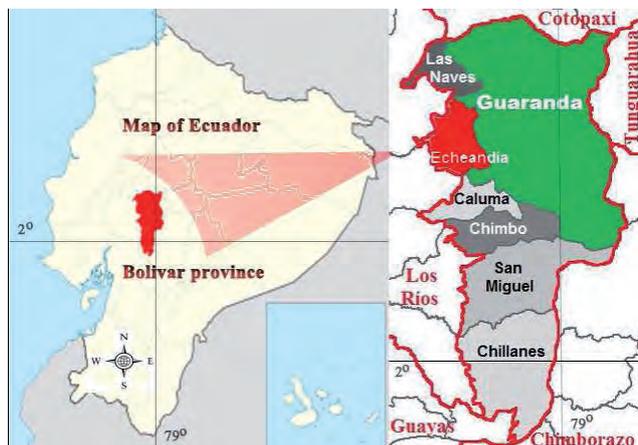


Figure 1: Map of Ecuador showing the area of Echeandia in Bolivar province.

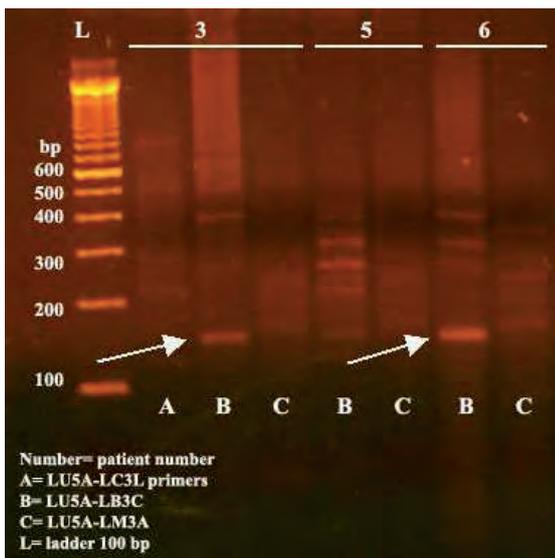


Figure 2: Detection of *Leishmania* parasites using the RNA mini exon gene PCR assay. Sample 3 and 6 showed distinct bands of 149bp and around 400 bp using LU5A-LB3C consistent with the expected band size for the *Leishmania braziliensis* complex of parasites. Sample 5 does not show any specific DNA amplification.

PCR assay (gel not shown) suggesting an unspecific amplification; no amplification was detected using the 18 S ribosomal DNA primers (Figure 3). Both PCR assays showed consistent positive/negative results in all the tissue biopsies except for samples 11 and 16. Sample 11 examined with LU5A-LB3C (*braziliensis* complex) primers showed a strong band of 149 bp and four additional bands with a similar band pattern to the one observed in samples 5, 7 and 8. However, was not recognized by the 18S ribosomal DNA primers. Sample 16 showed no amplification using the LU5A-LB-3C set of primers to the *braziliensis* complex (gel not shown) but showed a weak but distinct band of 600 bp using the 18 S ribosomal DNA primers suggesting the presence of *Leishmania* parasites (Figure 3).

The results which showed a different band pattern than the expected according to the bibliography using the RNA mini exon PCR assay may suggest that further standardization is needed and the use of beads instead of mixing the reagents individually may have affected the amplification. On the other side, it is also possible that the different band pattern might correspond to different *Leishmania* species within the *braziliensis* complex of parasites. Several past studies have reported co-infection of two parasite species [47], the presence of new parasites species (*Le. major*-like) [48] and hybrid species in Ecuador [49]; recently *Le. naiffi* was for the first time found in Ecuador [50] and *Lutzomyia tuberculata* was for the first time found constituting a new sand fly species record for the country [51], thus the immense biodiversity of parasite and vector species still need to be further investigated. According to the information reviewed, *Le. (V.) panamensis* is the only parasite species found in the Northern part of Bolívar province [7]. More studies are needed to further identify the parasite species circulating in Echeandía and to

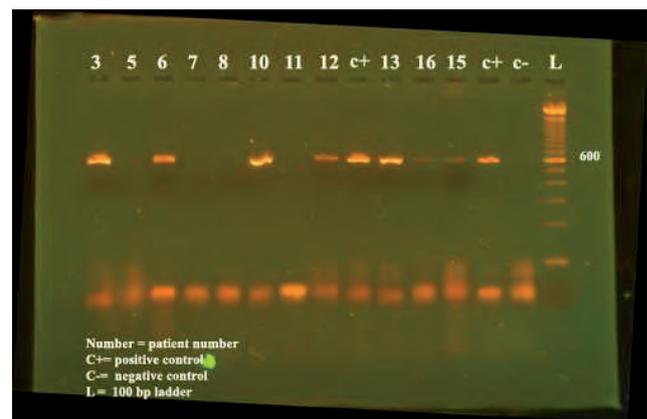


Figure 3: Detection of *Leishmania* parasites in 7 of 11 tissue biopsies as detected by PCR using 18S ribosomal DNA primers Sample number 3, 6, 10, 12, 13, 15, 16 are positive for *Leishmania* parasites as evidenced in the gel. (Expected band size: 600 bp).

further evaluate the PCR assays used in this study. To our knowledge this is the first time that this 18S ribosomal DNA PCR assay is tested with *Leishmania* samples from Ecuador. These preliminary results suggest that R174 and R798 primers may be an effective alternative and a useful tool for the detection of *Leishmania* parasites in Ecuador and in the New World, nevertheless, other species-specific PCR methods would be necessary to identify to species the *Leishmania* parasites circulating in this region of Ecuador.

Acknowledgements

The authors would like to thank the Erasmus Mundus Programme for providing financial support to C. Erkelenz to travel to Ecuador for training at the Medical Entomology & Tropical Medicine Laboratory (LEMMT) at Universidad San Francisco de Quito. We would also like to thank the medical personnel from the health Center of Echeandía for their help to obtain skin biopsies from the leishmaniasis patients. A special thanks to Dr. Henk Schallig at the Royal Tropical Institute KIT Medical Research, The Netherlands for providing reagents, primers and technical support for the PCR assays.

References

- [1] WHO. 2010. "Leishmaniasis magnitude of the problem". http://www.who.int/leishmaniasis/burden/magnitude/burden_magnitude/en/print.html.
- [2] Rodríguez, J. 1974. "Lecciones de Parasitología Humana: Género Leishmania". Universidad de Guayaquil: Guayaquil.
- [3] León, L. 1957. "Leishmanias y Leishmaniasis". Ed. Universitaria: Quito.
- [4] Rodríguez, J.; Aviles, F. 1953. "Algunas observaciones sobre leishmaniasis cutáneo mucosa en el Ecuador". *Rev Ec Hig Med Trop*, 10:35-58.
- [5] León, L. 1952. "Leishmaniasis Visceral". *Gaceta Médica año XII No 5: Guayaquil*.

- [6] Hashiguchi, Y.; Gomez, E. 1991. "Review of leishmaniasis in Ecuador". *Bull PAHO*, 25:64–76.
- [7] Calvopiña, M.; Armijos, R.; Hashiguchi, Y. 2004. "Epidemiology of Leishmaniasis in Ecuador: Current Status of Knowledge - A Review". *Mem Inst Oswaldo Cruz*, 99 (7):663–672.
- [8] Armijos, R.; Chico, M.; Cruz, M.; Guderian, R.; Kreutzer, R.; Berman, J.; Rogers, M.; Grogl, M. 1990. "Human cutaneous leishmaniasis in Ecuador: Identification of parasites by enzyme electrophoresis". *Am J Trop Med Hyg*, 42:424–428.
- [9] Mimori, T.; Sasaki, J.; Nakata, M.; Gomez, E.; Uezato, H.; Nonaka, S.; Hashiguchi, Y.; Furuya, M.; Saya, H. 1998. "Rapid identification of *Leishmania* species from formalin-fixed biopsies by polymorphism-specific polymerase chain reaction". *Gene*, 210:179–186.
- [10] Aviles, H.; Belli, A.; Armijos, R.; Monroy, F.; Harris, E. 1999. "PCR detection and identification of *Leishmania* parasites in clinical specimens in Ecuador: A comparison with classical diagnostic methods". *J. Parasitol*, 85: 181–187.
- [11] Bañuls, A.; Jonquieres, R.; Guerrini, F.; Le Pont, F.; Barrera, C.; Espinel, I.; Guderian, R.; Echeverria, R.; Tibayrenc, M. 1999. "Genetic analysis of *Leishmania* parasites in Ecuador: Are *Leishmania (Viannia) panamensis* and *L. (V.) guyanensis* distinct taxa?". *Am J Trop Med Hyg*, 6:838–845.
- [12] Alexander, J.; Takaoka, H.; Eshita, Y.; Gomez, E.; Hashiguchi, Y. 1992. "New records of phlebotomine sand flies (Diptera: Psychodidae) from Ecuador". *Mem Inst Oswaldo Cruz*, 87:123–130.
- [13] Le Pont, F.; Leon, R.; Guerrini, F.; Gantier, J.; Mouchet, J.; Echeverria, R.; Guderian, R. 1994. "Leishmaniasis in Ecuador. 3. *Lutzomyia trapidoi*, vector of *L. panamensis*". *Ann Soc Belg Med Trop*, 74:23–28.
- [14] Le Pont, F.; Barrera, C.; Caceres, A.; Galati, E.; Jarra, O.; Riofrio, A.; Mouchet, J.; Echeverria, R.; Guderian, R. 1994. "Leishmaniasis in Ecuador. 6. Epidemiological and entomological note on the focus of leishmaniasis in Zumba". *Ann Soc Belg Med Trop*, 74:43–49.
- [15] Dujardin, J.; Le Pont, F.; Cruz, M.; Tarrieu, L.; Guderian, R.; Echeverria, R.; Tibayrenc, M. 1996. "Cryptic speciation in *Lutzomyia (Nyssomyia) trapidoi* (Diptera: Psychodidae) detected by multilocus enzyme electrophoresis". *Am J Trop Med Hyg*, 54:42–45.
- [16] Kato, H.; Uezato, H.; Katakura, K.; Calvopiña, M.; Marco, J.; Barroso, P.; Gomez, E.; Mimori, T.; Korenaga, M.; Iwata, H.; Nonaka, S.; Hashiguchi, Y. 2005. "Detection and Identification of *Leishmania* Species within Naturally Infected Sand flies in the Andean Areas of Ecuador by a Polymerase Chain Reaction". *Am. J. Trop. Med. Hyg.*, 72(1):87–93.
- [17] Calvopiña, M.; Armijos, R.; Marco, J.; Uezato, H.; Kato, H.; Gomez, E.; Korenaga, M.; Barroso, P.; Mimori, T.; Cooper, P.; Nonaka, S.; Hashiguchi, Y. 2006. "*Leishmania* isoenzyme polymorphisms in Ecuador: Relationships with geographic distribution and clinical presentation". *BMC Infectious Diseases*, 6:139.
- [18] Calvopiña, M.; Gomez, E.; Uezato, H.; Kato, H.; Nonaka, S.; Hashiguchi, Y. 2005. "Atypical Clinical Variants in New World Cutaneous Leishmaniasis: Disseminated, Erysipeloid, and Recidiva Cutis due to *Leishmania (V.) panamensis*". *Am J Trop Med Hyg*, 73(2):281–284.
- [19] Calvopiña, M.; Uezato, H.; Gomez, E.; Korenaga, M.; Nonaka, S.; Hashiguchi, Y. 2006. "Leishmaniasis recidiva cutis due to *Leishmania (Viannia) panamensis* in subtropical Ecuador: isoenzymatic characterization". *International Journal of Dermatology*, 45:116–120.
- [20] Calvopiña, M.; Gomez, E.; Sindermann, H.; Cooper, P.; Hashiguchi, Y. 2006. "Relapse of New World Diffuse Cutaneous Leishmaniasis caused by *Leishmania (Leishmania) mexicana* after Miltefosine treatment". *Am. J. Trop. Med. Hyg*, 75(6):1074–1077.
- [21] Guderian, R.; Chico, M.; Rogers, M.; Pattishall, K.; Grogl, M.; Berman, J. 1991. "Placebo controlled treatment of Ecuadorian cutaneous leishmaniasis". *Am J Trop Med Hyg*, 45:92–97.
- [22] Weigel, M.; Armijos, R. 2001. "The traditional and conventional medical treatment of cutaneous leishmaniasis in rural Ecuador". *Rev Panam Salud Publica*, 10:395–404.
- [23] Armijos, R.; Weigel, M.; Aviles, H.; Maldonado, R.; Racines, J. 1998. "Field Trial of a Vaccine against New World Cutaneous Leishmaniasis in an At-Risk Child Population: Safety, Immunogenicity, and Efficacy during the First 12 Months of Follow-Up". *The Journal of Infectious Diseases*, 177:1352–1357.
- [24] Hashiguchi, Y. 1987. "Studies on New World leishmaniasis and its transmission, with particular reference to Equateur". *Kyowa Printing Co*, 1:1–174.
- [25] Hashiguchi, Y. 1990. "Studies on New World Leishmaniasis and its Transmission with Particular Reference to Ecuador". *Kyowa Printing Co*, 2:1–238.
- [26] Hashiguchi, Y. 1992. "Studies on New World Leishmaniasis and its Transmission with Particular Reference to Ecuador". *Kyowa Printing Co*, 3:1–182.
- [27] Hashiguchi, Y. 1994. "Studies on New World Leishmaniasis and its Transmission with Particular Reference to Ecuador". *Kyowa Printing Co*, 4:1–193.
- [28] Hashiguchi, Y. 1997. "Studies on New World leishmaniasis and its transmission, with particular reference to Equateur". *Kyowa Printing Co*, 5:1–207.
- [29] Hashiguchi, Y. 2001. "Studies on New World Leishmaniasis and its Transmission with Particular Reference to Ecuador". *Kyowa Printing Co*, 6:1–218.
- [30] Hashiguchi, Y. 2004. "Studies on New World Leishmaniasis and its Transmission with Particular Reference to Ecuador, Argentina and Pakistan". *Kyowa Printing Co*, 7:1–272.

- [31] Y., H. 2007. "Studies on New World Leishmaniasis and its Transmission with Particular Reference to Ecuador, Peru, Argentina and Pakistan". *Kyowa Printing Co*, 8: 1–329.
- [32] Fernández, T.; Almeida, R. 2012. "Reporte de Lesiones Mucosas en Leishmaniosis Tegumentaria Americana en el Litoral (costa) Ecuatoriano". *Revista de Patología Tropical*, 41(3):356–366.
- [33] Kato, H.; Calvopiña, M.; Criollo, H.; Hashiguchi, Y. 2013. "First human cases of *Leishmania (Viannia) naiffi* infection in Ecuador and identification of its suspected vector species". *Acta Tropica*, 128:710–713.
- [34] Calvopiña, M.; Kato, H.; Hashiguchi, Y. 2013. "Leishmaniasis Recidiva Cutis and Its Topical Treatment in Ecuador". *Tropical Medicine and Health*, 41(3):93–94.
- [35] Calvopiña, M.; Martínez, L.; Hashiguchi, Y. 2013. "Cutaneous Leishmaniasis "Chiclero's Ulcer" in Subtropical Ecuador". *Am. J. Trop. Med. Hyg.*, 89(2):195–196.
- [36] Barrera, C.; Herrera, M.; Martínez, F.; León, R.; Richard, A.; Guderian, R.; Mouchet, R.; Echeverría, R.; Le Pont, F. 1994. "Leishmaniose en Equateur. Incidence de la Leishmaniose Tegumentaire sur la Facade Pacifique". *Ann.Soc.belge Med.Trop*, 74:1–12.
- [37] Hashiguchi, Y.; Gomez, E.; De Coronel, V.; Mimori, T.; Kawabata, M.; Furuya, M.; Nonaka, S.; Takaoka, H.; Alexander, J.; Quizhpe, A.; Grimaldi, G.; R., K.; Tesh, B. 1991. "Andean Leishmaniasis in Ecuador caused by Infection with *Leishmania Mexicana* and *L. Major-Like Parasites*". *Am. J. Trop. Med. Hyg.*, 44(2):205–217.
- [38] Gomez, E.; Katakura, K.; Matsumoto, Y.; Nonaka, S.; Mimori, T.; Eshita, Y.; Sud, R.; Sulca, F.; Vallejo, C.; Jurada, M.; Furuya, M.; Hashiguchi, Y. 1994. "Further Epidemiological Studies of Andean Leishmaniasis, with Special Reference to Huigra, Chimborazo, Ecuador. In: Studies on New World Leishmaniasis and its Transmission, with Particular Reference to Ecuador (Y. Hashiguchi, ed.)". *Research Report Series Kochi: Kyowa Printing*, 4:71–84.
- [39] Furuya, M.; Akimaru, Y.; Mimori, T.; Shiraiishi, M.; Gomez, E.; Nonaka, S.; Hashiguchi, Y. 1997. "Identification of species of Ecuadorian *Leishmania* isolates by ELISA using monoclonal antibodies". In *Studies on New World Leishmaniasis and its Transmission with Particular Reference to Ecuador. Kochi Mem Inst Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, Vol. 99(7), November 2004 671 Japan. Res Rep Series*, 5:11–19.
- [40] Calvopiña, M.; Guevara, A.; Armijos, R.; Gomez, E.; Mimori, T.; Cooper, P.; Hashiguchi, Y. 2001. "Clinical features of mucocutaneous leishmaniasis in the Amazonian region of Ecuador. In Studies on New World Leishmaniasis and its Transmission with Particular Reference to Ecuador". *Res Rep Series*, 6:82–89.
- [41] Herwaldt, B.; Magill, A. 2010. "Chapter 5 Leishmaniasis, cutaneous. Yellow Book". <http://wwwnc.cdc.gov/travel/yellowbook/2010/chapter-5/cutaneous-leishmaniasis.aspx>. *CDC Travelers' Health*.
- [42] Kato, H.; Uezato, H.; Katakura, K.; Calvopiña, M.; Marco, J.; Barroso, P.; Gomez, E.; Mimori, T.; Korenaga, M.; Iwata, H.; Nonaka, S.; Hashiguchi, Y. 2005. "Detection and identification of *Leishmania* species within naturally infected sandflies at the Andean areas in Ecuador by polymerase chain reaction". *Am J Trop Med Hyg.*, 72(1):87–93.
- [43] Kato, H.; Gomez, E.; Yamamoto, Y.; Calvopiña, M.; Guevara, A.; Marco, J.; Barroso, P.; Iwata, H.; Hashiguchi, Y. 2008. "Short Report: Natural Infection of *Lutzomyia tortura* with *Leishmania (Viannia) naiffi* in an Amazonian Area of Ecuador". *Am. J. Trop. Med. Hyg.*, 79(3):438–440.
- [44] Kato, H.; A., C.; Gomez, E.; Mimori, T.; Uezato, H.; Marco, J.; Barroso, P.; Iwata, H.; Hashiguchi, Y. 2008. "Short Report: Molecular Mass Screening to Incriminate Sand Fly Vectors of Andean-type Cutaneous Leishmaniasis in Ecuador and Peru". *Am. J. Trop. Med. Hyg.*, 79(5):719–721.
- [45] Harris, E.; Kropp, G.; Belli, A.; Rodriguez, B.; Agabian, N. 1998. "Single-Step Multiplex PCR Assay for Characterization of New World *Leishmania* Complexes". *J. Clin. Microbiol.*, 36(7):1989–1995.
- [46] Van der Meide, W.; Schoone, G.; Faber, W.; Zeegelaar, J.; De Vries, H.; Ozbel, Y.; Lai A Fat, R.; Coelho, L.; Kassi, M.; Schallig, H. 2005. "Quantitative nucleic acid sequence-based assay as a new molecular tool for detection and quantification of *Leishmania* parasites in skin biopsy samples". *J Clin Microbiol.*, 43(11):5560–5566.
- [47] Martínez, E.; Mollinedo, S.; Torrez, M.; Muñoz, M.; Bañuls, A.; Le Pont, F. 2002. "Co-infection by *Leishmania amazonensis* and *L. infantum/L. chagasi* in a case of diffuse cutaneous leishmaniasis in Bolivia". *Trans R Soc Trop Med Hyg.*, 96(5):529–532.
- [48] Katakura, K.; Matsumoto, Y.; Gomez, E.; Furuya, M.; Hashiguchi, Y. 1993. "Molecular karyotype characterization of *Leishmania panamensis*, *Leishmania mexicana*, and *Leishmania major-like* parasites: agents of cutaneous leishmaniasis in Ecuador". *Am J Trop Med Hyg.*, 48(5):707–715.
- [49] Bañuls, A.; Guerrini, F.; Le Pont, F.; Barrera, C.; Espinel, I.; Guderian, R.; Echeverría, R.; Tibayrenc, M. 1997. "Evidence for hybridization by multilocus enzyme electrophoresis and random amplified polymorphic DNA between *Leishmania braziliensis* and *Leishmania panamensis/guyanensis* in Ecuador". *J Eukaryot Microbiol.*, 44(5):408–411.
- [50] Kato, H.; Gomez, E.; Yamamoto, Y.; Calvopiña, M.; Guevara, A.; Marco, J.; Barroso, P.; Iwata, H.; Hashiguchi, Y. 2008. "Natural infection of *Lutzomyia tortura* with *Leishmania (Viannia) naiffi* in an Amazonian area of Ecuador". *Am J Trop Med Hyg.*, 79(3):438–440.
- [51] Arrivillaga, J.; Perez, C.; Flores, M.; Enriquez, S.; Vaca, F.; Medina, B.; Benitez, W. 2014. "Primer registro de *Lutzomyia tuberculata*". *Mangabeira, 1941 (Diptera:Psychodidae:Phlebotominae) en el Ecuador. Bol. Mal.Salud Amb*, 54(1):103–106.

Expansion of *Brycon dentex* (Characiformes: Characidae) and *Hamuelopsis elongatus* (Perciformes: Heamulidae) distribution in Ecuador**Ampliación de la distribución de *Brycon dentex* (Characiformes: Characidae) y *Hamuelopsis elongatus* (Perciformes: Heamulidae) en Ecuador****Jonathan Valdiviezo Rivera^{1*}**

¹Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales del Instituto Nacional de Biodiversidad, Sección vertebrados, División Ictiología. Calle Rumipamba 541 y Av. de los Shyris. Casilla Postal 17-07-8976, Quito, Ecuador.

*Autor principal/Corresponding author, e-mail: bioictiojona@yahoo.com

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

Recibido/Received: 19/05/2014. Aceptado/Accepted: 20/10/2014.

Publicado en línea/Published on Web: 19/12/2014. Impreso/Printed: 19/12/2014.

Abstract

The fishes *Brycon dentex* and *Hamuelopsis elongatus* were collected for the first time in the Santiago-Cayapas ictiohydrographic zone, at the Mira and Camumbi rivers, River Mira basin, Tobar Donoso area, province of Carchi, Ecuador. Previous records of the species were from the Esmeraldas and Intertidal ictiohydrographic zones, respectively.

Keywords. Fishes, Characidae, Characiformes, Heamulidae, Perciformes, Tobar Donoso, Ecuadorian Chocó, distribution.

Resumen

Los peces *Brycon dentex* y *Hamuelopsis elongatus* fueron colectados por primera vez en la zona ictiohidrográfica de Santiago-Cayapas, en los ríos Mira y Camumbi, cuenca fluvial del río Mira, parroquia Tobar Donoso, provincia del Carchi, Ecuador. Los registros previos de estas especies venían de las zonas ictiohidrográficas Esmeraldas e Intermareal, respectivamente.

Palabras Clave. Peces, Characidae, Characiformes, Heamulidae, Perciformes, Tobar Donoso, Chocó ecuatoriano, distribución.

Los peces son el grupo de vertebrados más antiguo y numeroso, con cerca de 25.000 especies, la mayoría de las cuales habitan en aguas tropicales [1–4]. En Ecuador se han reportado 951 especies de peces de agua dulce [5] y el país se ha dividido en 11 zonas ictiohidrográficas, en las que se incluyen a 31 sistemas hidrográficos [5]. Durante trabajos de campo realizados por el Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales MECN en la parroquia Tobar Donoso, provincia del Carchi, se colectó ejemplares de *Brycon dentex* y *Hamuelopsis elongatus* que amplía sus rangos de distribución en Ecuador y cuya información se presenta en este comunicación. La parroquia Tobar Donoso se encuentra ubicada en el noroccidente ecuatoriano, cantón Tulcán, provincia del Carchi y forma parte de la cuenca del Río Mira, subcuenca Río San Juan y microcuenca del Río Camumbi (Fig. 1). Se efectuaron colectas en 18 estaciones de muestreo, que incluyeron ríos y quebradas de aguas claras y turbias empleándose redes de arrastre, atarrayas y anzuelos de distintos tamaños. En cada estación de

muestreo se registraron la altitud, las coordenadas y las características básicas del ambiente acuático. Todas las muestras fueron fijadas en formalina a los 10 %, preservadas en etanol al 75 % y depositadas en la colección de peces (MECN-DP) del Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales.

***Brycon dentex* (Günter, 1860)**

Tres ejemplares de *Brycon dentex* (Characiformes: Characidae; MECN-DP 1904, Fig. 2) fueron capturados en el río Mira (17N 0778635/930939, 131 m de elevación), el 10 de septiembre del 2009 y el 13 de agosto de 2010. Este río tenía un sustrato pedregoso, con rocas y cantos rodados, con aguas de coloración semiturbias y de corriente rápida. Los tres ejemplares examinados presentaron las siguientes medidas promedio: longitud total = 159,0 mm, longitud estándar = 126,3 mm, altura del cuerpo = 41,4 mm, y peso = 39,9 g. *Brycon dentex* se distingue de otras especies congénicas por tener la premaxila larga que se proyecta mucho más allá de la





Figura 1: Mapa del Ecuador con detalle de la ubicación del sector de Tobar Donoso, provincia de Carchi.

mandíbula, dejando casi todos los dientes de la premaxila expuesta [6, 7]. Esta especie había sido previamente registrada solo para la zona ictiohidrográfica Esmeraldas, que incluye las subcuencas de los ríos Guayllabamba, Alambi, Quinindé, Canandé y Teaone [5]. Este nuevo registro amplía la distribución de *B. dentex* a la zona ictiohidrográfica Santiago-Cayapas, que incluye las cuencas de los ríos Mira, Mataje, Santiago y Cayapas, con las respectivas subcuencas y microcuencas.

Haemulopsis elongatus (Steindachner, 1879)

Un ejemplar de *Haemulopsis elongatus* (Perciformes: Haemulidae; MECN-DP 1559, Fig. 2) se capturó en el río Camumbi, afluente del río Mira (17N 0778625/0131 663, 230 m de elevación), el 08 de septiembre de 2009. Este río tenía un ambiente de sustrato arenoso-pedregoso, con aguas de coloración ámbar y de corriente moderada. El ejemplar presentó las siguientes medidas: longitud total = 256,9 mm, longitud estándar = 208,3 mm; altura del cuerpo = 59,7 mm, y peso = 176,0 g. Estos peces son parecidos a los pargos pero se diferen-



Figura 2: *Brycon dentex* (MECN-DP 1904) colectado en el río Mira (arriba) y *Haemulopsis elongatus* (MECN-DP 1559) colectado en el río Camumbi (abajo), cuenca del Río Mira, zona ictiohidrográfica de Santiago-Cayapas, parroquia Tobar Donoso, provincia del Carchi, Ecuador.

cian por carecer de dientes caninos y vomerianos [8]. Si bien varias especies de esta familia penetran en las aguas continentales [9], son comunes en zonas rocosas y de arrecifes marinos. *Haemulopsis elongatus* había sido previamente registrado en la zona ictiohidrográfica Intermareal, que incluye dos tipos de ríos: los que nacen en la cordillera de la Costa (como el Verde, Chone, Jipijapa, Jama, Portoviejo, Ayampe, Javita, Zapotal, Mate) y los que se originan en la cordillera de los Andes (como el Santiago, Guayas, Zapotal, Taura, Cañar, Balao, Jubones y Arenillas [5]). Este nuevo registro amplía la distribución de *Haemulopsis elongatus* a la zona ictiohidrográfica Santiago-Cayapas, que incluye las cuencas de los ríos: Mira, Mataje, Santiago y Cayapas, con las subcuencas y microcuencas.

Agradecimientos

Este trabajo estuvo enmarcado dentro del proyecto “Efectos de la aspersión del glifosato sobre la diversidad biológica en la zona fronteriza con Colombia” financiado por la Secretaría de educación superior, ciencia, tecnología e innovación (SENESCYT) y ejecutada por el Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales. Agradezco a Hernando Román y Martha Buenaño por su apoyo en la colección de especímenes. A todos los colegas que colaboraron en la escritura de este artículo.

Referencias

- [1] Nelson, J. 1994. “Fishes of the world”. Wiley: New York.
- [2] Bejarano, I.; Blanco, M.; Mojica, I. 2006. “The Fish Community of Mesay River during high level water period (Caquetá, Colombian Amazon)”. *Caldasia*, 28(2): 359–370.
- [3] Val, A.; Almeida, V. 1995. “The fishes of the Amazon and their Environment: Physiological and Biochemical Aspect”. Springer: Alemania.
- [4] Gery, J. 1984. “The fishes of Amazonia”, en: “The Amazon: Limnology landscape ecology of a mighty tropical river and its basin”. H. Sioli (Ed.), *Monographiae Biologicae*, Springer, 56:353–370.
- [5] Barriga, R. 2012. “Lista de peces de agua dulce e intermareales del Ecuador”. *Politécnica*, 30(3):83–119.
- [6] Howes, G. 1982. “Review of the genus *Brycon* (Teleostei: Characoidei)”. *Bulletin of the British Museum of Natural History, Zoology*, 43:1–47.
- [7] Aguirre, W. 2014. “The Freshwater Fishes of Western Ecuador an Online Reference”. http://condor.depaul.edu/waguirre/fishwestec/brycon_dentex.html.
- [8] Romero, C.; Espino, M.; Garcia, A. 1973. “Aspectos poblacionales de cinco especies de la familia Haemulidae (Pisces) en la costa de Colima, Mexico”. *Ciencia Pesquera*, 10:43–54.
- [9] Castro, A. 1978. “Catálogo sistemático de los peces marinos que penetran a las aguas continentales de México, con aspectos zoogeográficos y ecológicos”. *Pesca*, 19:298.

Vocalizations of the mice *Reithrodontomys soderstromi* and *Thomasomys paramorum* (Rodentia: Cricetidae) in the province of Carchi, Ecuador

Vocalizaciones de los ratones *Reithrodontomys soderstromi* y *Thomasomys paramorum* (Rodentia: Cricetidae) de la provincia de Carchi, Ecuador

Jorge Brito M.^{1*}, Diego Batallas R.²

¹Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales del Instituto Nacional de Biodiversidad, División de Mastozoología, calle Rumipamba 341 y Av. de Los Shyris. Casilla Postal: 17-07-8976, Quito, Ecuador.

²Fundación Naturaleza Kakaram, calle Santa Rosa 158 BL B Dep 2. Casilla postal 17-07-9920, Quito-Ecuador.

*Autor principal/Corresponding author, e-mail: jorgeykuma@yahoo.es

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

Recibido/Received: 13/08/2014. Aceptado/Accepted: 08/11/2014.

Publicado en línea/Published on Web: 19/12/2014. Impreso/Printed: 19/12/2014.

Abstract

We report descriptive information on the vocalizations of two species of rodents, analyzing and describing their spectral and temporal variability. *Reithrodontomys soderstromi* emits a nearly constant sounding whistle with a mean dominant frequency of 10.16 ± 0.20 kHz. The vocalizations of *Thomasomys paramorum* resemble clicks with frequency modulations with a mean dominant frequency of 1.74 ± 0.10 kHz and generates a harmonic whose mean frequency is 3.64 ± 0.24 kHz.

Keywords. Andes, *Polylepis* woodlands, vocalization.

Resumen

Reportamos información descriptiva de las vocalizaciones de dos especies de ratones, analizando y describiendo sus variables espectrales y temporales. *Reithrodontomys soderstromi* presenta vocalizaciones similares a un silbido de frecuencia constante con una frecuencia dominante promedio de 10.16 ± 0.20 kHz; mientras que *Thomasomys paramorum* vocaliza como un chasquido de frecuencia modulada con una frecuencia dominante promedio de 1.74 ± 0.10 kHz, generando un armónico cuya frecuencia promedio es de 3.64 ± 0.24 kHz.

Palabras Clave. Andes, bosque de *Polylepis*, vocalización.

Los roedores emiten tanto sonidos audibles como inaudibles (dentro del margen de audición humana) [1, 2] que forman complejos comunicativos que se dan ante estrés y riesgo de depredación, llamados de encuentro, afectivos y apareamiento y de agresión y juego [3–9]. Existen varios estudios sobre las vocalizaciones audibles en pequeños roedores octodontinos, especialmente en el roedor subterráneo *Ctenomys* [10–12], pero para los roedores cricétidos son muy escasos [13, 14]. En el presente estudio se describe por primera vez las variables espectrales y temporales de las vocalizaciones de dos especies de ratones cricétidos simpátricos, *Reithrodontomys soderstromi* y *Thomasomys paramorum*.

Las grabaciones se obtuvieron en un bosque de *Polylepis* ($0^{\circ}42'55.5''N$, $77^{\circ}58'56.1''O$, 3635 m), zona de amortiguamiento de la Reserva Ecológica El Ángel, parroquia La Libertad, cantón Espejo, provincia del Car-

chi, norte de Ecuador (Fig. 1), el 27 y 29 de marzo del 2014 por J. Brito M. Este bosque se ubica en el piso zoo-geográfico Altoandino [15] y el ecosistema pertenece al Bosque siempreverde montano alto y montano superior de páramo [16]. El bosque se caracterizó por la dominancia visual de *Polylepis incana*, y *Oreopanax seemanium* en menor representación; el sotobosque albergaba arbustos como *Hypericum laricifolium*, *Weinmannia descendens*, *Gynoxys sodiroi*, *Brachyotum ledifolium*, *Myrsine andina*, y *Valeriana microphylla*, mientras que en el estrato terrestre abundaban numerosas herbáceas como *Galium hypocarpium*, *Rumex acetosella*, *Lachemilla orbiculata*, *Bromus pitensis*, *Polypodium monosorum* y *Oxalis phaeotricha*.

Las vocalizaciones se registraron con una grabadora digital Panasonic RR-US310, conectada a un sistema modular Sennheiser K6-C, acoplado a un micrófono de ca-



Figura 1: Ubicación del área de estudio al norte de Ecuador.

bezal Sennheiser ME 66. Los ejemplares fueron grabados de manera ocasional y oportunista mientras vocalizaban cautivos en trampas vivas tipo Sherman (7,5 × 9 × 27 cm; H. B. Sherman Traps, Tallahassee, Florida), después de recogerlos en la mañana temprano en el interior del bosque. Los especímenes testigo se encuentran depositados en la división de mastozoología del Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales (DMMECN), Quito-Ecuador. Para los análisis acústicos se utilizó el programa Adobe Audition 3.0 a una frecuencia de muestreo de 44.1 kHz y 16 “bits” de resolución y en la diagramación del oscilograma y espectrograma se utilizó el programa Raven 1.4 [17] a 256 puntos de resolución de la transformación rápida de Fourier (FFT). Los parámetros acústicos analizados son los siguientes: (1) Frecuencia dominante: frecuencia de mayor energía medida a lo largo de toda la llamada; (2) Armónico: frecuencia más alta que son múltiplo de la frecuencia fundamental; (3) Notas / llamado: número de unidades acústicas de un determinado patrón de amplitud reconocido en los llamados; (4) Duración de los llamados: tiempo desde el inicio hasta el final de un llamado, medido con el analizador de forma de onda; (5) Duración de las notas: tiempo desde el inicio hasta el final de una nota, medido con el anali-

zador de forma de onda; (6) Intervalos entre llamados: tiempo transcurrido entre llamado y llamado; (7) Intervalos entre notas: tiempo transcurrido entre nota y nota. Las definiciones y mediciones realizadas en los parámetros acústicos se adaptaron según las consideraciones de Miller y Engstrom [13, 14] y Campbell et al. [18].

El ratón cosechador *Reithrodontomys soderstromi* habita en los páramos y bosques montanos del norte de Ecuador [19, 20], en la Reserva Ecológica El Ángel, donde habita principalmente en los bosques de *Polylepis* [21]. Las vocalizaciones de un macho adulto de *R. soderstromi* eran un silbido de frecuencia constante, con una frecuencia dominante de 9.77–10.46 kHz (\bar{X} = 10.16 ± 0.20), duración de 541–1290 ms (\bar{X} = 892 ± 270.26), emitida a intervalos de 15.06–197.4 s (\bar{X} = 82.2 ± 63.61). Cada vocalización estuvo conformada por 3–5 notas con una duración de 23–179 ms (\bar{X} = 116.57 ± 47.25) a intervalos de 45–287 (\bar{X} = 158.75 ± 80.05) ms (Fig. 2).

El ratón andino de páramo *Thomasomys paramorum* habita matorrales de *Polylepis*, páramo arbustivo y bosques de ecotono [22, 23]. Las vocalizaciones una hembra adulta de *T. paramorum* eran imilares a un chasquido de frecuencia modulada, con una frecuencia dominante de 1.65–1.89 kHz (\bar{X} = 1.74 ± 0.10), generando un armónico cuya frecuencia era de 3.40–4.04 kHz (\bar{X} = 3.64 ± 0.24) (Fig. 3A), y con una duración de 45–840 ms (\bar{X} = 338.56 ± 291.92), a intervalos de 8.61–52.75 s (\bar{X} = 27.43 ± 15.07). Las vocalizaciones están conformadas por 1–6 notas, con una duración de 35–57 ms (\bar{X} = 45.72 ± 6.26), a intervalos de 67–180 ms (\bar{X} = 102.35 ± 23.33). Uno de sus llamados vario completamente de la estructuración característica de sus variables espectrales y temporales, emitiendo una vocalización de 4148 ms de duración, conformado por 29 notas, con una frecuencia dominante de 2.15 kHz y un armónico de 4.30 kHz (Fig. 3B).

La presentación de variables espectrales y temporales de las vocalizaciones son importantes en la identificación de sistemas comunicativos [24, 25]. Verduzco et al. [2] mencionaron que la comunicación sonora en los roedores es importante para las relaciones intra e interespecíficas pues no necesitan el contacto visual ni olfativo, y por lo tanto existirán diferentes patrones de vocalizaciones que sean propios y únicos en cada especie. Esto es evidente en los análisis de *Reithrodontomys soderstromi*

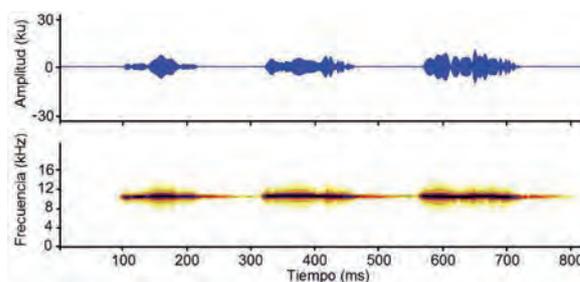


Figura 2: Oscilograma y espectrograma del llamado de *Reithrodontomys soderstromi*; macho adulto, DMMECN 3738.

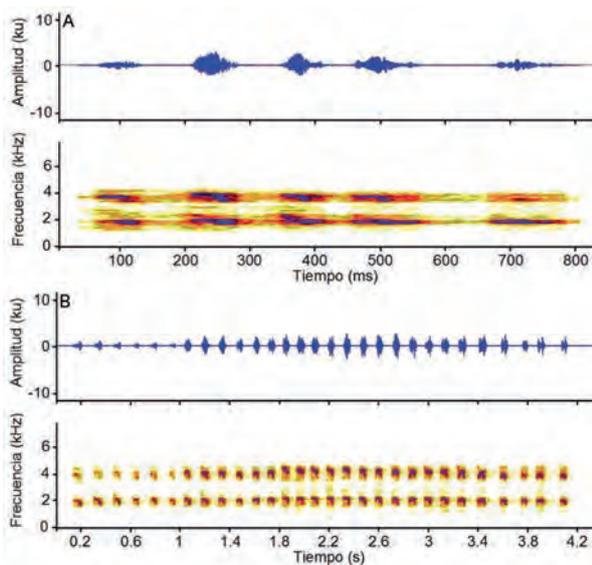


Figura 3: Oscilograma y espectrograma del complejo vocal de *Thomomys paramorum*. A = llamado de cinco notas; B = llamado de 29 notas emitido cuando el espécimen se encontraba en mayor condición de stress; hembra adulta, DMMECN 3730.

tromi y *Thomomys paramorum* que varían espectral y temporalmente considerablemente. Miller y Engstrom [13, 14] señalan que las características acústicas de cada especie guardan una relación importante para la identificación de las mismas, teniendo que cada variación de frecuencias, notas y demás poseen un propósito específico.

Si bien la muestra del presente estudio es producto de grabaciones ocasionales y oportunistas, es el primer registro de las vocalizaciones de *Reithrodontomys soders-tromi* y *Thomomys paramorum*. Esto nos exhorta a generar futuros estudios con estas especies a nivel bioacústico, analizando e interpretando con una mayor población para esclarecer diferencias intra e interespecíficas. Además es necesario enfocar estudios futuros en la función de las vocalizaciones, pues llama la atención que estos pequeños mamíferos emitan sonidos audibles siendo tan susceptibles a la depredación.

Agradecimientos

A Carlos Cerón del Herbario QAP de la Universidad Central del Ecuador, por su valiosa colaboración con la identificación de las muestras botánicas. Glenda Pozo nos colaboró en la fase de campo. Gerardo Cevallos gentilmente colaboró con el diseño del mapa de la figura 1. Fernando Acosta financió la fase de campo para el estudio de los pequeños mamíferos en el bosque de Polylepis Lodge. Ulises Pardiñas, Guillermo D'Elía y William R. Teska aportaron con valiosos y acertados comentarios para el fortalecimiento del manuscrito.

Referencias

[1] Anderson, J. 1954. "The production of ultrasonic sounds by laboratory rats and other mammals". *Science*, 119: 808–809.

[2] Verduzco, A.; Alfaro, A.; Arch, E. 2012. "Etología y bioacústica en ratas y cobayos". *Revista Mexicana de Comunicación, Audiología, Otoneurología y Foniatría*, 1:7–12.

[3] Brudzynski, S.; Fletcher, N. 2010. "Rat ultrasonic vocalization: short rang communication". en: "*Handbook of Mammalian Vocalization: An Integrative Neuroscience Approach and Handbook of Behavioral Neuroscience*" S. M. Brudzynski (Ed). Academic Press/Elsevier: Amsterdam, Holanda: 69–76.

[4] Smith, J. 1976. "Responses to adult mice to models infant calls". *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 90:1105–1115.

[5] Wöhr, M.; Dahloff, M.; Wolf, E.; Holsboer, F.; Schwarting, R.; Wotjak, C. 2008. "Effects of genetic background, gender, and early environmental factors on isolation-induced ultrasonic calling in mouse pups: an embryo-transfer study". *Behavior Genetics*, 38:579–595.

[6] Barfield, R.; Thomas, A. 1986. "The role of ultrasonic vocalizations in the regulation of reproduction in rats". *Annals of the New York Academy of Sciences*, 474:33–43.

[7] Holy, T.; Guo, Z. 2005. "Ultrasonic songs of male mice". *PLoS Biol*, 3:e386.

[8] Burgdorf, J.; Kroes, R.; Moskal, J.; Brudzynski, S.; Pfau, J.; Panksepp, J. 2008. "Ultrasonic Vocalizations of Rats (*Rattus norvegicus*) During Mating, Play, and Aggression: Behavioral Concomitants, Relationship to Reward, and Self-Administration of Playback". *Journal of Comparative Psychology*, 4:357–367.

[9] Wright, J.; Gourdon, J.; Clarke, P. 2010. "Identification of multiple call categories within the rich repertoire of adult rat 50-kHz ultrasonic vocalizations: effects of amphetamine and social context". *Psychopharmacology*, 211:1–13.

[10] Francescoli, G. 1999. "A preliminary report on the acoustic communication in uruguayan *Ctenomys* (Rodentia, Octodontidae): basic sound types". *Bioacoustics*, 10:203–218.

[11] Francescoli, G. 2001. "Vocal signals from *Ctenomys pearsoni* pups". *Acta Theriologica*, 46:327–330.

[12] Schleich, C.; Busch, C. 2002. "Acoustic signals of a solitary subterranean rodent *Ctenomys talarum* (Rodentia: Ctenomyidae): physical characteristics and behavioural correlates". *Journal of Ethology*, 20:123–131.

[13] Miller, J.; Engstrom, M. 2007. "Vocal stereotypy and singing behavior in baiomyine mice". *Journal of Mammalogy*, 88:1447–1465.

[14] Miller, J.; Engstrom, M. 2010. "Stereotypic vocalizations in harvest mice (*Reithrodontomys*): Harmonic structure contains prominent and distinctive audible, ultrasonic, and non-linear elements". *Journal of the Acoustical Society of America*, 128:1501–1510.

- [15] Albuja, L.; Almendáriz, A.; Barriga, R.; Cáceres, F.; Montalvo, L.; Román, J. 2012. “Fauna de Vertebrados del Ecuador”. *Escuela Politécnica Nacional. Editorial Arial 12. Quito, Ecuador.*
- [16] Cuesta, F.; Salgado, S.; Báez, S. 2012. “Bosque siempreverde montano alto y montano superior de páramo”, en: “Sistema de clasificación de los ecosistemas del Ecuador continental”. *Ministerio del Ambiente del Ecuador: Quito, Ecuador: 48–50.*
- [17] Charif, R.; Waack, A.; Strickman, L. 2010. “Raven Pro 1.4 User’s Manual”. *Cornell Lab of Ornithology: Ithaca. New York.*
- [18] Campbell, P.; Pasch, B.; Pino, J.; Crino, O.; Phyllips, M.; Phelps, S. 2010. “Geographic variation in the songs of neotropical singing mice: testing the relative importance of drift and local adaptation”. *Evolution, 7:1955–1972.*
- [19] Tirira, D. 2007. “Guía de campo de los mamíferos del Ecuador”. *Publicación especial sobre los mamíferos del Ecuador 6. Ediciones Murciélago Blanco: Quito, Ecuador.*
- [20] Tirira, D.; Boada, C. 2009. “Diversidad de mamíferos en bosques de Ceja Andina alta del nororiente de la provincia de Carchi, Ecuador”. *Boletín Técnico Serie Zoológica, 4(5):1–24.*
- [21] Brito, J. 2013. “Composición y abundancia de los pequeños mamíferos terrestres en dos tipos de hábitats (páramo de frailejón y bosque de Polylepis) en la Reserva Ecológica El Ángel, Carchi-Ecuador”. *Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Médicas y Ambientales, Universidad Central del Ecuador. Quito, Ecuador.*
- [22] Voss, R. 2003. “A New species of *Thomasomys* (Rodentia: Muridae) from Eastern Ecuador, with remarks on Mammalian Diversity and Biogeography in the Cordillera Oriental”. *American Museum Novitates, 3421.*
- [23] Brito, J.; Teska, W.; Ojala-Barbour, R. 2012. “Descripción del nido de dos especies de *Thomasomys* (Cricetidae) en un bosque alto-andino en Ecuador”. *Therya, 2: 263–268.*
- [24] Brudzynski, S. 2013. “Ethotransmission: communication of emotional states through ultrasonic vocalization in rats”. *Current Opinion in Neurobiology, 23:310–317.*
- [25] Pasch, B.; Bolker, B.; Phelps, S. 2013. “Interspecific Dominance Via Vocal Interactions Mediates Altitudinal Zonation in Neotropical Singing Mice”. *The American Naturalist, 182:161–173.*

Description of the nest of *Hylaeamys yunganus* (Rodentia: Cricetidae) in the Andes of southeastern Ecuador

Descripción del nido de *Hylaeamys yunganus* (Rodentia: Cricetidae) de los Andes del sureste de Ecuador

Jorge Brito M.^{1*}, Hernán Orellana V.², Germán Tenecota³

¹Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales del Instituto Nacional de Biodiversidad, División de Mastozoología, calle Rumipamba 341 y Av. de Los Shyris. Casilla Postal 17-07-8976, Quito, Ecuador.

²Universidad Central del Ecuador, Escuela de Ciencias Biológicas y Ambientales, Facultad de Ciencias Médicas, calle Yaguachi y calle Numa Pompilio Llona, Quito, Ecuador.

³Guardaparque del Parque Nacional Sangay, zona baja, Macas, Ecuador.

*Autor principal/Corresponding author, e-mail: jorgeyakuma@yahoo.es

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

Recibido/Received: 30/07/2014. Aceptado/Accepted: 14/11/2014.

Publicado en línea/Published on Web: 19/12/2014. Impreso/Printed: 19/12/2014.

Abstract

The nest of *Hylaeamys yunganus* Yungas rice rat (Rodentia: Cricetidae) is described for the first time. The nest was found while clearing a trail, 1.5 m above the floor and 5 m from a river, at Sardinayacu, Sangay National Park, in southeastern Ecuador.

Keywords. Nest, *Hylaeamys yunganus*, Sangay National Park.

Resumen

Se describe por primera vez el nido de *Hylaeamys yunganus* Rata de Tierras Bajas de las Yungas (Rodentia: Cricetidae). El nido se encontró durante la limpieza de un sendero, a 1,5 m sobre el suelo y 5 m de un río, en Sardinayacu, Parque Nacional Sangay, al sureste de Ecuador.

Palabras Clave. *Hylaeamys yunganus*, nido, Parque Nacional Sangay.

[1–16] Las ratas del género *Hylaeamys* (Rodentia: Cricetidae) habitan los bosques húmedos tropicales Amazónicos hasta los subtropicales Andinos, desde Venezuela y Guyana hacia el sur por el Amazonas hasta el este de Brasil y Paraguay, alcanzando los 1500 m de altitud [1–5]. El género está representado por siete especies [5], tres de ellas presentes en Ecuador [1, 3], de las cuales *Hylaeamys yunganus* Rata de Tierras Bajas de las Yungas se distribuye en la Amazonía y estribaciones orientales de los Andes entre 200 y 1581 m de altura [1–3, 6]. Tirira [3] menciona en forma general que las ratas del género *Hylaeamys* construyen sus nidos en el interior de troncos huecos, en cavidades del piso bajo rocas y árboles grandes. La presente nota contribuye al conocimiento de la ecología y la historia natural de *Hylaeamys yunganus*, describiendo por primera vez para la ciencia la arquitectura y características de su nido. Esta información es de utilidad para el desarrollo de futuros estudios biológicos y ecológicos con la finalidad de proteger esta especie poco conocida.

La identificación de la especie se realizó sobre la base de las descripciones de Musser et al. [1], Weksler et al. [2] y Tirira [3], quienes la diferencian de sus congéneres por las siguientes características fenotípicas: dorso de color marrón oscuro y con tonalidades más acentuadas en la drupa; flancos de coloración marrón amarillento, contrastando ligeramente con el dorso; región ventral grisácea, entremezclada con tonalidades pálidas y blanquecinas; cola de color marrón oscuro uniforme pero ligeramente bicolor en la base; patas traseras en vista ventral de color gris oscuro, almohadillas de color negro intenso, superficie dorsal blanca con tonalidades rosa y pequeños pelos entremezclados negros y blanco; mandíbula con proceso coronoide alargado y escotadura sigmoidea profunda. Para la descripción del nido se consideraron las siguientes medidas sugeridas por Brito et al. [10]: longitud, ancho, altura y peso del nido, diámetro de la entrada, orientación relativa en el espacio y materiales de construcción.

Se registró un nido de *Hylaeamys yunganus* durante una



Figura 1: Nido de *Hylaeamys yunganus*, A = en vista frontal; B = en vista lateral. Barra = 5 cm. Fotografías: Jorge Brito M.

expedición realizada en junio 2014 a Sardinayacu (02° 04'27.5"S, 78°12'46.6"W, 1785 m), Parque Nacional Sangay, provincia de Morona Santiago, Ecuador. El área está en el piso zoogeográfico Subtropical Oriental [7] y en la formación vegetal Herbazal lacustre montano bajo [8, 9], cubierta por un denso bosque primario. El nido fue encontrado adherido a una raíz de 30 mm de diámetro de una Ericaceae a 1,5 m de altura, inmerso en una cavidad de la raíz y recubierto de pequeñas ramas en descomposición (Fig. 1A). El nido tenía una forma ovalada (Fig. 1B), y era de tamaño mediano, presentando las siguientes medidas: 170 mm de largo, 60 mm de ancho, 95 mm de altura y 45 g de peso. El nido poseía una entrada de 20 mm de diámetro con dirección sur y estaba construido con material vegetal en la siguiente disposición: el contorno recubierto con fibra de hojas de la palma real *Dictyocaryum lamarckianum*, 120–200 mm de longitud que cubrían y daban forma al nido; el material del interior del nido era fibra picada muy fina y de tamaño menor a 30 mm. El nido se encontró en el interior de un bosque denso con dominancia de herbáceas de las familias Ciclantaceae, Melastomataceae; árboles con altura máxima de 20 m, cuyas especies dominantes fueron helechos arbóreos (*Cyathea* sp), la palma real (*Dictyocaryum lamarckianum*) y el romerillo (*Prumnopitys montana*). El río Cormorán (5 m de cauce) era el cuerpo de agua más cercano al nido y se encontraba a 10 m.

El hallazgo del nido fue accidental mientras se realizaba

corte de vegetación para la apertura de un sendero, un individuo fue observado en la entrada del nido. El individuo (DMMECN 3786) fue colectado manualmente dentro del nido y corresponde a un macho adulto con testículos escrotales; sus medidas fueron: Longitud cabeza y cuerpo = 113 mm; largo de la cola = 112 mm; largo de la pata = 30 mm; largo de la oreja = 21 mm; largo de la mano 13 mm; peso 48 g.

Algunos autores mencionan sitios de anidación de roedores similares a *H. Yunganus* (sobre el suelo pero cerca a un cuerpo de agua). Briani et al. [11] menciona que la rata *Nectomys scuamipes* construye nidos en troncos caídos y *Oryzomys intermedius* bajo o dentro de troncos caídos y dentro de raíces aéreas de palmas, siempre cerca de cuerpos de agua; Udrizar-Sauthier et al. [12] reportan los nidos de *Oryzomys* sp. e *Hylochilus brasiliensis* en sitios elevados a pocos centímetros de la superficie del agua; Brito et al. [10] reportan que *Thomomys aureus* y *T. paramorum* también construyen sus nidos cerca a los cuerpos de agua, mientras que Rengifo y Aquino [13] dan a conocer un nido de *Scolomys melanops* en un árbol caído a 50 m del cuerpo de agua más cercano.

El Parque Nacional Sangay es considerado por la UNESCO como Patrimonio Natural de la Humanidad, debido a su excelente estado de conservación y gran diversidad biológica [14], sin embargo son escasos los estudios faunísticos realizados en ésta importante área [15, 16]. Consideramos al PNS como un área magnífica para el estudio ecológico de los mamíferos pequeños debido a su amplio rango altitudinal (700-5230 m) y gran variedad ecosistémica [9].

Agradecimientos

La investigación contó con el soporte institucional del Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales y la Fundación Naturaleza Kakaram a través del proyecto "Diversidad de pequeños vertebrados en dos áreas del Parque Nacional Sangay". Agradecemos de manera especial a Víctor León, responsable del Parque Nacional Sangay, zona baja, por su valiosa colaboración con la logística para la expedición. Patricia Bejarano y Diego Batallas colaboraron en la fase de campo. Reed Ojala-Barbour nos colaboró revisando el resumen en inglés. El Ministerio del Ambiente de Morona Santiago otorgó el permiso de investigación N°. 05-2014-I-B-DPMS/MAE. Diego Cisneros-Heredia y dos revisores anónimos aportaron con valiosos comentarios para la mejora del manuscrito.

Referencias

- [1] Musser, C.; Carleton, M.; Brothers, E.; Gardner, A. 1998. "Systematic studies of oryzomyine rodents (Muridae, Sigmodontinae): diagnoses and distributions of species formerly assigned to *Oryzomys capito*". *Bulletin of the American Museum of Natural History*, 236:1–376.

- [2] Weksler, M.; Percequillo, A.; Voss, R. 2006. "Ten New Genera of Oryzomyine Rodents (Cricetidae: Sigmodontinae)". *American Museum Novitates*, 3537:1–29.
- [3] Tirira, D. 2007. "Mamíferos del Ecuador. Guía de Campo". *Publicación Especial de los Mamíferos del Ecuador 6. Ediciones Murciélago Blanco: Quito*.
- [4] Valencia-Pacheco, E.; Avaria-Llautureo, J.; Muñoz-Escobar, C.; Boric-Bargetto, D.; Hernández, C. 2011. "Patrones de distribución geográfica de la riqueza de especies de roedores de la tribu Oryzomyini (Rodentia: Sigmodontinae) en Sudamérica: Evaluando la importancia de los procesos de colonización y extinción". *Revista Chilena de Historia Natural*, 84:365–377.
- [5] Brennand, P.; Langguth, A.; Percequillo, A. 2013. "The genus *Hylaeamys* Weksler, Percequillo, and Voss 2006 (Rodentia: Cricetidae: Sigmodontinae) in the Brazilian Atlantic Forest: geographic variation and species definition". *Journal of Mammalogy*, 94(6):1346–1363.
- [6] Upham, N.; Ojala-Barbour, R.; Brito, J.; Velazco, P.; Patterson, B. 2013. "Reciprocal exchange between Andean and Amazonian centers of endemism in the radiation of some arboreal rodents". *Evolucionary Biology*, 13:191.
- [7] Albuja, L.; Almendáriz, A.; Barriga, R.; Cáceres, F.; Montalvo, L.; Román, J. 2012. "Fauna de Vertebrados del Ecuador". *Escuela Politécnica Nacional: Quito, Ecuador*.
- [8] Cerón, C. 2001. "Dos nuevas formaciones naturales del Ecuador". *Rev. Cinchionia*, 2(1):1–4.
- [9] MAE. 2013. "Sistema de Clasificación de los Ecosistemas del Ecuador Continental". *Ambiente del Ecuador: Quito, Ecuador*.
- [10] Brito, J.; Teska, W.; Ojala-Barbour, R. 2012. "Descripción del Nido de dos especies de *Thomasomys* (Cricetidae), en un Bosque Alto Andino en Ecuador". *Therya*, 3(2):263–268.
- [11] Briani, D.; Vieira, E.; Vieira, M. 2001. "Nests and nesting sites of Brazilian forest rodents (*Nectomys squamipes* and *Oryzomys intermedius*) as revealed by a spooland-line device". *Acta Theriologica*, 46:331–334.
- [12] Udrizar-Sauthier, W.; Abba, A.; Udrizar-Sauthier, D. 2010. "Nests of *Oligoryzomys* sp. and *Holochilus brasiliensis* (Rodentia, Cricetidae) in eastern Entre Ríos Province, Argentina". *Mastozoología Neotropical*, 17:207–211.
- [13] Rengifo, E.; Aquino, R. 2012. "Descripción del nido de *Scolomys melanops* (Rodentia, Cricetidae) y su relación con *Lepidocaryum tenue* (Arecaceae, Arecaceae)". *Revista Peruana de Biología*, 19(2):213–216.
- [14] INEFAN (Instituto Ecuatoriano Forestal y de Áreas Naturales y Vida Silvestre). 1998. "Plan de Manejo Estratégico del Parque Nacional Sangay". *Dirección Nacional de Áreas Naturales y Vida Silvestre. Quito, Ecuador*.
- [15] Ojala-Barbour, R.; Pinto, M.; Brito, J.; Albuja, L.; Patterson, B. 2013. "A new species of northern shrew-opossum (Paucituberculata: Caenolestidae) from the Sangay National Park". *Journal of Mammalogy*, 94(5):967–982.
- [16] Batallas, D.; Brito, J. 2014. "Nueva especie de rana del género *Pristimantis* del grupo *lacrimosus* (Amphibia: Craugastoridae) del Parque Nacional Sangay, Ecuador". *Papéis Avulsos de Zoologia*, 54(5):51–62.

Description of the nest, eggs and chicks Frigilo Pechicinereo *Phrygilus plebejus* (Aves: Emberizidae) in the province of Pichincha, Ecuador**Descripción del nido, huevos y polluelos del Frigilo Pechicinéreo *Phrygilus plebejus* (Aves: Emberizidae) de la provincia de Pichincha, Ecuador**Glenda M. Pozo-Zamora^{1*}

¹Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales del Instituto Nacional de Biodiversidad, División de Ornitología, Investigadora Asociada. Calle Rumipamba 341 y Av. de los Shyris. Casilla Postal: 17-07-8976, Quito, Ecuador.

*Autor principal/Corresponding author, e-mail: glenda.pozo@yahoo.es

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

Recibido/Received: 14/09/2014. Aceptado/Accepted: 15/11/2014.

Publicado en línea/Published on Web: 19/12/2014. Impreso/Printed: 19/12/2014.

Abstract

Information on the breeding biology of *Phrygilus plebejus* is presented based on a nest found in a rural area in the highlands of Ecuador. The open cup-like nest was constructed with different plant and animal materials. Clutch included three eggs, which are described together with the nestlings. Reproductive period was 34 days, including 15 days of incubation and 18 days of nestlings permanence in the nest.

Keywords. *Phrygilus plebejus*, nest, eggs, nestlings, breeding.

Resumen

Información sobre la biología reproductiva de *Phrygilus plebejus* se presenta sobre la base de un nido encontrado en una zona rural altoandina de Ecuador. El nido con forma de taza abierta fue constituido con diversos materiales vegetales y animales. La puesta incluyó tres, huevos, los cuales se describen junto a los polluelos. El periodo reproductivo fue de 34 días, incluyendo 15 días de incubación y 18 días de permanencia de los polluelos en el nido.

Palabras Clave. *Phrygilus plebejus*, nido, huevos, polluelos, reproducción.

El género *Phrygilus* incluye a 11 especies distribuidas a lo largo de la Cordillera de los Andes en Ecuador, Perú, Bolivia, Argentina y Chile en un amplio rango de elevación [1–4]. Tres especies habitan en Ecuador: *Phrygilus alaudinus*, *P. plebejus* y *P. unicolor* [5–7]. *Phrygilus plebejus* Frigilo Pechicinéreo ocurre desde Ecuador hasta Argentina a elevaciones entre 2.400 y 4.900 m [1]. En Ecuador, la especie es común en áreas rurales, zonas agrícolas y matorrales áridos de la región Sierra y localmente en la región Costa en la provincia de El Oro [6]. La historia natural y ecología de *P. plebejus* en los altos Andes es poco conocida [8]. Algunos estudios en Argentina y Perú han descrito aspectos de la biología reproductiva de *P. plebejus* [9, 10], pero en Ecuador y Chile solo se ha reportado información de especies congéneres [8, 11]. Esta comunicación contribuye al conocimiento de la biología reproductiva de *P. plebejus* presentando datos del periodo reproductivo, número de huevos, material de construcción del nido, medidas de peso de polluelos, periodo de incubación y periodo de

permanencia de los polluelos en el nido.

El nido fue encontrado en San Francisco de Alphuma (00°19'40"S, 78°24'22"W, 2.624 m), un sector poblado rural del cantón Rumiñahui, provincia de Pichincha, región Sierra del Ecuador. El sitio se ubica en el piso zoogeográfico Templado [12] y en la formación vegetal del Matorral Húmedo Montano [13] con dominancia de *Eucalyptus globulus* Eucalipto y *Agave americana* Pen-co. La temperatura media en la localidad oscila entre 12 y 15°C [12]. El periodo reproductivo fue delimitado a partir del día de postura del primer huevo hasta el día de abandono del último polluelo. Las medidas e identificación de materiales de construcción del nido fueron obtenidas luego de que fue abandonado para evitar perturbar la actividad reproductora [14]. El periodo de incubación se calculó desde la puesta del primer huevo hasta la eclosión del primer polluelo [15]. Se describió a los polluelos el día de nacimiento del último polluelo [16]. A los 11 días de vida se midió y pesó a los polluelos, tomando medidas de pico-cola, pico-cloaca, ala (desde el

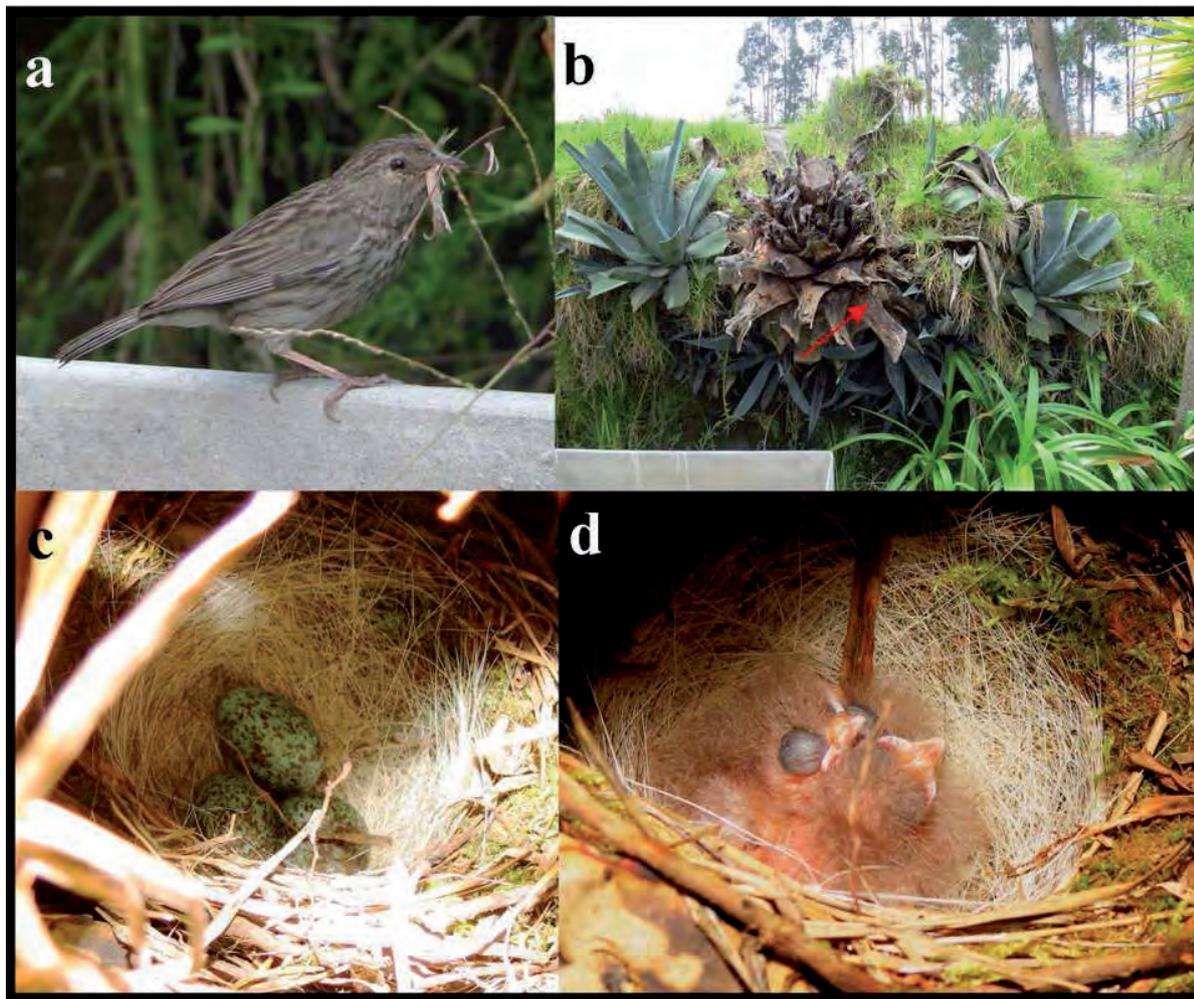


Figura 1: (a) Hembra adulta de *Phrygilus plebejus* transportando material para construcción del nido; (b) sitio de anidación en una asociación de *Agave*; (c) nido en forma de taza abierta con tres huevos; (d) polluelos en etapa inicial de desarrollo.

hombro hasta la primaria más larga, sin extender), pico (desde las comisuras a la punta de la maxila) y el peso, siguiendo los parámetros propuestos por Baldwin et al. [17]. El periodo de permanencia de los polluelos en el nido se estimó desde el día de eclosión del primer huevo hasta que el último polluelo abandonó el nido [18].

Un nido de *Phrygilus plebejus* en etapa inicial de construcción fue encontrado el 31 de marzo del 2013 cuando un individuo trasladaba material de construcción en el pico (Fig. 1a). El nido estaba ubicado en un grupo de *Agave americana* (Fig. 1b), entre las hojas secas más grandes pero apoyado sobre hojas vivas y sostenido por tallos de “kikuyo” a una altura de 1,5 m del suelo. El periodo de construcción del nido duró tres días, y fue realizado por una hembra acompañada de un macho joven que perchaba a 3 m del nido vocalizando con frecuencia. Los siguientes cuatro días ningún individuo fue observado cerca al nido, pero se registró vocalizaciones a una distancia aproximada de 15 metros. La parte externa del nido estaba confeccionada por hojas secas de *Salix humboldtiana* Sauce Llorón, musgo y en mayor parte de hojas y tallos de *Pennisetum clandestinum* Kikuyo. En la parte interna estaba compuesto de pelo de perro doméstico, pelo humano y flores de *Salix humboldtiana*.

El nido tenía forma de taza abierta, con las siguientes medidas: largo = 143,0 mm, ancho = 116,5 mm, alto = 69,3 mm, profundidad interior = 34,5 mm, y masa = 37,5 g. La entrada del nido se encontraba en dirección oeste y la letrina en dirección noreste. El tamaño de la postura fue de tres huevos, realizada de forma alternada (i.e, un huevo puesto cada día). Los huevos de forma ovoide presentaron color verde con manchas marrones pequeñas a lo largo de todo el huevo, más concentradas en el polo mayor (Fig. 1c). El periodo de incubación duró 15 días.

Los tres polluelos recién nacidos tenían los ojos cerrados, la piel de color rosa pálido con tonos anaranjado pálido en la zona malar, nuca y cuello, con presencia de plumón gris claro en la cabeza y dorso. El pico tenía una coloración rosa pálido en los bordes y mandíbula inferior, tornándose anaranjado pálido en la mandíbula superior, las comisuras eran de color rosa blanquecino y la piel que las rodea de un rosa intenso (Fig. 1d). Las medidas de los polluelos a los 11 días de nacidos fueron: longitud pico-cola = 64,6–67,4 mm ($66,2 \pm 1,5$), longitud pico-cloaca = 53,6–58,6 mm ($55,6 \pm 2,6$), longitud del ala = 36,0–40,0 mm ($38,6 \pm 2,2$), longitud del pico = 10,5–11,3 mm ($10,9 \pm 0,4$), y peso = 10,5–11,0

g ($10,8 \pm 0,3$). Los polluelos permanecieron en el nido 18 días. El periodo reproductivo duró 34 días.

La información reproductiva de *Phrygilus plebejus* presentada en esta contribución es similar a aquella reportada para la especie en otros países: La época coincide con la información de Hughes [9], quien observó nidos en los Andes de Perú en los meses de Marzo, Abril y Julio, aunque en Argentina los anidamientos se han registrado en diciembre y febrero [10]. La forma del nido es igual a la descrita por otros autores para la especie y para sus congéneres *P. patagonicus*, *P. gayi*, *P. fruticeti* y *P. unicolor* [8, 10]. Algunos de los materiales del nido coinciden con aquellos encontrados en nidos en Argentina: pelos, lanas y pajas [10]. En otros congéneres (*P. patagonicus*, *P. gayi*, *P. atriceps*, *P. fruticeti*) se encontró pasto, fibras vegetales, raicillas, lana de oveja, pelo de mamífero, plumas, semillas de *Puya* y musgo [8, 10]. El tamaño de la nidada se encuentra dentro del rango reportado (2–4 huevos) para *P. plebejus* en otros estudios [9, 10], y para sus congéneres (1–4 en *P. patagonicus*, *P. gayi*, *P. atriceps*, *P. fruticeti*) [8, 10, 11]. Los huevos presentaron una coloración similar a la reportada por De la Peña [10].

Agradecimientos

A Jorge Brito por su colaboración en la toma de datos de campo y por sus acertados comentarios al manuscrito. A Reed Ojala-Barbour por la revisión del abstract. A Diego Cisneros-Heredia y dos revisores anónimos por las valiosas observaciones para el mejoramiento del manuscrito.

Referencias

- [1] Fjélds, J.; Krabbe, N. 1990. "Birds of the High Andes". *Zoological Museum, University of Copenhagen: Svendborg, Denmark*.
- [2] Freile, J.; Ahlman, R.; Ridgely, R.; Solano-Ugalde, A.; Brinkhuizen, D.; Navarrete, L.; Greenfield, P. 2014. "Species lists of birds for South American countries and territories: Ecuador". *Versión 26. Enlace: <http://www.museum.lsu.edu/Remsen/SACCCountryLists.html>*.
- [3] BirdLife International. 2014. "Especies ficha: *Phrygilus plebejus*". <http://www.birdlife.org>.
- [4] Campagna, L.; Geale, K.; Handford, P.; Lijtmaer, D.; Tubaro, P.; Loudheed, S. 2011. "A molecular phylogeny of the Sierra-Finches (*Phrygilus*, Passeriformes): Extreme polyphyly in a group of Andean specialists". *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 61:521–533.
- [5] Restall, R.; Rodner, C.; Lentino, M. 2006. "Birds of Northern South America". *Yale University Press: New Haven, United States*.
- [6] Ridgely, R.; Greenfield, P. 2006. "Aves del Ecuador". *Academia de Ciencias Naturales de Filadelfia y Fundación de Conservación Jocotoco: Quito, Ecuador*.
- [7] McMullan, M.; Navarrete, L. 2013. "Fieldbook of the Birds of Ecuador". *Fundación Jocotoco: Quito, Ecuador*.
- [8] Greeney, H.; Martin, P.; Gelis, R.; Solano-Ugalde, A.; Bonier, F.; Freeman, B.; Miller, F. 2011. "Notes on the breeding of high-Andean birds in northern Ecuador". *Bulletin British Ornithologists' Club*, 131(1):24–31.
- [9] Hughes, R. 1980. "Midwinter Breeding by some birds in the high Andes of southern Perú". *The Condor*, 82(2): 229.
- [10] De la Peña, M. 1983. "Notas Nidobiológicas sobre Fringílidos (Aves, Emberizidae) (Cuarta parte)". *Historia Natural*, 3(14):141–143.
- [11] Vuilleumier, F. 1994. "Nidificación y status de *Phrygilus fruticeti* (Aves, Emberizidae) en la Patagonia chilena: un ejemplo del fenómeno de 'límite de la especie'?". *Revista Chilena de Historia Natural*, 67:299–307.
- [12] Albuja, L.; Almendáriz, A.; Barriga, R.; Montalvo, L.; Cáceres, F.; Román, J. 2012. "Fauna de Vertebrados del Ecuador". *Instituto de Ciencias Biológicas, Escuela Politécnica Nacional: Quito, Ecuador*.
- [13] Sierra, R. 1999. "Propuesta Preliminar de un Sistema de Clasificación de Vegetación para el Ecuador Continental". *Proyecto INEFAN/GEF-BIRF y EcoCiencia: Quito, Ecuador: 345–350*.
- [14] Lara, K.; Pinho, J.; Silveira, R. 2012. "Biología reproductiva de *Taraba major* (Aves, Thamnophilidae) na região do Pirizal, Porção Norte do Pantanal, Mato Grosso, Brasil". *Papéis Avulsos de Zoologia*, 52(30):349–359.
- [15] Greeney, H.; Sheldon, K.; Simbaña, J. 2008. "Observations on the hatchlings, eggs and incubation of the Masked Trogon *Trogon personatus* in eastern Ecuador". *Cotinga*, 29:82–84.
- [16] Greeney, H. 2008. "Nestling growth and plumage development of the Spotted Barbtail (*Premnoplex brunneus*)". *Kempffiana*, 4(1):21–29.
- [17] Baldwin, P.; Oberholser, H.; Worley, L. 1931. "Measurements of Birds". *Scientific Publications of the Cleveland Museum of Natural History, Volume II: Cleveland, United States*.
- [18] Mayfield, H. 1975. "Suggestions for calculating nest success". *The Wilson Bulletin*, 87(4):456–466.

Quantitative Structure-Activity Relationship study for pesticides by means of classification techniques

Estudio de la Relación Cuantitativa Estructura-Actividad de pesticidas mediante técnicas de clasificación

Fernando Cárdenas^{1*}, Piercosimo Tripaldi², Cristian Rojas³

¹Grupo de Investigación en Biotecnología y Ambiente (INBIAM). Escuela de Ingeniería Ambiental. Universidad Politécnica Salesiana. Calle Vieja 12-30 y Elia Liut, Cuenca-Ecuador.

²Laboratorio UDALAB, Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del Azuay. Av. 24 de Mayo 7-77 y Hernán Malo, Apartado postal 01.01.981. Cuenca-Ecuador.

³Instituto de Investigaciones Fisicoquímicas Teóricas y Aplicadas (INIFTA), Universidad Nacional de la Plata. Diagonal 113 y calle 64, C.C. 16, Suc. 4 (1900), La Plata-Argentina.

*Autor principal/Corresponding author, e-mail: lcardenas@ups.edu.ec

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

Recibido/Received: 15/09/2014. Aceptado/Accepted: 20/10/2014.

Publicado en línea/Published on Web: 19/12/2014. Impreso/Printed: 19/12/2014.

Abstract

The aim of this work was the comparison between k -Nearest Neighbors (k -NN) and Counterpropagation Artificial Neural network (CP-ANN) classification methods for modeling the toxicity of a set of 192 organochlorinated, organophosphates, carbamates, and pyrethroid pesticides measured as effective concentration (EC50). The EC50 values were divided into three classes, i.e. low, intermediate, and high toxicity. The 4885 molecular descriptors were calculated using the Dragon software, and then were simultaneously analyzed through k -NN classification analysis coupled with Genetic Algorithms - Variable Subset Selection (GA-VSS) technique. The models were properly validated through an external test set of compounds. The results clearly suggest that 3D-descriptors did not offer relevant information for modeling the classes. On the other hand, k -NN showed better results than CP-ANN.

Keywords. Pesticides, k -NN, CP-ANN, GA-VSS, QSAR Theory.

Resumen

El objetivo de este trabajo fue la comparación entre los métodos de clasificación del vecino más cercano (k -NN) y las redes neuronales artificiales de contrapropagación (CP-ANN) para modelar la toxicidad de un conjunto de 192 pesticidas organoclorados, organofosforados, carbamatos y piretroides, medidos como Concentración Efectiva (EC50) y que fueron divididos en tres clases, es decir, baja, intermedia y alta toxicidad. Se calcularon 4885 descriptores moleculares usando el programa DRAGON, los que fueron simultáneamente analizados mediante el método k -NN acoplado con la técnica de selección de variables de los Algoritmos Genéticos (GA-VSS). Los modelos fueron apropiadamente validados mediante un subconjunto de predicción. Los resultados claramente sugieren que los descriptores 3D no ofrecen información relevante para modelar las clases. Por otro lado, k -NN muestra mejores resultados que CP-ANN.

Palabras Clave. Pesticidas, k -NN, CP-ANN, GA-VSS, Teoría QSAR.

Introducción

Los pesticidas son un grupo muy importante de compuestos químicos que son utilizados en la agricultura para la protección contra las plagas. Su aplicación anual estimada es de 4 millones de toneladas pero sólo el 1 % de estos compuestos llegan a ser efectivos en su aplicación, es decir, el 99 % de sus componentes activos son

liberados y estos pueden causar diferentes afectaciones a los componentes ambientales y a los seres vivos. Varias investigaciones han estudiado la toxicidad de los pesticidas y se ha demostrado que los mismos pueden ser peligrosos si se usan indiscriminadamente. La toxicidad de los pesticidas depende en gran medida de la estructura química que poseen, metabolismo de los organismos, dosis, grado de descomposición, modo de en-

trada al organismo, entre otros; razón por la cual es de suma importancia determinar su toxicidad [1].

Para este fin se han estudiado y desarrollado diversos ensayos en organismos vivos. La ventaja fundamental de estas pruebas es su realización en condiciones rigurosas y controladas de laboratorio, permitiendo establecer de manera cuantitativa la relación entre la exposición (dosis) y su efecto (respuesta) [2]. Dentro de las desventajas de realizar estas pruebas es la detección de los efectos en dosis bajas; esto requiere de un número elevado de ejemplares lo que convierte al proceso inviable económicamente [3]. En un estudio de la Comisión Europea se estimó que las pruebas toxicológicas de 30.000 sustancias constituyeron un costo total de 2 billones de euros hasta el año 2013 [4]; asimismo, se ha estimado que para realizar estas pruebas fueron necesarios el uso de más de 12 millones de animales vertebrados que fueron sacrificados para este propósito [3]. Esto claramente indica que existen varias limitaciones en los ensayos de toxicidad como: restricciones económicas, consideraciones éticas y la presión pública para reducir las pruebas toxicológicas en animales [4].

Debido a estas limitaciones, se han desarrollado nuevos métodos que permiten reducir el número de animales usados en la experimentación, ahorrar tiempo y reducir el costo de los ensayos [5]. Dentro de estas estrategias se encuentran los modelos matemáticos de predicción basados en la teoría QSAR (Relación Cuantitativa Estructura-Actividad) [6]. Estos modelos fueron descritos inicialmente por Hansch y su equipo en 1964 [7]. Ellos establecieron que moléculas semejantes tendrán un comportamiento similar tanto en las propiedades fisicoquímicas como biológicas. Por lo tanto, estas sustancias pueden inducir una determinada respuesta en el organismo, lo cual indica el efecto y la función característica de las mismas. El postulado de Hansch afirma que la actividad está en función de propiedades lipofílicas (L), propiedades electrónicas (E), propiedades estéricas (S) y, finalmente cualquier otro tipo de propiedad molecular (M) necesaria para describir el efecto biológico estudiado. Estos modelos son basados en una serie de aplicaciones matemáticas y estadísticas que tienen como premisa encontrar un modelo matemático cuantitativo que relacione la estructura molecular y una actividad definida. Para lograr este objetivo los modelos QSAR se apoyan en técnicas quimiométricas que permiten analizar de manera exhaustiva los datos [8].

La Quimiometría es una ciencia que utiliza técnicas matemáticas y estadísticas multivariantes sobre datos químicos, permitiendo obtener la máxima información para entender un problema [9]. Estas técnicas analizan sistemas complejos de información, los cuales están formados por matrices compuestas por varias partes interconectadas y entrelazadas cuyos vínculos crean información adicional no visible antes del análisis. Con los avances de la informática se han podido desarrollar técnicas que permiten utilizar toda la información disponible en las bases de datos; minimizando el tiempo y el

costo del análisis y maximizando la calidad de la respuesta. Esto permite tener un mejor entendimiento del problema al estudiar todos los datos disponibles usando técnicas tales como análisis de componentes principales, análisis de conglomerados, métodos de regresión, métodos de clasificación, métodos de selección de variables, redes neuronales, diseño experimental, entre otros [8].

Las técnicas de clasificación [8, 9] tienen como objetivo la construcción de modelos discretos sobre la base de un cierto número de variables independientes y una clase como respuesta cualitativa. Existe una vasta gama de métodos de clasificación, entre los cuales se tiene el método del vecino más cercano k -NN [8] y las redes neuronales artificiales de contrapropagación (CP-ANN) [10, 11]. Debido a la dimensionalidad de las bases de datos es necesario realizar una selección previa de las variables (descriptores) más significativas que permitirán predecir la toxicidad de los pesticidas. Para obtener un conjunto óptimo de variables necesarias para la construcción del modelo se usan diversas técnicas, entre ellas, la metodología de selección de variables de los algoritmos genéticos (GA-VSS) [12–14], esta metodología se basa en el proceso genético evolutivo de los organismos vivos y simula el proceso de la selección natural y la supervivencia.

Duchowicz y Castro [6] presentaron un artículo de revisión de las diversas aplicaciones de la teoría QSAR/QSPR en el estudio de pesticidas desarrolladas durante la década 2003-2013. En ella mostraron estudios de propiedades tales como Factor de Bioconcentración, Coeficiente de Adsorción Suelos/Sedimentos, Toxicidad, Solubilidad Acuosa y Partición Aire a Agua; constituyendo un resumen detallado de estudios específicos en este campo. Dadas estas premisas, el objetivo principal fue el desarrollar un modelo QSAR para modelar la Concentración Efectiva 50 (EC₅₀) medida en *Daphnia magna*, usando un conjunto de 192 pesticidas. Se aplicó el método de selección de variables GA-VSS acoplado con k -NN. Finalmente se compararon las técnicas de clasificación k -NN y CP-ANN. Estos modelos permitirán predecir la actividad biológica de nuevas moléculas en términos discretos, permitiendo ahorrar tiempo, recursos económicos y reducir la experimentación de laboratorio sobre animales.

Materiales y Métodos

Base de datos experimental

El dominio químico analizado involucra 192 moléculas de pesticidas de cuatro tipos: carbamatos, piretroides organoclorados y organofosforados, reportados en Pesticide Properties Data Base (PPDB) [15, 16]. La actividad experimental reportada es la Concentración Efectiva 50 (EC₅₀) medida en *Daphnia magna*, la cual representa la concentración en mg/L que producirá la reducción del 50 % de la población en estudio luego de 48 horas [2].

Parámetro	Clase 1	Clase 2	Clase 3
Valor umbral	5,3-4,65mg/L	<4,65-0,10mg/L	<0,10-0,000001mg/L
Toxicidad	Baja	Mediana	Alta
Número de objetos	64	65	63

Tabla 1: Intervalo de valores de EC₅₀ para la construcción de las clases y número de pesticidas por cada clase.

Cálculo de los descriptores moleculares

Un problema crucial en los estudios QSAR es el encontrar una representación estructural conveniente y por este motivo se usan los descriptores moleculares como una caracterización estructural. Los descriptores moleculares son el resultado de un procedimiento lógico y matemático que transforma la información química codificada dentro de una representación simbólica de una molécula en un número útil o el resultado de algún experimento estandarizado [17]. Para tal efecto, las estructuras moleculares fueron diseñadas y optimizadas en el programa Hyperchem [18] por el método de los campos de fuerza de la mecánica molecular (MM+), seguido por el método semiempírico PM3. Se usó el algoritmo del gradiente conjugado en la versión Polak-Ribiere hasta que la desviación cuadrática media sea menor que 0.01kcal.(Å.mol)⁻¹. Seguidamente, se calcularon 4885 descriptores moleculares usando el programa DRAGON versión 6.0 [19]. Esta base de datos de descriptores incluyen 29 familias: 0D- descriptors (constitutional indices), 1D- descriptors (functional group counts, atom-centred fragments, molecular properties), 2D- descriptors (ring descriptors, topological indices, walk and path counts, connectivity indices, information indices, 2D matrix-based descriptors, 2D autocorrelations, Burden eigenvalues, P_VSA-like descriptors, edge adjacency indices, CATS 2D, 2D atom pairs, atom-type E-state indices, ETA indices, drug-like indices), and 3D-descriptors (Randic molecular profiles, geometrical descriptors, RDF descriptors, 3D- MoRSE descriptors, WHIM descriptors, GETAWAY descriptors, charge descriptors, 3D matrix-based descriptors, 3D autocorrelations, 3D atom pairs). Se excluyeron descriptores con valores constantes y casi constantes, además de los que están correlacionados al 95 %. De esta manera se obtuvieron 1126 descriptores que nos permitieron relacionar la estructura con una actividad biológica conocida que en nuestro estudio es la toxicidad EC₅₀.

Asignación de clases

Para evitar errores en la modelización de la respuesta debidos al rango y la variabilidad de los datos dentro del mismo; los valores de EC₅₀ fueron normalizados realizando la siguiente transformación:

$$EC_{50}^{nor} = \log \frac{1}{EC_{50}} \quad (1)$$

Posteriormente, los valores de EC₅₀^{nor} obtenidos se dividieron en tres clases. Para ello se calcularon los percentiles 33 y 66 para representar los valores de frontera

para las clases, es decir, clase 1 o toxicidad baja (0-33 % de los datos), toxicidad media o clase 2 (34-66 % de los datos) y clase 3 o toxicidad alta (67-100 % de los datos). Las características de cada una de las clases se presentan en la Tabla 1.

Desarrollo de los Modelos

Selección de los descriptores en clasificación

Otro de los temas a considerar en la teoría QSAR es la selección de los descriptores moleculares más útiles a partir de un gran conjunto de datos experimentales. Existen varias metodologías de selección de variables, dentro de las cuales GA-VSS han sido ampliamente utilizados en Quimiometría y QSAR [13, 20–40]. En resumen, GA-VSS consisten en un ciclo iterativo de creación de conjuntos (cromosomas) de variables originales que generan poblaciones viables las cuales son las más óptimas para la construcción del modelo final. Los cálculos GA-VSS se realizaron usando el GA toolbox para MatLab [41] provisto por el Milano Chemometrics and QSAR Research Group (University of Milano - Bicocca).

Método de clasificación del vecino más cercano (*k*-Nearest Neighbors)

k-NN es un método de clasificación no paramétrico que para realizar la clasificación se basa sobre el concepto de analogía. El método se fundamenta en la elección de una distancia (generalmente la Euclidea) y en la selección oportuna de los *k* objetos más cercanos a la molécula en estudio [42]. Luego se enumera cuántos de estos *k* objetos caen en cada clase y la molécula es atribuida a la clase más numerosa; esta evaluación se extiende a todos los objetos estudiados hasta determinar a qué clase corresponde cada uno de ellos y en ese momento se termina el algoritmo de clasificación. *k*-NN no provee un modelo matemático, es decir, una función analítica aplicable sucesivamente a los objetos desconocidos a ser clasificados [9]. En la práctica es necesario probar diversos valores de *k* que oscilan entre 3 y 10 hasta obtener el valor de clasificación más óptimo. Este es un algoritmo que posee una gran simplicidad y por lo tanto ha sido ampliamente aplicado a diversos estudios de clasificación debido a su rendimiento en la respuesta obtenida [42].

Método de clasificación de las Redes Neuronales Artificiales de Contrapropagación (Counterpropagation Artificial Neural network)

CP-ANNs son uno de los métodos más populares de las Redes Neuronales Artificiales [10, 11]. Ellas imitan la acción de una red biológica de neuronas donde cada

Descriptor	Descripción	Bloque	Sub-bloque
B01[C-N]	Presence/absence of C - N at topological distance 1	2D atom pairs	Binary atom pairs of order 1
B02[C-N]	Presence/absence of C - N at topological distance 2		Binary atom pairs of order 2
B04[C-P]	Presence/absence of C - P at topological distance 4		Binary atom pairs of order 4
B04[C-N]	Presence/absence of C - N at topological distance 4		Binary atom pairs of order 4
F02[C-N]	Frequency of C - N at topological distance 2		Frequency atom pairs of order 2
O-059	Al-O-Al	Atom-centred fragments	Basic descriptors
CATS2D_02_DA	Donor-acceptor at lag 02	CATS 2D	Basic descriptors
CATS2D_02_DL	CATS2D Donor-lipophilic at lag 02		
nP	Number of phosphorous atoms	Constitutional indices	Basic descriptors
SssNH	Sum of ssNH E-states atom-type	E-state indices	E-State sums
GATS1s	Geary autocorrelation of lag 1 weighted by I-state	2D Autocorrelations	Geary autocorrelations

Tabla 2: Descripción de los descriptores calculados por Dragon considerados en los modelos k -NN y CP-ANN.

neurona acepta diferentes señales de las neuronas vecinas y las procesa para un número de iteraciones definidas. Se las puede considerar una extensión de los mapas de Kohonen, también llamado Mapas de Auto-Organización (SOMs). CP-ANNs consiste en dos capas, una capa Kohonen y una capa de salida (también denominada capa de Grosberg). La primera capa es usualmente caracterizada por ser un espacio toroidal cuadrado o hexagonal, que consiste en una cuadrícula de $N \times N$ neuronas; donde N es el número de neuronas para cada lado del espacio. Cada neurona contiene tantos elementos (pesos) como el número de variables de entrada. Los pesos de cada neurona son aleatoriamente inicializados entre 0 y 1 y actualizados en función de los vectores de entrada, es decir, las muestras para un determinado número de tiempo (denominado épocas). Ambos parámetros deben ser definidos por el usuario [39]. El uso de CP-ANNs se ha incrementado en diferentes aspectos de la química y actualmente pueden ser consideradas una herramienta importante dentro del análisis multivariable. Para los cálculos, se usó utilizó el Kohonen and CPANN Toolbox [43, 44] también implementado en MatLab.

Validación del modelo

Para propósitos de validación externa, la base de datos de 192 pesticidas y 1126 descriptores fue dividida en dos grupos de manera aleatoria, considerando el 70 % de las moléculas para la calibración (training set) y las restantes para la predicción (test set). El parámetro que sintetiza el resultado de un método de clasificación es la tasa de no error (non-error rate, NER %) definido de la siguiente manera:

$$NER = \frac{\sum_g c_{gg}}{n} \quad (2)$$

Donde c_{gg} son los elementos diagonales de la matriz de confusión y n es el número total de datos. Los valores de NER tienen un intervalo que van de 0 a 1 o de 0 a 100 (NER %), donde valores cercanos a 1 o 100, respectivamente, representan el mejor resultado de clasificación [9]. Se usó el subconjunto de calibración para realizar la validación cruzada extrayendo aleatoriamente el 20 % de moléculas (leave-more-out) y obtener el NER_{cv} ; mientras que, con el subconjunto de predicción se ha obtenido el NER_{pred} .

Resultados y Discusión

En la Tabla 1S (material suplementario) se indica la información de los pesticidas (tipo y nombre), su valor de toxicidad, las clases asignadas de acuerdo a los valores presentados en la Tabla 1. Se indican también las cla-

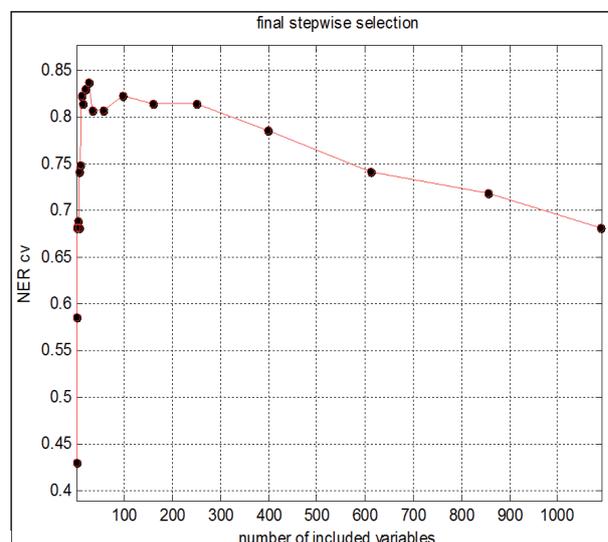


Figura 1: Relación entre el número de descriptores incluidos en los modelos y la tasa de no error en validación cruzada (NER_{cv}).

Clases verdaderas	Clases Asignadas k -NN			Clases Asignadas CP-ANN		
	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 1	Clase 2	Clase 3
Clase 1	33	3	3	30	6	3
Clase 2	4	36	8	5	37	6
Clase 3	2	3	43	3	5	40

Tabla 3: Matrices de confusión para los métodos k -NN y CP-ANN obtenidos a partir del subgrupo de calibración.

ses asignadas por los dos métodos de clasificación, las cuales se usan para el cálculo del NER. La partición de la base de datos fue aleatoria, manteniendo el 70 % de moléculas en el subgrupo de calibración y las restantes en el de predicción, las cuales serán usadas para la validación externa del modelo.

Sobre el subconjunto de calibración, se aplicó el algoritmo k -NN acoplado con la técnica de selección de variables de los Algoritmos Genéticos (GA-VSS), optimizando como parámetro de clasificación la tasa de no error en validación cruzada (NER_{cv}). El resultado de la optimización del NER_{cv} respecto al número de variables incluidas en el modelo se muestra en la Fig. 1.

Del algoritmo de selección de variables se obtuvo un modelo constituido por 11 descriptores moleculares, buscando cumplir el principio de parsimonia (Occam's Razor Principle) [6]. En la tabla 2 se muestra la información de los mejores descriptores con los cuales se construyeron y validaron los modelos k -NN y CP-ANN.

Estos 11 descriptores son los que mejor describen la relación entre la estructura molecular y la toxicidad de los pesticidas en las tres clases asignadas oportunamente. Para la construcción del mapa de Kohonen hexagonal se usaron los siguientes parámetros optimizados: número de neuronas de 14×14 , número de épocas de 150 y la frecuencia en un valor de 0.2. El mapa obtenido se muestra en la Fig. 2.

El gráfico que es de forma toroidal muestra claramente un espacio de clase definido por cada color, es decir,

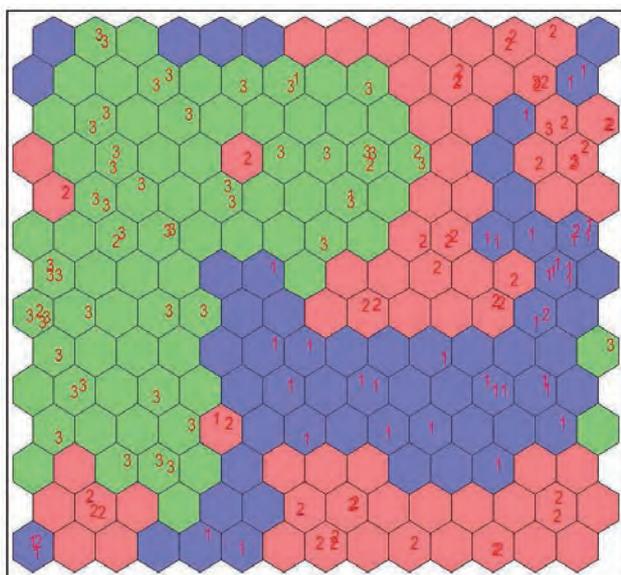


Figura 2: Mapa de Kohonen obtenido para el modelo de clasificación CP-ANN para el subconjunto de calibración.

azul para la clase 1 (toxicidad baja), rojo para la clase 2 (toxicidad media) y verde para la clase 3 (toxicidad alta). Se observa que existen pesticidas que son mal clasificados y son los que determinan la tasa de error del modelo ($ER=1-NER$). En este mapa se indican únicamente los resultados de asignación de los pesticidas del subconjunto de calibración, a partir del cual se obtuvieron los valores de cada clase. Para la construcción de modelo de clasificación del k -NN se optimizó previamente el número de los k vecinos, usándose valores comprendidos entre 3 y 7. El valor de k que muestra la mejor respuesta, es decir, la menor tasa de no error fue $k=4$ ($NER=0.82$). Con las clases asignadas por cada método de clasificación (ver Tabla 1S), se construyeron las matrices de confusión para interpolación, tanto para el k -NN y CP-ANN, cuyos resultados se muestran en la Tabla 3.

A partir de estas matrices se calculó el NER_{cal} según la ecuación 2. Los mejores resultados se obtienen para el método CP-ANN, mientras que en validación cruzada k -NN resulta ser más estable (ver Tabla 4).

Posteriormente, se usó el subconjunto de predicción para realizar la validación externa de los modelos. Se calcularon las clases asignadas por cada método (ver Tabla 1S) y con estos valores se construyeron las matrices de confusión que se presentan en la Tabla 5, que servirán para establecer los parámetros predictivos de los modelos.

Dado que k -NN muestra mejores resultados respecto a CP-ANN se procedió a realizar un análisis más exhaustivo del modelo, calculando el NER_{cal} para cada una de las clases, como se observa en la Tabla 6. El modelo k -NN es bastante estable para separar apropiadamente los pesticidas de las tres clases, de manera significativa los de toxicidad alta (89 %), seguido por los de toxicidad baja (84 %) y algo menor para los de toxicidad media (75 %).

Asimismo, se calcularon los valores de Sensibilidad (S_n) y Especificidad (S_p) [9] (ver Tabla 6). La sensibilidad se define como la capacidad de una clase para representar los objetos de aquella clase, indicando que la clase 3 tiene la mayor sensibilidad seguida de la clase 1; mientras que, la clase menos sensible es la 2 debido a que se encuentra en la frontera entre las clases de pesticidas de

Método	NER_{cal}	NER_{cv}	NER_{pred}
k -NN	0.88	0.83	0.70
CP-ANN	0.91	0.79	0.67

Tabla 4: Valores de la tasa de no error alcanzados para los modelos de clasificación en calibración, validación cruzada y predicción.

Clases verdaderas	Clases Asignadas <i>k</i> -NN			Clases Asignadas CP-ANN		
	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 1	Clase 2	Clase 3
Clase 1	12	2	3	11	3	3
Clase 2	1	11	8	2	10	8
Clase 3	1	2	17	1	2	17

Tabla 5: Matrices de confusión para los métodos *k*-NN y CP-ANN obtenidos a partir del subgrupo de predicción.

baja y alta toxicidad, lo que generaría que varios de estos vengan clasificados erróneamente en alguna de estas dos clases. Por otro lado, la especificidad define la capacidad de una clase para aislar de las otras clases los objetos de aquella clase. La clase 2 es la más específica a pesar de ser la menos sensible; por otro lado, la clase 1 resulta ser la más sensible y específica y la clase tres es la que tiene la menor especificidad.

Según la estructura molecular de los pesticidas, al existir mayor cantidad de estructuras cíclicas y heterocíclicas aumenta su toxicidad [4]. En este estudio los pesticidas clasificados en la clase de baja toxicidad tienen la característica de ser moléculas de cadena lineal; mientras que, las moléculas de la clase 2 tienen una estructura cíclica aromática como característica principal y los compuestos de la clase 3 son estructuras cíclicas y heterocíclicas en donde se encuentran más de dos anillos aromáticos.

El modelo encontrado y validado presenta una buena capacidad predictiva ($NER_{cv}=0,83$) a pesar que el mismo integra pesticidas de diversa estructura química. En un estudio similar publicado en 2002, Ferreira [45] desarrolló un modelo QSAR con un $NER_{cv}=0,71$, utilizando 50 pesticidas, lo cual representa un 26 % de compuestos respecto a los 192 considerados en el presente estudio. El presente modelo presenta mejores parámetros tanto en calibración, validación cruzada y predicción.

En los estudios QSAR son muy apreciados los modelos continuos, dado que la predicción devuelve un valor de toxicidad (modelo cuantitativo), en tanto que los modelos discretos muestran el valor de una clase de toxicidad (modelo cualitativo) [46]. Sin embargo, los modelos discretos permiten enfrentar estudios donde la variabilidad de la respuesta y la heterogeneidad de las fuentes de medición constituyen un detonante para que un modelo continuo fracase y donde un modelo de clasificación puede ser usado como herramienta útil. De hecho, los métodos de clasificación son apropiados en los estudios QSAR para modelar diversos tipos de respuestas, tales como compuestos activos/no activos o compuestos de toxicidad baja, mediana y alta [47].

En definitiva, dado que no se consideran dentro de los modelos los descriptores 3D, se tiene la ventaja de reducir el costo computacional que involucra el determinar

Clase	NER_{cal}	Sn	Sp
1	0,84	0.85	0.85
2	0,75	0.75	0.86
3	0,89	0.90	0.80

Tabla 6: Tasa de no error, Sensibilidad y Especificidad para cada clase en el modelo de clasificación *k*-NN.

la geometría óptima de menor energía, que también podría limitar la aplicación futura de los modelos *k*-NN y CP-ANN debido a inconsistencias con la generación de estructuras 3D [48].

Conclusiones

Se presenta una aplicación satisfactoria de la teoría QSAR para el desarrollo de los modelos de clasificación *k*-NN y CP-ANN para la predicción de la toxicidad (EC_{50} medida en *Daphnia magna*, en un ensayo de duración de 48 horas) de 192 pesticidas definida discretamente en tres clases (baja, media y alta toxicidad). Los modelos muestran buena estabilidad en calibración, validación cruzada y predicción; sin embargo, entre los dos, el modelo *k*-NN muestra los mejores parámetros de calidad ($NER_{cal}=0.88$, $NER_{cv}=0.83$ y $NER_{pred}=0.70$), pudiéndose usar para modelar esta actividad y predecir el comportamiento de pesticidas no considerados y aún no sintetizados. Este modelo complementa resultados previamente publicados; sin embargo, constituye un modelo más general y predictivo. Finalmente, los descriptores 3D no ofrecen información relevante para modelar las clases y en este contexto, los métodos QSAR independientes de la conformación continúan a emerger como una alternativa para el desarrollo de los modelos, basados únicamente en descriptores topológicos y constitucionales de los compuestos.

Agradecimientos

Cristian Rojas agradece la Beca Doctoral otorgada por la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) de la República del Ecuador. Asimismo, los autores agradecen al Milano Chemometrics and QSAR Research Group de la Università degli Studi di Milano - Bicocca por permitir el uso del algoritmo de selección de variables GA Toolbox.

Referencias

- [1] Jaramillo, B.; Martelo, I.; Duarte, E. 2013. "Toxicidad Aguda de Pesticidas Organofosforados y Análisis de la Relación Cuantitativa de Estructura Actividad (QSAR)". *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 11:76–84.
- [2] Castillo Morales, G. 2004. "Ensayos toxicológicos y métodos de evaluación de calidad de aguas; estandarización, intercalibración, resultados y aplicaciones". *IDRC/IMTA*.

- [3] Mazzatorta, P.; Smiesko, M.; Lo Piparo, E.; Benfenati, E. 2005. "QSAR model for predicting pesticide aquatic toxicity". *Journal of chemical information and modeling*, 45:1767–1774.
- [4] Zvinavashe, E.; Du, T.; Griff, H. T. van den Berg; Soffers, A.; Vervoort, J.; Murk, A.; Rietjens, I. 2009. "Quantitative structure-activity relationship modeling of the toxicity of organothiophosphate pesticides to *Daphnia magna* and *Cyprinus carpio*". *Chemosphere*, 75: 1531–1538.
- [5] Toropov, A.; Benfenati, E. 2006. "QSAR models for *Daphnia* toxicity of pesticides based on combinations of topological parameters of molecular structures". *Bioorganic & medicinal chemistry*, 14:2779–2788.
- [6] Duchowicz, P.; Castro, E. 2013. "The Importance of the QSAR-QSPR Methodology to the Theoretical Study of Pesticides". *International Journal of Chemical Modeling*, 5:35–50.
- [7] Hansch, C.; Hoekman, D.; Leo, A.; Weininger, D.; Sellassie, C. 2002. "Chem-bioinformatics: comparative QSAR at the interface between chemistry and biology". *Chemical reviews*, 102:783–812.
- [8] Frank, I.; Todeschini, R. 1994. "The data analysis handbook". *Elsevier*.
- [9] Todeschini, R. 1998. "Introduzione alla chemiometria". *EdiSES, Napoli, Italia*.
- [10] Zupan, J.; Novič, M.; Gasteiger, J. 1995. "Neural networks with counter-propagation learning strategy used for modelling". *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, 27:175–187.
- [11] Zupan, J.; Novič, M.; Ruisánchez, I. 1997. "Kohonen and counterpropagation artificial neural networks in analytical chemistry". *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, 38:1–23.
- [12] Leardi, R. 2001. "Genetic algorithms in chemometrics and chemistry: a review". *Journal of Chemometrics*, 15: 559–569.
- [13] Leardi, R. 2003. "Nature-inspired Methods in Chemometrics: Genetic Algorithms and Artificial Neural Networks". *Elsevier*.
- [14] Leardi, R. 2007. "Genetic algorithms in chemistry". *J. Chromatogr. A*, 1158:226–233.
- [15] University of Hertfordshire. 2013. "PPDB: Pesticide Properties DataBase". <http://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/en/index.htm>.
- [16] Lewis, K.; Green, A. 2011. "The Pesticide Properties Database". *Chemistry International*.
- [17] Todeschini, R.; Consonni, V. 2009. "Molecular Descriptors for Chemoinformatics". *WILEY-VCH, Weinheim*.
- [18] Hypercube, Inc. 2014. "HyperChem". <http://www.hyper.com>.
- [19] TALETE. 2014. "DRAGON, Software for Molecular Descriptor Calculation". <http://www.talete.mi.it/>.
- [20] Cho, S.; Hermsmeier, M. 2002. "Genetic algorithm guided selection: variable selection and subset selection". *Journal of chemical information and computer sciences*, 42:927–936.
- [21] Fan, Y.; Shi, L.; Kohn, K.; Pommier, Y.; Weinstein, J. 2001. "Quantitative structure-antitumor activity relationships of camptothecin analogues: cluster analysis and genetic algorithm-based studies". *Journal of medicinal chemistry*, 44:3254–3263.
- [22] Fernandez, M.; Caballero, J.; Fernandez, L.; Sarai, A. 2011. "Genetic algorithm optimization in drug design QSAR: Bayesian-regularized genetic neural networks (BRGNN) and genetic algorithm-optimized support vectors machines (GA-SVM)". *Molecular diversity*, 15: 269–289.
- [23] Gao, H. 2001. "Application of BCUT metrics and genetic algorithm in binary QSAR analysis". *Journal of chemical information and computer sciences*, 41:402–407.
- [24] Ghosh, P.; Bagchi, M. 2009. "QSAR modeling for quinoline derivatives using genetic algorithm and simulated annealing based feature selection". *Current medicinal chemistry*, 16:4032–4048.
- [25] Hemmateenejad, B. 2004. "Optimal QSAR analysis of the carcinogenic activity of drugs by correlation ranking and genetic algorithm-based PCR". *Journal of Chemometrics*, 18:475–485.
- [26] Hemmateenejad, B.; Akhond, M.; Miri, R.; Shamsipur, M. 2003. "Genetic algorithm applied to the selection of factors in principal component-artificial neural networks: application to QSAR study of calcium channel antagonist activity of 1, 4-dihydropyridines (nifedipine analogues)". *Journal of chemical information and computer sciences*, 43:1328–1334.
- [27] Hemmateenejad, B.; Miri, R.; Akhond, M.; Shamsipur, M. 2002. "QSAR study of the calcium channel antagonist activity of some recently synthesized dihydropyridine derivatives. An application of genetic algorithm for variable selection in MLR and PLS methods". *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, 64:91–99.
- [28] Hoffman, B.; Kopajtic, T.; Katz, J.; Newman, A. 2000. "2D QSAR modeling and preliminary database searching for dopamine transporter inhibitors using genetic algorithm variable selection of Molconn Z descriptors". *Journal of medicinal chemistry*, 43:4151–4159.
- [29] Leardi, R.; Lupiáñez González, A. 1998. "Genetic algorithms applied to feature selection in PLS regression: how and when to use them". *Chemom. Intell. Lab. Syst.*, 41:195–207.
- [30] Leardi, R.; Seasholtz, M.; Pell, R. 2002. "Variable selection for multivariate calibration using a genetic algorithm: prediction of additive concentrations in polymer films from Fourier transform-infrared spectral data". *Analytica Chimica Acta*, 461:189–200.
- [31] Li, T.; Mei, H.; Cong, P. 1999. "Combining nonlinear PLS with the numeric genetic algorithm for QSAR". *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, 45: 177–184.

- [32] Saripinar, E.; Geçen, N.; Şahin, K.; Yanmaz, E. 2010. "Pharmacophore identification and bioactivity prediction for triaminotriazine derivatives by electron conformational-genetic algorithm QSAR method". *European journal of medicinal chemistry*, 45:4157–4168.
- [33] Sutherland, J.; O'Brien, L.; Weaver, D. 2003. "Spline-fitting with a genetic algorithm: A method for developing classification structure-activity relationships". *Journal of chemical information and computer sciences*, 43:1906–1915.
- [34] Taha, M.; Qandil, A.; Zaki, D.; AlDamen, M. 2005. "Ligand-based assessment of factor Xa binding site flexibility via elaborate pharmacophore exploration and genetic algorithm-based QSAR modeling". *European journal of medicinal chemistry*, 40:701–727.
- [35] Turner, D.; Willett, P. 2000. "Evaluation of the EVA descriptor for QSAR studies: 3. The use of a genetic algorithm to search for models with enhanced predictive properties (EVA_GA)". *Journal of Computer-Aided Molecular Design*, 14:1–21.
- [36] Wanchana, S.; Yamashita, F.; Hashida, M. 2003. "QSAR analysis of the inhibition of recombinant CYP 3A4 activity by structurally diverse compounds using a genetic algorithm-combined partial least squares method". *Pharmaceutical research*, 20:1401–1408.
- [37] Weber, L. 1998. "Applications of genetic algorithms in molecular diversity". *Current Opinion in Chemical Biology*, 2:381–385.
- [38] Pavan, M.; Consonni, V.; Gramatica, P.; Todeschini, R. 2006. "New QSAR Modelling Approach Based on Ranking Models by Genetic Algorithms - Variable Subset Selection (GA-VSS)". in: R. Brüggemann, L. Carlsen (Eds.) *Partial Order in Environmental Sciences and Chemistry*, Springer Berlin Heidelberg: 181–217.
- [39] Ballabio, D.; Vasighi, M.; Consonni, V.; Kompany-Zareh, M. 2011. "Genetic algorithms for architecture optimisation of counter-propagation artificial neural networks". *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, 105:56–64.
- [40] Devillers, J. 2012. "Genetic Algorithms in Molecular Modeling (Principles of QSAR and Drug Design)". *Academic Press, New York*.
- [41] The MathWorks, Inc. 2014. "Matlab". *Masachussetts, USA*, <http://www.mathworks.com>.
- [42] Gemperline, P. 2012. "Practical guide to chemometrics". *CRC press*.
- [43] Ballabio, D.; Consonni, V.; Todeschini, R. 2009. "The Kohonen and CP-ANN toolbox: a collection of MATLAB modules for self organizing maps and counter-propagation artificial neural networks". *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, 98:115–122.
- [44] Ballabio, D.; Vasighi, M. 2012. "A MATLAB toolbox for Self Organizing Maps and supervised neural network learning strategies". *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, 118:24–32.
- [45] Ferreira, M. 2002. "Multivariate QSAR". *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 13:742–753.
- [46] Benfenati, E. 2011. "Quantitative Structure-Activity Relationships (QSAR) for pesticide regulatory purposes". *Elsevier*.
- [47] Gramatica, P. 2007. "Principles of QSAR models validation: internal and external". *QSAR Comb. Sci*, 26: 694–701.
- [48] Brandmaier, S.; Peijnenburg, W.; Durjava, M.; Kolar, B.; Gramatica, P.; Papa, E.; Bhatarai, B.; Kovarich, S.; Cas-sani, S.; Roy, P. 2014. "The QSPR-THESAURUS: The online platform of the CADASTER project". *Alternatives to laboratory animals: ATLA*, 42:13–24.

Material Suplementario

Id.	Tipo	Nombre	EC₅₀	Clase_{EXP}	Clase_{k-NN}	Clase_{CP-ANN}
1	Fosforados	Acefato	67.2	1	1	1
2	Fosforados	Ampropylfos	100	1	1	1
3*	Fosforados	Anilofos	56	1	1	2
4	Fosforados	Azametifos	0.00067	1	1	1
5	Fosforados	Azinfos-etil	0.0002	3	2	2
6*	Fosforados	Azinfos-metil	0.0011	3	3	3
7	Fosforados	Bensulida	0.58	1	1	1
8	Fosforados	Bromofos	0.0086	2	2	2
9*	Fosforados	Bromofos-etil	0.0086	2	1	2
10	Fosforados	Butonato	0.006	2	1	1
11	Fosforados	Cadusafos	0.00075	3	3	3
12	Fosforados	Cianofos	0.097	2	2	2
13	Fosforados	cloretoxifos	0.00041	3	3	3
14	Fosforados	Clorfenvinfos	0.00025	3	3	3
15	Fosforados	Clorpirifos	0.0001	3	1	2
16	Fosforados	clorpirifos-metil	0.0006	3	3	3
17*	Fosforados	Demeton-o	0.0104	2	2	2
18	Fosforados	Demeton-s	0.0104	2	2	2
19	Fosforados	Demeton-S-metil	0.023	2	2	2
20*	Fosforados	Diazinon	0.001	3	2	3
21	Fosforados	Diclofention	0.0011	3	3	3
22	Fosforados	Diclorvos	0.00019	1	1	2
23*	Fosforados	Dicrotofos	0.013	2	2	2
24	Fosforados	Dimethylvinphos	0.002	3	3	3
25*	Fosforados	Dimetoato	2	1	1	1
26*	Fosforados	Dioxation	0.00035	3	3	3
27*	Fosforados	Disulfoton	0.013	2	2	1
28	Fosforados	Edifenfos	0.000032	3	3	3
29	Fosforados	EPN	0.00006	3	2	2
30	Fosforados	Etion	0.000056	3	3	3
31	Fosforados	Etoprop	0.2	1	2	2
32	Fosforados	Etrimfos	0.004	2	2	1
33	Fosforados	Fenamifos	0.0019	3	3	3
34	Fosforados	Fenitrotion	0.0086	2	2	2
35	Fosforados	Fenkaptona	0.0013	3	3	3
36	Fosforados	Fonofos	0.0023	3	3	3
37*	Fosforados	Forato	0.004	2	2	2
38	Fosforados	Formotion	16.1	1	2	2
39	Fosforados	Fosalon	0.00074	3	3	3
40	Fosforados	Fosamina	152	1	1	1
41	Fosforados	Fosfamidon	0.008	2	2	2
42	Fosforados	Fosmet	0.002	3	3	3
43*	Fosforados	Fostiazato	0.282	1	1	2
44	Fosforados	Foxim	0.00081	3	3	3
45	Fosforados	Heptenofos	0.0022	3	2	2
46	Fosforados	Iodofenfos	0.0016	3	3	3
47*	Fosforados	Iprobenfos	0.2	1	1	1
48	Fosforados	Isazofos	0.5	1	1	1
49*	Fosforados	Isofenfos	0.0039	2	3	2
50	Fosforados	Isoxation	0.0052	2	2	2
51*	Fosforados	Malation	0.0007	3	2	3
52	Fosforados	Mefosfolan	0.0003	3	3	3
53	Fosforados	Metamidofos	0.27	1	1	1
54*	Fosforados	Metidation	0.0064	3	2	3
55	Fosforados	Mevinfos	0.00016	3	2	2
56*	Fosforados	Monocrotofos	0.023	2	2	2

Tabla 1S: Nombres químicos, familia de pertenencia, Concentración Efectiva 50 y clases de los 192 pesticidas. Las moléculas del subgrupo de predicción se indican con *.

Id.	Tipo	Nombre	EC₅₀	Clase_{Exp}	Clase_{k-NN}	Clase_{CP-ANN}
57*	Fosforados	Naled	0.00035	3	3	3
58	Fosforados	Ometoato	0.022	2	2	2
59	Fosforados	Oxidemeton metil	0.11	2	2	2
60	Fosforados	Paratión	0.0025	2	2	2
61	Fosforados	Paratión-metil	0.0073	2	2	2
62	Fosforados	Piperophos	0.0033	2	2	2
63	Fosforados	Pirimifos-etil	0.0025	2	1	1
64	Fosforados	Pirimifos-metil	0.00021	1	2	2
65	Fosforados	Profenofos	0.5	1	1	1
66	Fosforados	Protiofos	0.014	2	2	2
67	Fosforados	Quinalfos	0.00066	3	2	2
68*	Fosforados	Sulfotep	0.002	3	2	
69	Fosforados	Sulprofos	0.00083	3	3	3
70	Fosforados	Tebupirimfos	0.00008	3	3	3
71	Fosforados	Temefos	0.00001	3	1	2
72*	Fosforados	Terbufos	0.00031	3	2	3
73*	Fosforados	Tetraclorvinfos	0.002	3	3	3
74	Fosforados	Tetraetill pyrofosfato	0.055	2	1	1
75*	Fosforados	Tiometon	8.2	1	1	2
76	Fosforados	Triazofos	0.0026	2	2	2
77	Fosforados	Tribufos	0.12	2	2	2
78	Fosforados	Triclorfon	0.00096	3	2	2
79	Fosforados	Vamidotion	0.19	1	2	2
80	Carbamatos	Alanycarb	9.4	1	1	1
81	Carbamatos	Aldicarb	0.42	1	3	2
82*	Carbamatos	Aldoxicarb	0.28	1	1	2
83*	Carbamatos	Aminocarb	0.19	1	1	1
84	Carbamatos	Asulam	59.7	1	1	1
85*	Carbamatos	Barban	0.3	1	1	1
86	Carbamatos	Bendiocarb	0.03	2	2	2
87	Carbamatos	Benfuracarb	0.01	2	2	2
88*	Carbamatos	Benthiavalicarb isopropyl	10	1	1	1
89	Carbamatos	Butilato	158.6	1	1	1
90	Carbamatos	Butocarboxim	3.2	1	1	1
91	Carbamatos	Butoxicarboxim	0.5	1	1	1
92	Carbamatos	Carbaril	0.0064	2	2	2
93	Carbamatos	Carbetamida	81	1	1	1
94	Carbamatos	Carbofurano	0.0094	2	2	2
95*	Carbamatos	Carbosulfan	0.0015	3	2	3
96	Carbamatos	Chinometionato	0.12	2	3	3
97	Carbamatos	Cicloato	24	1	1	1
98	Carbamatos	Clororofam	2.6	3	3	3
99	Carbamatos	Dazomet	19	1	1	1
100	Carbamatos	Desmedifam	0.45	1	1	1
101*	Carbamatos	Dietofencarb	23	1	1	1
102*	Carbamatos	Dimepiperato	40	1	1	1
103	Carbamatos	EPTC	14	1	1	1
104	Carbamatos	Etiofencarb	0.22	1	1	1
105	Carbamatos	Fenmedifam	0.41	1	1	1
106*	Carbamatos	Fenobucarb	0.1	2	2	2
107	Carbamatos	Fenotiocarb	6.7	1	1	1
108	Carbamatos	Fenoxicarb	0.5	1	1	1
109*	Carbamatos	Ferbam	0.09	2	1	3
110	Carbamatos	Furatiocarb	0.0018	3	3	3
111*	Carbamatos	Iprovalicarb	19.8	1	1	1
112	Carbamatos	Isolan	0.0125	2	2	2

Continuación Tabla 1S: Nombres químicos, familia de pertenencia, Concentración Efectiva 50 y clases de los 192 pesticidas. Las moléculas del subgrupo de predicción se indican con *.

Id.	Tipo	Nombre	EC₅₀	Clase_{Exp}	Clase_{k-NN}	Clase_{CP-ANN}
113	Carbamatos	Isoprocarb	0.024	2	2	2
114*	Carbamatos	Metiocarb	0.008	2	3	3
115	Carbamatos	Metomilo	0.0076	2	3	1
116	Carbamatos	Mexacarbato	0.0018	3	2	2
117	Carbamatos	Molinato	14.9	1	3	2
118	Carbamatos	Orbencarb	2.88	1	3	2
119	Carbamatos	Oxamilo	0.319	1	3	2
120	Carbamatos	Pebulato	5.9	1	1	1
121	Carbamatos	Pirimicarb	0.017	2	2	2
122*	Carbamatos	Profam	23	1	3	2
123*	Carbamatos	Propamocarb	106	1	1	1
124	Carbamatos	Propoxur	0.15	1	1	2
125	Carbamatos	Prosulfocarb	0.51	1	1	1
126*	Carbamatos	Tiobencarb	1.1	1	1	2
127	Carbamatos	Tiodicarb	0.027	2	2	2
128	Carbamatos	Tiofanox	0.31	1	1	1
129*	Carbamatos	Tiram	0.011	2	3	1
130*	Carbamatos	Trialato	0.091	2	3	3
131*	Carbamatos	Trimetacarb	30	1	1	2
132*	Carbamatos	Vernolato	1.8	1	1	1
133	Carbamatos	XMC	0.055	2	2	2
134*	Carbamatos	Ziram	0.048	2	2	2
135	Clorados	Aldrin	0.028	2	2	2
136	Clorados	Alfaendosulfan	0.44	1	2	2
137*	Clorados	Alpha-hexaclorociclohexano	0.37	1	2	2
138*	Clorados	Bromociclen	0.7	1	2	
139	Clorados	Clortion	4.2	1	1	1
140	Clorados	Clorbenzilato	0.01	2	2	2
141*	Clorados	Clordano	0.59	1	1	1
142*	Clorados	Clordecon	0.03	2	2	2
143	Clorados	DDT	0.005	2	2	2
144	Clorados	Dicofol	0.14	1	1	2
145	Clorados	Dienoclor	1.2	3	3	3
146*	Clorados	Endosulfan	0.44	1	1	2
147	Clorados	Endrin	0.0042	2	2	2
148	Clorados	Epiclorhidrina	20.4	1	1	1
149	Clorados	Fomesafen	22.1	1	1	1
150	Clorados	Heptaclor	0.042	2	2	2
151	Clorados	Isobenzan	0.008	2	2	2
152	Clorados	Lindano	1.6	1	1	1
153	Clorados	Metoxiclor	0.00078	3	2	2
154	Clorados	Mirex	0.1	2	2	2
155	Clorados	Pentaclorofenato	0.45	1	1	1
156	Clorados	TDE	0.009	2	2	2
157*	Piretroides	Acrinatrina	0.000022	3	3	3
158	Piretroides	Aletrina	0.021	2	2	2
159	Piretroides	Alfacipermetrina	0.0003	3	3	3
160	Piretroides	Beta-ciflutrina	0.00029	3	3	3
161	Piretroides	Beta-cipermetrina	0.00026	3	3	3
162	Piretroides	Bifentrin	0.00011	3	3	3
163*	Piretroides	Bioaletrina	0.0356	2	2	1
164*	Piretroides	Bioresmetrin	0.0008	3	2	3
165	Piretroides	Ciflutrin	0.00016	3	3	3
166	Piretroides	Cihalotrin lambda	0.00036	3	3	3
167	Piretroides	Cihalotrina	0.38	1	1	1
168	Piretroides	Cipermetrin	0.0003	3	3	3

Continuación Tabla 1S: Nombres químicos, familia de pertenencia, Concentración Efectiva 50 y clases de los 192 pesticidas. Las moléculas del subgrupo de predicción se indican con *.

Id.	Tipo	Nombre	EC₅₀	Clase_{EXP}	Clase_{k-NN}	Clase_{CP-ANN}
169	Piretroides	Cicloprotrin	10	1	1	1
170*	Piretroides	Cyphenothrin	0.00043	3	3	3
171*	Piretroides	Deltametrin	0.00056	3	1	3
172	Piretroides	Empentrin	0.02	2	2	2
173	Piretroides	Esfenvalerato	0.0009	3	3	3
174*	Piretroides	Etofenprox	0.0012	3	3	3
175	Piretroides	Fenotrin	0.0043	2	2	2
176*	Piretroides	Fenpropatrin	0.00053	3	3	3
177	Piretroides	Fenvalerato	0.00003	3	3	3
178*	Piretroides	Flucitrinato	0.0083	2	2	2
179	Piretroides	Fluvalinate	0.074	2	2	2
180*	Piretroides	Gamma-cihaltrina	0.00045	3	3	3
181*	Piretroides	Halfenprox	0.000031	3	3	3
182	Piretroides	Imiprothrin	0.051	2	2	2
183*	Piretroides	Metofluthrin	0.0047	2	2	1
184	Piretroides	Permetrin	0.0006	3	3	3
185	Piretroides	Praletrin	0.0062	2	2	2
186*	Piretroides	Resmetrin	0.0037	2	2	1
187	Piretroides	Tau-fluvalinate	0.0089	2	2	2
188	Piretroides	Teflutrín	0.00007	3	3	3
189	Piretroides	Tetrametrina	0.045	2	2	2
190	Piretroides	Tralometrín	0.000038	3	3	3
191	Piretroides	Transfluthrin	0.0017	3	3	3
192	Piretroides	Zeta-cipermetrin	0.00014	3	3	3

Continuación Tabla 1S: Nombres químicos, familia de pertenencia, Concentración Efectiva 50 y clases de los 192 pesticidas. Las moléculas del subgrupo de predicción se indican con *.

A model of allocation, negotiation and redistribution of resources, based on intelligent agents

Un modelo de asignación, negociación y redistribución de recursos, basado en agentes inteligentes

Eduardo Véliz Quintero^{1*}, Carlos Jiménez Mosquera¹

¹Universidad San Francisco de Quito, Colegio de Ciencias e Ingeniería - El Politécnico. Diego de Robles y Vía Interoceánica, Campus Cumbayá, Quito, Ecuador.

*Autor principal/Corresponding author, e-mail: eduardo@eveliz.com

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

Recibido/Received: 08/07/2014. Aceptado/Accepted: 19/10/2014.

Publicado en línea/Published on Web: 19/12/2014. Impreso/Printed: 19/12/2014.

Abstract

The present work is an application of artificial intelligence, based on intelligent agents, to simulate the allocation, negotiation and redistribution of financial resources by Central Government to autonomous decentralized municipal governments. The goal is to develop a model based on intelligent agents using Netlogo, that allow the distribution of resources to autonomous decentralized municipal governments based on social variables such as deficit of housing, access to services and/or poverty by unsatisfied basic needs.

Keywords. Artificial intelligence, intelligent agents, central government, autonomous decentralized, social variables, deficit of housing, access to services, poverty, unsatisfied basic needs, Netlogo.

Resumen

El presente trabajo es una aplicación de la inteligencia artificial, basado en Agentes Inteligentes, para simular la asignación, negociación y redistribución de recursos económicos por parte del Estado Central hacia los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales. El objetivo es desarrollar un modelo basado en Agentes Inteligentes utilizando Netlogo, que permita realizar la distribución de los recursos hacia los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales sustentado en variables sociales tales como déficit de vivienda, acceso a servicios y/o pobreza por necesidades básicas insatisfechas.

Palabras Clave. Inteligencia artificial, agentes inteligentes, estado central, gobiernos autónomos descentralizados, variables sociales, déficit de vivienda, acceso a servicios, pobreza, necesidades básicas insatisfechas, Netlogo.

Introducción

Los Agentes Inteligentes

Un agente es cualquier ente capaz de percibir su medio ambiente mediante sensores y actuar en ese medio mediante actuadores [1], todo agente tiene una función u objetivo. Un agente muestra un alto grado de autonomía, realizando acciones basado en información recibida de su entorno mediante sensores [2]. Un ejemplo sencillo de comprender es un aire acondicionado automático que se enciende cuando sus sensores detectan que la temperatura ambiente es menor o mayor a la temperatura deseada.

Un agente inteligente es una entidad con una estructura interna especializada y una conducta flexible e indepen-

diente que podemos calificar como inteligente. Inicialmente, los agentes perciben su ambiente mediante sensores, cuentan con un “estado interno” que les permite recordar y relacionar lo percibido con ideas preconcebidas o conocimientos adquiridos, y toman decisiones y actúan sobre el ambiente, por medio de efectores (acciones) [1]. En muchas ocasiones, sus acciones están basadas en sus metas u objetivos, en función de los cuales tomara la “decisión más adecuada” dependiendo del conjunto de percepciones del ambiente.

Las acciones que puede tomar el agente se ven afectadas por las diferentes propiedades del ambiente, pudiendo ser este accesible, estático o dinámico, determinista, discreto o continuo, episódico. Los agentes poseen diversas propiedades según el propósito que deban alcan-

zar [3]:

- **Reactivo:** Responde inmediatamente a cambios en el ambiente.
- **Pro-Activo:** Debe ser capaz de intentar cumplir sus propios planes y objetivos a pesar de cambios en el ambiente.
- **Autónomo:** Tiene control sobre sus acciones, posee inteligencia para la toma de decisiones. Sus acciones son Orientadas al cumplimiento de metas y no actúa en respuesta al ambiente, sino que sigue un plan para alcanzar su propósito.
- **Comunicativo:** Tienen la habilidad de trabajar socialmente con otros agentes sociables para alcanzar un objetivo en común mucho más complejo.
- **Adaptativo:** Si puede cambiar su comportamiento basado en ese aprendizaje y a sus experiencias.
- **Flexible:** Sus acciones no están determinadas de ante mano.
- **Cooperativo:** Está dispuesto a colaborar con otros agentes si esto no entra en conflicto con sus propios objetivos.
- **Racional:** Siempre realiza lo “correcto” a partir de los datos que le llegan de su entorno.
- **Veracidad:** Agente que no comunica información falsa a propósito.

Según su clase, los agentes inteligentes pueden ser clasificados como [1]:

- **Agentes colaborativos:** Este tipo de agentes se enfatiza en la autonomía y las habilidades sociales con otros agentes para ejecutar las tareas de sus usuarios. Son capaces de actuar racionalmente y autónomamente en ambientes multiagente y con restricciones de recursos. A su vez, poseen habilidades sociales, son proactivos, benévolo, estáticos y veraces.
- **Agentes de Interface:** Los agentes de interfaz se enfatizan en la autonomía y la adaptabilidad para realizar tareas a sus usuarios. Este tipo de agentes básicamente presta soporte y asistencia a un usuario que está aprendiendo una nueva aplicación o nuevos conceptos.
- **Agentes móviles:** Estos agentes se enfatizan en las habilidades sociales y la autonomía, a diferencia de los agentes cooperativos, estos son móviles. Algunas de las ventajas que se pueden obtener al usar agentes móviles son la reducción del costo de comunicación, facilidad de coordinación, reducción de los recursos locales, etc.

- **Agentes de información:** Los agentes de información nacieron debido a la gran cantidad de herramientas que surgieron para el manejo y recuperación de información. Tienen los roles de manejar, manipular, e integrar información de muchas fuentes de datos distribuidas.

Los Sistemas Multiagentes

Los Sistemas Multiagentes cooperativos son una combinación de sistemas distribuidos e inteligencia artificial, y se conocen también como inteligencia artificial distribuida (IAD). Se divide en dos áreas que son los problemas de solución distribuida y los sistemas multiagentes (SMA). Los Sistemas Multiagentes (SMA) intentan lograr la cooperación de un conjunto de agentes autónomos para la realización de una tarea, la cual depende de las interacciones entre los agentes e incorpora tres elementos: la colaboración, la coordinación y la resolución de conflictos. En un entorno multiagente hay más de un agente interactuando entre ellos cumpliendo las reglas, y no necesariamente un agente conoce el estado interno de otro agente [2].

Se definen 3 tipos de aprendizaje [2]:

- **Supervisado:** El control provee el aprendizaje correcto.
- **Sin supervisión:** Se realiza sin contar con retroalimentación.
- **Basado en el reconocimiento:** El control provee la calidad.

En el aprendizaje en equipo, hay un solo estudiante, pero éste va descubriendo un conjunto de comportamientos para un equipo de agentes, en lugar de un solo agente. Esta noción es a menudo denominada complejidad emergente del sistema multiagente.

El aprendizaje en equipo es un método fácil de aprendizaje multiagente, ya que su único aprendiz puede utilizar técnicas de aprendizaje automático. Esto deja de lado las dificultades derivadas de la coadaptación de varios aprendices que más tarde se encontrarán en enfoques de aprendizaje concurrentes.

Otra ventaja es su preocupación por el rendimiento de todo el equipo, y no con la de los agentes individuales. Por esta razón, los enfoques de aprendizaje en equipo pueden pasar por alto en la asignación de beneficios a los agentes, que suele ser difícil de calcular.

Un problema del aprendizaje en equipo son los grandes tiempos para el proceso de aprendizaje y una segunda desventaja es la centralización del algoritmo de aprendizaje: todos los recursos tienen que estar disponibles en el lugar único que se realizan todos los cálculos.

Este aprendizaje en equipo se puede dividir en tres categorías [1]:

- **Aprendizaje Homogéneo en Equipo.-** Todos los agentes tienen comportamientos idénticos, a pesar de no ser idénticos, es decir diferentes agentes pueden tomar una cantidad diferente de tiempo para completar la misma tarea. Debido a que todos los agentes tienen el mismo comportamiento, el espacio de búsqueda para el proceso de aprendizaje se reduce drásticamente. La idoneidad de aprendizaje homogéneo depende del problema: algunos problemas no requieren agentes especializados para lograr un buen rendimiento.
- **Aprendizaje Heterogéneo en Equipo.-** En el aprendizaje heterogéneo en equipo, el equipo se compone de agentes con diferentes comportamientos, con un solo aprendiz tratando de mejorar el equipo en su conjunto. Este enfoque permite una mayor diversidad en el equipo y aumentar el espacio de búsqueda. Para dominios de problemas que tienen un gran número de agentes como enjambres, la búsqueda del espacio es demasiado grande para utilizar el aprendizaje heterogéneo, aunque la heterogeneidad en última instancia permite obtener los mejores resultados.
- **Aprendizaje Híbrido en Equipo.-** En el aprendizaje híbrido del equipo, el conjunto de los agentes se divide en varias escuadras, con cada agente perteneciendo a un solo equipo. Todo agente de un escuadrón tiene el mismo comportamiento. Un extremo es tener un solo equipo, lo cual es equivalente a utilizar un aprendizaje en equipo homogéneo, mientras que el otro extremo es tener un agente por cada equipo, que es equivalente a utilizar aprendizaje en equipo heterogéneo. El aprendizaje híbrido del equipo permite lograr algunas de las ventajas de cada método.

Aprendizaje concurrente

La alternativa más común de equipo de aprendizaje en sistemas multiagentes cooperativos es el aprendizaje simultáneo, donde múltiples procesos de aprendizaje intentan mejorar partes del equipo. Por lo general cada agente tiene su propio proceso único de aprendizaje para modificar su comportamiento. Tanto el aprendizaje concurrente como el aprendizaje en equipo tienen sus ventajas y desventajas [1, 2].

La ventaja principal es que el problema se puede descomponer para permitir comportamientos de agentes individuales relativamente disjuntos, entonces puede resultar en una reducción dramática del espacio de búsqueda y en la complejidad computacional. Una segunda ventaja, es la ruptura del proceso de aprendizaje en pedazos más pequeños que permiten una mayor flexibilidad en el uso de recursos computacionales para aprender cada proceso, ya que aprende independientemente uno de otro.

El desafío central para el aprendizaje concurrente es que cada alumno adaptan sus comportamientos en el contexto del otro, coadaptando los alumnos sobre los que no tiene control.

Asignación de Prestigio

Cuando se trabaja con múltiples aprendices, se debe repartir la recompensa de prestigio o beneficios a través de las acciones conjuntas. La solución más sencilla es dividir la recompensa por igual entre cada uno de los aprendices. Este enfoque de asignación de crédito por lo general se denomina recompensa global [2].

Sin embargo hay situaciones en las que podría ser deseable asignar prestigio de una manera diferente, ya que es más útil recompensar especialmente a aquellos aprendices que realizaron la tarea o cumplieron sus acciones, y castigar a otros por pereza.

Un escenario completamente cooperativo emplea un programa de beneficios global para repartir en partes iguales entre todos los agentes. Después de cada interacción, cada agente puede recibir alguna recompensa o castigo. Los refuerzos para las interacciones son independientes de cualquier interacción anterior.

La asignación de incentivos compartidos de manera desigual puede resultar distinto del incentivo de aumento de la recompensa de todos sus compañeros de equipo, y puede crear escenarios no cooperativos.

El modelado de compañero de equipo consiste en aprender acerca de otros agentes del entorno, a fin de hacer buenas conjeturas de su comportamiento esperado, y actuar en consecuencia.

La dinámica del aprendizaje

Al aplicar experimentos con aprendizaje de un solo agente para entornos estacionarios, los agentes con diferentes comportamientos esperan descubrir un comportamiento óptimo a nivel general. En entornos dinámicos, el agente trata de mantenerse actualizado a los cambios y en constante seguimiento del comportamiento óptimo [2].

Es más complicado en los sistemas multiagente, donde los agentes pueden cambiar de forma adaptativa los entornos de aprendizaje de los demás. La gama de herramientas para modelar y analizar la dinámica de los aprendices concurrentes es muy limitada, muchas son especializadas solo para algunos métodos de aprendizaje, y sólo unas pocas ofrecen un marco común para múltiples técnicas de aprendizaje.

Aprendizaje y comunicación

Para algunos problemas la comunicación es una necesidad, mientras que para otros la comunicación puede aumentar el rendimiento del agente. Definimos la comunicación como la alteración de la situación del entorno tal que otros agentes puedan percibir la modificación y decodificar la información.

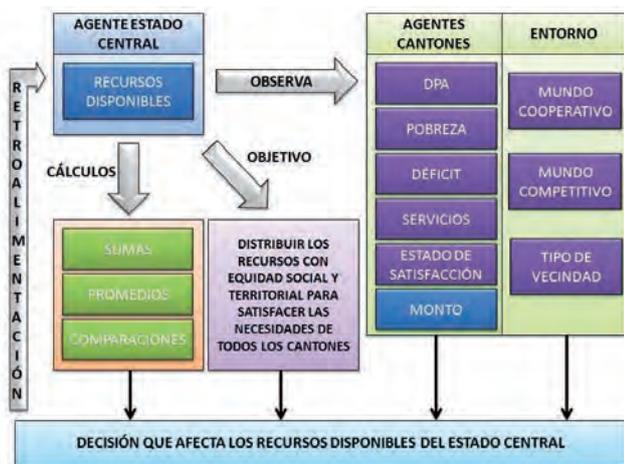


Figura 1: Agente Inteligente del Estado Central

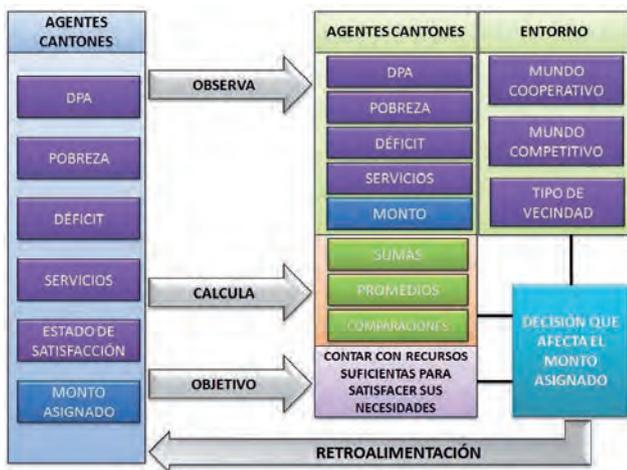


Figura 2: Agente Inteligente de los Municipios

Entre otras razones, los agentes se comunican con el fin de coordinar de forma más efectiva y para aprender soluciones parciales el uno del otro.

- **Comunicación Directa.-** Muchas de las técnicas emplean comunicación entre los agentes, lo cual permite compartir información entre sí [2]. La comunicación directa consiste en la emisión de mensajes entre los agentes que son entendibles para ambos en un mismo protocolo, y puede estar limitada en términos de rendimiento, latencia, localidad, clase de agente.
- **Comunicación Indirecta.-** Definimos métodos de comunicación indirectos como los que implican la transferencia implícita de información entre agentes a través de la modificación del entorno. La comunicación indirecta incluye: huellas en la nieve, rastro de migas, feromonas y sugerencias a través de la colocación de objetos en el entorno[2].

El trabajo conjunto de los agentes multiagentes en una tarea grande que puede ser abrumadora. Una manera de hacer frente a esto es usar el conocimiento del dominio para simplificar el espacio de estados, a menudo proporcionando un conjunto más pequeño de acciones más

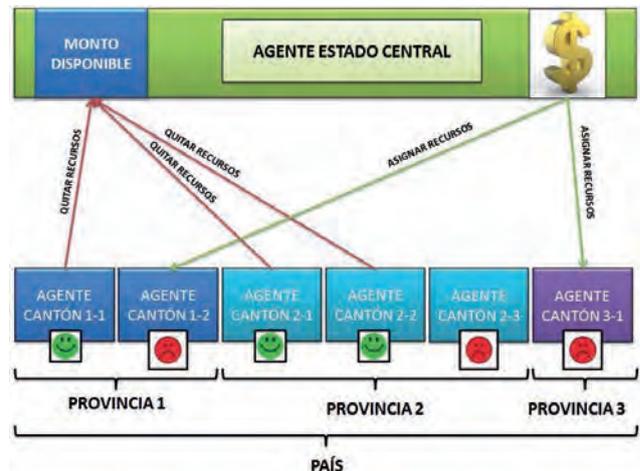


Figura 3: Relación entre el Agente Estado y los Agentes Municipios

poderosos hechas a medida para el dominio del problema.

Aplicaciones de los agentes inteligentes

- **Agentes con cuerpo.-** Búsqueda de alimento, robots para movimiento de cajas, fútbol robótico, navegación cooperativa, observación cooperativa del destino, reunión de robots [1, 4].
- **Entornos de teoría de juegos.-** Juegos de coordinación, dilemas sociales.
- **Aplicaciones del mundo real.-** Monitoreo distribuido de vehículos, control de tráfico aéreo, administración de redes y rutas, administración de distribución de energía eléctrica, supervisión médica, asistencia financiera, cadenas productivas, problemas de jerarquía de sistemas multiagentes, modelos de interacción social, asignación de horarios y tareas.

Aplicaciones

Para aplicar la teoría de agentes inteligentes en la asignación, negociación y redistribución de los recursos que el Estado Central otorga a los gobiernos municipales, debemos definir adecuadamente los dos tipos de agentes involucrados: agente Estado Central y agentes Gobiernos Municipales. La figura 1 muestra la estructura del agente Estado Central, mientras que la figura 2 muestra la estructura de los agentes Gobiernos Municipales:

Adicionalmente es necesario explicar la interacción entre los Gobiernos Municipales y el Estado Central, así como la relación que existe entre ellos. La figura 3 muestra la relación e interacción entre el agente Gobierno Central y los agentes Gobiernos Municipales.

El Aplicativo en NetLogo

El Aplicativo está desarrollado en el lenguaje NetLogo [4], el mismo que contiene un mapa del Ecuador, donde se muestra el estado de cada municipio. En la parte izquierda se encuentran los botones que dan paso a los

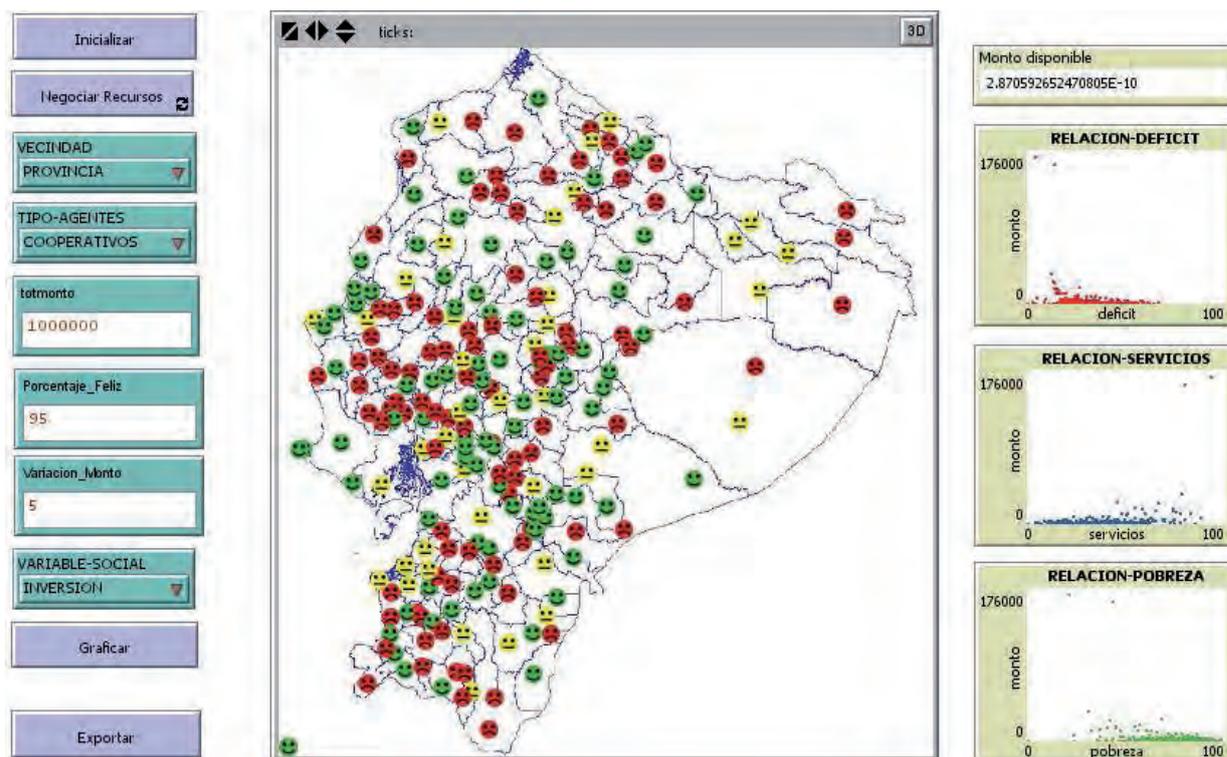


Figura 4: Ambiente de Simulación

llamado de las funciones: inicializar, negociar recursos, graficar y exportar los datos.

Adicionalmente se encuentran como selectores: La vecindad y el tipo de agentes. Finalmente se encuentran tres cuadros de ingreso de texto, donde se incluyen los recursos que se asignarán, el porcentaje de municipios que deben estar satisfechos para que converja, y el porcentaje que se retira a los municipios felices para volver a repartir a los que no están felices.

Del lado derecho, encontramos un monitor de texto que muestra el monto disponible, luego encontramos 3 gráficos pequeños que muestran la relación entre el monto asignado y las variables sociales utilizadas. Además un gráfico más grande que muestra las series del número de cantones según su estado. Es fácil visualizar que este gráfico mantiene correspondencia con los colores del mapa. (Ver Figura 4).

Lo primero que haremos es plantear un nuevo agente denominado cantón, y hacemos que el grupo de todos los agentes se denomine cantones. A estos cantones los dotamos de características internas propias: pobreza, déficit de vivienda, acceso a servicios, número de viviendas.

Entonces, puesto que deseamos que la simulación realizada nos ofrezca la información necesaria para tomar decisiones, basamos la simulación en cifras obtenidas del Censo de Población y Vivienda 2010 a nivel de cantones.

Se plantea que se ingrese el monto de recursos económicos que se asignarán, se selecciona el tipo de vecindad entre provincia y país, y se plantea que se elija si los agentes son de tipo competitivo o cooperativo.

Si se elige que la vecindad sea el país, cada agente se comparará de acuerdo a las variables sociales con los demás del país, mientras que si se elige provincia, la comparación se realizará entre cantones de la misma provincia.

Si los agentes son de tipo competitivo, cada agente desea su propio bienestar, mientras que los agentes de tipo cooperativo manifiestan su inconformidad si considera que se le han asignado más recursos que lo que cree que se merece.

Adicionalmente el aplicativo muestra el diagrama de puntos de las variables de pobreza vs. monto asignado, déficit de vivienda vs. monto asignado, acceso a servicios vs. monto asignado, y grafica la serie del número de cantones que están satisfechos o insatisfechos. En el mapa también es posible observar la distribución territorial de las variables sociales, considerando tres categorías o estados que toman los agentes.

Los Estados de los Agentes

Los Estados que toman los agentes inteligentes dependen de las comparaciones que el agente realiza [1], acerca de cómo se percibe así mismo y cómo percibe sus vecinos, con respecto a alguna variable en particular. Para ello comparamos el valor que posee dicho agente, con el valor promedio de acuerdo con la vecindad elegida. En el caso particular en que se grafican los estados de las variables sociales utilizadas por sí mismas, se utilizan las categorías mostradas en la tabla 1.

Al llevar a cabo la simulación deseada, el agente que representa el Gobierno Autónomo Descentralizado Muni-

Variable	Estado	Inferior	Superior
Déficit de Vivienda	Contento	0	30
	Neutral	30	50
	Descontento	50	100
Acceso a Servicios	Contento	70	100
	Neutral	40	70
	Descontento	0	40
Necesidades Básicas Insatisfechas	Contento	0	40
	Neutral	40	70
	Descontento	70	100

Tabla 1: Rangos de los Estados (categorías) de las variables sociales utilizadas.

principal, utiliza una variable social (aunque podría tomarse un conjunto de variables en una función o modelo), la cual es utilizada para compararse con sus vecinos (otros cantones o municipios). En este caso, una vez que se ha elegido la vecindad que se utilizará (a nivel nacional o provincial), aunque podría ser una vecindad zonal o regional, o simplemente mediante vecinos geográficos, sin importar si pertenecen o no a la misma provincia.

De este modo, las variables sociales juegan un rol muy importante en la simulación de agentes planteada[5], y que identifican a un municipio asignándole un valor que permitirá su comparación con otros agentes.

Es importante señalar que el estado del agente cambia de acuerdo con las reglas, y posteriormente influye en la redistribución de los recursos si considera que se le quitarán recursos a los agentes con estado contento y se asignarán entre los agentes con estado descontento [6].

Los tres estados utilizados son: Contento, Descontento y Neutral. Cuando el tipo de agentes que se utiliza son competitivos, aparecen solamente dos estados: Contento - Si el agente está satisfecho con los recursos recibidos, y Descontento - Si el agente considera que no está satisfecho con los recursos que le fueron asignados.

De la misma manera al utilizar los agentes de tipo cooperativo, pero aparece un tercer estado, en el cual cada agente puede considerar que los recursos que se le han asignado son más que los necesarios, y que hay otros agentes que necesitan más recursos.

Las Reglas de comparación y transición

Las principales reglas que se utilizan en la presente simulación a fin de lograr una transición de los estados de todos los agentes son las siguientes:

Sea M_i : El monto de recursos económicos asignado al agente (cantón) i .

Sea X_i : El valor que toma la variable social del agente (cantón) i .

Sea \bar{M} : El monto de recursos económicos que tiene en promedio de la vecindad.

Sea \bar{X} : El valor promedio que toma la variable social en la vecindad.

Si $X_i < \bar{X}$ y $M_i < \bar{M} \Rightarrow E_i = -1$ (Descontento).

Si $X_i < \bar{X}$ y $M_i \geq \bar{M} \Rightarrow E_i = +1$ (Contento).

Si $X_i \geq \bar{X}$ y $M_i \geq \bar{M} \Rightarrow E_i = 0$ (Neutral).

Se observan 3 reglas básicas que de manera clara permiten tomar decisiones a los agentes acerca de su estado de ánimo. Para el caso particular de nuestra simulación estas 3 reglas son aplicadas a cada una de las variables sociales utilizadas: Pobreza, Déficit de Vivienda, Acceso a Servicios de Agua y Alcantarillado. De este modo tenemos un total de 9 reglas de transición para los agentes.

Para el modelo de simulación utilizado, cada agente se aferra a una de las variables sociales, sin embargo, podrían establecerse dos variantes en la simulación: la primera variante consiste en utilizar una combinación de las variables sociales en lugar de una sola variable, y la segunda variante es que el agente no se aferra a dicha variable, sino que en cada iteración pueda cambiar la variable mediante la cual realiza sus comparaciones, o pueda elegir otra combinación de las mismas.

Algoritmo

El algoritmo básico que se ejecuta en un sistema Multiagentes con aprendizaje supervisado para la presente negociación, mientras no haya convergencia o un punto de parada, considera para cada agente:

- El análisis de la percepción que éste tiene sobre su entorno y de otros agentes y sobre sí mismo.
- La comparación de sí mismo con otros agentes.
- El estado de ánimo del agente luego de compararse.

En este sentido, se ha considerado el siguiente algoritmo:

Sea Monto: el Monto total Disponible.

Sea n : el número de cantones.

Sea m : el número de variables.

Sea C_i : el i -ésimo Cantón.

Sea E_i : el Estado anímico del Cantón k .

Sea P : la población total del País.

Sea P_i : la población del Cantón C_i .

Sea C_{ij} : el valor que toma j -ésima variable en el i -ésimo Cantón

Sea M_i : el monto asignado al Cantón i .

Sea r : la variable a la que se aferra el Cantón C_i

La j -ésima variable es una variable social, o la DPA o los montos iniciales asignados.

INICIALIZAR LOS CANTONES

Para $i \leftarrow 1$ a n

Para $j \leftarrow 1$ a m

$C_{ij} \leftarrow CPV2010_{(i,j)}$ // Valor del Censo 2010

Fin_para

$M_i \leftarrow Monto * P_i / P$ // La asignación inicial se realiza por el tamaño de la población

$Monto \leftarrow Monto - M_i$

$r \leftarrow j / \min(C_{ij})$ // Se aferra a la variable que más lo representa.

Fin_Para

CONVERGENCIA

CALCULAR SI EXISTE CONVERGENCIA

$cont \leftarrow 0$

Para $k \leftarrow 1$ a n

Si $(E_k = 1)$ entonces // Estado contento es 1

$cont \leftarrow cont + 1$

Fin_Si

Fin_Para

Si $(cont/n \geq 0,95)$ entonces

$Converge \leftarrow Verdadero$

Sino

$Converge \leftarrow Falso$

Fin_si

COMPARA SI HA CONVERGIDO Y REALIZA LAS ACCIONES

Mientras (Converge = Falso) hacer

COMPARARSE CON OTROS CANTONES RESPECTO A LA VARIABLE Y AL MONTO ASIGNADO

Para $i \leftarrow 1an$

DESCONTO SI EL AGENTE PERCIBE QUE HA RECIBIDO POCO

Si $(C_{ij} < \bar{C}_r) \wedge (M_i < \bar{M})$ entonces

$E_i \leftarrow -1$ //Estado descontento

Fin_Si

CONTENTO SI EL AGENTE PERCIBE QUE HA RECIBIDO SUFICIENTE

Si $(C_{ij} < \bar{C}_r) \wedge (M_i \geq \bar{M})$ entonces

$E_i \leftarrow +1$ //Estado contento

Fin_Si

NEUTRAL SI EL AGENTE PERCIBE QUE OTRO DEBÍA RECIBIR MÁS AUNQUE PARA SÍ MISMO ES SUFICIENTE

Si $(C_{ij} > \bar{C}_r) \wedge (M_i \geq \bar{M})$ entonces

$E_i \leftarrow 0$ //Estado neutral

Fin_Si

Fin_Para

QUITAR RECURSOS A LOS CONTENTOS Para $i \leftarrow 1an$

Si $(E_i \neq -1)$ entonces

$Monto \leftarrow Monto + 0,01 * M_i$

$M_i \leftarrow M_i - 0,01 * M_i //0,01$ es un porcentaje que podría variar

Fin_Si

Fin_Para

REDISTRIBUIR LOS RECURSOS A LOS DESCONTENTOS Para

$i \leftarrow 1an$

Si $(E_i = -1)$ entonces

$M_i \leftarrow M_i + Monto * C_{ir}/C_r$

$Monto \leftarrow Monto - Monto * C_{ir}/C_r$

Fin_Si

Fin_Para

Fin_Mientras

La negociación se da al compararse con otros cantones mostrando su descontento, y posteriormente al redistribuirse los recursos. Es importante destacar que al compararse afecta el hecho que la vecindad elegida sean todos los cantones del país o sean los cantones de la provincia.

Adicionalmente se debe destacar que cuando se elige el tipo de agentes cooperativos, el algoritmo se modifica con un estado adicional, este estado adicional indica que al cantón se le ha entregado más recursos de los que el agente considera que merece.

Resultados

Consideraciones Generales

Para todas las simulaciones que se realizan en el presente documento, se asigna desde el Estado Central hacia los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales 1 millón de dólares. Se considera una convergencia de al menos 95 % de municipios satisfechos, y el monto asignado a los municipios satisfechos se disminuye en un 5 % para volver a asignarlo a los municipios que no están satisfechos.

Para cada simulación se realiza el ejercicio 5 veces con cada escenario o configuración de los parámetros, y luego de ello se muestra una tabulación de los promedios de los resultados obtenidos:

- Simulación con el Escenario 1: Vecindad País y Agentes Competitivos.
- Simulación con el Escenario 2: Vecindad País y Agentes Cooperativos

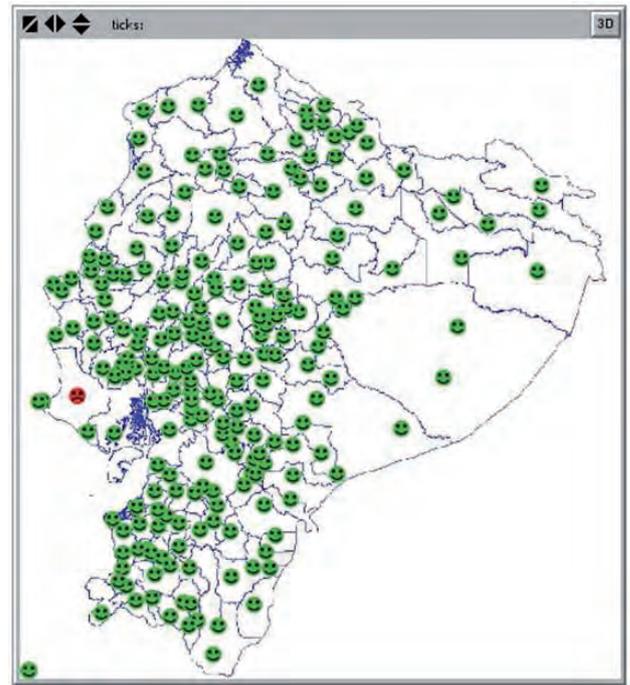


Figura 5: Resultados de una corrida del escenario 1

- Simulación con el Escenario 1: Vecindad Provincia y Agentes Competitivos.
- Simulación con el Escenario 2: Vecindad Provincia y Agentes Cooperativos

Simulación con el Escenario 1: Vecindad País y Agentes Competitivos

Como se observa en la figura 5, al final de la simulación se observa que casi todos los municipios se encuentran contentos o satisfechos.

La figura 6 muestra que la simulación se realizó en 15 iteraciones hasta obtener la convergencia.

Como se observa en la figura 7, Los montos mayores de asignación se asignan en los municipios que tienen

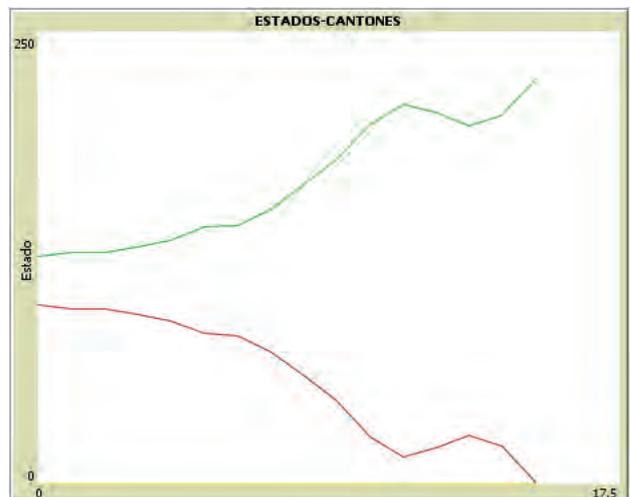


Figura 6: Curva de convergencia hacia la satisfacción con el escenario 1

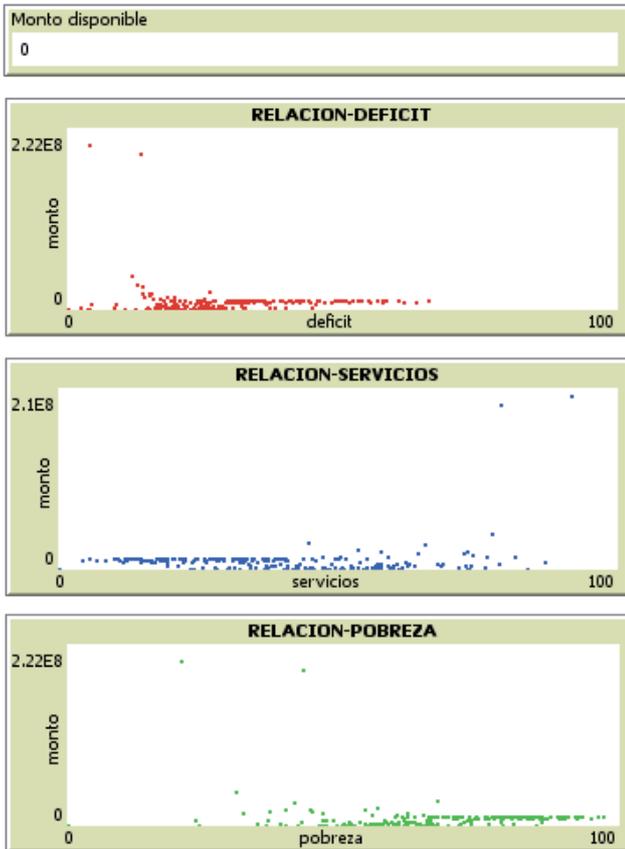


Figura 7: Relación de la asignación de recursos con las variables sociales

menor acceso a servicios, mayor déficit y mayor pobreza. Se observa también que dos municipios reciben una cantidad mayor de recursos de manera atípica, alrededor de 85.000.

Resumen de las corridas del escenario 1

Luego de haber realizado cinco corridas del escenario 1: vecindad País con agentes competitivos, se comprueba la aleatoriedad en las simulaciones de negociación realizadas, en este punto es necesario recordar que el agente eligió aleatoriamente una de las variables sociales, con la que se siente identificado, y a partir de dicha variable realizó las negociaciones.

Es importante observar que en el escenario 1 siempre hubo convergencia, el número de iteraciones realizadas hasta lograr la convergencia mostro como mínimo 13 y como máximo 15 iteraciones. Obsérvese también que los recursos asignados en todos los casos están correlacionados con todas las variables sociales, a pesar que cada municipio se aferra únicamente a una de las variables sociales, lo que significa que las variables sociales están altamente correlacionadas.

El número de municipios descontentos en cada una de las corridas fue de: 1, 10, 2, 2, 11 respectivamente. Dando en promedio 5.6 municipios descontentos. Lo que en promedio nos da un 2.3 % de municipios descontentos.

En general los recursos comienzan a repartirse de manera equitativa con respecto a las variables sociales asociadas, pero en dos municipios con alto nivel de población

predomina la misma, incluso antes que las variables sociales. Se asigna alrededor de un 10 % de los recursos a Guayaquil, un 8 % a Quito y el 82 % es repartido entre el resto del País.

Simulación con el Escenario 2: Vecindad País y Agentes Cooperativos

Como se observa en la figura 8, al final de la simulación casi todos los municipios se encuentran contentos o satisfechos, excepto un 5 %.

La figura 9 muestra que la simulación se realizó en 11 iteraciones hasta obtener la convergencia.

Adicionalmente, la figura 10 muestra que los montos mayores de asignación se asignan en los municipios que tienen mayor déficit de vivienda y mayor pobreza. Se observa también que dos municipios reciben una cantidad mayor de recursos de manera atípica, alrededor de 100.000.

Resumen de las corridas del escenario 2

Luego de haber realizado cinco corridas del escenario 2: vecindad País con agentes cooperativos, se comprueba la aleatoriedad en las simulaciones de negociación realizadas, en este punto es necesario recordar que el agente eligió aleatoriamente una de las variables sociales con la cual se siente identificado y a partir de dicha variable realizó las negociaciones. Adicionalmente, los agentes que consideran haber recibido de más están dispuestos a dar recursos a otros.

Es importante observar que en el escenario 2 siempre hubo convergencia, el número mínimo de iteraciones realizadas fue 10 y el máximo fue 14 iteraciones. Obsérvese también que los recursos asignados en todos los

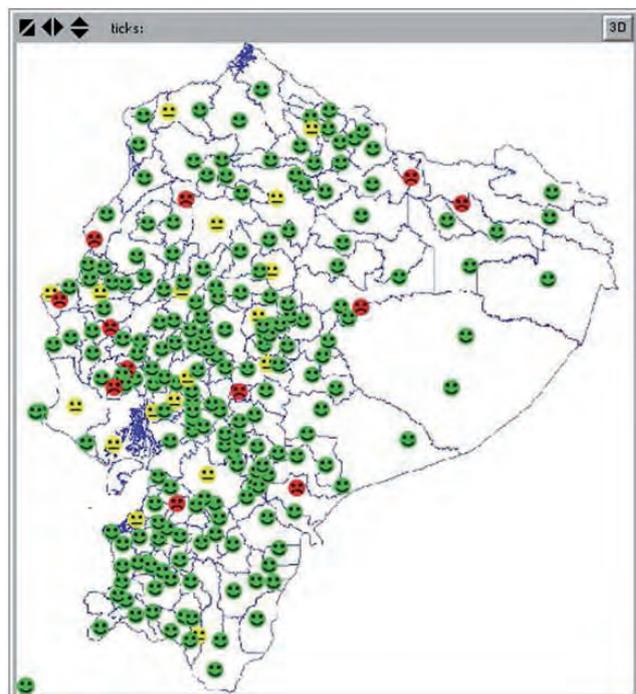


Figura 8: Resultados de una corrida del escenario 2

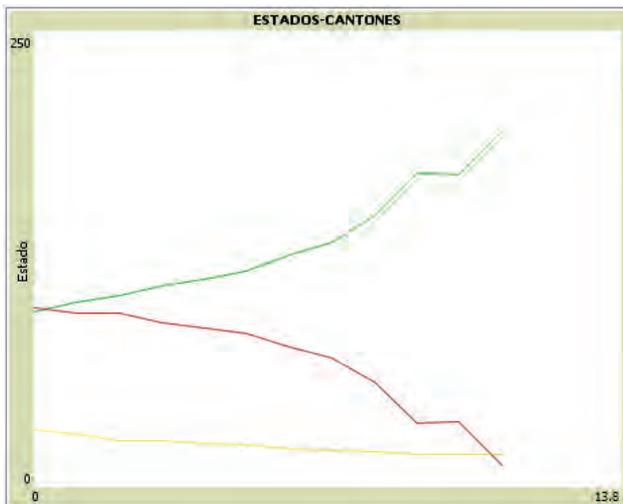


Figura 9: Curva de convergencia hacia la satisfacción con el escenario 2

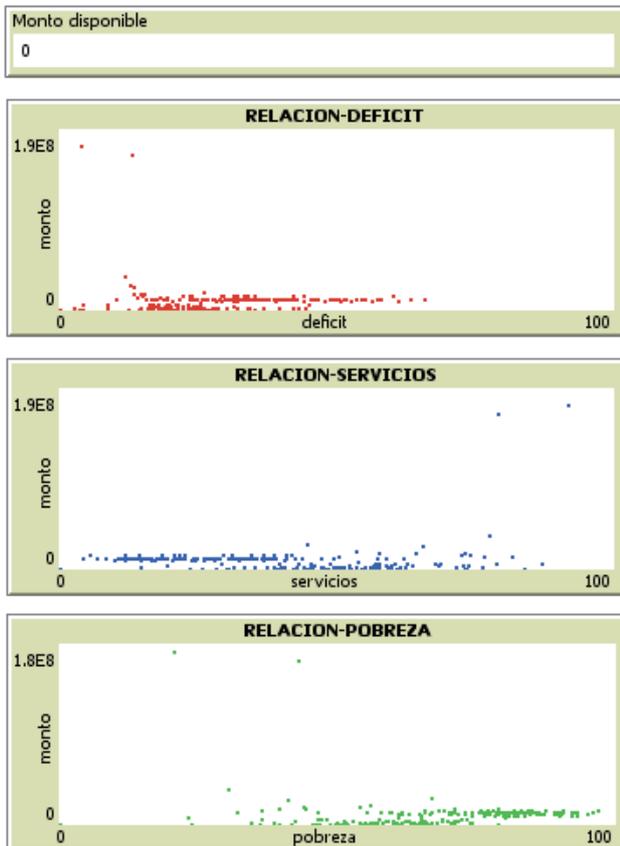


Figura 10: Relación de la asignación de recursos con las variables sociales

casos están altamente correlacionados con todas las variables sociales, a pesar que cada municipio se aferra únicamente a una de las variables sociales, lo que significa que las variables sociales están altamente correlacionadas.

El número de municipios descontentos en cada una de las corridas fue de: 5, 0, 2, 10 y 5 respectivamente. Dando en promedio 4.4 municipios descontentos. Lo que en promedio nos da un 1.9 % de municipios descontentos. Aspecto que mejora con relación a lo sucedido en el escenario 1.

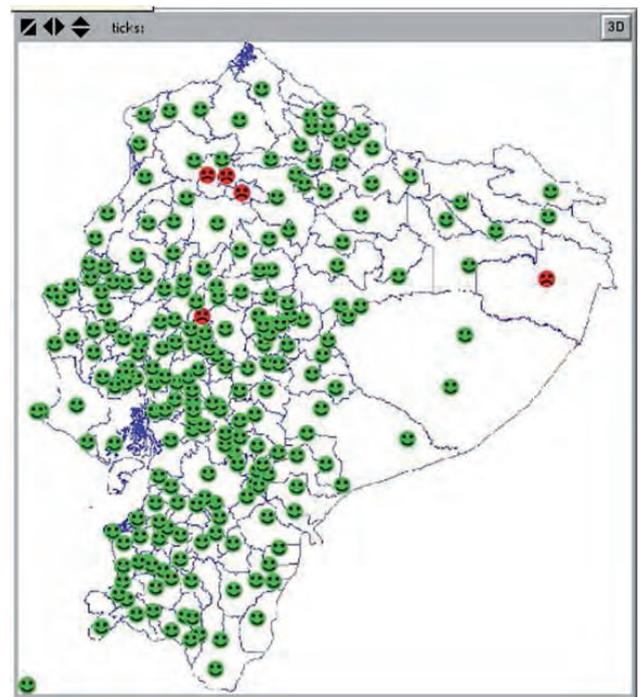


Figura 11: Resultados de una corrida del escenario 3

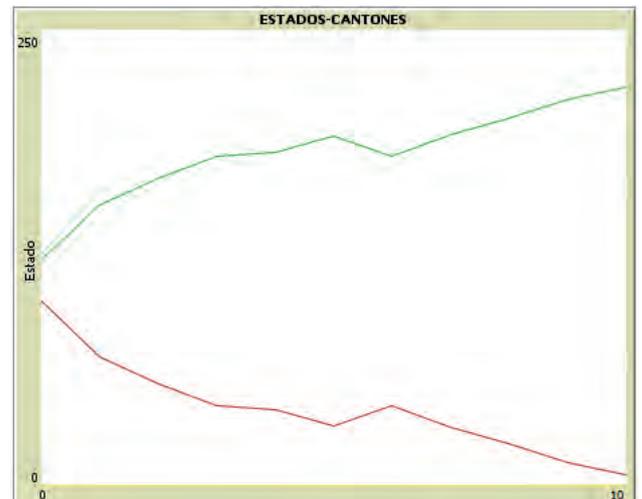


Figura 12: Curva de convergencia hacia la satisfacción con el escenario 3

Simulación con el Escenario 3: Vecindad Provincia y Agentes Competitivos

Como se observa en la figura 11, al final de la simulación casi todos los municipios se encuentran contentos o satisfechos, excepto 5 municipios.

La figura 12 muestra que la simulación se realizó en 10 iteraciones hasta obtener la convergencia.

Adicionalmente, la figura 13 muestra que los montos mayores de asignación se asignan en los municipios que tienen menor acceso a servicios y mayor pobreza. Se observa también que dos municipios reciben una cantidad mayor de recursos de manera atípica, alrededor de 75.000.

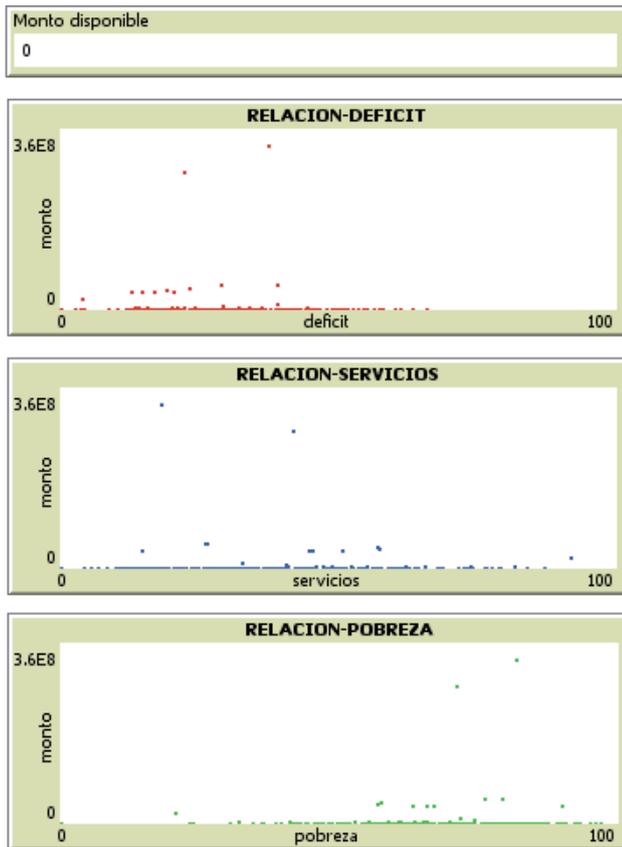


Figura 13: Relación de la asignación de recursos con las variables sociales

Resumen de las corridas del escenario 3

Luego de haber realizado cinco corridas del escenario 3: vecindad Provincia con agentes competitivos, se comprueba la aleatoriedad en las simulaciones de negociación realizadas, en este punto es necesario recordar que el agente eligió aleatoriamente una de las variables sociales con la cual se siente identificado y a partir de dicha variable realizó las negociaciones. Adicionalmente, los agentes se comparan solamente con los cantones ubicados dentro de su misma provincia.

Es importante observar que en el escenario 3 siempre hubo convergencia, el número mínimo de iteraciones realizadas fue 10 y el máximo fue 15 iteraciones. Obsérvese también que los recursos asignados en todos los casos están altamente corelacionados con todas las variables sociales, a pesar que cada municipio se aferra únicamente a una de las variables sociales, lo que significa que las variables sociales están altamente corelacionadas.

El número de municipios descontentos en cada una de las corridas fue de: 5, 10, 12, 11 y 10 respectivamente. Dando en promedio 9.6 municipios descontentos, lo que en promedio nos da un 4.2 % de municipios descontentos. Que se encuentra por debajo del 5 % planteado.

Simulación con el Escenario 4: Vecindad Provincia y Agentes Cooperativos

Como se observa en la figura 14, al final de la simulación casi todos los municipios se encuentran contentos

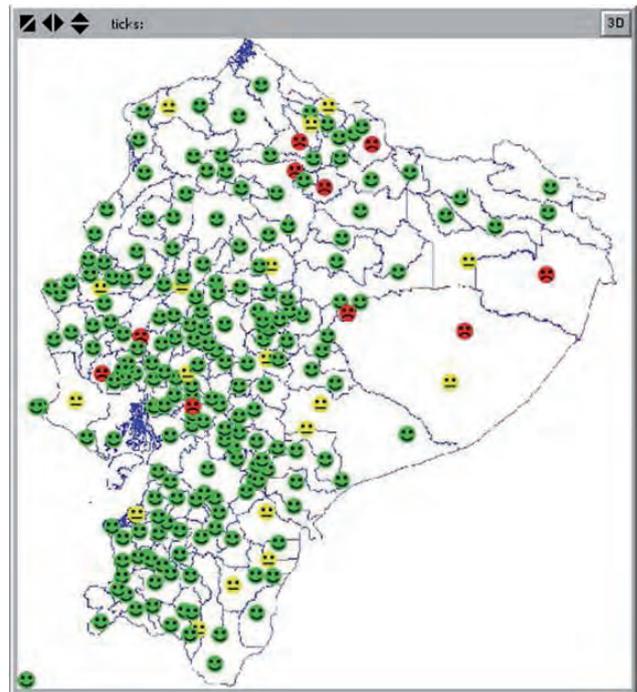


Figura 14: Resultados de una corrida del escenario 4

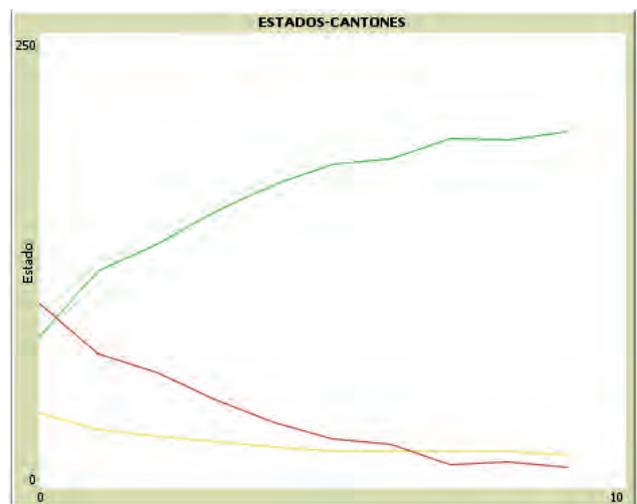


Figura 15: Curva de convergencia hacia la satisfacción con el escenario 4

o satisfechos, excepto un 5 %.

La figura 15 muestra que la simulación se realizó en 9 iteraciones hasta obtener la convergencia.

Adicionalmente, la figura 16 muestra que los montos mayores de asignación se asignan en los municipios que tienen menor acceso a servicios y mayor pobreza. Se observa también que dos municipios reciben una cantidad mayor de recursos de manera atípica, alrededor de 25.000.

Resumen de las corridas del escenario 4

Luego de haber realizado cinco corridas del escenario 4: vecindad Provincia con agentes cooperativos, se comprueba la aleatoriedad en las simulaciones de negociación realizadas, en este punto es necesario recordar que

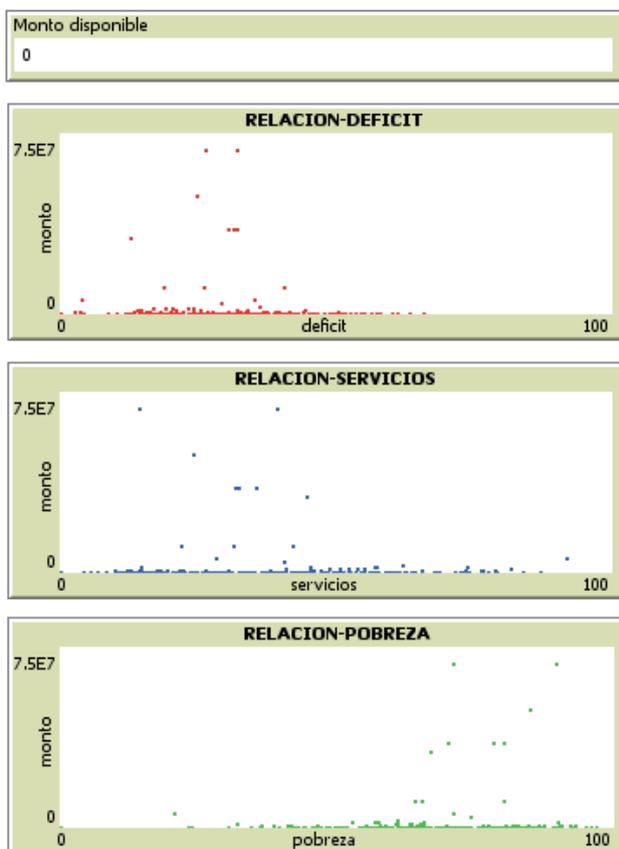


Figura 16: Relación de la asignación de recursos con las variables sociales

el agente eligió aleatoriamente una de las variables sociales, con la que se siente identificado, y a partir de dicha variable realizó las negociaciones.

Adicionalmente en este escenario las comparaciones se hicieron con los municipios de la misma provincia, y los agentes que consideraban que habían recibido más recursos que los que necesitaban manifestaron su descontento neutral.

Es importante observar que en el escenario 4 siempre hubo convergencia, el número de iteraciones realizadas hasta lograr la convergencia mostro como mínimo 8 y como máximo 16 iteraciones. Obsérvese también que los recursos asignados en todos los casos están correlacionados con al menos una de las variables sociales.

El número de municipios descontentos en cada una de las corridas fue de: 10, 10, 11, 11, 11 respectivamente. Dando en promedio 10.6 municipios descontentos, lo que en promedio nos da un 4.7 % de municipios descontentos.

Utilizando estos parámetros, la simulación utiliza la población de la provincia para asignar los recursos, y luego se reparten entre los municipios de dicha provincia con respecto a las necesidades expresadas en las variables sociales.

Conclusiones

- La asignación de recursos con equidad y satisfacción de todos los involucrados puede lograrse me-

diante la aplicación de una simulación con agentes inteligentes que tengan metas definidas, intereses comunes y capacidad de negociación.

- El lenguaje NetLogo presenta un ambiente apropiado de programación orientada a agentes inteligentes, permitiendo simular agentes que pueden tomar decisiones a partir de lo que perciben en otros agentes y en el mundo que se desarrolla la simulación.
- Se observa que la vecindad elegida para comparaciones y negociaciones afecta en los resultados obtenidos tanto en cantidad de iteraciones como en número de municipios descontentos en promedio, los tiempos de convergencia y la asignación de recursos.
- El tipo de agentes utilizados en la simulación (cooperativos o competitivos) también afecta en los resultados obtenidos, pero se observa que el estado descontento neutral, decrece rápidamente (amarillo) a pesar que considera que recibe más recursos de los esperados, ya que en todas las simulaciones se reduce a menos del 10 % (18 en promedio).
- La distribución de los recursos asignados al inicio de la simulación guarda relación con los el tamaño de la población, pero luego de las iteraciones hay una adaptación dirigida hacia las variables sociales, tal como se muestra en cada una de las corridas realizadas en los diferentes escenarios de simulación.
- La distribución de recursos más adecuada según la teoría se realizaría con vecindad provincial y con agentes de tipo cooperativos, pues, se observa que con esta definición de parámetros, los valores atípicos decrecen de forma notable, lo que significa que hubo mayor equidad en la distribución de los recursos.

Referencias

- [1] Mas, A. 2005. "Agentes software y sistemas multiagente: conceptos, arquitecturas y aplicaciones". *Prentice-Hall. 1a. Edición. Madrid-España.*
- [2] Panait, L.; Luke, S. 2005. "Cooperative multi-agent learning: The state of the art". *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems. Kluwer Academic Publishers*, 11(3):387-434.
- [3] Gilbert, N.; Troitzsch, K. 2014. "Simulation For The Social Scientist". *Open University Press. 2a. Edición. Berkshire-Inglaterra.*
- [4] Russell, J.; Cohn, R. 2012. "Netlogo". *Book on Demand. 1a. Edición. Madrid-España.*
- [5] Lahoz-Beltra, R. 2004. "Simulación, vida artificial e inteligencia artificial". *Ediciones Díaz de Santos. 1a. Edición. Madrid-España.*

- [6] Toffoli, T.; Margolus, N. 1987. "Cellular Automata Machines: A New Environment for Modeling (Scientific Computation)". *The MIT Press. 1a. Edición. Massachusetts.*

Implementing a convolution neural network for recognizing poses in images of faces Implementación de una red neuronal de convolución para el reconocimiento de poses en imágenes de rostros

Paul Méndez¹, Julio Ibarra^{1*}

¹Universidad San Francisco de Quito. Colegio de Ciencias e Ingenierías - Departamento de Matemáticas.
Diego de Robles y Vía Interoceánica, Cumbayá.

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

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

Recibido/Received: 14/03/2014. Aceptado/Accepted: 25/08/2014.

Publicado en línea/Published on Web: 19/12/2014. Impreso/Printed: 19/12/2014.

Abstract

Convolutional neural networks belong to a set of techniques grouped under deep learning, a branch of machine learning, which has proven successful in recent years in image and voice recording recognition tasks. This paper explores the use of deep convolutional neural networks in the recognition of horizontal poses outside the plane. We propose a convolutional neural network architecture based on OpenCV open source libraries for classification of images of human faces within seven default poses. We present in details the optimized design of our architecture and our learning strategy.

The classifier trained on a set of 2600 images of sizes: 33×33 , 41×41 , 65×65 y 81×81 , achieve an recognition rate of 85 %, higher than the 78 % achieved with the Eigenfaces algorithm, with nearly the same execution time.

Keywords. Convolutional neuronal network, deep neuronal networks, deep learning, machine learning, face recognition, face pose detection.

Resumen

Las redes neuronales de convolución pertenecen a un conjunto de técnicas agrupadas bajo el aprendizaje profundo, una rama del aprendizaje automático que ha probado ser exitosa en los últimos años en tareas de reconocimiento de imágenes y grabaciones de voz. El presente trabajo explora la utilización de las redes neuronales de convolución en el reconocimiento de imágenes de poses horizontales fuera del plano de rostros. Se propone una implementación basada en las bibliotecas de código abierto OpenCV para la clasificación de imágenes de rostros humanos dentro de 7 poses predeterminadas y se presenta en detalle la arquitectura de la red y la estrategia de aprendizaje.

La implementación entrenada con conjuntos de 2600 imágenes de cuatro tamaños: 33×33 , 41×41 , 65×65 y 81×81 , alcanza una tasa de aciertos promedio del 85 % superior a la obtenida con el algoritmo de Rostros Propios cercana al 78 %, con un tiempo de ejecución similar.

Palabras Clave. Red neuronal de convolución, red neuronal profunda, reconocimiento de rostros, poses, aprendizaje profundo.

Introducción

El procesamiento automático de imágenes para extraer su contenido semántico es una tarea que ha adquirido mucha importancia en los últimos años debido en gran medida al auge de la fotografía digital y sus medios de distribución sobre todo el Internet. Dentro de este contexto, los rostros son especialmente valiosos dado que representan una parte importante de la información semántica contenida en una fotografía.

El reconocimiento facial constituye un área de investi-

gación muy activa en los campos de la Visión Artificial y la Biométrica con aplicaciones en seguridad, robótica, interfaces humano-computadora, cámaras digitales y entretenimiento. Sin embargo, y a pesar del gran esfuerzo dedicado a mejorar los algoritmos de reconocimiento facial, todavía queda mucho por mejorar a fin de que los sistemas puedan producir buenos resultados en tiempo real y bajo condiciones ambientales no controladas. En general el reconocimiento facial sigue siendo un área de activa investigación [1].

En el pasado la mayor parte de las investigaciones rea-

lizadas en el área del reconocimiento de rostros se han centrado en el reconocimiento sobre imágenes frontales. Sin embargo, en los últimos años el interés se ha extendido al trabajo sobre imágenes fuera de ambientes controlados, donde el objetivo central es aumentar la robustez de los algoritmos empleados frente a distintas condiciones de resolución, escala, iluminación, expresión facial, pose, entre otros factores [2].

El reconocimiento de pose fuera de plano, tanto horizontal como vertical, resulta importante en sistemas de reconocimiento con sujetos cooperadores, pero más aún para sistemas que buscan el reconocimiento en sujetos no cooperadores, donde es imprescindible desarrollar todo el potencial del reconocimiento de rostros como una técnica biométrica de naturaleza no intrusiva.

El presente trabajo tiene como objetivo explorar la utilización de redes neuronales profundas de convolución para el reconocimiento de poses en imágenes de rostros. Los algoritmos de aprendizaje profundo constituyen una importante alternativa en el área de la inteligencia artificial, que ha presentado resultados muy alentadores en tareas de reconocimiento de imágenes y de audio en los últimos años y que sin embargo se considera, aún está en una etapa temprana de su desarrollo. [3].

En casi todos los usos prácticos de este tipo de algoritmos, la función objetivo es una función altamente no convexa en sus parámetros, con el potencial de presentar muchos mínimos locales. Esto introduce un serio problema ya que no todos los mínimos presentan tasas de error comparables. Como consecuencia en múltiples casos las técnicas usuales basadas en inicialización aleatoria de los parámetros presentan un pobre desempeño [4].

En los últimos años se han presentado diferentes aproximaciones para solucionar este problema. La más importante de estas publicada por Geoffrey Hinton en el 2012 [4] propone pre-entrenar cada capa con un algoritmo de aprendizaje no supervisado, que les permita aprender una transformación lineal de sus entradas que capture las variaciones principales. El pre-entrenamiento es seguido por una etapa final donde la arquitectura se ajusta respecto a un criterio supervisado utilizando optimización basada en el gradiente. Esta estrategia ha reportado mejoras importantes en los algoritmos de aprendizaje de múltiples capas, sin embargo sus mecanismos subyacentes aún son objeto de estudio.

Otro problema presente al entrenar redes neuronales es el “sobre-ajuste”. Este es usualmente más crítico, si el conjunto de entrenamiento es limitado, dado que los vectores de pesos tienden a usar dependencias entre detectores para ajustarse casi perfectamente al conjunto de entrenamiento, lo cual posteriormente implica un mal desempeño sobre el conjunto de prueba.

Recientemente se ha propuesto como solución el procedimiento conocido como *dropout*, que consiste en omitir aleatoriamente algunos de los detectores de atributos

Base de datos	Número de imágenes	Tasa de detección
FERET	2807	99.4 %
FEI	2800	98.6 %

Tabla 1: Tasas de detección del algoritmo en cascada de Viola-Jones.

en cada iteración de entrenamiento. De esta forma se reducen las coadaptaciones complejas en las cuales un determinado detector de atributos se vuelve útil solo en el contexto de muchos otros detectores de atributos específicos.

Sobre la base de datos de imágenes de escritura a mano MNIST, el *dropout* permitió una reducción en la tasa de error para una red de convolución de 5 capas cercana al 19 %. Sobre la base de datos TIMIT para reconocimiento de voz, y una red neuronal de 4 capas conectadas completamente, se consiguió una reducción de la tasa de error sobre un conjunto de prueba de 22.7 % a 19.7 % [5].

En general los autores argumentan que independientemente de la arquitectura el *dropout* permite obtener mejoras moderadas en la tasa de error sobre el conjunto de prueba.

Trabajos posteriores han mejorado esta idea al utilizar el *dropout* como una técnica para promediar modelos y combatir el sobre-ajuste. En este contexto se puede ver el *dropout* en cada actualización como la ejecución de un modelo diferente sobre un subconjunto diferente del conjunto de entrenamiento.

El modelo *maxout* basado en esta idea es una arquitectura de propagación hacia atrás, tal como una red de perceptrón multicapa o una red de convolución, que utiliza una nueva función de activación llamada *unidad maxout*, y se entrena utilizando el modelo *dropout* [6].

Con este método sobre la base de datos MNIST se obtuvo una tasa de error de 0.94 %, que es el mejor resultado a la fecha para algoritmos sin pre-entrenamiento no supervisado. Sobre la base de datos de imágenes CIFAR-10, utilizando una red neuronal de convolución de 3 capas se obtuvo una tasa de error del 12.93 %, que mejora considerablemente la más baja alcanzada para este tipo de algoritmos del 14.05 % [6].

En la siguiente sección se presentarán los experimentos exploratorios diseñados sobre las bases de datos de imágenes de rostros de libre acceso: FERET y FEI y la arquitectura de la red neuronal profunda de convolución utilizada para el reconocimiento de poses. A continuación se presentará las tasas de reconocimiento alcanzadas comparadas contra un algoritmo de Rostros Propios entrenado sobre las mismas imágenes, para después discutir áreas de potencial mejora y desarrollos recientes relacionados con el algoritmo presentado.

Materiales y métodos

Para las pruebas se utilizaron como plataformas de desarrollo una computadora portátil con sistema operativo

	Red Neuronal Profunda de Convolución		Rostros Propios
	Entrenamiento	Prueba	
33 × 33	0.112 (0.001)	0.157 (0.005)	0.203 (0.005)
41 × 41	0.098 (0.001)	0.158 (0.003)	0.210 (0.004)
65 × 65	0.072 (0.001)	0.149 (0.004)	0.210 (0.006)
81 × 81	0.073 (0.001)	0.154 (0.005)	0.215 (0.006)

Tabla 2: Error promedio (entre paréntesis el error estándar para cada dato), según tamaño de imagen de entrada y algoritmo de reconocimiento.

	Pre-procesamiento (100 imágenes)	RNPC		Rostros Propios	
		Entrenam. (200 epochs)	Prueba (100 imág.)	Entrenam.	Prueba (100 imág.)
33 × 33	162.8	539.49	1.02	148.93	1.73
41 × 41	161.5	958.77	1.75	545.4	3.04
65 × 65	154.8	3105.60	5.27	2206.65	6.71
81 × 81	162.1	3796.94	8.46	2257.76	9.91

Tabla 3: Tiempos de ejecución en segundos, según tamaño de imagen de entrada y algoritmo de reconocimiento.

Microsoft Windows, procesador Intel I7 de 2.3 Ghz, con 8Gb de memoria RAM y compilador MinGW 4.8 de 32 bits; y una computadora portátil MacBook Pro, con procesador Intel I7 a 2.3 Ghz y 8 Gb de memoria RAM, con compilador CLANG - LLVM 3.3 de 64 bits.

Los rostros utilizados para la etapa de entrenamiento del sistema de estimación de poses se obtuvieron de dos bases de datos de imágenes de rostros de uso público: la base de datos FERET y la base de datos FEI.

El programa (FERET) es administrado por la Agencia (DARPA) (Defense Advanced Research Projects Agency) y (NIST) (National Institute of Standards and Technology). La base de datos consiste en imágenes faciales recogidas entre diciembre de 1993 y agosto de 1996. En 2003 se publicó una versión de alta resolución, 24 bits de color, de estas imágenes. El conjunto de datos incluye 2413 imágenes faciales, representando a 856 persona. Las imágenes a color se encuentran en formato ppm con una resolución de 256 × 384 píxeles [7].

FEI es una base de datos de libre acceso para investigación y actividades académicas que consiste en 2800 imágenes tomadas entre junio de 2005 y marzo de 2006 en el laboratorio de inteligencia artificial de São Bernardo do Campo, São Paulo, Brasil. Contiene 14 imágenes a color de 640×480 píxeles (10 posiciones e imágenes frontales con diferentes expresiones y condiciones de iluminación) por cada uno de los 200 individuos participantes, para el total de 2800 imágenes. Las imágenes recogen un número igual de mujeres y hombres [8].

Procesamiento previo

Se utilizaron como entrada de la red neuronal de convolución, los rostros detectados y enmarcados por el conocido algoritmo de detección de rostros en cascada desarrollado por Viola y Jones [9].

A fin de construir los conjuntos de prueba y entrenamiento se realizó primero una prueba para determinar las imágenes que podían ser detectadas correctamente por el algoritmo de detección de rostros. Las tasas de

detección alcanzadas para las dos bases de datos empleadas se resumen en la Tabla 1.

Las imágenes se normalizaron a imágenes en escala de grises con tamaños estándar de 33 × 33, 41 × 41, 65 × 65 y 81 × 81 píxeles cambiando la escala y recortando la imagen según fue necesario para conservar la proporción original del rostro.

A continuación se realizó una ecualización de histograma para mejorar el contraste y el brillo de las imágenes. Esta etapa ayuda a reducir la variación debido a condiciones diferentes de iluminación y es importante para mejorar el desempeño de algoritmos basados en extraer características del rostro [10].

Las imágenes resultantes se convirtieron en arreglos unidimensionales para facilitar la alimentación de los datos a las siguientes etapas.

Finalmente, para preparar los datos de entrenamiento para el sistema de estimación de pose horizontal para cada vista se separaron las imágenes en siete conjuntos según las siguientes categorías: frontal, cuarto de perfil izquierdo y derecho, medio perfil izquierdo y derecho y perfil completo izquierdo y derecho. Las imágenes de perfil corresponden aproximadamente a ángulos de rotación horizontal respecto a la posición frontal de $\pm 22,5^\circ$, $\pm 67,5^\circ$ y $\pm 90^\circ$ para el cuarto de perfil, medio perfil y perfil completo respectivamente.

Arquitectura de la red neuronal

A diferencia de trabajos con redes neuronales estándar en los que se utiliza un algoritmo adicional para la extracción de las características a ser alimentadas al sistema, la red neuronal profunda de convolución permite delegar la tarea de seleccionar las características importantes a las capas iniciales de convolución de la red. En éstas, la importancia de las características se refleja en los pesos del *kernel* (núcleo) de cada mapa de características.

La red neuronal de convolución utilizada para la estimación de poses se desarrolló a partir de un prototipo de

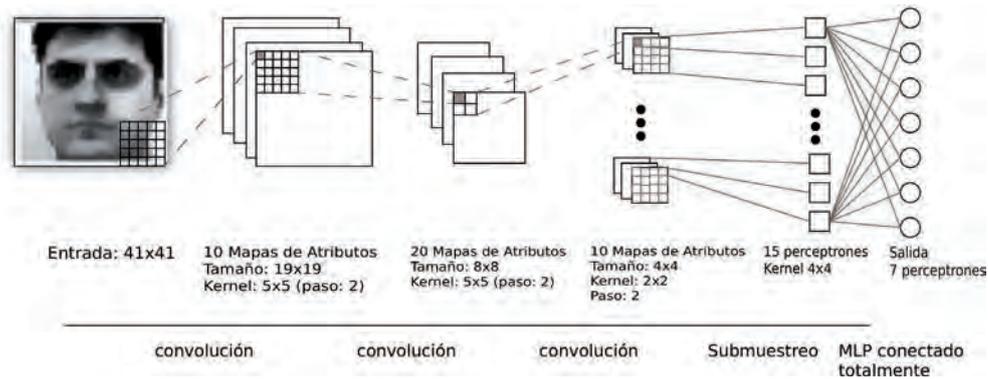


Figura 1: Arquitectura de la red neuronal de convolución usada en la detección de poses.

red neuronal simple con una capa oculta y conexiones completas. Ese prototipo se fue mejorando gradualmente buscando aumentar tanto su rendimiento como su tasa de estimación correcta de poses. El objetivo propuesto para esta etapa preliminar fue alcanzar un error cercano o inferior al 20 %, para después proceder a un ajuste más fino de los parámetros.

La estructura final de seis capas descrita en la sección anterior permitió alcanzar este objetivo sin ningún procedimiento de refinación de sus parámetros, por tanto se aceptó como base para un ajuste más exhaustivo.

Los parámetros iniciales tales como las dimensiones de las imágenes alimentadas a la red neuronal y el pre-procesamiento de las mismas se desarrollaron tomando como base trabajos previos, tanto en reconocimiento de imágenes como estimación de poses [11–13]. Al definir estos parámetros se buscó un balance entre la cantidad de información y los requerimientos de memoria y tiempo de procesamiento.

La arquitectura final de la red neuronal está constituida de seis capas: entrada, tres capas de convolución, una capa de submuestreo y una capa de salida tradicional con conexión completa, con función de activación sigmooidal y el número de mapas que se resume en la Figura 1.

La arquitectura de la red neuronal está basada en el trabajo de reconocimiento de dígitos con redes neuronales de convolución desarrollado por LeCun y las sugerencias para optimizar redes neuronales del artículo “Propagación hacia atrás eficiente” del mismo autor [14]. La implementación se basa en el trabajo sobre redes neuronales de convolución para reconocimiento de dígitos de O’Neill [15], cuyo código se encuentra disponible bajo licencia de código abierto MIT X11.

La implementación de la etapa de detección y la red neuronal de convolución se realizó en C++, utilizando la biblioteca para sistemas de visión artificial OpenCV.

OpenCV (Open source computer vision) es una biblioteca de visión artificial de código abierto, originalmente diseñada por Intel en 1999. La librería está escrita en C y C++ y tiene versiones para sistemas Linux, Windows,

Mac OS X y algunas plataformas móviles, contiene alrededor de 500 funciones que abarcan diversas áreas de la visión artificial incluyendo el manejo eficiente de imágenes y matrices, reconocimiento de objetos, análisis de imágenes médicas, seguridad, interfaz de usuario, calibración de cámara, visión estereo y visión robótica [16].

Metodología de entrenamiento

Utilizando las imágenes detectadas correctamente y que por tanto pueden ser sujetas al pre-procesamiento indicado, se elaboraron conjuntos de entrenamiento de aproximadamente 2400 y 2600 imágenes y conjuntos de prueba de aproximadamente 100 y 200 imágenes para la primera etapa de evaluación.

Con el fin de determinar si los parámetros de la red neuronal de convolución no se ajustaron solo a las particularidades de un conjunto de prueba, se buscó la configuración y los parámetros óptimos de la red utilizando solamente la base de datos FERET y posteriormente se utilizaron estos mismos parámetros para entrenar la red con las imágenes de la base de datos FEI y evaluar los resultados sobre un segundo conjunto de prueba.

Para evaluar el impacto del tamaño de imagen alimentado a la red, se entrenó la red neuronal para tamaños de 33, 41, 65 y 81 píxeles, con conjuntos de 2600 imágenes de la base de datos FEI, y se evaluó con conjuntos de 200 imágenes de la misma base de datos. Para cada uno de las 30 evaluaciones realizadas por cada tamaño, los conjuntos de entrenamiento y prueba anteriormente descritos se generaron aleatoriamente.

El algoritmo utilizado para el entrenamiento fue el algoritmo de propagación hacia atrás junto al método estocástico diagonal de Levenberg Marquadt para la optimización de la tasa de aprendizaje η , conjuntamente

Pose	RNPC	Rostros Propios
Perfil completo	0.120 (0.013)	0.153 (0.018)
Medio perfil	0.412 (0.017)	0.547 (0.018)
Cuarto de perfil	0.195 (0.010)	0.273 (0.017)
Frontal	0.037 (0.004)	0.065 (0.005)

Tabla 4: Tasa de error promedio según pose y algoritmo utilizado para imágenes de 65 × 65 píxeles.

con un término de decaimiento por peso para controlar el sobre-ajuste.

Resultados y Discusión

En el presente trabajo se ha buscado explorar la utilidad de las redes neuronales profundas de convolución como un método para la estimación de poses horizontales fuera de plano, alcanzando como resultado un algoritmo que permite una tasa de estimación de poses cercana al 85 % para las dos bases de datos de prueba estudiadas.

El error promedio alcanzado con la implementación final de la red neuronal profunda de convolución, junto al error obtenido por un algoritmo estándar de Rostros Propios se puede ver en la Tabla 2.

Como se puede apreciar en la Tabla 3, a pesar de que el tiempo de entrenamiento es mayor para una red neuronal, no existe diferencias significativas en el tiempo de procesamiento empleado sobre el conjunto de prueba para un algoritmo de Rostros Propios (valor-p prueba t pareda menor a 0.01). En general las redes neuronales profundas de convolución requieren de un tiempo sustancialmente mayor para su entrenamiento (los datos presentados en la Tabla 3 no incluyen el tiempo requerido para el ajuste de los parámetros de la red neuronal), pero una vez entrenadas su ejecución sobre datos de prueba es suficientemente eficiente como para su aplicación en tareas de reconocimiento en tiempo real.

La tasa de reconocimiento del 79 % alcanzada por el algoritmo de Rostros Propios en este estudio, es muy similar a la encontrada en estudios similares [17] y ligeramente menor al 85 % alcanzado por la red neuronal. El mismo resultado se confirma al analizar las tasas de error para cada pose.

Como lo revelan los datos de la Tabla 4, en general la tarea de reconocer imágenes en posiciones frontales es sustancialmente más simple que el reconocimiento de otras poses. De entre las poses analizadas aquellas que presentan la mayor tasa de error son las poses intermedias que tienden a ser clasificadas erróneamente entre ellas o con alguna de las poses extremos (frontal y perfil completo).

Un aspecto que se deja para estudios posteriores es el encontrar algoritmos que permitan el escalado y localización uniforme de características del rostro (ojos, nariz, boca) bajo distintos ángulos de rotación. Este tratamiento previo de las imágenes conduce a mejoras en la tasa de reconocimiento de imágenes frontales [18] y puede tener un efecto similar en el reconocimiento de poses. Sin embargo, los algoritmos basados en cascada usualmente utilizados para esta tarea tienen dificultades para detectar la posición de los ojos en rostros con rotaciones horizontales pronunciadas. Bajo estas condiciones usualmente la nariz proyecta cierta sombra sobre los ojos, la cual disminuye considerablemente la precisión de su detección o la impide completamente. Más aún,

para imágenes de rostros de perfil completo no es posible detectar ambos ojos y por tanto no es posible usar el procedimiento más común de enmarcado, que emplea la distancia entre estos para escalar las imágenes. Una alternativa para la detección y enmarcado de las imágenes de rostros puede ser el uso de redes neuronales de convolución similares a la arquitectura propuesta por García y Delakis [19] que involucra una red neuronal de convolución de desplazamiento espacial.

Referencias

- [1] Zhang, C.; Zhang, Z. 2010. "A survey of recent advances in face detection". <http://research.microsoft.com/apps/pubs/default.aspx?id=132077>, June.
- [2] Zhang, X.; Gao, Y. 2009. "Face recognition across pose: A review". *Pattern Recognition*, 42(11):2876–2896.
- [3] Hinton, G.; Deng, L.; Yu, D.; Dahl, G.; Mohamed, A.; Jaitly, N.; Senior, A.; Vanhoucke, V.; Nguyen, P.; Sainath, T.; Kingsbury, B. 2012. "Deep neural networks for acoustic modeling in speech recognition: The shared views of four research groups". *IEEE Signal Process. Mag*, 29(6):82–97.
- [4] Hinton, G.; Srivastava, N. 2012. "Improving neural networks by preventing co-adaptation of feature detectors". *arXiv preprint*: 1–18.
- [5] Srivastava, N. 2013. "Improving neural networks with dropout". *PhD thesis University of Toronto*.
- [6] Goodfellow, I.; Warde-Farley, D.; Mirza, M.; Courville, A.; Bengio, Y. 2013. "Maxout networks". *ICML*.
- [7] Phillips, P.; Wechsler, H.; Huang, J.; Rauss, P. 1998. "The FERET database and evaluation procedure for face-recognition algorithms". *Image and Vision Computing*, 16(5):295–306.
- [8] Pesquisa, P.; Leonel, L.; Junior, D. 2005. "Relatório Final Captura e Alinhamento de Imagens : Um Banco de Faces Brasileiro". 1-10.
- [9] Viola, P.; Jones, M. 2001. "Rapid object detection using a boosted cascade of simple features". *Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR*, 1:1–511–1–518.
- [10] Moon, H.; Phillips, P. 2001. "Computational and performance aspects of PCA-based face-recognition algorithms". *Perception-London*.
- [11] Le, Q.; Ngiam, J.; Chen, Z. 2010. "Tiled convolutional neural networks". *Advances in Neural*: 1–9.
- [12] Vatahska, T.; Bennewitz, M.; Behnke, S. 2007. "Feature-based head pose estimation from images". *7th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*: 330–335.
- [13] Bouvrie, J. 2006. "Notes on convolutional neural networks". <http://cogprints.org/5869/>.

- [14] LeCun, Y.; Bottou, L.; Orr, G.; Müller, K. 1998. “Efficient backprop”. *Neural networks*.
- [15] O’Neill, M. 2006. “Neural Network for Recognition of Handwritten Digits”. <http://www.codeproject.com/Articles/16650/Neural-Network-for-Recognition-of-Handwritten-Digi>.
- [16] Bradski, G.; Kaehler, A. 2008. “Learning OpenCV: Computer Vision in C++ with the OpenCV Library”. *O’Reilly Media, 1st ed. edition*.
- [17] Pang, S.; Kasabov, N. 2006. “Investigating LLE eigenface on pose and face identification”. *In Advances in Neural Networks - ISNN 2006, Third International Symposium on Neural Networks, Chengdu, China*: 134–139.
- [18] Zhao, W.; Chellappa, R.; Phillips, P.; Rosenfeld, A. 2003. “Face recognition”. *ACM Computing Surveys*, 35(4):399–458.
- [19] García, C.; Delakis, M. 2004. “Convolutional face finder: A neural architecture for fast and robust face detection”. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell*, 26(11): 1408–1423.