Ciencia, Tecnología y Salud

Revista Centroamericana de Investigación y Postgrado
Universidad de San Carlos de Guatemala

ISSN: 2409-3459 Volumen 5 Número 2 julio / diciembre 2018

Artículos científicos

Artículos de revisión

Ensayos científicos

Resúmenes de congresos

Reporte de casos

Reseñas

USAC TRICENTENARIA Universidad de San Carlos de Guatemala

Dirección General de Investigación Universidad de San Carlos de Guatemala

CG-sep Coordinadora General Sistema de Estudios de Postgrado

CONCYT SENACYT Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología GUATEMALA

Ciencia, Tecnología y Salud es una publicación de la Dirección General de Investigación (Digi), con la colaboración del Sistema de Estudios de Postgrado (SEP), de la Universidad de San Carlos de Guatemala (Usac) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Concyt). Está orientada a divulgar investigaciones originales en las áreas de ciencias, tecnologías y salud humana y animal. Constituye una publicación en formato digital Open Journal System (OJS) en línea, y semestral en forma impresa. Los manuscritos aceptados para publicación son sometidos a procesos de arbitraje por revisores externos, lo que garantiza al lector y autores un alto nivel y rigor académico. Aprobada en el punto Séptimo, Inciso 7.1 del Acta No. 20-2014 de la sesión ordinaria celebrada por el Consejo Superior Universitario, el dia miércoles 12 de noviembre de 2014.

500
C569 Ciencia, Tecnología y Salud / Revista Centroamericana de Investigación y Postgrado.
- - Volumen 5, número 2. (julio / diciembre 2018). - - Guatemala : Universidad de San Carlos de Guatemala, Dirección General de Investigación, Sistema de Estudios de Postgrado, Unidad de Publicaciones y Divulgación, 2018.
volumnes : ilustraciones ; 27 cm.

Semestral

ISSN impreso: 2409-3459
ISSN electrónico: 2410-6356

Disponible en: http://digi.usac.edu.gt/ojsrevistas

1. Alimentación 2. Agronomía 3. Biología 4. Conservación de los recursos naturales 5. Física 6. Industrias 7. Matemática 8. Medicina 9. Medio ambiente natural 10. Recursos naturales 11. Salud pública 12. Química I. Dirección General de Investigación II. Sistema de Estudios de Postgrado

Universidad de San Carlos de Guatemala

Murphy O. Paiz Recinos
Rector

Carlos E. Valladares Cerezo
Secretario General

Erwin H. Calgua Guerra
Director General de Investigación, Digi

Julio R. Salazar Pérez
Coordinador General de Programas, Digi

Jorge Ruano Estrada
Coordinador General, SEP

La correspondencia debe ser dirigida a:
Armando Cáceres Estrada
Edificio S-11, 3er. Nivel, Ciudad Universitaria, Zona 12
Teléfono: 2418 7950
Correo: cts@digi.usac.edu.gt

Fotografía de portada: Cámara automática del Programa para la Conservación del Tapir en Guatemala del Centro de Estudios Conservacionistas, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la Universidad de San Carlos de Guatemala (Usac) y la Fundación Defensores de la Naturaleza con el apoyo del Programa mundial para la conservación de los tapires del Grupo de especialistas del tapir de la UICN y la Fundación Segré y la Dirección General de Investigación (Digi) de la Usac, 2017).

Descripción de la fotografía de portada: Jaguar hembra en aguada del Biotopo Protegido Dos Lagunas, Reserva de la Biosfera Maya, Petén, Guatemala.

La reproducción total o parcial del contenido e imágenes de esta publicación se rige de acuerdo a normas internacionales sobre protección a los derechos de autor, con criterios especificados en la licencia Creative Commons (CC BY-NC-SA 4.0)

©Universidad de San Carlos de Guatemala, Dirección General de Investigación, 2018
Los textos publicados en este documento son responsabilidad exclusiva de sus autores.

Ciencia, Tecnología y Salud

ISSN: 2409-3459 Vol. 5 Num. 2 jul/dic 2018

Directorio / Board-Staff

Director de la revista

Erwin Humberto Calgua Guerra
Dirección General de Investigación, Usac, Guatemala

Editor en jefe

Erwin Humberto Calgua Guerra
Dirección General de Investigación, Usac, Guatemala

Editor Adjunto

Armando Cáceres Estrada
Dirección General de Investigación, Usac, Guatemala

Co-editores y Editora Ejecutiva

Augusto Saúl Guerra Gutiérrez
Dirección General de Investigación, Usac, Guatemala

María del Rosario Godínez y Godínez
Sistema de Estudios de Postgrado, Usac, Guatemala

Andrea E. Rodas-Morán
Dirección General de Investigación, Usac, Guatemala
Asistente de Editores

Comité Editorial

Liuba María Cabrera Ovalle de Villagrán
Dirección General de Investigación, Usac, Guatemala

Oscar Manuel Cóbar Pinto
Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología

José A. Franco
Universidad del Norte de la Florida

Dennis Guerra-Centeno
Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Usac, Guatemala

Hugo Roberto Muñoz Roldan
Facultad de Odontología, Usac, Guatemala

Oscar Federico Nave
Dirección General de Investigación, Usac, Guatemala

Julio Rufino Salazar Pérez
Dirección General de Investigación, Usac, Guatemala

Hilda Elena Valencia Marroquín de Abril
Dirección General de Investigación, Usac, Guatemala

Erick José Velásquez Castillo
Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología

Patricia Velez-Möller
Facultad de Ciencias Médicas, Usac, Guatemala

Consejo Editorial

Ania Torres
Centro Nacional Coordinador de Ensayos Clínicos (CENCEC), Cuba

Mary Almanzar Santos
Universidad Autonoma de Santo Domingo, República Dominicana

Carolina Arévalo Valdéz
Instituto Guatemalteco de Seguridad Social, Guatemala

Byron Calgua
Naciones Unidas, Suiza

Silvia Duran
Universidad Autonoma de Nicaragua (Unan-Leon), Nicaragua

Fernando García-Santamaría
Universidad de Costa Rica (UCR), Costa Rica

Cristian Kraker Castañeda
Colegio de la Frontera Sur, México

Eduardo López Bastida
Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, Cuba

Ciencia, Tecnología y Salud

ISSN: 2409-3459 Vol. 5 Num. 2 jul/dic 2018

Directorio / Board-Staff

Carmen Elena Madriz
Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica

María Carlota Monroy
Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Usac, Guatemala

Leonardo Mendoza Blanco
Universidad Nacional Autonoma de Nicaragua (Unan-León), Nicaragua

Enrique Pazos
Escuela de Física y Matemáticas, Usac, Guatemala

José Leonel Plazao Prado
Universidad Nacional de Ingeniería, Nicaragua

María Guadalupe Reyes
Universidad Maritima Internacional de Panamá, Panamá

Francisco Romero Royo
Universidad Tecnológica Nacional, Costa Rica

Benjamin Antonio Rosales Rivera,
Universidad Nacional de Ingeniería (Uni), Nicaragua

Igor Iván Slowing Umaña
Iowa State University, United States of America

Janzel Villalaz
Universidad de Panamá, Panamá

Unidad de Publicaciones y Divulgación

Marlene Pawlova Pérez Muñoz
Dirección General de Investigación, Usac, Guatemala

Mynor Alexander Alegria Monterroso
Dirección General de Investigación, Usac, Guatemala

Asesores de edición

José David Marroquín
Dirección General de Investigación, Usac, Guatemala

Ciencia, Tecnología y Salud

ISSN: 2409-3459 Vol. 5 Num. 2 jul/dic 2018

Contenido / Contents

Editorial / Editorial 97

Artículo Científico / Scientific Article

Dinámica temporal de la disponibilidad de agua y microclima en aguadas del biotopo protegido Dos Lagunas, Petén, Guatemala

Temporal dynamics of water availability and microclimate in seasonal water ponds in the Dos Lagunas Biotopo Protegido, Peten, Guatemala

Manolo J. García, Andrea L. Aguilera, Gerber D. Guzmán-Flores, Dana I. Rodríguez, Vivian R. González.....99

Relación entre áreas y variables ambientales espaciales con el atropellamiento y cruce de la fauna silvestre en la carretera de la Franja Transversal del Norte, Cobán, Guatemala

Areas and spatial environmental variables related with the trampling and wildlife crossing in the Northern Transversal Road in Coban, Guatemala.

Oscar Rojas, Carlos Avendaño..... 111

Riqueza y abundancia de peces arrecifales en el Caribe de Guatemala utilizando Estaciones Remotas de Video Subacuático con Carnada

Richness and abundance of reef fish in the Caribbean of Guatemala using Baited Remote Underwater Video Stations

Francisco Polanco-Vásquez, Alerick Pacay, José R. Ortíz-Aldana, Ana Hacohen-Domené, Cristopher Avalos-Castillo.....125

Native species valuable timber plantations in Northern Guatemalan Humid Lowlands: ecological features and silvicultural feasibility

Plantaciones con especies nativas valiosas en Tierras Bajas del Norte de Guatemala: rasgos ecológicos y viabilidad silvícola

Boris A. Mendez-Paiz 136

Diversidad genética de aislados de *Phytophthora infestans* colectados en zonas productoras de papa y tomate de Guatemala

Genetic diversity of Phytophthora infestans *isolates collected from tomato and potato producing areas in Guatemala*

José A. Ruiz-Chután, Julio E. Berdúo-Sandoval, Amilcar Sánchez-Pérez 151

Simulación del flujo de viento sobre el territorio de Guatemala utilizando un modelo climático regional

Simulation of wind flux over the Guatemala territory using a regional climate model

Enrique Pazos.....162

Ensayo Científico / Scientific Essay

La epigenética: ¿el regreso de Lamarck?

Epigenetics: the return of Lamarck?

Laura M. Benítez-Cojulún 172

Reporte de Casos / Case Report

Modelo de negocio de restauración productiva de *Abies guatemalensis* Rehder utilizando plantas nodrizas para su establecimiento

Business model of productive restoration of Abies guatemalensis *Rehder using nurse plants for its establishment*

José Vicente Martínez Arévalo.....182

Detección de residuos de quinolonas en carne bovina de venta en mercados municipales de la ciudad de Guatemala

Quinolone antibiotic residues in beef meat sold in municipal markets of Guatemala City

Miriam J. Canet-Elgueta, Amílcar Dávila, Roderico Hernández, Manuel Lepe-López 189

Ciencia, Tecnología y Salud

ISSN: 2409-3459 Vol. 5 Num. 2 jul/dic 2018

Contenido / Contents

Reseña / Review

Estadística para la investigación
Statistics for research
Gerardo Arroyo 196

Instruciones para autores
Instructions for authors 199

Revisores de este volumen
Reviewers 201

Ciencia, Tecnología y Salud

ISSN: 2409-3459 Vol. 5 Num. 2 jul/dic 2018

Editorial / Editorial

En la comunidad científica internacional existen dos indicadores clave para medir el éxito en la investigación: (1) los proyectos financiados y (2) la publicación científica en revistas con factor de impacto. La divulgación científica a través de la publicaciones es lo que diferencia a una institución de educación superior y la convierte en Universidad, al cumplir con la misión de crear y divulgar el conocimiento que sea útil para la sociedad. En el caso de la Universidad de San Carlos de Guatemala (Usac), tiene el deber constitucional de que la investigación fundamente soluciones para los problemas nacionales.

La Dirección General de Investigación (Digi) de la Usac cuenta con dos revistas científicas que publican de forma semestral desde el 2014. Cada una tiene un Comité Editorial el cual está dirigido y conformado por profesionales con experiencia en publicaciones científicas. En el último quiquenio el equipo ha logrado hitos de importancia, siendo el primero, que las revistas se encuentran indexadas, y más recientemente, se ha logrado que Google Académico lo registre en su base, logrando factor de impacto 2 para la Revista de *Ciencia, Tecnología y Salud*. En el caso de la Revista *Ciencias Sociales y Humanidades*, se está trabajando en obtener los mismos resultados.

Uno de los mayores retos que se ha tenido es lograr que más investigadores(as) envíen a consideración editorial sus manuscritos, y dentro de los muchos factores que pueden explicar esta tendencia se encuentran algunos que sobresalen, como el hecho de que en la Usac no se fomenta la cultura de publicar, que la publicación no es un elemento importante de la evaluación docente, y que a pesar de que hay una muy modesta inversión en investigación, la calidad de la misma no satisface el rigor y consideraciones éticas que revistas de impacto a nivel nacional e internacional requieren para publicar. Esto último lo hemos corroborado a través de análisis internos donde la evidencia muestra que los errores en los planteamientos de proyectos en la parte metodológica se deben a una deficiente formación en investigación, en especial lo relacionado a la revisión de la literatura, la cual es poco accesible en nuestro medio. Es aquí donde, para que la publicación institucional mejore, se debe impulsar la formación en investigación, y es por ello que la Digi ha creado una colaboración más fuerte con la Coordinadora de Estudios de Postgrado, para que, los estudios de doctorado y maestría, en cumplimiento a una disposición de la Asamblea de Escuela de Estudios de Postgrado que data de 2015, sean enviados a las revistas dentro de nuestra red universitaria, con la finalidad de que sean publicadas, pero a la vez se pueda evaluar la calidad de la formación en los niveles más altos de la academia. Además, se espera que esta acción impulse una mayor inversión financiera dirigida a la investigación de nivel doctoral y de maestría. Esto coadyudaría a que exista formación en investigación, y a la vez, mayor calidad en la investigación que será publicada institucionalmente, lo cual incidiría en los indicadores de investigación de la Usac.

La Digi ha trazado una hoja de ruta para aumentar la visibilidad de las revistas, la cual puede ser aplicada en otras redes de revistas que existen en la Universidad. Esto nos permite una transferencia de tecnología interna, pero a la vez, como subproducto, sería la creación de una red de Revistas Institucionales, por medio de la cual ingresarían los manuscritos a la Digi, y de aquí se identificarían las Revistas Institucionales, Nacionales o Internacionales a donde se podría enviar el producto de investigación.

La Digi continuará enfocada en fortalecer por todos los medios la publicación científica de calidad y ampliar su espectro de influencia, así como registrar y reportar los indicadores que deriven de estas acciones, y lograr así escalar en su posicionamiento académico nacional e internacional.

Dr. Erwin Humberto Calgua Guerra
Director General de Investigación

Ciencia, Tecnología y Salud
Vol. 5 Num. 2 2018
ISSN: 2410-6356 (electrónico) / 2409-3459 (impreso)

Artículo Científico / Scientific Article

Dinámica temporal de la disponibilidad de agua y microclima en aguadas del biotopo protegido Dos Lagunas, Petén, Guatemala

Temporal dynamics of water availability and microclimate in seasonal water ponds in the Dos Lagunas Biotopo Protegido, Peten, Guatemala

Manolo J. García*, Andrea L. Aguilera, Gerber D. Guzmán-Flores, Dana I. Rodríguez, Vivian R. González

Centro de Estudios Conservacionistas, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia,
Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

***Autor al que se dirige la correspondencia:** garcia.manolo@usac.edu.gt

Recibido: 29 de marzo 2017 / 1era. Revisión: 06 de marzo 2018 / 1era. Revisión: 27 de junio 2018 / Aceptado: 28 de agosto 2018

Resumen

En el territorio de la Selva Maya se han identificado a los cuerpos de agua estacionales denominados localmente aguadas, como un recurso crítico para la supervivencia de especies de fauna silvestre, ya que son su principal fuente de agua durante la temporada seca. En el presente estudio se registró en cinco aguadas, la dinámica temporal de la acumulación de agua empleando una cámara automática, así como la temperatura y la humedad relativa utilizando sensores automáticos a lo largo de abril a agosto del 2016. En cuanto a la disponibilidad de agua, esta fue disminuyendo hasta agotarse al final de la temporada seca en el mes de abril, y fue aumentando al inicio de la temporada lluviosa en junio. Para la temporada seca se registró una temperatura promedio (desviación estándar) de 27.65 (4.52) ºC y una humedad relativa de 71.30 (19.00) %, mientras que para la temporada lluviosa la temperatura promedio fue de 26.09 (3.21) ºC y humedad relativa promedio de 86.16 (14.15) %. Sin embargo no se encontró una diferencia significativa entre los valores registrados en las "distintas" aguadas. Se encontró una correlación significativa entre los valores registrados en las aguadas con los registrados por la estación meteorológica automática (EMA) Calakmul II, por lo que para estudios futuros es posible utilizar los valores de la EMA para representar la dinámica en las aguadas. Entre las estrategias para reducir los potenciales efectos del cambio climático para la fauna es la conservación de las aguadas manteniendo la conectividad entre las mismas.

Palabras claves: temperatura ambiental, humedad relativa, diversidad biológica, recursos hídricos, Reserva de Biosfera Maya

Abstract

In the Maya Forest, the seasonal water ponds locally known as *aguadas* have been identified as a critical resource for the survival of wild species, as they are the main source of fresh water during the dry season. In the present study, in five aguadas, we recorded the availability of water using a camera-trap, as well as the temperature and relative humidity using data loggers, from April to August 2016. Regarding water availability, the water quantity was diminishing at the end of the dry season in April until it ran out, and increased as the rainy season started on June. For the dry season we recorded an average temperature (standard deviation) of 27.65 (4.52) ºC and average relative humidity of 71.30 (19.00) %, and on the rainy season, the average temperature was 26.09 (3.21) ºC and average relative humidity of 86.16 (14.15) %. Nevertheless we didn't found a significant difference between the values recorded at the aguadas. We founded a significant correlation between the values recorded at the aguadas and the Automatic Meteorological Station (AME) Calakmul II, so for future research the AME values can be used to represent the dynamics at the aguadas. Among the strategies to reduce the potential impacts of Climate Change on animal species is the conservation of aguadas, maintaining the connectivity within them.

Keywords: Environmental temperature, relative humidity, biological diversity, hydrological resources, Maya Biosphere Reserve

La reproducción total o parcial del contenido e imágenes de esta publicación se rige de acuerdo a normas internacionales sobre protección a los derechos de autor, con criterio especificados en la licencia Creative Commons (CC BY-NC-SA 4.0)

Introducción

El territorio denominado Selva Maya, el cual abarca áreas de México, Guatemala y Belice, ha sido identificado como un centro de alta diversidad biológica en la región mesoamericana, que a su vez está amenazado como consecuencia de las elevadas tasas de deforestación en años recientes, así como por los impactos potenciales del cambio climático (Anderson et al., 2008; Hansen et al., 2013; Hodgon, Hughell, Ramos, & McNab, 2015). En este territorio, de manera general, se presenta un clima de tipo tropical cálido y húmedo, con temperaturas medias entre los 22 y 29ºC y precipitaciones entre los 1,200 y 2,000 mm anuales, sin una estacionalidad bien definida (Araujo, 2014; Consejo Nacional de Áreas Protegidas [Conap], 2015). A una menor escala, existe un gradiente de humedad y temperatura de norte a sur y de este a oeste, ocasionando que el noreste es más seco y cálido en comparación con el suroeste (Conap, 2015; Instituto Nacional de Ecología [INE], 2000). El área es predominantemente plana (plataforma sedimentaria de Yucatán) con algunos sistemas de serranías hacia el sur, correspondientes a los cinturones plegados de Chiapas y Lacandón (sistemas montañosos del norte de Centroamérica), en un suelo de tipo cárstico (Conap, 2015; INE, 2000). Las características propias del suelo, hace que la mayor parte del drenaje sea subterráneo, con algunos cuerpos de agua dulce que incluyen lagos, lagunas, ríos permanentes e intermitentes y otros tipos de humedales, siendo un elemento sobresaliente las aguadas, las cuales consisten en zonas que almacenan el agua de lluvia, y pueden variar desde 236 m^2 hasta varias hectáreas (Araujo, 2014; Conap, 2015; González, 2015; Reyna, O´Farril, Simá, Andrade, Padilla, & Sosa, 2010). Las aguadas suelen presentarse en bajas densidades, ya que se encuentran dispersas en el paisaje (González, 2015; Reyna et al., 2010). Dado que las aguadas, son formadas por la acumulación del agua de lluvia, presentan una dinámica asociada a las temporadas seca y lluviosa, en la cual algunas aguadas pueden secarse por completo durante la época seca, mientras que otras permanecen a lo largo del año (González, 2015).

Debido a la poca disponibilidad de agua superficial en la región, las aguadas son una de las principales fuentes de agua para mantener a la fauna silvestre durante la época seca (Reyna et al., 2010; Simá, Reyna, & Retana, 2008). Se ha documentado que más de 20 especies de vertebrados visitan las aguadas, incluyendo especies amenazadas y de importancia económica y cultural, entre las que se incluyen aves como *Aramides albiventris* Lawrence, 1868 (gallinula), *Crax rubra* Linnaeus, 1758 (faisán), *Meleagris ocellata* Cuvier, 1820 (pavo ocelado), así como especies de mamíferos incluyendo *Tapirus bairdii* Gill, 1865 (danto o tapir), *Panthera onca* Linnaeus, 1758 (jaguar), *Tayassu pecari* Link, 1795 (jabalí de labio blanco), *Puma concolor* Linnaeus, 1771 (puma), *Leopardus pardalis* Linnaeus, 1758 (ocelote), entre otras (González, 2015; Simá et al., 2008; Ruano et al., 2009). Dos de las especies de mamíferos que presentan una alta dependencia de las aguadas son *T. bairdii* y *T. pecari*, por lo que las aguadas son vitales para su supervivencia (Moreira-Ramírez et al., 2016; Pérez-Cortez, Enríquez, Sima-Panti, Reyna-Hurtado, & Naranjo, 2012; Ruano et al., 2009; Sandoval-Serés, Reyna-Hurtado, Briceño-Méndez, & de la Cerda-Vega, 2016).

Dada la relevancia que tienen las aguadas para la diversidad biológica, el objetivo de este estudio fue documentar la dinámica temporal de acumulación de agua, temperatura y humedad relativa en cinco aguadas del Biotopo Protegido Dos Lagunas (BPDL), con el fin de conocer la dinámica hidrológica de estos importantes humedales, y así generar insumos que permitan el desarrollo de estrategias de adaptación y mitigación de los efectos del cambio climático para la fauna silvestre en la región de la Selva Maya.

Materiales y métodos

Área de estudio

La etapa de campo se realizó en cinco aguadas ubicadas en el BPDL, zona núcleo de la RBM, localizado en el límite norte del municipio de Flores en el departamento de Petén. El biotopo colinda al norte con la Reserva de Biosfera Calakmul (RBC) en Quintana Roo, México y con el Parque Nacional Mirador Río Azul en sus límites sur, este y oeste, contando con una extensión aproximada de 30,710 ha (307.19 km^2) (Figura 1) (Conap, Dirección General de Patrimonio Cultural y Natural [DGPCyN], & Centro de Estudios Conservacionistas [Cecon], 2010). En cuanto al clima, la temperatura promedio varía entre 21 y 30 ºC, la precipitación promedio es de 1,136 mm/año y se presentan variaciones estacionales con una temporada seca de febrero a mayo y otra lluviosa de junio a diciembre (Conap et al., 2010). Las aguadas incluidas en este estudio fueron las conocidas localmente como Monifatos, El Trampole, El Tintal, Poza Maya y otra sin nombre

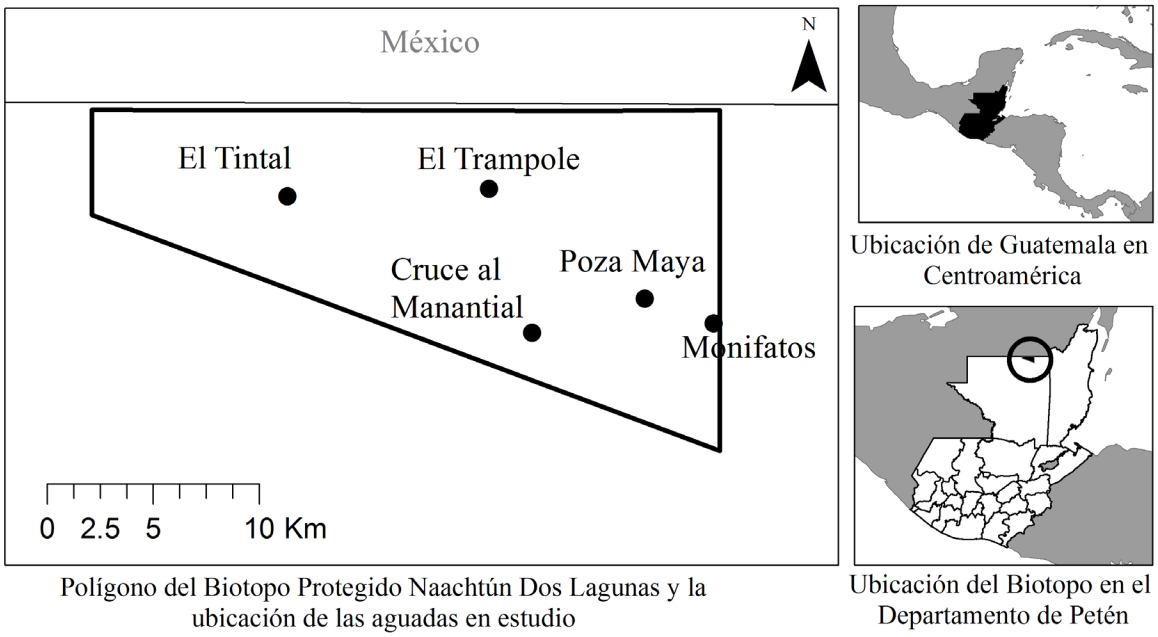

Figura 1. Ubicación del Biotopo Protegido Dos Lagunas, Petén, Guatemala.

conocido ubicada en el camino hacia el campamento chiclero El Manantial, a la cual se le denominó Cruce al Manantial. El estudio se realizó durante los meses de abril a agosto del 2016, con el fin de registrar la dinámica de la disponibilidad de agua, temperatura y humedad relativa en las aguadas durante el cambio de la temporada seca a la lluviosa.

Registro de la disponibilidad de agua en aguadas

Se realizó un registro fotográfico de la disponibilidad de agua en cada una de las aguadas del estudio, utilizando cámaras automáticas o cámaras-trampa marca Bushnell modelo *Trophycam* 14MP *Intrussor No Glow* (Bushnell outdoor products, Overland Park, Estados Unidos). En cada una de las aguadas, en un árbol ubicado en el margen, se instaló una cámara-trampa orientada hacia el centro del espejo de agua a una altura aproximada de 1.7 m. Con una resolución de 14 megapixeles, una foto por evento de captura y la función *field scan* (barrido del campo visual) activada para tomar una foto de manera automática a cada hora en punto entre las 05:00 y 18:00 h. Las imágenes obtenidas fueron examinadas con el fin de determinar para cada aguada, la hora del día en que era posible apreciar con mayor claridad el contenido de agua acumulada. Los horarios seleccionados para las aguadas de estudio fueron: Monifatos 17:00 h, Trampole 06:00 h, El Tintal 09:00 h, Poza Maya 07:00 h y Cruce al Manantial 14:00 h.

Con el fin de contar con una referencia para la estimación de la disponibilidad de agua, se colocó un lazo previamente identificado con marcas cada metro desde el centro de la aguada hacia la cámara, activando la cámara de manera manual para que tomara fotografías. Posteriormente, se realizó una compilación de todas las fotos de cada aguada a la hora seleccionada, las cuales fueron comparadas con la referencia para estimar el radio del espejo de agua para cada día, como una referencia de la cantidad de agua acumulada.

Registro de variables microclimáticas

El registro de la temperatura y humedad relativa de cada aguada se realizó utilizando un sensor automático o *data logger* marca Onset modelo HOBOS Pro v2 U23-001 (Onset Computer Corporation, Bourne, Estados Unidos), instalado a una altura de 1.7 m en un árbol cercano a la cámara automática. Para facilitar la recuperación de los dispositivos en el campo se utilizó cinta forestal para identificar los árboles donde

se instaló el equipo y se tomaron las coordenadas de los mismos utilizando un GPS. Los sensores fueron programados para activarse de manera simultánea y registrar las variables cada hora. Los datos colectados por los sensores automáticos fueron descargados en archivos de texto utilizando el programa HOBOware Pro v. 3.5.0 (Onset Computer Corporation 2002-2013, Bourne, Estados Unidos) y posteriormente exportados a hojas de cálculo electrónicas para la estimación de los promedios semanales.

Se realizó un análisis de varianzas (Andeva) para comparar los datos de temperatura registrados en las aguadas para determinar si existen diferencias significativas entre las mismas.

Correlación entre los datos de temperatura y humedad en aguadas y la Estación Meteorológica Automática (EMA) Calakmul II

El Servicio Meteorológico Nacional de la Comisión Nacional del Agua (Conagua) de México, posee un sistema de estaciones meteorológicas automáticas (EMAs) para el registro constante de variables climáticas en distintos sitios de México, incluyendo dos estaciones en la RBC. Debido al costo de monitorear las variables microclimáticas directamente en las aguadas, se quiso conocer si los datos de temperatura y humedad colectados por las EMAs poseen una correlación significativa con los que fueron colectados en las aguadas, y así poder utilizar este recurso en análisis y monitoreo de aguadas en el futuro, sin necesidad de instalar sensores en las aguadas. Se realizó un análisis de correlación de Pearson entre los promedios diarios de temperatura y humedad relativa registrados en las aguadas con los datos registrados por la EMA Calakmull II ubicada al norte del BPDL.

Resultados

Registro de la disponibilidad de agua en aguadas

Se obtuvieron 7,620 fotografías de las cuales se seleccionaron 635 para ser incluidas en el procesamiento. A partir de esta información se generó una base de datos con 635 registros de los radios diarios estimados para las cinco aguadas de estudio, de los cuales corresponden a El Tintal con 139 días, Monifatos con 146, Poza Maya con 148, Trampole con 127 y Cruce al Manantial con 75. Con estos datos se estimaron los promedios semanales de la disponibilidad de agua paras las aguadas El Tintal, Los Monifatos y Poza Maya. No fue posible estimar el radio para la aguada Trampole debido al crecimiento de la vegetación lo que impidió la visibilidad del espejo de agua y en el caso de la aguada Cruce al Manantial la cámara presentó desperfectos por lo que no se obtuvieron fotografías para todo el período de estudio. De las aguadas que fue posible estimar el radio, las tres se secaron a finales del mes de abril (alrededor de las semanas 16 y 17) y permanecieron totalmente secas durante 5 semanas (de la semana 18 a la 22), hasta que comenzaron a llenarse nuevamente a inicios de la temporada lluviosa en el mes de junio (Figura 2).

Registro de variables microclimáticas

Con respecto a las variables climáticas, se obtuvieron 16,248 mediciones que corresponden a 2,520 para el Cruce al Manantial y 3,432 para cada una de las otras aguadas. Los valores registrados de ambas variables son similares para las cinco aguadas a lo largo del período de estudio, tanto en la dinámica diaria como entre semanas y temporadas (Tabla 1).

Con respecto a la dinámica diaria de la temperatura y la humedad relativa, a partir del total de datos registrados por los sensores, puede evidenciarse que de manera general que en las aguadas existe un aumento gradual en la temperatura a partir de la hora más fresca entre las 05:00 y 06:00 h, alcanzando su máximo entre las 12:00 y 14:00 h, y posteriormente vuelve a descender gradualmente hasta la hora más fresca (Figura 3). La humedad relativa presentó un patrón inverso, en el cual entre las 5:00 y 7:00 h se alcanza la mayor humedad relativa, la cual desciende gradualmente alcanzando su mínimo entre las 13:00 y 15:00 h para aumentar nuevamente (Figura 4).

En cuanto a los patrones a lo largo de las semanas, con respecto a la temperatura promedio se presentan fluctuaciones entre las semanas, con una tendencia al incremento durante la época seca en los meses de abril y mayo, y un decremento al inicio de la temporada lluviosa en el mes de junio (Figura 5). Durante las semanas 21 y 22 en el mes de mayo se alcanzaron las máximas temperaturas promedio (desviación estándar) de 29.40 (4.34) y 29.02 (4.07) ºC, respectivamente, mientras que la más baja, 24.38 (2.53) se registró en la semana 31 en el mes de julio. A pesar que los valores de temperatura son muy similares en las aguadas, puede notarse que durante las semanas más cálidas (21 y 22) del período

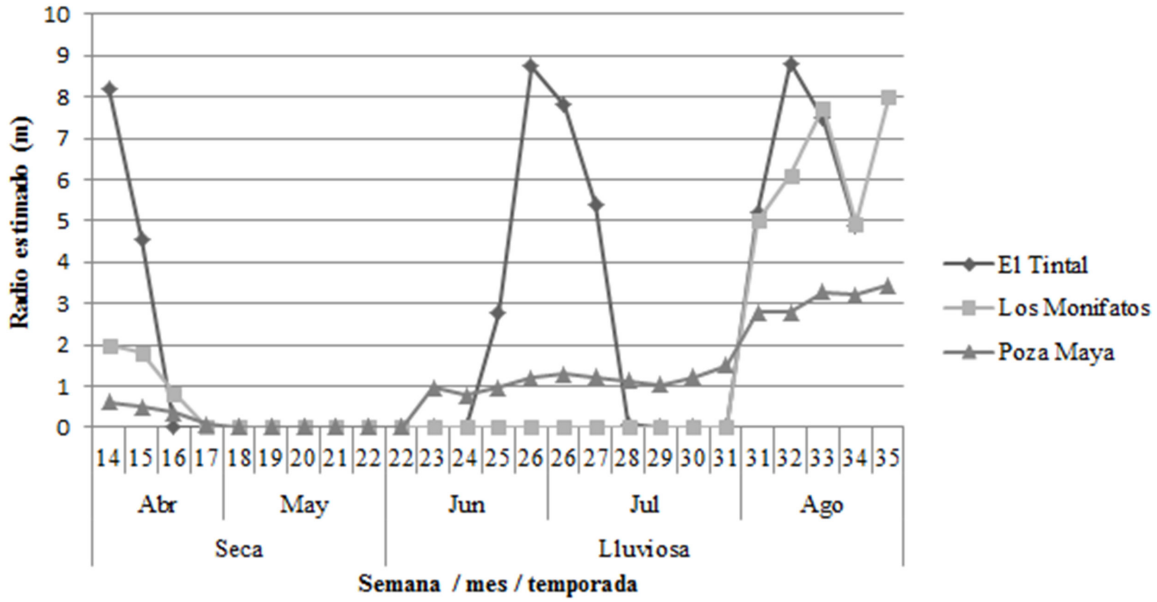

Figura 2. Promedio semanal de la estimación del radio por aguada.

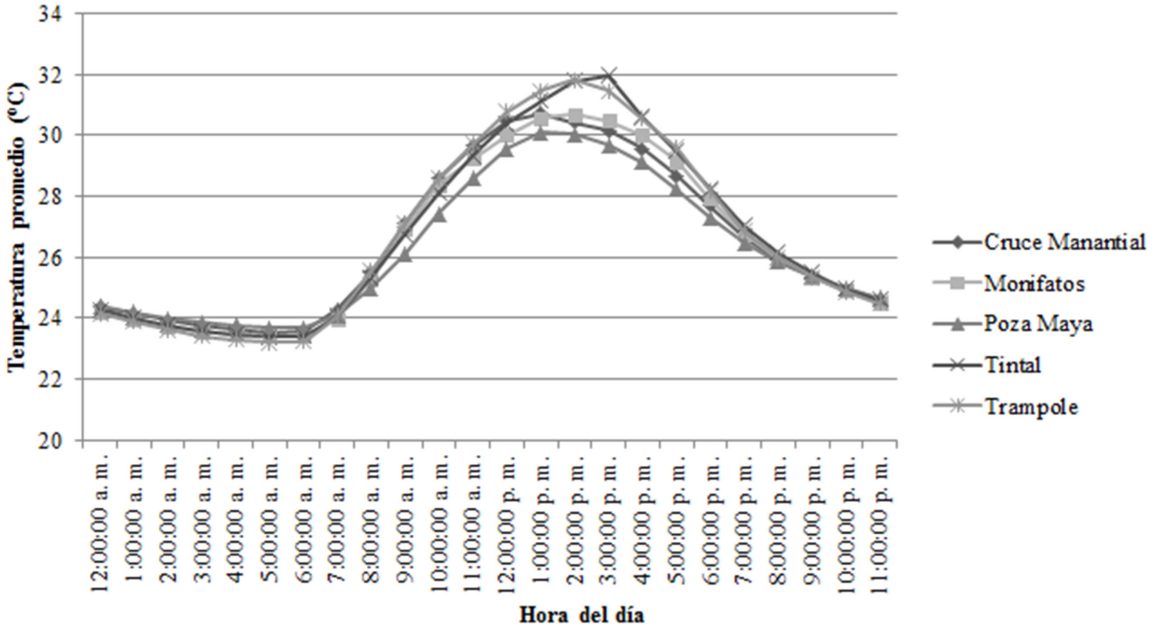

Figura 3. Dinámica diaria de temperatura en cinco aguadas para el periodo del estudio.

Tabla 1

Valores promedio y desviación estándar de temperatura y humedad relativa por aguada

Variable	Aguada	Temporada			
		Seca		Lluviosa	
		Promedio	Desviación estándar	Promedio	Desviación estándar
Temperatura	Cruce Manantial	29.3	(4.4)	26.0	(3.2)
	Monifatos	27.4	(4.1)	25.9	(2.9)
	Poza Maya	27.3	(3.8)	25.6	(2.5)
	Tintal	27.8	(4.5)	26.1	(3.3)
	Trampole	27.8	(4.8)	26.1	(3.3)
Humedad relativa	Cruce Manantial	69.0	(19.9)	86.9	(14.1)
	Monifatos	72.1	(17.9)	87.1	(13.6)
	Poza Maya	73.2	(17.0)	90.2	(11.6)
	Tintal	69.7	(18.3)	85.3	(14.3)
	Trampole	70.8	(19.2)	86.8	(14.2)

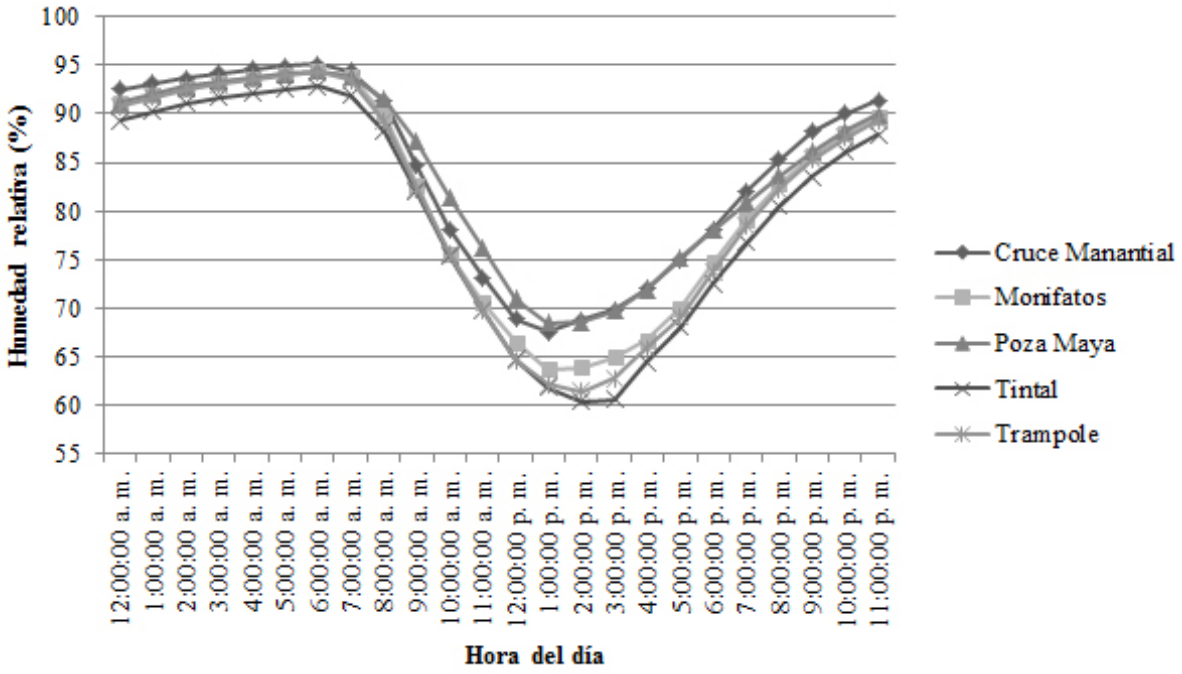

Figura 4. Dinámica diaria de humedad relativa en cinco aguadas para el periodo del estudio.

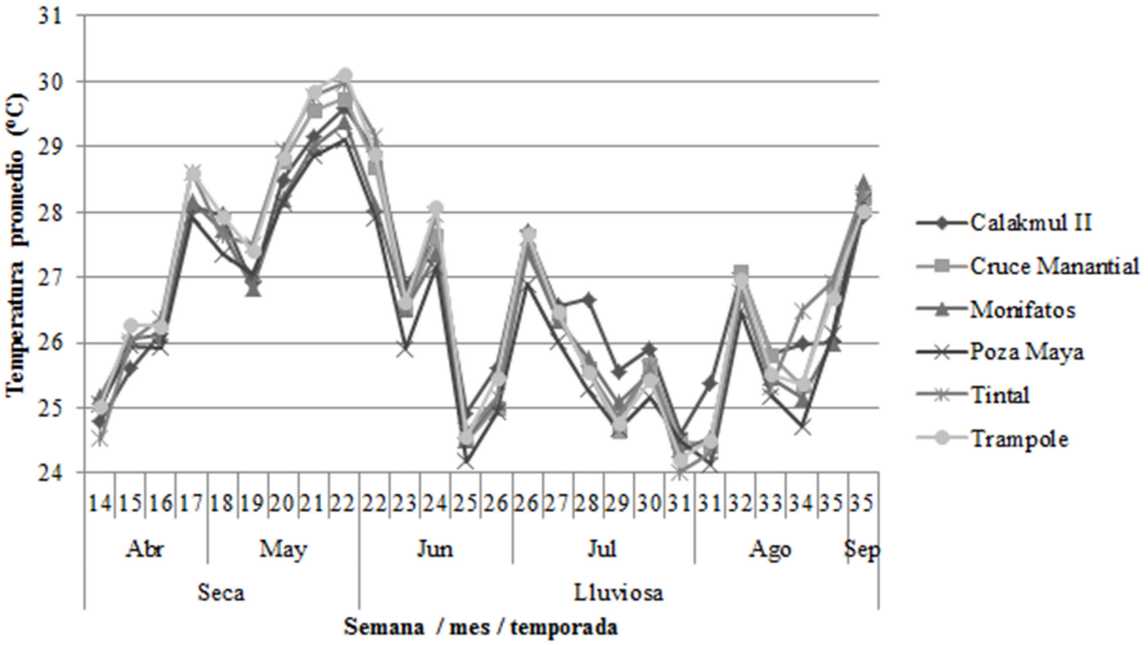

Figura 5. Promedio semanal de la temperatura (ºC) en cada una de las aguadas en estudio y la estación meteorológica automática Calakmul II. Nota: Abr=abril, May=mayo, Jun=junio, Jul=julio, Ago=agosto, Sep=septiembre..

del estudio, las aguadas Cruce al Manantial, El Tintal y Trampole alcanzaron temperaturas mayores con respecto a las aguadas Los Monifatos y Poza Maya, siendo esta última la que presenta en la mayoría de las semanas los promedios menores de temperatura. Así mismo, puede notarse que la temperatura ambiental registrada por la EMA Calakmul II es ligeramente mayor a la de las aguadas durante las semanas 28 a la 30 en el mes de junio. La mayor variación de los valores entre las aguadas ocurrió en la semana 34 en el mes de agosto.

Con respecto a la humedad relativa puede observarse un patrón similar para todas las aguadas, sin embargo es notorio que la Poza Maya presenta valores promedio mayores que las otras aguadas, especialmente durante la temporada lluviosa, a partir de la semana 25 (Figura 6). Durante las semanas de la 18 a la 22, cuando se presentaron los valores más bajos de humedad relativa, la aguada El Tintal presentó los valores promedio más bajos de humedad relativa. Así mismo, la humedad relativa ambiental registrada por la EMA Calakmul II presenta valores promedio menores que las aguadas, de la semana 27 a la 33 correspondientes a los meses de julio y agosto.

A pesar de que se observan algunas diferencias entre los valores de temperatura y humedad relativa en las aguadas, en el Andeva se obtuvo un valor F de 0.3869 (P = 0.817563) con lo que se determinó que no existen diferencias significativas entre las aguadas. (Tabla 2)

Correlación entre temperatura y humedad relativa en aguadas y la EMA

Se estimaron los coeficientes de correlación entre los valores promedio diarios de temperatura de la EMA Calakmul II y los valores en las aguadas (Tabla 3). El promedio (desviación estándar) de las correlaciones entre la EMA y los sensores automáticos fue de 0.8638 (0.02). Para la humedad relativa se presentó una tendencia similar, con un promedio (desviación estándar) para las correlaciones de 0.8425 (0.02).

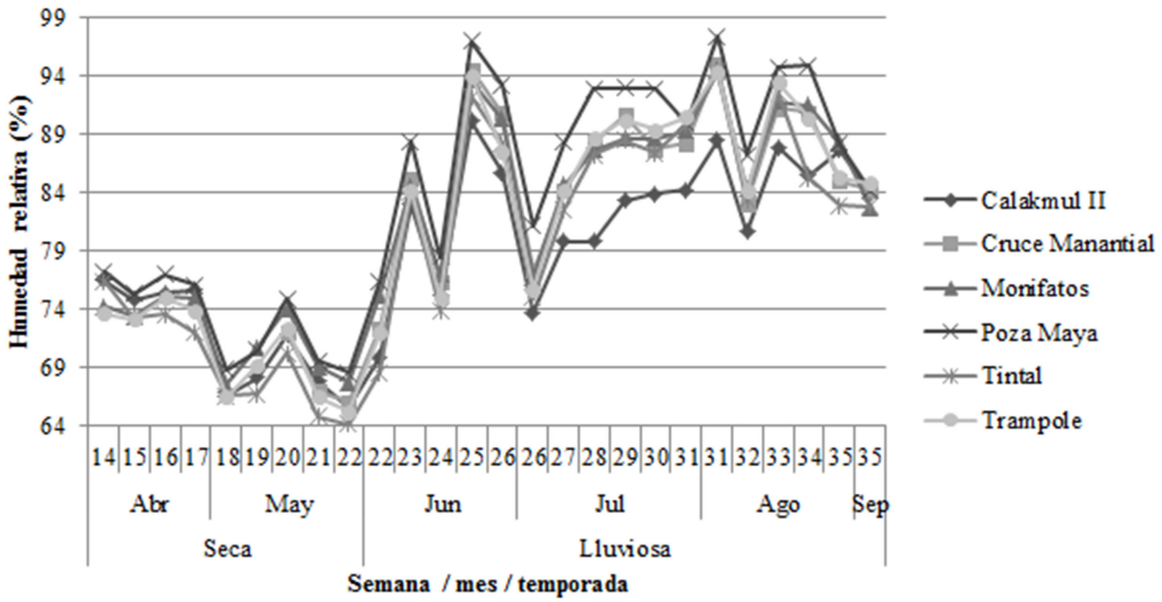

Figura 6. Promedio semanal de la humedad relativa (%) en cada una de las aguadas en estudio y la estación meteorológica automática Calakmul II. Nota: Abr=abril, May=mayo, Jun=junio, Jul=julio, Ago=agosto, Sep=septiembre.

Tabla 2
Valores del análisis de varianza (Andeva) para los valores de temperatura promedio semanal para las aguadas del estudio

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	P
Entre grupos	3.4511	4	0.8628	0.3869	0.817563
Error	220.7485	99	2.2298		
Total	224.1996	103			

Tabla 3
Coeficientes de correlación entre la temperatura registrada por la EMA Calakmul II y los data loggers en las aguadas

Aguada	Cruce Manantial	Monifatos	Poza Maya	Tintal	Trampole
Coeficiente de correlación con la EMA Calakmul II	0.8676759	0.8681748	0.8350361	0.868933	0.8792934

Discusión

Registro de la disponibilidad de agua en aguadas

En los cuerpos de agua estacionales someros, como las aguadas, el patrón temporal de la acumulación de agua (hidrorégimen) y su duración en las mismas (hidroperíodo) son determinadas por el balance hídrico entre el abastecimiento y la pérdida del líquido. Los componentes principales de este balance son la precipitación, los flujos superficiales y subterráneos y la evapotranspiración, los cuales interactúan en una combinación particular en función a las particularidades del cuerpo de agua (Leibowitz & Brooks, 2007; Winter, Rosenberry, Buso, & Merk, 2001). Estudios demuestran cómo en un cuerpo de agua somero, el hidroperiodo refleja en primera instancia la variación en el clima, especialmente de la precipitación como fuente de recarga hídrica (Brooks, 2004; Winter et al., 2001; Zedler, 1987).

Dada la naturaleza de las aguadas, el aumento del radio de su espejo de agua corresponde con eventos climáticos de precipitación (Reyna et al., 2010). En la Poza Maya y El Tintal este aumento es evidente al inicio de la temporada lluviosa en el mes de junio. Así mismo, durante el período de estudio, entre el 03 al 04 de agosto del 2016, el paso del huracán Earl en el Caribe implicó un aumento en la precipitación en el área de estudio, coincidiendo con un mayor incremento en el radio del espejo de agua de las aguadas, especialmente para El Tintal y Los Monifatos (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología [Insivumeh], 2016). Lo anterior, evidencia que fenómenos meteorológicos estocásticos intensos, como los huracanes, tienen una influencia significativa en el régimen de acumulación de agua en los cuerpos de agua, siendo también el caso de las aguadas (Hanes & Stromberg, 1998).

Además de los patrones de acumulación del agua interceptada por las aguadas, las variaciones físicas y bióticas determinan que esta agua se pierda como escorrentía o evapotranspiración. La topografía también influye si hay áreas de captación más extensas y podrían prolongar la duración de la fase de inundación y acortar la fase de desecación (Keeley & Zedler, 1998). Este podría ser el caso de El Tintal, el cual se encuentra en un bajo o selva inundable y la acumulación de agua podría depender del flujo de la misma desde áreas con relieve más elevado, a lo cual se podrían deber las pequeñas diferencias que se observaron. Se desconoce además, la influencia de la permeabilidad del sustrato sobre el balance hídrico de cada aguada, donde suelos con niveles más altos de arcillas pueden favorecer la acumulación de agua (Bauder, 2005; Keeley & Zedler, 1998; Wahl, Schreiner, Byrne, & Hansen, 2007).

Registro de variables microclimáticas

Respecto a la evapotranspiración, la magnitud de la misma se relaciona con factores físicos a escala local, como la temperatura, humedad y viento. La vegetación circundante modifica además, la incidencia solar y el flujo de aire que afectan la evaporación, por lo tanto, las diferencias en la composición estructural de la vegetación de las aguadas podría explicar las diferencias en el volumen de agua acumulada (Mitsch & Gosselink, 2015). Por ejemplo, El Trampole y El Tintal presentaron mayores valores de temperatura y menores valores de humedad relativa, y bajos valores para el radio de la aguada, lo que indica una mayor tasa de evapotranspiración. Siendo estas aguadas ubicadas en bajos, donde los árboles mayores a 30 m se encuentran ausentes y la cobertura herbácea es densa, con vegetación susceptible a inundaciones, lo cual pudo influir en una mayor exposición a la radiación solar y transpiración por la vegetación herbácea (González, 2015; Lundell, 1937; Rodas, 1998). De forma contraria, la Poza Maya se encuentra en un bosque alto con mayor cobertura del estrato arbóreo, lo que podría determinar que presente mayores valores de volumen de agua (González, 2015). Es importante hacer notar que en el estudio de González (2015) se describen como aguadas permanentes al menos a tres de las aguadas incluidas en este estudio, las cuales se secaron en el 2016. Esto evidencia que los patrones de disponibilidad de agua en las aguadas varían en cada año, dependiendo de los patrones de precipitación, duración e intensidad de las lluvias (Bauder, 2005).

Todos estos cambios estacionales en el régimen de las lluvias, en el clima y la humedad relativa, ocasionan variaciones del balance hídrico de las aguadas, que determina a su vez, la acumulación de agua o la pérdida de la misma. Patrones que pueden relacionarse además con el establecimiento de la vegetación. Zedler (1987) caracterizó al menos cuatro estadios en las pozas estacionales en California en un año, iniciando con la germinación de semillas latentes y el crecimiento de plantas perennes, seguida de una fase acuática o inundable, para después disminuir el nivel del agua,

finalizando con una fase de sequía. En este estudio, todas las aguadas presentaron fases inundables, en concordancia con la precipitación, y una fase de sequía, acompañados por una sucesión de vegetación asociada. En los registros fotográficos pudo observarse la presencia de plantas acuáticas en las aguadas, donde las aguadas Monifatos, El Tintal y Poza Maya presentaron una cobertura de hidrófitas emergentes y flotantes, que podrían influir en la velocidad con la que el agua acumulada se evapotranspira, fluctuación particularmente evidente en la Poza Maya. Por lo tanto, puede inferirse que se lleva a cabo una sucesión de distintos grupos funcionales y taxonómicos que aprovechan los recursos que ofrece los patrones de humedad y productividad asociados al hidroperíodo de cada aguada, como ya se ha reportado en la literatura (Husband & Barrett, 1998; Jeffries, 2001; Schriever, Cadotte, & Wililams, 2014).

El estudio de cuerpos de agua fluctuantes como las aguadas es complejo, ya que las medidas sobre el tamaño y forma son representativas únicamente para un momento en particular, debido a que llegan a cambiar a lo largo del tiempo, incluso llegando varios cuerpos de agua a unirse o bien, a secarse (Zedler, 1987). Siendo otra de las variables que determina la permanencia del agua el aislamiento del subsuelo y la geomorfología de la aguada (Akpinar, 2011). En este sentido, se considera importante realizar el monitoreo de los niveles del agua a través de varios años e investigaciones que incorporen estudios topográficos de las aguadas. La comprensión de la variación geomorfológica de las aguadas y su influencia en la distribución y balance de agua, puede ayudar a predecir qué aguadas serán clave, tanto a nivel de área protegida como de paisaje en la hidratación de la fauna presente, o bien, cuáles aguadas son susceptibles a un manejo especial para evitar su desecamiento.

Correlación entre los datos de temperatura y humedad relativa en aguadas y la EMA Calakmul II

Con respecto a la correlación significativa entre los valores registrados por los sensores en las aguadas y la EMA Calakmul II, indica que es posible utilizar los valores registrados por la EMA como una referencia de la temperatura y humedad relativa de las aguadas en los programas de monitoreo de aguadas y la fauna asociada. Sin embargo, dadas las variaciones climáticas interanuales, se recomienda implementar un estudio de varios años, con el fin de determinar si efectivamente se mantiene esta correlación significativa a través de años con distintas características climáticas.

En cuando a las recomendaciones para el manejo de las aguadas, es evidente que en años como el 2016, en el cual se secan por completo las aguadas, podría suponerse la necesidad de implementar medidas alternativas como los bebederos artificiales que se han instalado en la RBC (Araujo, 2014). Sin embargo se considera que, con base al principio de precaución, es necesario realizar estudios sobre la calidad de agua en estas fuentes alternativas, con el fin de garantizar que no representan ningún riesgo para la fauna silvestre que las utilice.

Así mismo, podría ser que la fauna esté adaptada para estas condiciones, migrando hacia otras áreas, como el caso del indidivuo de *T. bairdii* que reportan Reyna-Hurtado, Sanvicente-López, Pérez-Flores, Carrillo-Reyna y Calmé (2016) en la RBC, el cual se desplazó una distancia máxima de 10.5 km, aparentemente en busca de agua. Por lo que otra estrategia a considerar es mantener la conectividad entre las aguadas para permitir el desplazamiento de la fauna, sin necesidad de otras medidas alternativas, cuyo costo de implementación podría hacerlas inviables (Araujo, 2014; O´Farrill et al., 2014). Sin embargo, un riesgo asociado a estas potenciales migraciones, es que las especies se vean forzadas a salir afuera de las áreas protegidas hacia zonas pobladas donde aumenta su vulnerabilidad a la cacería o atropellamientos (O'Farrill et al., 2014).

De modo que se plantea la necesidad del desarrollo de estrategias integrales a escala de paisaje, que aseguren el movimiento de las especies, acciones de control y vigilancia para reducir la cacería, la conservación de los cuerpos de agua, medidas de mitigación en carreteras y educación ambiental en comunidades aledañas y la población en general (Araujo, 2014; González, 2015; O'Farrill et al., 2014).

Agradecimientos

La realización de este estudio fue posible gracias al cofinanciamiento de la Digi-Usac (2016), proyecto (4.8.63.4.04) y el Programa Mundial para la Conservación de los Tapires del Grupo de Especialistas del Tapir de la UICN y la Fondation Segré. Así como la participación del personal de Cecon Usac: Saúl Castillo Hernández, Darwin Aguirre Castillo, Jaime F. Gutiérrez, Héctor A. Palacios, Agustín Caal Cajbón, Elvis Solís Montúfar, Erwin R. Mayen, Marvin A. Ochaeta, Renan Sotó Hernández, Fredy N. Bedoya y los técnicos Marvin Rosales, Juan J. Romero y Luis Rodas, la Fundación Defensores de la Naturaleza y los colabora-

dores Raquel Leonardo y Santiago Zetina. Al Servicio Meteorológico Nacional de la Comisión Nacional del Agua (Conagua) de México por compartir información correspondiente a la estación meteorológica automática (EMA) Calakmull II. Y al Consejo Nacional de Áreas Protegidas (Conap) por su aval, acompañamiento y apoyo en la realización de este estudio.

Referencias

Akpinar, E. (2011). *Aguadas: A significant aspect of the southern Maya lowlands water management system* (Tesis de doctorado). University of Cincinnati, Ohio.

Anderson, E. R., Cherrington, E. A., Flores, A. I., Pérez, J. B., Carrillo, R., & Sempris, E. (2008). *Potential impacts of climate change on biodiversity in Central America, Mexico and Dominican Republic*. Panamá: Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y el Caribe y United States Agency for International Development.

Araujo, R. (Ed.) (2014). *Programa municipal de desarrollo de gran visión para el municipio de Calakmul, Campeche (2013-2040*). Guatemala: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit.

Bauder, E. (2005). The effects of an unpredictable precipitation regime on vernal pool hydrology. *Freshwater Biology, 50*(12), 2129-2135. doi:10.1111/j.1365-2427.2005.01471.x

Brooks, R. T. (2004). Weather-related effects on woodland vernal pool hydrology and hydroperiod. *Wetlands*, *24*(1), 104-114. doi:10.1672/0277-5212(2004)024[0104:WEOWVP]2.0.CO;2

Consejo Nacional de Áreas Protegidas, Dirección General del Patrimonio Cultural y Natural, & Centro de Estudios Conservacionistas. (2010). *Plan Maestro 2009-2013 Parque Nacional Mirador Río Azul y Biotopo Protegido Naachtún- Dos Lagunas*. Guatemala: Autor.

Consejo Nacional de Áreas Protegidas. (2015). *Plan Maestro de la Reserva de la Biósfera Maya. Segunda Actualización* (Tomo 1). Guatemala: Autor.

González, V. R. (2015). *Vertebrados medianos y mayores asociados a las aguadas del Biotopo Protegido Naachtún - Dos Lagunas, Petén* (Tesis de licenciatura). Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

Hanes, T., & Stromberg, L. (1998). Hydrology of vernal pools on non-volcanic soils in the Sacramento Valley. En C. Witham, E. Bauder, D. Belk, W. Ferren & R. Ornduff (Eds.), *Ecology, Conservation,and Management of Vernal Pool Ecosystems.* Proceedings from a 1996 Conference of the California Native Plants Society. Sacramento: California, Native Plant Society.

Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Thau, D., ... Townshend, J. R. G. (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science, 342*(6160), 850-853. doi:10.1126/science.1244693

Hodgon, B. D., Hughell, D., Ramos, V. H., & McNab, R. B. (2015). *Tendencias en la deforestación de la Reserva de Biosfera Maya, Guatemala 2000-2013*. Guatemala: Rainforest Alliance, Wildlife Conservation Society y Consejo Nacional de Áreas Protegidas.

Husband, B. C., & Barrett, S. C. H. (1998). Spatial and temporal variation in population size of *Eichhornia paniculat*a in ephemeral habitats: Implications for metapopulation dynamics. *Journal of Ecology, 86*(6), 1021-1031. doi:10.1046/j.1365-2745.1998.00324.x

Instituto Nacional de Ecología. (2000). *Programa de manejo de la Reserva de Biosfera Calakmul*. México: Autor.

Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. (2016). Avance de la Tormenta Earl. (Informe preliminar, emisión 4 agosto 2016). Recuperado de www.insivumeh.gob.gt/meteorologia/Informe_preliminar__ tormenta_earl.pdf

Jeffries, M. J. (2001). Modeling the incidence of temporary pond microcrustacea: The importance of dry phase and linkage between ponds. *Israel Journal of Zoology, 47*(4), 445-458. doi:10.1560/8C99-UNJK-V1CL-EA8K

Keeley, J., & Zedler, P. (1998). Characterization and global distribution of vernal pools. En C. Witham, E. Bauder, D. Belk, W. Ferren & R. Ornduff (Eds.), *Ecology, Conservation, and Management*

of Vernal Pool Ecosystems. Proceedings from a 1996 Conference of the California Native Plants Society. Sacramento, CA Native Plant Society.

Leibowitz, S. G., & Brooks, R. T. (2007). Hydrology and landscape connectivity of vernal pools. En A. Calhoun & P. De Maynadier. *Science and conservation of vernal pools in Northeastern North America,* (p. 31-54). Nueva York: CRC Press.

Lundell, C. L. (1937). *The Vegetation of Petén. Studies of Mexican and Central American Plants I*. Washington, D. C.: Carnegie Institution of Washington.

Mitsch, W., & Gosselink, J. (2015). *Wetlands* (5th ed.). New Jersey: Wiley & Sons

Moreira-Ramírez, J. F., Reyna-Hurtado, R., Hidalgo-Mihart, M., Naranjo, E., Ribeiro, M. C., García-Anleu, … Ponce-Santizo, G. (2016). Importancia de las aguadas para el pecarí de labios blancos (*Tayassu pecari*) en la Selva Maya, Guatemala. *Therya*, *7*(1), 51-64. doi: 10.12933/therya-16-344.

O'Farrill, G., Schampaert, K. G., Rayfield, B., Bodin, O., Calmé, S., Sengupta, R., & Gonzalez, A. (2014). The potential connectivity of waterhole networks and the effectiveness of a protected area under various drought scenarios. *Plos One, 9*(5), e95049. doi:10.1371/journal.pone.0095049

Pérez-Cortez, S., Enríquez, P. L., Sima–Panti, D., Reyna–Hurtado, R., & Naranjo, E. J. (2012). Influencia de la disponibilidad de agua en la presencia y abundancia de *Tapirus bairdii* en la selva de Calakmul, Campeche, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad, 83*(3), 753-761. doi:10.7550/rmb.25095

Reyna, R., O´Farril, G., Simá, D., Andrade, M., Padilla, A., & Sosa, L. (2010). Las aguadas de Calakmul: Reservorios de vida silvestre y de la riqueza natural de México. *Biodiversitas, 93*, 1-6.

Reyna-Hurtado, R., Sanvicente-López, M., Pérez-Flores, J., Carrillo-Reyna, N., & Calmé, S. (2016). Insights into the multiannual home range of a Baird's tapir (*Tapirus bairdii*) in the Maya Forest. *Therya, 7*(2), 271-276. doi:10.12933/therya-16-348

Rodas, R. (1998). *Evaluación de la riqueza de especies del dosel y del sotobosque en la estación biológica las Guacamayas, Parque Nacional Laguna del Tigre, Petén* (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Guatemala.

Ruano, G., Moreira, J., García, R., McNab, R. B., Ponce-Santizo, G., Méndez, V., & Córdova, F. (2009). *Monitoreo de manadas de jabalí y dantos que visitan las aguadas de la región Este del Parque Nacional Mirador Río Azul* (Informe técnico). Guatemala: Wildlife Conservation Society, United States Agency for International Development, Consejo Nacional de Áreas Protegidas y Centro de Estudios Conservacionistas.

Sandoval-Serés, E., Reyna-Hurtado, R., Briceño-Méndez, M., & de la Cerda-Vega, R. (2016). Uso de aguadas y abundancia relativa de *Tapirus bairdii* en la región de Calakmul, Campeche, México. *Therya*, *7*(1), 39-50. doi: 10.12933/therya-16-349, ISSN 2007-3364

Schriever, T. A., Cadotte, M. W., & Williams, D. D. (2014). How hydroperiod and species richness affect the balance of resource flows across aquatic-terrestrial habitats. *Aquatic Sciences, 76*(1), 131-143. doi: 10.1007/s00027-013-0320-9

Simá, P., Reyna, R, & Retana, O. (2008). *Caracterización de fauna silvestre asociada a aguadas en cuatro ampliaciones forestales en la Reserva de Biosfera Calakmul, Campeche, México* (Informe técnico). México: Reserva de Biosfera Calakmul, ProNatura Península de Yucatán, The Nature Conservancy, Universidad Autónoma de Campeche y Universidad de Florida.

Wahl, D., Schreiner, T, Byrne, R., & Hansen, R. (2007). A Paleoecological record from a late classic Maya Reservoir in the North Peten. *Latin American Antiquity, 18*(2), 212-222. doi:10.2307/25063105

Winter, T. C., Rosenberry, D. O., Buso, D., & Merk, D.A. (2001). Water source to four U.S. wetlands: Implications for wetland management. *Wetlands, 21*(4), 462–473. doi:10.1672/0277-5212(2001)021[0462:WSTFUS]2.0.CO;2

Zedler, P. (1987). The ecology of southern California Vernal Pools: A community profile. Biological Report 85(7.11). Washington, D. C.: Fish and Wildlife Service.

Ciencia, Tecnología y Salud
Vol. 5 Num. 2 2018
ISSN: 2410-6356 (electrónico) / 2409-3459 (impreso)

Artículo Científico / Scientific Article

Relación entre áreas y variables ambientales espaciales con el atropellamiento y cruce de la fauna silvestre en la carretera de la Franja Transversal del Norte, Cobán, Guatemala

Areas and spatial environmental variables related with the trampling and wildlife crossing in the Northern Transversal Road in Coban, Guatemala.

Oscar Rojas, Carlos Avendaño

Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala

***Autor al que se dirige la correspondencia:** oscaralbertorojascastillo@hotmail.com

Recibido: 04 de abril 2018 / Revisión: 24 de agosto 2018 / Aceptado: 24 de septiembre 2018

Resumen

Dentro del Proyecto vial de la Franja Transversal del Norte en Cobán se planea asfaltar 10 km del trayecto en el Parque Nacional Laguna Lachuá. Esto impactará a la fauna de no considerarse medidas de mitigación del atropellamiento. La investigación evaluó los patrones espaciales del atropellamiento de vertebrados, la frecuencia de cruce de aves y categorizó las secciones de la carretera en dicho trayecto, según variables ambientales (humedales, usos del suelo, cobertura; y ancho, asfaltado y ubicación de la carretera) con el fin de determinar los sitios más eficientes para la aplicación de medidas de mitigación. En el 2016, se realizaron 20 recorridos, donde se georreferenció, fotografió e identificó a los individuos atropellados; tres recorridos en los meses de febrero, marzo y abril, cinco en mayo y seis en junio; 12 recorridos fueron realizados adicionalmente cuantificando el cruce de aves para determinar que sitios podrían ser futuramente impactados. Finalmente, para un análisis más completo, el trayecto de la carretera bajo estudio fue dividido en 19 secciones (T1-T19) de 550 m cada uno. Fueron empleadas: estadística descriptiva, análisis de componentes principales (ACP), correspondencia canónica (CCA) y análisis de correspondencia (AC), para relacionar variables ambientales con atropellamiento y frecuencia de cruce. La mayoría de atropellamientos (80 %) ocurrieron en zonas asfaltadas, los anfibios fueron los más atropellados (125 individuos, 75 %), seguido por reptiles 21 (12 %), mamíferos 11 (7 %) y aves 10 (6 %). La mayor frecuencia de cruce ocurrió en zonas con humedales y alta cobertura boscosa (T1, T3, T6, T7 y T10) siendo estas secciones prioritarias para mitigación.

Palabras claves: Patrones espaciales, frecuencia de cruce, sitios de reducción de atropellamiento, cruce de aves, Parque Nacional Laguna Lachuá.

Abstract

The Franja Transversal del Norte road project in the Coban Province plans to pave a 10 km long dirt road inside the Laguna Lachua National Park. This will impact the fauna if no mitigation measure for wildlife-vehicle collision is considered. The research evaluated the spatial patterns of the vertebrate´s roadkills, the bird's road-crossing frequency, and categorized the road section based on environmental variables (wetlands, land use, coverture; and road's width, location, and paved or not paved) to determine the most efficient sites for the application of mitigation measures. In 2016, 20 treks were made to detect, geo-reference, photograph and identify road killed individuals, three treks in the months of February, March, and April, five in May and six in June; 12 additional treks were made to quantify birds' road-crossing to determine the sites that could be impacted in the future. Finally, for a further analysis, the road section under study was divided into 19 segments (T1-T19), 550 m long each. A combination of descriptive statistics, principal component analysis (PCA), canonical correspondence analysis (CCA) and correspondence analysis (CA) were employed to relate the spatial environmental variables with roadkill and road-crossing frequency. Eighty percent of the roadkill's occurred in the paved zones, the amphibians were the most affected (125 carcasses, 75 %), followed by reptiles 21 (12 %), mammals 11 (7 %) and birds 10 (6 %). The highest road-crossing frequencies were related to wetlands and high forest cover (T1, T3, T6, T7, T10) being priority areas for the application of mitigation measures.

Keywords: Spatial patterns, vertebrate road-crossing, wildlife vehicle collision, speed reduction measures, Laguna Lachua National Park.

La reproducción total o parcial del contenido e imágenes de esta publicación se rige de acuerdo a normas internacionales sobre protección a los derechos de autor, con criterio especificados en la licencia Creative Commons (CC BY-NC-SA 4.0)

Introducción

Los proyectos viales se consideran de beneficio social y económico por su contribución al desarrollo humano y el mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes (Arroyave et al., 2006). Sin embargo, en numerosos estudios se ha observado que el establecimiento de los mismos produce efectos negativos sobre el ambiente, como la fragmentación de ecosistemas, dispersión de especies exóticas, alteración del ciclo hidrológico, modificación micro climática, contaminación auditiva, contaminación física del suelo y agua, y un impacto directo a la flora nativa y principalmente a la fauna (Andrews & Gibbons, 2008; Dyer, O'Neill, Wasel, & Boutin, 2002).

La mortalidad de animales por atropellamiento es uno de los efectos negativos más importantes (Trombulak & Frissell, 2000). Se estima que más de 30 millones de vertebrados son atropellados cada año en España (López, 2004), entre 89 y 340 millones de aves en los Estados Unidos (Loss, Will, & Marra, 2014), 200,000 ciervos en Alemania (Hothorn, Brandl, & Müller, 2012) y 5 millones de anfibios y réptiles en Australia (Hels & Buchwald, 2001). Dentro de áreas protegidas la cantidad de atropellamientos es aún mayor, en solamente 76 km de la carretera del Parque Nacional Saguaro en Arizona se estima que más de 29 mil vertebrados son atropellados anualmente (Gerow, Kline, Swann, & Pokorny, 2010). Estudios de largo plazo estiman que más de 625 serpientes y más de 1,700 sapos son atropellados anualmente en cada km de carretera cercana a humedales, presentando estas las tasas más altas de atropellamiento de fauna (Ashley & Robinson, 1996; Forman & Alexander, 1998).

Por todo lo anterior, el Proyecto vial de la Franja Transversal del Norte (FTN), especialmente la sección ubicada en la Ecorregión Lachuá (EL), debe considerar con seriedad sus repercusiones, ya que esta se caracteriza por una selva tropical lluviosa verdadera, reconocida por su alta biodiversidad faunística, y una serie de cuerpos hídricos que han sido considerados por la convención RAMSAR de importancia nacional e internacional para la conservación de los humedales (Escuela de Biología, 2004). La FTN atraviesa 372 km de esta ecorregión (Rogers, 2013; Solano, 2012). De estos, 10 km serán pavimentados dentro del Parque Nacional Laguna Lachuá (PNLL) cuya importancia radica en su biodiversidad, ya que resguarda al menos a 130 especies de mamíferos, 30 de reptiles, 40 de anfibios, 177 de aves, incluyendo 29 especies migratorias (Avendaño, 2001; Instituto Nacional de Bosques [INAB], 2003); además el PNLL es el único remanente de bosque tropical verdaderamente lluvioso que se encuentra actualmente protegido en el área, lo que lo hace vital para la conservación de estas especies (Escuela de Biología, 2004).

Al encontrarse la FTN en contacto con esta importante reserva de vida silvestre, se supone que los impactos del proyecto vial hacia la fauna serán muy altos. Por lo tanto, resulta importante llevar a cabo una medición de los puntos preferenciales de paso de la fauna en la carretera, y complementario a esto, una evaluación de los patrones espaciales de atropellamiento de la misma para priorizar localidades de mitigación del impacto (Teixeira et al., 2013).

La presente investigación tuvo como fin evaluar los patrones espaciales del atropellamiento de vertebrados en los meses de febrero a junio, la frecuencia de cruce de la fauna (aves) del PNLL y caracterizar la carretera tomando en cuenta variables ambientales espaciales (cuerpos hídricos, parche anexo a carretera, traslape de copas (dosel), porcentaje de cobertura boscosa, ancho y tipo de carretera y posición espacial), para así determinar los sitios útiles para la implementación de medidas de reducción del atropellamiento en la misma.

Materiales y métodos

Área de estudio

La EL, fisiográficamente pertenece al Cinturón Plegado del Lacandón, es una región kárstica con clima cálido (21-28 °C) y húmedo (90-95 %) característico de la selva tropical lluviosa verdadera (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación [MAGA] & Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza [CATIE], 2001). Es habitada por 55 comunidades indígenas de la etnia q'eqchi'. Debido a un historial de ocupación territorial desordenado, debilidades institucionales y de desarrollo social, además de diversas amenazas, entre ellas, talas ilícitas, pérdida de cobertura forestal, expansión de cultivos, proyectos petroleros, entre otros, la riqueza natural de la Ecorregión se encuentra amenazada (Avendaño et al., 2005; INAB, 2003); siendo el PNLL el único remanente de bosque natural protegido en la FTN.

El PNLL es un área de importancia en términos de la biodiversidad del país, posee una extensión de 14,500 ha en la que se encuentran diversos ecosistemas,

acuáticos y terrestres (planos y de montaña). Dentro del parque se encuentran al menos 130 especies de mamíferos, equivalente a un 50 % de las especies reportadas para el país, y entre un 15-20 % de los reptiles y anfibios (30-40 especies, entre ellas la rana de árbol *Hyla ebraccata* y la culebra de pantano *Tretanorhinus nigroluteus,*). El PNLL alberga especies emblemáticas de mamíferos como lo son: el jaguar (*Panthera onca*), el venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*), el tepezcuintle (*Cuniculus paca*) y el coche de monte (*Pecari tajacu*); así como especies de distribución restringida como el cocodrilo moreleti (*Crocodilus moreletti*) y el mono aullador (*Alouatta pigra*) (INAB, 2003). Además, es importante para la avifauna neotropical; según estudios por Avendaño (2001), reportan 177 especies, incluyendo 13 de las 17 especies endémicas regionales y 29 especies migratorias, lo que equivale aproximadamente al 44 % del total del país (Avendaño, 2001).

Recolección de datos:

El procedimiento de este estudio consistió en tres fases. La primera fue la observación de los vertebrados atropellados, la segunda fue la determinación de la frecuencia de cruce de aves en la carretera y la tercera fue la caracterización de los tramos de la carretera en función de variables espaciales, finalmente se realizó un análisis de estas con los fenómenos de atropellamiento y de paso de aves.

Detección del atropellamiento de vertebrados. En cinco meses se llevaron a cabo 20 recorridos en bicicleta a lo largo de la carretera del límite norte del PNLL a una velocidad promedio de 20 km/h. Cada recorrido fue de 10 km, y en cada uno se observó, identificó a nivel de especie (Identificación de la herpetofauna Köhler, 2008; y de la ornitofauna empleando van Perlo, 2006), anotó y georreferenció los vertebrados atropellados. Los recorridos se llevaron a cabo por conveniencia (según el tiempo de estadía del investigador en el área). En febrero, marzo y abril se realizaron tres recorridos. En mayo se realizaron cinco recorridos y en junio seis; abarcando meses de temporada seca (febrero, marzo y abril) y meses de temporada lluviosa (mayo y junio).

Caracterización de los tramos de la carretera en función de variables ambientales espaciales. El total de la FTN que limita la sección norte del PNLL se dividió en 19 unidades o tramos de 550 m cada uno (denominados del T1 al T19, como se muestra en la figura 1A, 1B y 1C), los primeros 13 fueron de terracería y los últimos seis de asfalto. Las unidades se caracterizaron mediante la observación y el análisis de imágenes satelitales en el programa Google Earth©, en función de las variables ambientales espaciales: presencia de cuerpos de agua (detectando cuerpos de agua anexos a la carretera observables en las imágenes satelitales y/o recorridos), identificación de parche anexo a carretera (clasificados en función de las categorías: bosque, jardín/vivienda cultivo, pastizal, palma africana), porcentaje de traslape de copas sobre la carretera (empleando una cuadrícula 0.5x0.5 cm sobre la carretera de la imagen satelital de Google Earth© escala 1:2,255 (Google, 2015), se calculó el porcentaje de cuadros con cobertura), porcentaje de cobertura de parches anexos (100 m al norte y 100 m al sur fueron analizados con la misma cuadrícula e imagen que la variable anterior), sustrato del camino (asfalto o terracería), ancho de carretera (medida directamente en los puntos de observación de cruce de la fauna) y posición espacial (se obtuvo la latitud, longitud y altitud de Google Earth© mediante un GPS Garming©) (Tabla 2).

Medición de la frecuencia de cruce de aves

Cada una de las 19 unidades (T1 al T19) se representó por una subunidad de 200 m ubicada dentro de las mismas, esta es la distancia máxima continua que permite una observación ininterrumpida para detectar eventos de paso o cruce de animales en la carretera del norte del PNLL (distancia calibrada en premuestreo, mediante la realización de observaciones en diferentes puntos de la carretera con el fin de evitar sesgo causado por eventos de cruce no observados consecuencia de obstrucciones como ramas o curvas en la carretera). Cada subunidad fue observada por un periodo de 5 min en cada recorrido de visualización de paso (un total de 12 recorridos por unidad, seis de los cuales llevados a cabo en mayo y los seis restantes en junio). Cada unidad se observó durante el mismo tiempo en los distintos intervalos temporales planteados (6:00-7:30, 7:30-9:00, 9:00-10:30, 10:30-12:00), con el fin de reducir el sesgo que puede darse en función de la variación de la actividad de los vertebrados a lo largo del día.

Análisis de datos

Las frecuencias de cruce de aves y del atropellamiento fueron analizadas empleando estadística

Figura 1A. Tramos T1-T7 del Proyecto de la FTN, ubicado en el norte del Parque Nacional Laguna Lachuá (Google Inc, 2015).

Figura 1B. Tramos T8-T13 del Proyecto de la FTN, ubicado en el norte del Parque Nacional Laguna Lachuá (Google Inc, 2015).

Figura 1C. Tramos T13-T19 del Proyecto de la FTN, ubicado en el norte del Parque Nacional Laguna Lachuá (Google Inc, 2015).

Cada uno de los 19 tramos T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7 (Figura 1A), T8, T9, T10, T11, T12 (Figura 1B), T13, T14, T15, T16, T17, T18, T19 (Figura 1C) mide 550 metros y fue caracterizado en función de variables ambientales espaciales, estos tramos representan los ejes x de las figuras 2 y 3.

descriptiva, utilizando diagramas de barras (Cooper & Shore, 2010). Además, se utilizaron los análisis de componentes principales (PCA), análisis de correspondencia canónica (CCA) y análisis de correlación (CA) en Past 3.03 (Hammer, Harper, & Ryan, 2001), con el fin de observar las variables ambientales espaciales relacionadas a la frecuencia de cruce (PCA y CCA) y al atropellamiento (CA), para entender estos fenómenos de una forma más detallada (Legendre & Legendre, 1998; McGarigal, Stafford, & Cushman, 2000).

Resultados

Los sitios asfaltados presentaron un mayor número de animales atropellados en contraste con los sitios de terracería. En los 3.24 km de asfalto del área de estudio (tramos T14-T19), el número de vertebrados fue de 132 (103 anfibios, 5 mamíferos, 15 réptiles y 9 aves), considerablemente mayor al observado en los 6.86 km de terracería, donde el valor fue de 35 (22 anfibios, 6 mamíferos, 6 réptiles y 1 ave) (Figura 2). Los tramos T16 y T17 presentaron el mayor atropellamiento. Los anfibios fueron los más atropellados, seguido por los reptiles, mientras las aves fueron las menos atropelladas. Los tramos T6, T9, T10 y T13 presentaron la mayor cantidad de animales atropellados en lo que respecta a la terracería de la carretera (Figura 2).

El taxón más frecuentemente atropellado fue el de anfibios con 125 (75 %) individuos, seguido por réptiles con 21 (12 %) individuos, mamíferos con 11 (7 %) individuos y por último el de aves con 10 (6 %) individuos siendo un total de 167 animales silvestres atropellados (Figuras 2 y 4).

Once mamíferos fueron atropellados. El tacuazín (*Didelphis marsupialis*) fue la especie con el mayor número (10) (Tabla 1). Diez aves fueron atropelladas, la familia Trochilidae (*Phaethornis superciliosus* y *Amazilia tzacatl*) fue la más afectada con dos atropellamientos. Ciento veinticinco anfibios fueron atropellados y debido al deterioro de los organismos por el sol, lluvia, etc. no todos se lograron identificar a nivel de especie; 85 individuos se identificaron hasta familia, 65 hasta género y 57 hasta especie. *Rhinella horribilis* fue la más afectada de este grupo con 36 atropellamientos, seguida por *Incilius valliceps* con 10 (Tabla 1). Veinte reptiles fueron atropellados, 15 del grupo serpentes (serpientes),

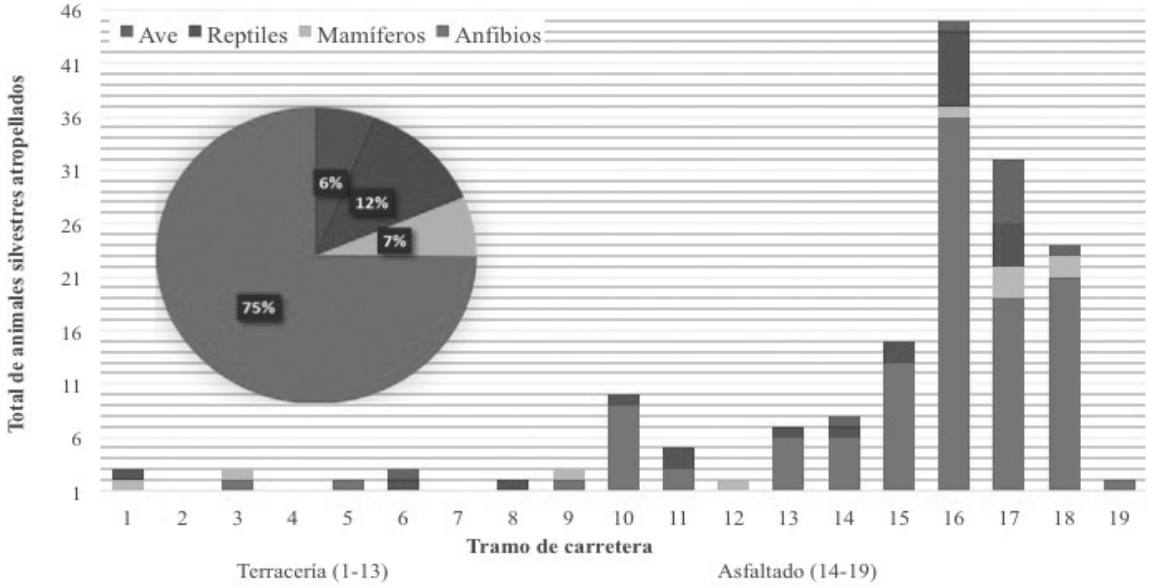

Figura 2. Proporción de vertebrados atropellados según su taxón y total de atropellamientos detectados por tramo.

dos del grupo testudines (tortugas) y dos del grupo lacertilla (lagartijas), siendo *Ninia sebae* y *Rhadinaea decorata* los más atropellados (Tabla 1).

Los tramos T6 y T7 de la sección de terracería, asociados a ríos, presentaron los mayores valores de paso de aves (Figura 3). El tramo T12, asociado a un parche de cultivo de palma africana (*Elaeis guineensis*) considerada una especie exótica en el país, fue el sitio con el menor paso de aves (Figura 3). En la sección asfaltada los tramos T14 (pastizal) y T17 (pequeño bosque), presentaron los valores mayores de frecuencia de cruce de aves.

Los sitios 1-9 se caracterizaron por no presentar asfalto, un ancho de carretera menor a 5 m, cobertura forestal mayor a 60 %, los menores valores de longitud (X) y latitud (Y) encontrándose más al sur y este que el resto de los tramos; además presentaron un parche anexo de bosque. Los tramos 10-12, fueron de terracería, cobertura forestal menor a 60 %, colindaron al sur con parches de bosque y al norte con parches de casas y jardines (tramo 10-11) y palma africana (tramo 12). El tramo 13 fue muy similar a los tramos 1-9, sin embargo, además de bosque al norte colindó con un parche de pastizal (50 %) y el ancho de la carretera era mayor a 5 m. Los tramos 3, 6, 7, 9, 10, 12 y 15 se encuentran anexos a un humedal (río 6, 7 y 10; laguna 3, 9, 12 y 15); los tramos 4, 5, 7 y 8 presentan un traslape de copas alto (mayor al 50 %). Los tramos 14-17 presentaron asfalto, alta cobertura forestal (mayor a 60 %), bajo traslape de copas y parches anexos de cultivos (tramo 14 y 15), pastizales (13-14, 16-17), casas (18-19) y bosque (13, 15 y 17).

Para el CA y PCA se utilizaron las variables ambientales espaciales observadas en la Tabla 2 con respecto al atropellamiento (CA) o al paso de aves (PCA). En el CA las variables de posición (latitud y longitud) presentaron correlación positiva significativa con la mortalidad de anfibios ($p < .05$), y con la mortalidad de aves ($p < .05$) lo que significa que un mayor número de atropellamientos ocurrió en el norte y oeste. El ancho de la carretera también presentó correlación significativa con la variable de mortalidad de anfibios ($p < .05$). Con relación al PCA, el eje 1 explica casi el 50 % de la varianza total. Las variables presencia de humedales y porcentaje de cobertura se relacionaron positivamente ($p < .05$) con la variable de frecuencia de cruce, mientras que la variable altitudinal se relacionó de forma inversa con la variable de frecuencia de cruce (Figura 4).

Discusión

Tabla 1
Lista de vertebrados y sus abundancias en eventos de atropellamiento en la carretera de la FTN de la EL (febrero-junio, 2015)

Grupo	No. de Individuos	Grupo	No. de Individuos	Grupo	No. de Individuos
Mamíferos	11	Reptiles	20	Anfibios	125
Didelphis marsupialis	10	Reptiles (Lacertilia)	3	No identificable	40
Conepatus semistriatus	1	*Corytophanes cristatus*	1	*Smilisca baudinii*	1
		Basiliscus pilatus	1	*Agalychnis calidryas*	1
		Coleonyx elegans	1	*Rhinophrynus dorsalis*	6
		Reptiles (Testudines)	2	Hylidae	2
		Dermatemys mawii	1	*Lithobates vaillanti*	2
Aves	10	*Trachemys scripta elegans*	1	*Lithobates brownorum*	1
No identificable	6	Reptiles (Serpentes)	15	*Lithobates* Sp.	8
Amazilia tzacatl	1	No identificable	1	*Rhinella horribilis*	36
Platyrinchus cancrominus	1	*Micrurus nigrocinctus*	1	*Incilius valliceps*	10
Phaethornis superciliosus	1	*Scaphiodontophis annulatus*	1	Buffonidae	18
Habia fuscicauda	1	*Porthidium nasutum*	1		
		Imantodes cenchoa	1		
		Ninia diademata	1		
		Ninia sebae	3		
		Leptodeira septentrionalis	2		
		Rhadinaea decorate	3		
		Boa constrictor	1	Total = 167 individuos	

Tabla 2
Variables ambientales espaciales de la sección bajo estudio de la carretera ¨Franja Transversal del Norte¨

Tramo	Asfalto	Humedal	Ancho carretera	Cobertura Forestal	Traslape de copas	Ubicación		Ambiente anexo								
								Bosque		Cultivo		Casas y Jardín		Pastizal		Palma
			(m)	(%)	(%)	x	y	sur %	norte %	sur %	norte %	sur %	norte %	sur %	norte %	norte %
1	0	0	4.4	76	13.6	15.949641°	90.629159°	100	100	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	4.4	74	2.7	15.949964°	90.634960°	100	100	0	0	0	0	0	0	0
3	0	1	4.4	80	6.1	15.951397°	90.639568°	100	100	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	4.3	80	53.3	15.951210°	90.645118°	100	100	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	3.8	77	53.3	15.951664°	90.650271°	100	100	0	0	0	0	0	0	0
6	0	1	2.5	85	37.8	15.951776°	90.655305°	100	100	0	0	0	0	0	0	0
7	0	1	4.4	67	82.2	15.951582°	90.660402°	100	100	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	3.6	63	69.6	15.952008°	90.665827°	100	100	0	0	0	0	0	0	0
9	0	1	3.6	57	13.6	15.952367°	90.670718°	100	80	0	20	0	0	0	0	0
10	0	1	5.3	54	11.4	15.952796°	90.675843°	100	0	0	20	0	80	0	0	0
11	0	0	5.4	56	27.3	15.953278°	90.681067°	100	0	0	0	0	100	0	0	0
12	0	1	5.5	57	2.2	15.953500°	90.686400°	100	0	0	0	0	0	0	0	100
13	0	0	5.7	69	27.9	15.954208°	90.691272°	100	50	0	0	0	0	50	0	0
14	1	0	5.7	67	2.3	15.954513°	90.696462°	0	27	45	32	0	0	55	41	0
15	1	1	5.7	85	0	15.954762°	90.701645°	55	100	45	0	0	0	0	0	0
16	1	0	5.7	62	16.3	15.955588°	90.706523°	0	14	50	14	0	0	50	72	0
17	1	0	5.7	65	7.1	15.956220°	90.711590°	41	55	2	0	2	2	55	37	0
18	1	0	5.7	71	17.1	15.956334°	90.716395°	0	10	0	0	100	90	0	0	0
19	1	0	5.7	51	3.2	15.956975°	90.720035°	0	0	0	0	100	20	0	80	0

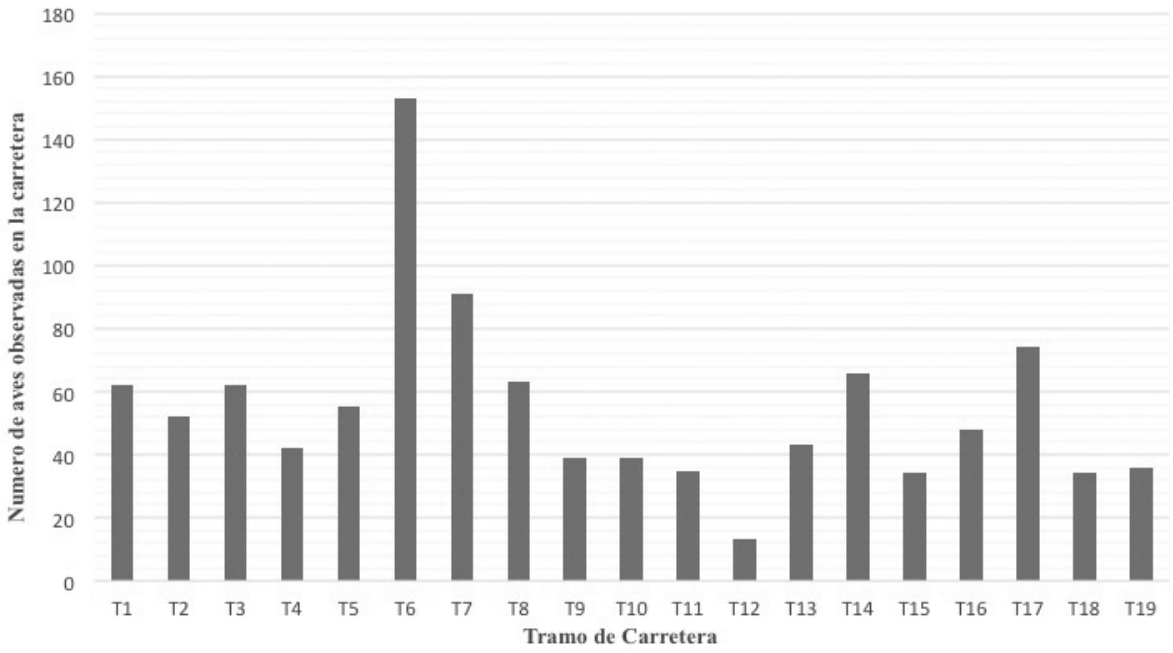

Figura 3. Frecuencia de cruce de aves por la carretera.

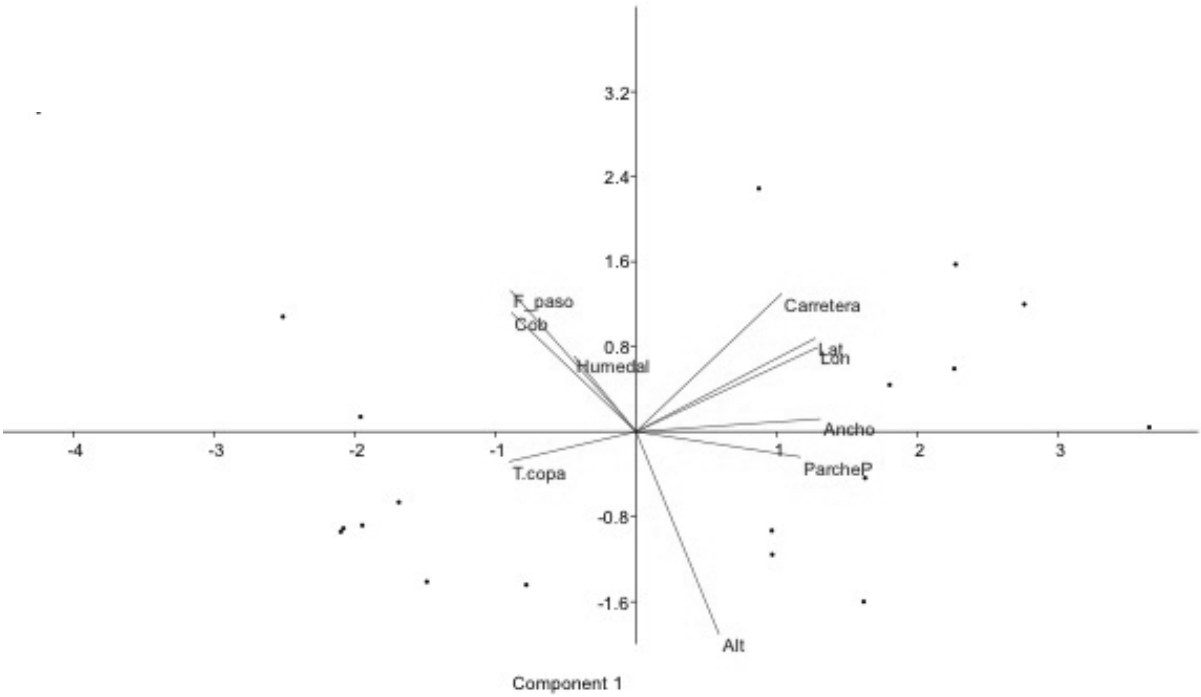

Figura 4. Análisis de Componentes Principales (PCA) de las variables ambientales espaciales y de frecuencia de cruce de aves Abreviaturas***:*** *F_paso:* Frecuencia de paso; *Lat:* Latitud; *Lat: Longitud; ParcheP*: Parche principal; *Cob:* Cobertura; *Alt:* Altitud; *Humedales:* Humedales cercanos; *T.copa:* Traslape de copa en carretera.

El área asfaltada presentó valores de atropellamiento notablemente mayores a los observados en el área de terracería (Figura 2) lo cual explica la correlación positiva ($p < .05$) entre la posición y el atropellamiento. Los sitios asfaltados se localizaron en las mayores latitudes y longitudes y estos presentaron mayor atropellamiento. El efecto del asfalto ha sido reportado en numerosos estudios y es asociado a la velocidad vehicular que permite, al proporcionar una superficie plana sin irregularidades los vehículos pueden movilizarse con mayores velocidades que en áreas de terracería, donde las irregularidades son numerosas (Ament, Clavenger, Yu, & Hardy, 2008; Arroyave et al., 2006). Sin embargo, la velocidad vehicular no fue medida en el presente estudio. Esta diferencia en cuanto al número de atropellamientos en función del asfaltado evidencia un probable aumento en la mortalidad de la fauna silvestre cuando el asfaltado de la carretera FTN finalice, reflejando la importancia de la implementación de reductores de velocidad y/o medidas de mitigación del atropellamiento de fauna en la carretera.

De manera similar a lo establecido en estudios previos (Ashley & Robinson, 1996; Glista, DeVault, & De Woody, 2008; Rodríguez, 2015), la herpetofauna (anfibios y réptiles) presentó los mayores valores de atropellamiento de todos los taxa en el presente estudio (Figura 2 y Tabla 1). Este fenómeno se atribuye a la naturaleza de este grupo. Las carreteras suelen ser un elemento atractivo para la herpetofauna, debido a su naturaleza ectotérmica, y requieren regular su temperatura corporal mediante la absorción de calor del medio (Ashley & Robinson, 1996). Las carreteras pavimentadas absorben grandes cantidades de calor durante el día, debido a esto en la noche actúan como fuentes de calor, lo que es aprovechado por la herpetofauna para la regulación de su temperatura corporal (Ashley & Robinson, 1996; Arroyave et al., 2006). Lo anterior hace que esta fauna se encuentre altamente expuesta al atropellamiento.

Los anfibios, al igual que en los estudios de Andrews y Gibbons (2008) y Mazerolle (2004), fueron los más atropellados (Figura 2 y Tabla 1). Este fenómeno es explicado en función del comportamiento, ya que al movilizarse los anfibios en la carretera realizan paradas periódicas aumentando su tiempo en las mismas y con esto su probabilidad de ser atropellados (Andrews & Gibbons, 2008; Mazerolle, 2004). El sapo común (*R. horribilis*) fue el anfibio con los mayores valores de atropellamiento (Tabla 1) lo cual ha sido observado en estudios previos y ha sido asociado a su alta abundancia en Brasil (Junior, Lima, Santos, & Arid, 2012) y Costa Rica (Rodríguez, 2015). El atropellamiento de anfibios tiene una relación directa con el ancho de la carretera (Figura 4), en primer lugar, porque la zona asfaltada es la más ancha y en segundo lugar porque tienen más probabilidad de ser atropellados al cruzar caminos anchos, debido a su lenta y pausada movilidad (Mazerolle, 2004). Un hallazgo interesante en este taxón fue la observación de 10 individuos atropellados pertenecientes a la especie *Rhinophrynus dorsalis*, siendo la cuarta especie más atropellada en este grupo (Tabla 1). Este evento tiene importancia ecológica, ya que esta especie permanece enterrada durante casi todo el año, saliendo de sus agujeros únicamente en la época de reproducción que coincide con la época lluviosa (Sandoval, Barrantes, Ocampo, & Sánchez-Quirós, 2015) siendo esta la época en que se observó el 100 % de los atropellamientos de la especie, pudiendo afectar a la dinámica de la población y con esto su rol ecológico en un futuro. Además, *R. dorsalis* es el único sobreviviente de un linaje independiente y antiguo derivado de los ascafidos durante el Cretácico, lo que la hace importante a nivel evolutivo y por consecuente importante en la conservación de la diversidad genética (Foster & McDiarmid, 1983; Frost, 2013; Maxson & Daugherty, 1980).

En los reptiles las especies con los valores más altos de atropellamiento fueron, *R. decorata* y *N. sebae* (Tabla 1), dos serpientes bastante comunes en Mesoamérica, las cuales también han sido reportadas como las más atropelladas en investigaciones previas (Rodríguez, 2015). A pesar de que las aves fueron los únicos vertebrados observados cruzando la carretera (Figura 3), estos presentaron las menores frecuencias de atropellamiento, probablemente por su alta agilidad y velocidad de cruce asociada al vuelo (Baskaran & Boominathan, 2010); además no se observó dominancia de atropellamiento en una especie si no en los integrantes de la familia Trochilidae (colibrís), la cual presentó una ligera dominancia de atropellamiento con dos integrantes (*P. superciliosus* y *A. tzacatl*) (Tabla 1), esto probablemente porque los colibrís se alimentan de néctar y existe un gran número de flores en las orillas del parque, actuando estas como atrayentes. La frecuencia de cruce de aves se correlaciona directamente con las variables de cobertura forestal y con la presencia de humedales (Figura 4). Arroyave y colaboradores (2006), explican el efecto de la primera variable con el alto número de individuos y especies que habitan los bosques. Glista y

colaboradores (2008) por otra parte, relacionan el efecto de la segunda variable con el efecto de corredores biológicos que presentan los ríos y cuerpos de agua.

El mamífero más atropellado fue el tacuazín (*D. marsupialis)*, lo cual concuerda con la bibliografía en el caso de Brasil (Gumier-Costa & Sperber, 2009; Junior et al., 2012) y Costa Rica (Rodríguez, 2015). Este hecho es explicado por su hábito de oportunismo (basureros) y depredador de insectos, pequeños reptiles y anfibios fácil de atrapar en lugares abiertos. Además, esta especie aprovecha las carreteras para llevar a cabo una movilización ininterrumpida, ya que las carreteras, al no contar con vegetación brindan un camino sin obstáculos (Junior et al., 2012). Sin embargo, los datos del atropellamiento de los mamíferos podrían estar sesgados, debido a que según los guarda-recursos del PNLL muchos de estos atropellamientos no dejan evidencia, ya que los habitantes de esta zona tienden a llevarse animales como coches de monte, cabritos, jabalís, armadillos e incluso tacuazines para alimentación después de atropellarlos.

El tramo T6 es un sitio de importancia para el atropellamiento y la frecuencia de cruce (Figura 2 y 3). La alta frecuencia de cruce en este caso (Figura 3) además de estar correlacionado con la presencia de un humedal amplio y un alto nivel de cobertura forestal (Figura 4 y Tabla 2), puede explicarse en función de su complejidad paisajística al contar con bosque alto y mediano, pero también con una zona de gramíneas (familia Poaceae) y un río de gran tamaño. Esta diversidad de microhábitats promueve la presencia de diferentes recursos en lados opuestos de la carretera, lo que propicia el cruce de la fauna por la misma (Andrews & Gibbons, 2008; Carr & Fahrig, 2001). A pesar de no correlacionarse el ancho de la carretera con la frecuencia de cruce de manera clara en el estudio (Figura 4), esto si se ha reportado en diversos estudios, al relacionarse las barreras ecológicas estrechas con una disminución de la fragmentación del hábitat y por lo tanto promoviendo la conectividad de las poblaciones de fauna (Arroyave et al., 2006). La alta frecuencia de cruce en el tramo T6 se explica en función del reducido ancho del tramo de la carretera, cerca de 5 m.

A pesar de que en el tramo T6 de la carretera es de terracería (Tabla 2) y por lo tanto no favorece el tránsito continuo y veloz de los automóviles, si favorece el paso de animales debido principalmente a que un río de gran tamaño atraviesa el tramo manteniendo la conectividad del hábitat ripario (Rodríguez, 2015). Lo anterior explica la presencia de reptiles, anfibios y aves atropellados (Figura 2). El tramo T6, al promover el paso de la fauna silvestre, (Figura 3) y al mostrar evidencia de atropellamiento durante los 5 meses de monitoreo (es uno de los sitios con más fauna atropellada en terracería) (Figura 2). El tramo T6 se considera importante para la implementación de medidas de mitigación del impacto del atropellamiento.

El tramo T7 es también un sitio de importancia para el paso de animales, reportando el valor más abundante después del tramo T6 (Figura 3), ya que a pesar de no contar con tan alta diversidad de microhábitats como el tramo T6 cuenta con un río (Tabla 2) que podría estar actuando como un corredor biológico lo que se ha evidenciado en diversos ríos (Rodríguez, 2015). El T7 presenta alta conectividad entre copas (bosque alto), lo cual favorece el paso de especies que habitan este tipo de bosque (Arroyave et al., 2006). La inexistencia de atropellamiento en este sitio se debe al estado deteriorado de la carretera, a consecuencia de los ríos que atraviesan dicho tramo, arrastrando rocas y humedad que va erosionando el sustrato del tramo. Sin embargo, al terminarse el proceso de asfaltado en este tramo, se predice un aumento considerable del atropellamiento, debido a que presenta un valor alto de frecuencia de paso.

Los Tramos T1, T3 y T10 también presentan importancia en lo que respecta a la propuesta de reducción del atropellamiento. El Tramo T1 además de poseer valores altos de frecuencia de cruce de aves (Figura 3) y presencia de atropellamiento de mamíferos, anfibios y réptiles (Figura 2), también se encuentra vecino a un centro urbano incipiente (Santa Lucía Lachuá). Estas medidas serían funcionales no solo para la protección de la fauna del PNLL, sino también para la protección de las personas en la comunidad Santa Lucía. El tramo 3 presentó una alta frecuencia de cruce (Figura 3) y un valor de atropellamiento relativamente alto (cinco individuos), similar a los observados en el Tramo T1 (Figura 2). Esta similitud sugiere al T3 como un sitio importante en lo que respecta a la implementación de medidas de reducción contra el atropellamiento. El Tramo T10 también se considera importante para la implementación de dichas medidas, ya que presenta un valor de atropellamiento bastante alto, el mayor observado en el sitio de terracería (Figura 2). Además de la importancia individual de cada tramo seleccionado para la implementación de reductores de velocidad, la distribución de los mismos es también estratégica, evitando tramos continuos muy largos que permitan movilización de vehículos a velocidades altas (Arroyave et al., 2006).

Tomando en cuenta los valores de atropellamiento, los Tramos T16, T17 y T18 fueron identificados

como sitios importantes para la implementación de medidas de reducción de atropellamiento en la zona asfaltada, al ser los que presentaron los valores de atropellamiento más elevados (Figura 2). Los tramos T11 y T19 se consideran importantes, ya que se ubican dentro de comunidades humanas.

El Tramo T12 presentó el menor paso de aves (Figura 3). Esto podría explicarse en función al cultivo de palma africana al que se encuentra anexo (Tabla 2). El monocultivo ha sido asociado en diversas investigaciones científicas, con una reducción de especies de aves, mamíferos, anfibios e insectos (Savilaakso, Petrokofsky, Zrust, & Guariguata, 2014). Además de la reducción de la riqueza de especies, el monocultivo de palma africana también se ha visto asociado con una reducción en la abundancia de muchos de estos grupos, principalmente en aves y mamíferos (Foster et al., 2011). Esta pérdida de diversidad puede explicarse en función de la simplicidad del paisaje, tanto en la diversidad vegetal como en su arquitectura y fisonomía, lo cual reduce la diversidad de nichos (Foster et al., 2011; Savilaakso et al., 2014). Otra importante razón de la pérdida de diversidad se explica en función del microclima que permite el dosel. El dosel de la palma africana es bajo, abierto y mucho más simple (formado por una sola especie) que el del bosque lluvioso, lo cual se encuentra asociado a condiciones desfavorables de temperatura y humedad para muchos organismos (Foster et al., 2011). Estos cambios presentan dos componentes: Condiciones extremas (alta temperatura y baja humedad), y mayor variabilidad de estos componentes a lo largo del día. Estas condiciones no son favorables en el área anexa al PNLL, ya que pueden incidir en el aislamiento de la fauna que habita en el parque.

De manera general, se recomienda la instalación de señales que prevengan a los conductores sobre el cruce de animales en la carretera; sin embargo, la efectividad de esta medida de mitigación es muy variable (Beckmann, Clevenger, Huijser, & Hilty, 2010). La construcción de túneles para el paso de animales podría disminuir los impactos del atropellamiento considerablemente (Lesbarrères, Lodé, & Merilä, 2004), además traería otros beneficios relacionados a la red hídrica al permitir el flujo del agua. Se recomienda, además, el establecimiento de una garita en el límite este y oeste del parque (tramos T1 y T19) acompañada de una serie de reductores de velocidad colocados en los sitios importantes para la implementación de medidas de reducción del atropellamiento (tramos: T3, T6, T7, T10, T11, T16, T17 y T18; priorizando el T6), obligando al conductor a reducir su velocidad y con esto mitigar efectivamente el atropellamiento de la fauna del PNLL y sus alrededores (van der Grift et al., 2013).

Agradecimientos

Se agradece al estudiante de biología Renato Morales por el apoyo en la identificación de la herpetofauna atropellada, al guarda-recursos Paulino Baleu por el apoyo en la identificación de la ornitofauna, y a Luis Trujillo por el apoyo brindado durante sus prácticas de EPS. También agradecemos a todos los integrantes del Parque Nacional Laguna Lachuá, sin los cuales este estudio no habría sido posible.

Referencias

Ament, R., Clevenger, A. P., Yu, O., & Hardy, A. (2008). An assessment of road impacts on wildlife populations in US National Parks. *Environmental Management*, *42*(3), 480. doi:10.1007/s00267-008-9112-8.

Andrews, K. M., & Gibbons, J. W. (2008). Roads as catalysts of urbanization: snakes on roads face differential impacts due to inter-and intraspecific ecological attributes. En J. C. Mitchell, R. E. Jung Brown, & B. Barthdomenw (Eds.), *Urban Herpetology*, (pp. 145-153), Salt Lake City, Utah: Society for the study of Amphibians and Reptiles.

Arroyave, M. P., Gómez, C., Gutiérrez, M. E., Múnera, D. P., Zapata, P. A., Vergara, I. C., ... Ramos, K. C. (2006). Impactos de las carreteras sobre la fauna silvestre y sus principales medidas de manejo. *Revista EIA*, *5*(1), 45-57.

Ashley, E. P., & Robinson, J. T. (1996). Road mortality of amphibians, reptiles and other wildlife on the Long Point Causeway, Lake Erie, Ontario. *Canadian Field Naturalist*, *110*(3), 403-412.

Avendaño, C. (2001). Caracterización de la Avifauna del Parque Nacional Laguna Lachuá, Cobán, Alta Verapaz (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Guatemala.

Avendaño, C.E, Avendaño, C., Carías, A., García, M., Cajas, M. & De León, K. (2005). Dinámica del uso de la tierra y conservación de los Recursos

Naturales de la Eco-región Lachua. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Escuela de Biología, Universidad de San Carlos de Guatemala. Recuperado de http://glifos.concyt.gob.gt/digital/fodecyt/fodecyt%202003.20.pdf

Baskaran, N., & Boominathan, D. (2010). Road kill of animals by highway traffic in the tropical forest of Mudumalai Tiger Reserve southern India. *Journal of Threatened Taxa, 2*(3),753-759. doi: 10.11609/JoTT.o2101.753-9

Beckmann, J. P., Clevenger, A. P., Huijser, M. P., & Hilty, J. A. (2010). Safe passages high ways, wildlife, and habitat connectivity, (March 2014), 396. doi:10.2307/23259952.

Carr, L. W., & Fahrig, L. (2001). Effect of road traffic on two amphibian species of differing vagility. *Conservation Biology*, *15*(4), 1071-1078. doi:10.1046/j.1523-1739.2001.0150041071.x.

Cooper, L. L., & Shore, F. S. (2010). The effects of data and graph type on concepts and visualizations of variability. *Journal of Statistics Education*, *18*(2), 1-16. doi:10.1080/10691898.2010.11889487.

Dyer, S. J., O'neill, J. P., Wasel, S. M., & Boutin, S. (2002). Quantifying barrier effects of roads and seismic lines on movements of female woodland caribou in northeastern Alberta. *Canadian Journal of Zoology*, *80*(5), 839-845. doi:10.1139/z02-060

Escuela de Biología. (2004). Ficha Ramsar Sitio Eco-región Lachuá. Editado por el Programa de Investigación y Monitoreo de Lachuá. Recuperado de http://studylib.es/doc/7804294/eco-regi%C3%B3n-lachu%C3%A1.

Forman, R. T. T., & Alexander, L. E. (1998). Roads and their major ecological effects. *Annual Review of Ecology and Systematics*, *29*(1), 207-231. doi:10.1146/annurev.ecolsys.29.1.207.

Foster, M. S., & McDiarmid, R. W. (1983). Rhinophrynus dorsalis (Alma de Vaca, Sapo Borracho, Mexican Burrowing Toad). En D. H. Janzen (Ed.), Costa Rican Natural History (pp. 419–421). University of Chicago Press, Chicago, Illinois, United States.

Foster, W. A., Snaddon, J. L., Turner, E. C., Fayle, T. M., Cockerill, T. D., Ellwood, M. F., & Yusah, K. M. (2011). Establishing the evidence base for maintaining biodiversity and ecosystem function in the oil palm landscapes of South East Asia. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, *366*(1582), 3277-3291. doi: 10.1098/rstb.2011.0041

Frost, D. R. (2013). Amphibian Species of the World: An online reference. Version 5.6 (9 January 2013). New York, USA: American Museum of Natural History.

Gerow, K., Kline, N. C., Swann, D. E., & Pokorny, M. (2010). Estimating annual vertebrate mortality on roads at Saguaro National Park, Arizona. *Human-Wildlife Interactions*, *4*(2), 283-292.

Glista, D. J., DeVault, T. L., & DeWoody, J. A. (2009). A review of mitigation measures for reducing wildlife mortality on roadways. *Landscape and Urban Planning*, *91*(1), 1-7. doi:10.1016/j.landurbplan.2008.11.001.

Google. (2015). [Google Maps Laguna de Lachuá]. Recuperado el 3 de Junio del 2015 de https://www.google.com/maps/place/Lachu%C3%A1+Lake/@15.9487395,-90.704935,11145m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x858b038188af171b:0x6783dd6a0c335467!8m2!3d15.9160751!4d-90.6725609

Gumier-Costa, F., & Sperber, C. F. (2009). Atropelamentos de vertebrados na Floresta Nacional de Carajás, Pará, Brasil. *Acta Amazonica*, *39*(2), 459-466.

Hammer, Ø, Harper, D. A. T., & Ryan, P. D. (2001). PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica, 4*(1) Art. 4. Recuperado de https://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm

Hels, T., & Buchwald, E. (2001). The effect of road kills on amphibian populations. *Biological Conservation, 99*(3), 331-340. doi: 10.1016/S0006-3207(00)00215-9.

Hothorn, T., Brandl, R., & Müller, J. (2012). Large-scale model-based assessment of deer-vehicle collision risk. *PLoS One, 7*(2), 1-10. doi: 10.1371/journal.pone.0029510

Instituto Nacional de Bosque [INAB]. (2003). Plan Maestro 2004-2009 del Parque Nacional Laguna Lachuá, Cobán, Alta Verapaz. Guatemala: Insti-

tuto Nacional de Bosques, Consejo Nacional de Áreas Protegidas.

Junior, R. O., Lima, J. P., Santos, A. L. W., & Aride, P. H. R. (2012). Caracterização da fauna de vertebrados atropelada na rodovia BR 174, Amazonas, Brasil. *Revista Colombiana de Ciencia Animal*, *4*(2), 291-307.

Köhler, G. (2008). *Reptiles of Central America*. Offenbach, Frankfurt: Herpeton.

Legendre, P., & Legendre, L. (1988). *Numerical Ecology, Volume 24.* Amsterdam: Elsevier.

Lesbarrères, D., Lodé, T., & Merilä, J. (2004). What type of amphibian tunnel could reduce road kills?. *Oryx, 38*(2), 220-223.

López, M. (2004). Los Otros Peatones. *Tráfico*, (julio-agosto), 36-39. Recuperado de http://www.dgt.es/revista/archivo/pdf/num167-2004-Animales.pdf

Loss, S. R., Will, T., & Marra, P. P. (2014). Estimation of bird-vehicle collision mortality on US roads. *Journal of Wildlife Management*, *78*(5), 763-771. doi: 10.1002/jwmg.721

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación [MAGA] y Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza [CATIE]. (2001). Base de datos digital de la República de Guatemala a Escala 1: 250, 000. Coordinado por: Unidad de Políticas de e Información Estratégica (UPIE-MAGA). Guatemala.

Maxson, L. R., & Daugherty, C. H. (1980). Evolutionary relationships of the monotypic toad family Rhinophrynidae: A biochemical perspective. *Herpetologica*, *36*(3), 275-280.

Mazerolle, M. J. (2004). Amphibian road mortality in response to nightly variations in traffic intensity. *Herpetologica*, *60*(1), 45-53. doi:10.1655/02-109

McGarigal, K., Stafford, S., & Cushman, S. (2000). Ordination: principal components analysis. En K. McGarigal (Ed.), *Multivariate statistics for wildlife and ecology research* (pp. 19-80). New York: Springer. doi:10.1007/978-1-4612-1288-1_2.

Rodríguez, A. A. (2015). *Identificación y caracterización de cruces de fauna silvestre en la sección de la ampliación de la carretera nacional Ruta 32, Limón, Costa Rica* (Tesis de maestría). Universidad Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Costa Rica.

Rogers, O. J. (2013). *Abriendo Brechas: El Proyecto Vial de la Franja Transversal del Norte, Desarrollo y Territorio en Huehuetenango*. Guatemala: Centro de Estudios y Documentación de la Frontera Occidental de Guatemala (CEDFOG).

Savilaakso, S., Petrokofsky, G., Zrust, M., & Guariguata, M. R. (2014). Palm oil and biodiversity. *CIFOR Infobrief, 69*(1), 1-4.

Solano, L. (2012). *Contextualización histórica de la Franja Transversal del Norte (FTN)*. Guatemala: Centro de Estudios y Documentación de la Frontera Occidental de Guatemala.

Teixeira, F. Z., Coelho, I. P., Esperandio, I. B., Oliveira, N. R., Peter, F. P., Dornelles, S. S., ... Kindel, A. (2013). Are road-kill hotspots coincident among different vertebrate groups. *Oecologia Australis*, *17*(1), 36-47. doi:10.4257/oeco.2013.1701.04.

Trombulak, S. C., & Frissell, C. A. (2000). Review of ecological effects of roads on terrestrial and aquatic communities. *Conservation Biology*, *14*(1), 18-30. doi:10.1046/j.1523-1739.2000.99084.x

van der Grift, E. A., van der Ree, R., Fahrig, L., Findlay, S., Houlahan, J., Jaeger, J. A., & Olson, L. (2013). Evaluating the effectiveness of road mitigation measures. *Biodiversity and Conservation,* 22(2), 425-448. Doi:10.1007/s10531-012-0421-0.

van Perlo, B. (2006). *Birds of Mexico and Central America*. Princeton, Texas: Princeton University Press.

Ciencia, Tecnología y Salud
Vol. 5 Num. 2 2018
ISSN: 2410-6356 (electrónico) / 2409-3459 (impreso)

Artículo Científico / Scientific Article

Riqueza y abundancia de peces arrecifales en el Caribe de Guatemala utilizando Estaciones Remotas de Video Subacuático con Carnada

Richness and abundance of reef fish in the Caribbean of Guatemala using Baited Remote Underwater Video Stations

*Francisco Polanco-Vásquez[1, 2], Alerick Pacay[2], José R. Ortíz-Aldana[1], Ana Hacohen-Domené[2], Cristopher Avalos-Castillo[2]

[1]Instituto de Investigaciones Hidrobiológicas, Centro de Estudios del Mar y Acuicultura (Cema), Universidad de San Carlos de Guatemala (Usac); [2]Fundación Mundo Azul (FUNMZ), Guatemala

***Autor al que se dirige la correspondencia:** polancoenca@gmail.com

Recibido: 15 de marzo 2017 / 1era. Revisión: 20 de marzo 2018 / 2da. Revisión: 31 de mayo 2018 / Aceptado: 24 de septiembre 2018

Resumen

El mar Caribe de Guatemala forma parte del Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM), el cual alberga una alta diversidad de especies marinas. Dichas poblaciones son importantes para el bienestar de las comunidades humanas que habitan en la zona marino-costera de los países que conforman el SAM, y que dependen de manera directa o indirecta de estos recursos. El objetivo de este estudio fue determinar la riqueza y abundancia tanto de las especies de peces herbívoros presentes en el área, como de aquellas que son atraídas por carnada de sábalo y atún, utilizando la metodología de Estaciones Remotas de Video Subacuático con Carnada BRUVS en sitios con presencia de arrecifes. El muestreo se realizó en siete sitios ubicados fuera de la Bahía de Amatique, Izabal, en abril, junio y septiembre de 2016. Se grabaron 26.06 h, en 21 sets de BRUVS. Se contabilizaron 778 organismos, correspondientes a dos clases, 20 familias, 31 géneros y 59 especies. Las especies más abundantes en el estudio fueron *Scarus* spp. (19.67 %), *Clepticus parrae* (9.64 %), *Aluterus scriptus* (6.04 %), *Scarus iserti* (5.14 %) y *Caranx ruber* (5.01 %). Los sitios Quetzalito 1 y 2 presentaron una riqueza de especies significativamente mayor ($p < 0.006$) al resto de sitios de muestreo. Quetzalito 1, 2 y King Fish presentaron una abundancia significativamente mayor ($p < .038$) al resto de sitios. El dendrograma derivado de la abundancia por especie para los sitios de muestreo, mostró cinco agrupaciones (similaridad de Bray-Curtis del 43 %). Finalmente se observó una baja presencia de peces de importancia comercial en los siete puntos evaluados.

Palabras claves: Bahía de Amatique, Scaridae, *Scarus*, BRUVS.

Abstract

The Guatemalan Caribbean Sea forms part of the Mesoamerican Reef System (MAR), which harbors a great marine biodiversity. These populations are important for the wellness of humans who live in communities at coastal areas located in the MAR region, and who directly or indirectly depend on these resources to survive and thrive. The main objective of this study was to determine not only species richness and abundance of herbivorous fish, but also those who are attracted by shad and tuna bait when used in the Baited Remote Underwater Video Stations (BRUVS) in sites with coral reef presence. Monitoring was held at seven spots located outside Bahía de Amatique, Izabal, in April, June and September 2016. In 21 sets of BRUVS, 26.06 h of video were recorded, counting a total of 778 organisms which belongs to two classes, 20 families, 31 genera and 59 species. The most abundant species were *Scarus* spp. (19.67 %), *Clepticus parrae* (9.64 %), *Aluterus scriptus* (6.04 %), *Scarus iserti* (5.14 %) and *Caranx ruber* (5.01 %). The sites that presented higher richness of species were Quetzalito 1 y 2 ($p < 0.006$ compared to the rest of the sampled sites). Quetzalito 1, 2 and King Fish showed higher abundance ($p < .038$) compared to the rest of the sites. Abundance per specie dendrogram showed five groups (Bray-Curtis similarity of 43 %). Finally, low presence of commercial fish species was seen at the seven monitored sites.

Keywords Amatique Bay, Scaridae, *Scarus*, BRUVS.

La reproducción total o parcial del contenido e imágenes de esta publicación se rige de acuerdo a normas internacionales sobre protección a los derechos de autor, con criterio especificados en la licencia Creative Commons (CC BY-NC-SA 4.0)

Introducción

El Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM), es una estructura viviente que se extiende por más de 1,000 km a lo largo de la zona marino-costera de sus cuatro países miembros (México, Belice, Guatemala y Honduras). Esta región es considerada de alta importancia, tanto biológica como socioeconómica, ya que sostiene gran parte de la economía local de las comunidades costeras asentadas en el SAM (Kramer et al., 2015). El SAM es el segundo arrecife de coral más grande del mundo y presenta una gran variedad de ecosistemas costeros como manglares, praderas marinas, llanuras de fango y arrecifes coralinos (Adams et al., 2006; Mumby et al., 2004; Vásquez, Vega, Montero, & Sosa, 2011).

Históricamente, las investigaciones científicas para comunidades ictiológicas, realizaban monitoreos invasivos y destructivos con el fin de reducir el error estadístico de muestreo (Ackerman & Bellwood, 2000). Posteriormente, este tipo de metodologías fueron reemplazadas por buceos, donde los buzos registraban datos de abundancia y estimaban las tallas de peces dentro de los límites de transectos determinados. Sin embargo, se detectaron varias inconsistencias en cuanto a la abundancia y tamaño de los organismos debido a la variación de criterios de los investigadores (Harvey, Fletcher, Shortis, & Kendrick, 2004).

Actualmente, no se cuenta con una metodología estandarizada no invasiva que permita evaluar la eficacia con relación a los objetivos de conservación y pueda ser aplicada y replicada en el monitoreo continuo dentro de las áreas marinas protegidas (De Vos, Götz, Winker, & Attwood, 2014). En este sentido la metodóloga de Estaciones Remotas de Video Subacuático con Carnada (BRUVS, por sus siglas en inglés) es muy útil ya que es eficiente para el análisis de comunidad de peces, requiriendo menor esfuerzo de muestreo en comparación de otras metodologías y muestras más sensibilidad para mostrar diferencias estadísticas en las abundancias de las diferentes comunidades (Bernard & Gotz, 2012; Harvey et al., 2012). Además, utilizar esta metodología puede resultar en la reducción de tiempo en campo, número de personal capacitado y puede llegar a ser más eficiente que la utilización de buzos (Watson, Harvey, Anderson, & Kendrick, 2005)

Los BRUVS constan de una estructura de PVC, la cual porta una videocámara subacuática y una red metálica de carnada colocada en el campo de visión de la cámara. Esta metodología es utilizada en hábitats marinos sensibles y de batimetría compleja. Asimismo, ésta se ha convertido en una técnica de muestreo de peces arrecifales no invasiva, principalmente donde el acceso a través de equipo autónomo de buceo es complicado y donde los muestreos podrían comprometer los objetivos de conservación del área o la confiabilidad de los datos (Cappo, Speare, & De´ath, 2004; De Vos et al., 2014). Esta metodología puede ser utilizada para la determinación de la riqueza de especies, con relación a la estructura del ensamble de la ictiofauna en hábitats coralinos (Cappo et al., 2004; Cappo, Stowar, Syms, Johansson, & Cooper, 2011; Meekan & Meeken, 2006).

Algunos autores han utilizado esta metodología y sus variables sin carnada para la determinación de poblaciones, tanto de peces óseos, como de depredadores tope en el SAM (Andradi-Brown et al., 2016b; Bond et al., 2012). Esto ha permitido determinar la presencia-ausencia de estos organismos en los ecosistemas de arrecife, tomando en cuenta las tallas y abundancia de diferentes especies.

El colapso de los arrecifes de coral en el Caribe ha sido atribuido en parte a la sobrepesca que ha ocurrido históricamente en la región (Newman, Paredes, Sala, & Jackson, 2006). En ese sentido, el presente estudio tiene como objetivo principal evaluar la abundancia y riqueza de las especies de peces arrecifales, tanto como peces herbívoros y de importancia comercial, en siete sitios coralinos en el mar Caribe de Guatemala utilizando la metodología BRUVS.

Materiales y métodos

Área de estudio y sitios de muestreo

El estudio se llevó a cabo en siete sitios con presencia de arrecifes coralinos en el mar Caribe de Guatemala, ubicados a un rango de profundidad entre 5-11 m, fuera de la Bahía de Amatique: Quetzalito 1 (QUE1), Quetzalito 2 (QUE2), Motagüilla 1 (MOT1), Motagüilla 2 (MOT2), que son ecosistemas arrecifales formados por valles y crestas, y Cabo Tres Puntas 1 (CTP1), Cabo Tres Puntas 2 (CTP2), y King Fish (KIN), que son parches arrecifales de menor tamaño. Los sitios muestreados tienen libre acceso a la pesca. Todos los sitios fueron seleccionados basándose en los ecosistemas de arrecifes coralinos presentes en el área (Figura 1).

En total, se realizaron tres muestreos aplicando la metodología de BRUVS en los meses de abril, junio y septiembre de 2016. Todas las réplicas fueron realiza-

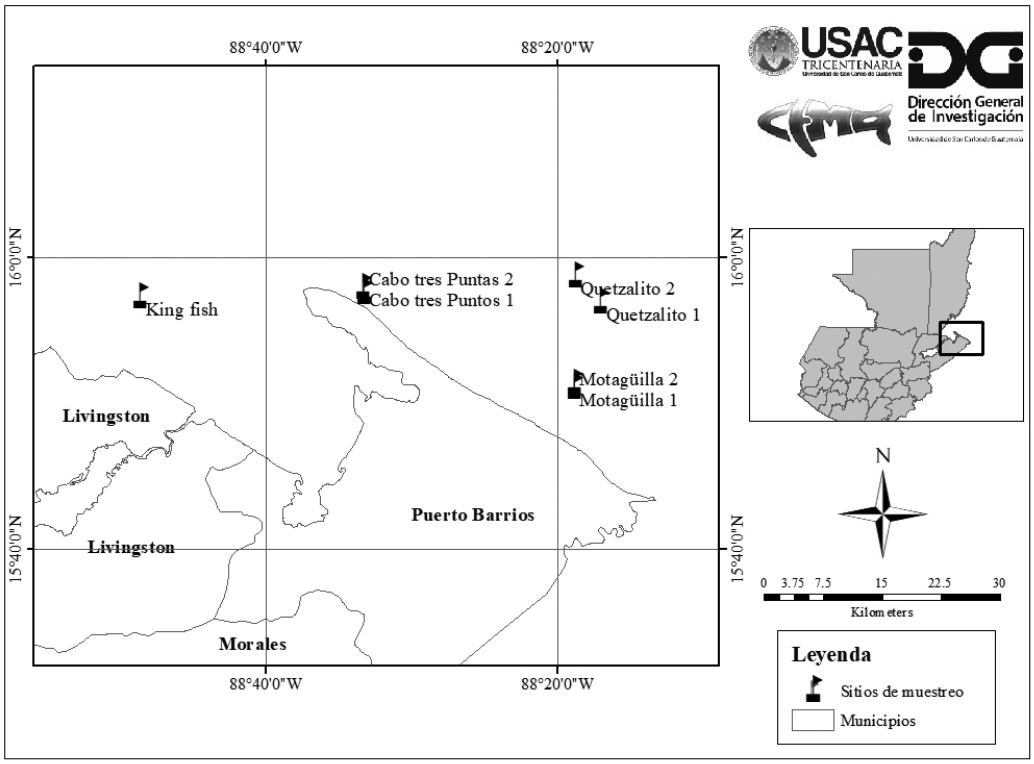

Figura 1. Ubicación geográfica de los sitios de muestreo

das por la mañana, cada sitio en el mismo horario y sin aleatorización de los mismos.

Descripción de los BRUVS

Se utilizaron cámaras portátiles GoPro Hero® 3 y 4, las cuales fueron enganchadas a una tabla de madera sobrepuesta sobre una estructura triangular en forma de trípode, fabricada con tubos de Poli-Cloruro de Vinilo (PVC). Para evitar el movimiento de la estructura, se colocaron barras de acero, como lastre, en la parte inferior de la misma. La carnada utilizada durante el monitoreo fue sábalo y atún, la cual se colocó en la parte posterior de un tubo de 1.5 m de largo, en una bolsa fabricada de malla metálica de 2.5 cm de abertura. Los BRUVS tuvieron sujetado un lazo de 20 m de largo y una boya blanca y se sumergieron aproximadamente una hora cada uno (Figura 2). Finalmente, en cada sitio de muestreo se tomaron las coordenadas geográficas.

El análisis fue realizado a través de la observación de los videos, con el programa *Windows Media Player*©. Se inició el análisis del video a partir del minuto cinco (5:00 min), momento cuando la lancha había partido del sitio. Una vez cumplida la hora de filmación, se procedió a acercarse al sitio para recoger la estructura (Brooks, Sloman, Sims, & Danylchuk, 2011). Las especies observadas en los videos fueron identificadas hasta el menor taxón, mediante guías de identificación de la fauna arrecifal (Carpenter, 2002; Humann & DeLoach, 2014). Finalmente, se hizo un conteo de los especímenes de cada especie observada, con la finalidad de calcular la riqueza y abundancia de especies en cada punto de muestreo.

Análisis estadístico

Para cada sitio de muestreo, se identificó y contabilizó cada una de las especies que aparecían dentro

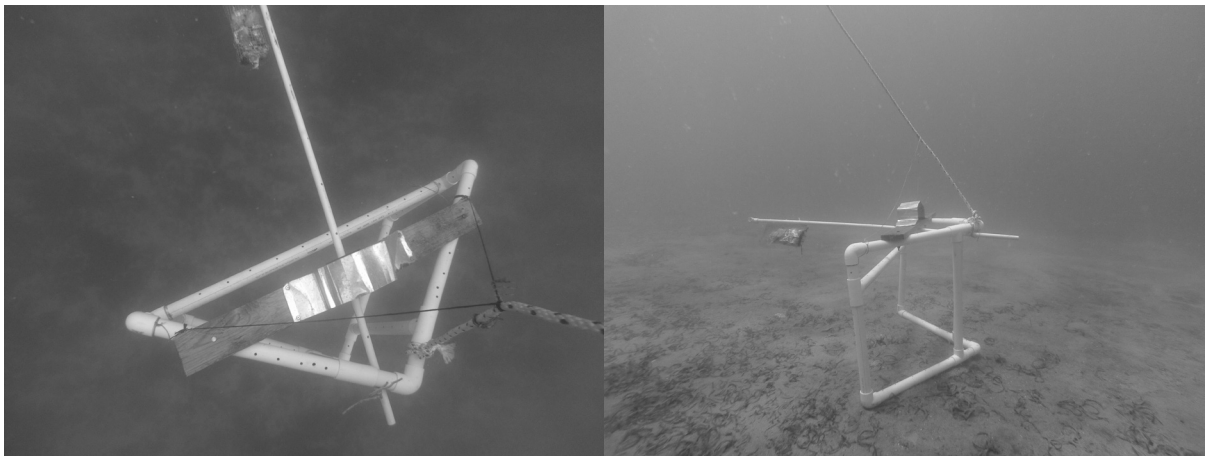

Figura 2. Estaciones Remotas de Video Subacuático con Carnada (BRUVS)

del cuadro de video. Con esta información se realizó el análisis de varianza de Kruskal-Wallis (1952) para establecer si existían diferencias significativas de la abundancia y riqueza de las especies entre los sitios. Además, se utilizó la prueba de Friedman-Dunn (1937) para establecer que media fue mayor o menor.

Para calcular la diversidad estimada se utilizaron los estimadores de diversidad no paramétricos de Chao 1 y el Abundance-based coverage estimator (ACE por sus siglas en inglés), de igual manera se realizó una curva de acumulación de especies mediante el programa EstimateS Versión 9.1.0 (Colwell, 2013).

Para evaluar la heterogeneidad de las especies en los sitios de muestreo se analizaron los índices de diversidad (*H'*) de Shannon-Weaver y equidad de Pielou (*J'*) mediante el programa PAST (Statistical Version 1.93 para Windows XP). Así mismo se realizó una conversión del índice de Shannon-Weaver (H) a número efectivo de especies mediante la siguiente ecuación:

$$^{1}D = exp\ (H')$$

Se aplicó el análisis de conglomerados, utilizando el índice de Bray-Curtis para calcular y visualizar las similitudes entre los sitios, tomando en cuenta las abundancias de los organismos. El agrupamiento de los sitios de muestreo basado en la abundancia de peces se exploró mediante un análisis de escalamiento no métrico multidimensional (NMDS).

Resultados

Se grabaron 26.06 h en 21 sets de BRUVS, distribuidos en siete sitios de muestreo. Se contabilizaron 778 organismos correspondientes a dos clases, 20 familias, 31 géneros y 59 especies de peces (Tabla 1). Las especies más abundantes en el estudio fueron *Scarus* spp. (19.67 %), *Clepticus parrae* Bloch & Schneider, 1801 (9.64 %), *Aluterus scriptus* Osbeck, 1765 (6.04 %), *Scarus iserti* Bloch, 1789 (5.14 %) y *Caranx ruber* Bloch, 1793 (5.01 %). El resto de las especies presentó una abundancia porcentual individual menor al 5 %.

La riqueza esperada de la curva de acumulación de especies muestra que con siete sitios de muestreo, la curva aún no alcanza la asíntota; por lo que se puede esperar un aumento con respecto al número de especies, si se aumentara la cantidad de sitios de muestreo. El estimador de diversidad no paramétrico ACE estimó 66 especies, mientras que Chao 1 estiró 63 especies (Figura 3).

Se evidenciaron diferencias significativas en cuanto a la riqueza de especies (p = .006) y la abundancia (p = .038) entre los sitios de muestreo, pero no se evidenció diferencias con respecto a las mismas variables entre los meses de muestreo (p = > .999).

Los sitios con mayor riqueza fueron QUE1 y QUE 2 con 35 y 28 especies de peces respectivamente. Mientras que CTP1 y MOT1 fueron los sitios con menor número de especies (14). Con respecto a la abundancia, QUE1 y QUE2 fueron los sitios con mayor número de organismos con 259 y 119 peces respectivamente. Mientras que CTP2 (54 organismos) y MOT1 (44 organismos) presentaron la menor abundancia (Tabla 2).

Tabla 1
Listado taxonómico y abundancia (No. de organismos/hora de grabación) de peces arrecifales en el Caribe de Guatemala

Familia	Especie	QUE1	QUE2	CTP1	CTP2	MOT1	MOT2	KING	Total
Acanthuridae	*Acanthurus chirurgus*	6	9	2	0	3	5	0	25
Acanthuridae	*Acanthurus* spp.	1	3	0	0	0	0	0	4
Acanthuridae	*Acanthurus coeruleus*	8	0	0	0	0	0	0	8
Acanthuridae	*Acanthurus bahianus*	0	0	0	0	0	2	0	2
Balistidae	*Balistes vetula*	4	1	0	0	0	0	0	5
Carangidae	*Caranx crysos*	0	4	0	0	0	0	7	11
Carangidae	*Caranx latus*	0	0	0	0	0	2	0	2
Carangidae	*Caranx ruber*	13	5	14	0	4	0	3	39
Carangidae	*Caranx* spp.	4	0	0	0	0	1	2	7
Chaetodontidae	*Chaetodon striatus*	0	2	3	1	0	0	22	28
Chaetodontidae	*Chaetodon capistratus*	2	7	15	0	5	1	0	30
Chaetodontidae	*Chaetodon ocellatus*	1	2	0	0	0	4	0	7
Haemulidae	*Haemulon macrostomum*	0	0	0	1	0	3	5	9
Haemulidae	*Anisotremus virginicus*	0	0	0	0	0	0	3	3
Haemulidae	*Haemulon plumierii*	0	1	1	1	0	0	6	9
Haemulidae	*Haemulon album*	0	0	0	0	0	1	0	1
Labridae	*Halichoeres* spp.	5	2	0	1	4	6	0	18
Labridae	*Thalassoma bifasciatum*	9	8	0	2	2	0	0	21
Labridae	*Halichoeres radiatus*	0	0	0	0	1	0	0	1
Labridae	*Halichoeres bivittatus*	0	0	0	3	0	0	0	3
Labridae	*Halichoeres garnoti*	14	4	0	6	2	0	1	27
Labridae	*Clepticus parrae*	72	3	0	0	0	0	0	75
Labridae	*Bodianus rufus*	1	3	0	5	1	0	15	25
Lutjanidae	*Ocyurus chrysurus*	1	2	5	2	0	4	4	18
Lutjanidae	*Lutjanus apodus*	1	0	0	0	0	0	1	2
Lutjanidae	*Lutjanus synagris*	0	2	0	2	0	4	6	14
Lutjanidae	*Lutjanus analis*	3	2	0	2	0	0	0	7
Lutjanidae	*Lutjanus jocu*	1	0	0	0	1	0	0	2
Lutjanidae	*Lutjanus griseus*	0	0	0	0	0	1	2	3
Lutjanidae	*Lutjanus* spp.	0	0	0	1	0	4	1	6
Lutjanidae	*Lutjanus mahogoni*	0	0	2	0	0	0	1	3

Continúa

Tabla 1
Listado taxonómico y abundancia (No. de organismos/hora de grabación) de peces arrecifales en el Caribe de Guatemala (Continuación)

Familia	Especie	QUE1	QUE2	CTP1	CTP2	MOT1	MOT2	KING	Total
Malacanthidae	*Malacanthus plumieri*	2	0	0	1	1	0	0	4
Monacanthidae	*Aluterus scriptus*	10	1	1	0	0	35	0	47
Muraenidae	*Gymnothorax moringa*	0	0	1	0	0	0	0	1
Pomacantidae	*Pomacanthus arcuatus*	0	1	2	0	3	4	6	16
Pomacantidae	*Pomacanthus paru*	4	3	0	1	0	0	3	11
Pomacentridae	*Holacanthus tricolor*	1	1	0	0	0	0	0	2
Pomacentridae	*Stegastes partitus*	1	4	0	0	0	0	0	5
Pomacentridae	*Stegastes planifrons*	3	0	0	0	0	0	0	3
Scaridae	*Scarus taeniopterus*	4	0	2	0	0	0	0	6
Scaridae	*Scarus iserti*	27	0	0	5	0	1	7	40
Scaridae	*Scarus* spp.	47	42	20	4	12	10	18	153
Scaridae	*Cryptotomus roseus*	0	0	0	0	0	0	1	1
Scaridae	*Sparisoma viride*	3	1	0	1	0	1	0	6
Scaridae	*Sparisoma chrysopterum*	0	2	0	0	0	0	0	2
Scombridae	*Acanthocybium solandri*	1	0	0	0	0	0	0	1
Scorpaenidae	*Pterois volitans*	1	0	0	0	0	0	0	1
Serranidae	*Mycteroperca bonaci*	2	0	0	0	0	0	0	2
Serranidae	*Cephalopholis cruentata*	1	0	3	8	0	3	1	16
Serranidae	*Cephalopholis* spp.	0	2	0	0	4	4	0	10
Serranidae	*Cephalopholis fulva*	0	1	0	1	0	0	0	2
Serranidae	*Epinephelus striatus*	0	0	0	0	0	0	1	1
Serranidae	*Epinephelus itajara*	2	0	0	0	0	0	0	2
Serranidae	*Hypoplectrus* spp.	0	0	0	0	0	0	1	1
Serranidae	*Mycteroperca* spp.	1	0	0	2	0	0	3	6
Sphyraenidae	*Sphyraena barracuda*	1	1	0	4	1	1	12	20
Tetraodontidae	*Canthigaster rostrata*	2	0	0	0	0	0	0	2
Carcharhinidae	*Carcharhinus* spp.	0	0	1	0	0	0	0	1
Ostracidae	*Lactophrys bicaudalis*	0	0	0	0	0	1	0	1

Nota: Quetzalito 1 (QUE1), Quetzalito 2 (QUE2), Cabo Tres Puntas 1 (CTP1), Cabo Tres Puntas 2 (CTP2), Motaguilla 1 (MOT1), Motaguilla 2 (MOT2) y King Fish (KIN).

Tabla 2
Índices de diversidad para los sitios de muestreo

Sitio	Riqueza	Abundancia	Shannon-Weaver	Dominancia	Igualdad	ee
QUE1	35	259	2.602	0.133	0.385	13.490
QUE2	28	119	2.628	0.149	0.495	13.846
CTP1	14	72	2.087	0.171	0.576	8.060
CTP2	21	54	2.789	0.075	0.775	16.264
MOT1	14	44	2.333	0.128	0.736	10.308
MOT2	22	98	2.453	0.158	0.529	11.623
KIN	25	132	2.765	0.085	0.635	15.879

Nota: Quetzalito 1 (QUE1), Quetzalito 2 (QUE2), Cabo Tres Puntas 1 (CTP1), Cabo Tres Puntas 2 (CTP2), Motaguilla 1 (MOT1), Motaguilla 2 (MOT2) y King Fish (KIN), ee (número efectivo de especies).

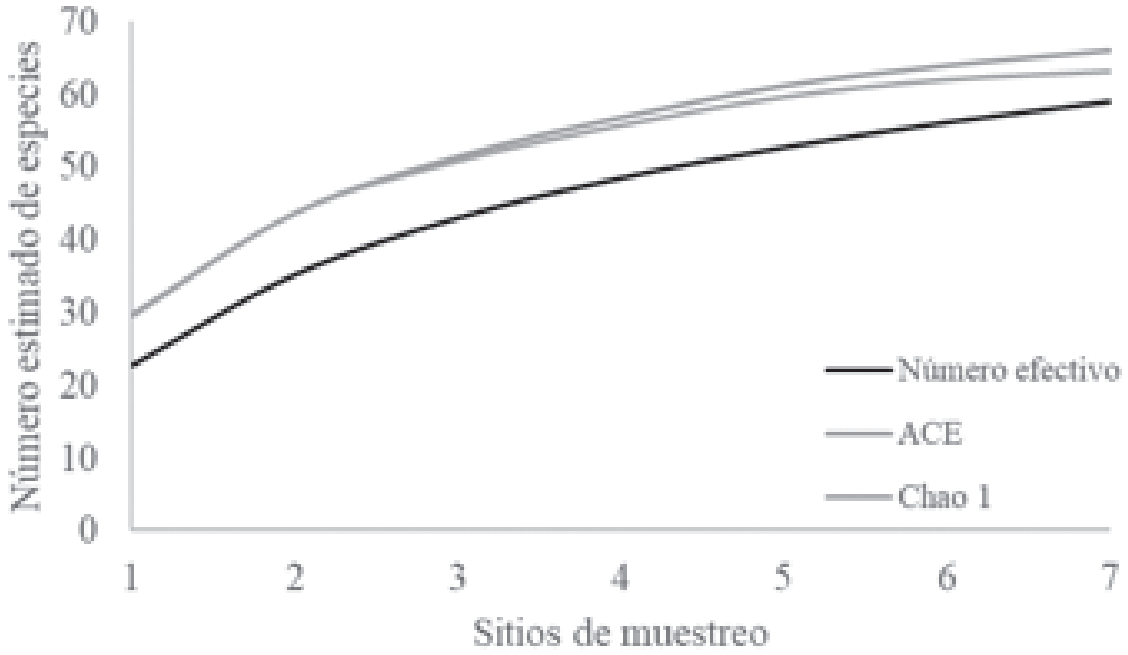

Figura 3. Curva de acumulación de especies observadas y estimadas durante el período de muestreo.

Con relación al índice de Shannon-Weaver, los sitios con mayor diversidad fueron CTP2 (2.789), KIN (2.765) y QUE2 (2.628). En cuanto al índice de Igualdad, los valores más elevados se presentaron en los sitios CTP2 (0.775), MOT1 (0.736) y KIN (0.635).

El dendrograma derivado de la abundancia por especie para los sitios de muestreo, mostró cinco agrupaciones (similaridad de Bray-Curtis del 43 %) (Figura 4). Los sitios QUE1 y QUE2 comprenden un conglomerado, caracterizándose por ser los sitios con la mayor riqueza y abundancia, principalmente de *Scarus* spp., así como también los sitios más alejados de la costa. El segundo conglomerado está comprendido por MOT1 y CTP1, los cuales presentaron valores de riqueza (14 especies) y abundancias similares. Por otro lado, MOT2, KIN y CTP2 no mostraron agrupación con otros sitios, presentando características diferentes con respecto a la abundancia y la riqueza (Figura 5).

Los sitios con mayor número efectivo de especies fueron CTP2 (16.2), KIN (15.8), QUE1 (13.4) y QUE2 (13.8). Y los que presentaron menor número efectivo de especies fueron MOT2 (11.6), MOT1 (10.3) y CTP 1 (8.06).

Discusión

Los resultados obtenidos con este estudio son los primeros que se realizan con la metodología de BRUVS en el mar Caribe de Guatemala. Las primeras investigaciones realizados sobres peces arrecifales en esta zona, se han llevado a cabo por el método de transectos, donde los resultados muestran una biomasa de 43 g/100 m^2 de peces comerciales y 433 g/100 m^2 de peces herbívoros, mostrando un estado crítico (McField et al., 2018).

Las cinco familias con mayor abundancia encontradas durante esta investigación fueron: Scaridae, Labridae, Chaetodontidae, Carangidae y Lutjanidae, de las cuales las últimas dos son consideradas de importancia comercial. En cuanto a las especies más abundantes durante esta investigación se reportaron a *Scarus* spp., *C. parrae, A. scriptus, S. iserti* y *C. ruber*. El patrón de la composición de familias y especies más abundantes encontrado en este estudio es similar al encontrado en otros arrecifes en el Caribe (Andradi-Brown, Gres, Wright, Exton, & Rogers,, 2016a; Alemu, 2014; Núñez, González, Zarate, Hernández, & Arias, 2003).

Durante este estudio las especies con algún grado de importancia comercial con más abundancia fueron *C. ruber, O. chrysurus* y *L. synagris*. Mientras que la abundancia reportada es menor a la encontrada en un estudio que se realizó con la misma metodología y mismo hábitat (Andradi-Brown et al., 2016b). En cuanto a la riqueza, esta investigación obtuvo un promedio de 22 especies por sitio de muestreo, mientras que Andradi-Brown y colaboradores (2016b) reporta una riqueza de 26 especies por sitio de muestreo. Esta diferencia se puede atribuir a que los sitios evaluados en el Caribe de Guatemala están sometidos a sobre pesca, mientras que los reportados por el estudio mencionado no experimentan presión por pesca.

La curva de acumulación de especies, no alcanzó la asíntota de la curva, esto coincide con lo reportado en la literatura, donde especifican que uno de los principales problemas de utilizar BRUVS es que se requiere un alto esfuerzo de muestreo para alcanzar la asíntota en la curva de acumulación de especies, en comparación con otras metodologías (Malcolm, Gladstone, Lindfield, Wraith, & Lynch, 2007). Esto es una limitante importante del método de BRUVS, que debe tomarse en cuenta para estudios futuros.

Los resultados de este estudio permitieron registrar diferencias significativas en la riqueza y abundancia, donde los sitios QUE1 y QUE2 y KIN presentaron la mayor riqueza y abundancia. Esta información puede utilizarse para plantear acciones de manejo pesquero en la zona en QUE1 y QUE2, ya que KIN actualmente es una zona que tiene una veda de artes de pesca, aunque existen limitaciones para las autoridades en cuanto al control y vigilancia de las zonas, lo que se traduce en una alta tasa de pesca ilegal, aunque estos resultados muestran de que las acciones de gestión de pesca aplicadas en KIN han tenido algún impacto en la comunidad de peces.

El número efectivo de especies nos muestra que los dos sitios con más especies son CTP2 y KIN, esto es resultado de que en estos sitios la dominancia de especies es menor comparado con otros sitios, por ejemplo, QUE1 y QUE2, aunque presentan una mayor cantidad de especies, los índices de dominancia son de los más altos. Jost (2006) menciona que este "índice es el número de especies que tiene una comunidad virtual en la que todas las especies fueran igualmente comunes, conservando la abundancia relativa promedio de la comunidad estudiada". Una de las ventajas de utilizar este índice es que podemos evaluar la magnitud del cambio entre comunidades (García-Morales, Moreno, & Bello-Gutiérrez, 2011).

Los sitios QUE1 y QUE2 formaron un conglomerado que se encuentra más alejado de la costa, tienen menor incidencia de pesca, y la formación arrecifal es

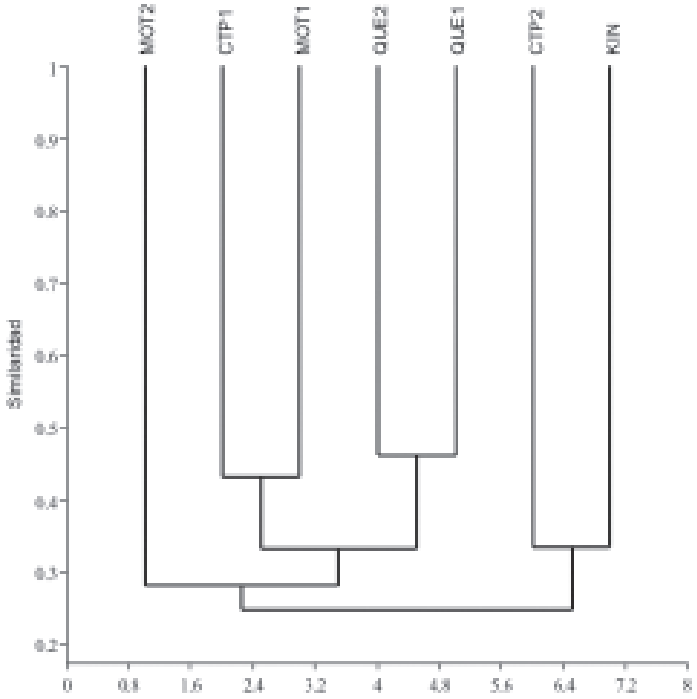

Figura 4. Similaridad de Bray-Curtis de la abundancia de peces arrecifales. Quetzalito 1 (QUE1), Quetzalito 2 (QUE2), Cabo Tres Puntas 1 (CTP1), Cabo Tres Puntas 2 (CTP2), Motaguilla 1 (MOT1), Motaguilla 2 (MOT2) y King Fish (KIN).

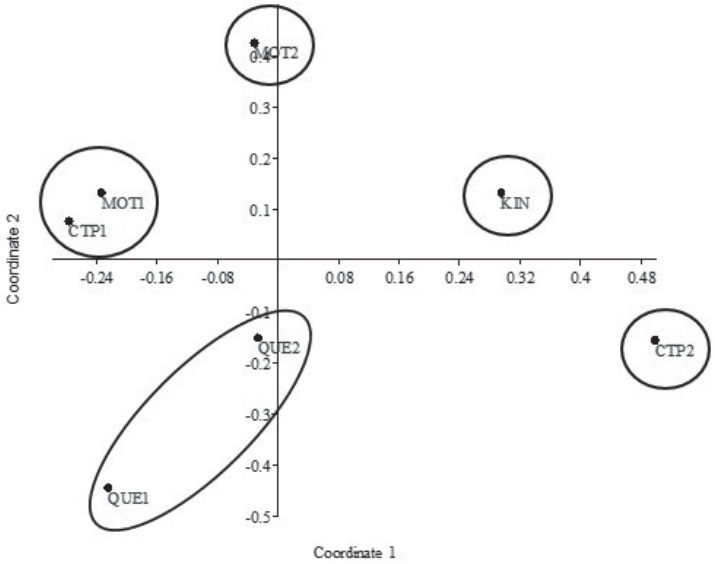

Figura 5. Gráfico de escalamiento no métrico multidimensional (NMDS) de la abundancia de peces arrecifales. Quetzalito 1 (QUE1), Quetzalito 2 (QUE2), Cabo Tres Puntas 1 (CTP1), Cabo Tres Puntas 2 (CTP2), Motaguilla 1 (MOT1), Motaguilla 2 (MOT2) y King Fish (KIN).

de valles y crestas, por lo que estas similitudes podrían propiciar que se agrupen en una misma forma, las especies más abundantes en estos sitios fueron el género Scarus y *Clepticus parrae*. Mientras que MOT1 y CTP1 son sitios están más cercanos a la costa y tienen mayor presión pesquera, en cuanto al ecosistema, el primero es de valles y crestas y el segundo son parches arrecifales, las especies más abundantes fueron el género Scarus, *C. ruber* y *C. capistratus*.

Finalmente, los resultados obtenidos durante esta investigación nos muestran que la mayoría de sitios evaluados están expuestos a sobre pesca, ya que la abundancia de especies de importancia comercial es baja, predominando las especies herbívoras. En el caso de los puntos QU1 y QU2 tienen menor incidencia de pesca debido a la lejanía de la costa, dificultando el acceso a pescadores, en cuanto a KIN, este punto cuenta con protección legal en cuanto al uso de artes de pesca, lo que podría ayudar a reducir los efectos de la pesca.

Agradecimientos

Esta investigación fue cofinanciada por Digi-Usac-2016, Proyecto: 4.8.26.7.41. Un especial agradecimiento a los pescadores de la comunidad de El Quetzalito y al Consejo Nacional de Áreas Protegidas (Conap) por su apoyo durante el periodo de estudio.

Referencias

Ackerman, J. L., & Bellwood, D. R. (2000). Reef fish assemblages: A re-evaluation using enclosed rotenone stations. *Marine Ecology Progress Series, 206*(1), 227-237. doi:10.3354/meps206227

Adams, A., Dahlgren, C., Todd, G., Kendall, M., Layman, C., Ley, J., … Serafy, J. (2006). Nursey function of tropical back-reef systems. *Marine Ecology Progress Series*, *206*(3018), 287-301.

Alemu, J. (2014). Fish assemblages on fringing reefs in the southern Caribbean: Biodiversity, biomass and feeding types. *Revista de Biología Tropical, 62*(3), 169-181. doi:10.15517/rbt.v62i0.15912

Andradi-Brown, D. A., Gress, E., Wright, G., Exton, D. A., & Rogers, A. D. (2016a). Reef fish community biomass and trophic structure changes across shallow to upper-mesophotic reefs in the Mesoamerican Barrier Reef, Caribbean. *PLoS ONE, 11*(6), e0156641. doi:10.1371/journal.pone.0156641

Andradi-Brown, D. A., Macaya-Solís, C., Exton, D. A., Gress, E., Wright, G., & Rogers, A. D. (2016b). Assessing Caribbean shallow and mesophotic reef fish communities using Baited-Remote Underwater Video (BRUV) and Diver-Operated Video (DOV) survey techniques. *PLoS ONE, 11*(12), e0168235. doi:10.1371/journal.pone.0168235

Bernard, A., & Gotz, A. (2012). Bait increases the precisión in coutn data from remote underwater video for most subtidal reef fish in the warm-temperate Agulhas bioregion. *Marine Ecology Progress Series, 471*, 235-252. doi:10.3354/meps10039

Bond, M. E., Babcock, E. A., Pikitch, E. K., Abercrombie, D. L., Lam, N. F., & Chapman, D. D. (2012). Reef sharks exhibit site-fidelity and higher relative abundance in marine reserves on the Mesoamerican Barrier Reef. *PLoS ONE, 7*(3), e32983. doi:10.1371/journal.pone.0032883.

Brooks, E., Sloman, K., Sims, D., & Danylchuk, J. (2011). Validating the use of baited remote underwater video surveys for assessing the diversity, distirubiton and abundance of sharks in the Bahamas. *Endangered Species Reserarch, 13*(3), 231-243. doi:10.3354/esr00331

Cappo, M., Speare, P., & De´ath, G. (2004). Comparison of baited remote underwater video stations (BRUVS) and prawn (shrimp) trawls for assessments of fish biodiversity in inter-reefal areas of the Great Barrier Reef Marine Park. *Marine Biology and Ecology, 302*(1), 123-152. doi: 10.1016/j.jembe.2003.10.006

Cappo, M., Stowar, M., Syms, C., Johansson, C., & Cooper, T. (2011). Fish-habitat asssociations in the region offshore from James Price Point- a rapid assessment using Baited Remote Underwater Video Stations (BRUVS). *Journal of the Royal Society of Western Australia, 94*, 303-321.

Carpenter, K. E. (Ed.). (2002). *The living marine resources of the Western Central Atlantic.* Rome: Food and Agriculture Organization of The United Nations

Colwell, R. K. (2013). EstimateS: Statistical estimation of species richness and shared species from samples (Version 9) [*Software* de computación]. Recuperado de purl.oclc.org/estimates.

De Vos, L., Götz, A., Winker, H., & Attwood, C. G. (2014). Optimal BRUVS (baited remote underwater video system) survey design for reef fish monitoring in the Stilbaai Marine Protected Area. *African Journal of Marine Science, 36*(1), 1-10. doi:10.2989/1814232X.2013.873739

García-Morales, R., Moreno, C. E., & Bello-Gutiérrez, J. (2011). Renovando las medidas para evaluar la diversidad en comunidades ecológicas: El número de especies efectivas de murciélagos en el sureste de Tabasco, México. *Therya*, *2*(3), 205-215. doi:10.12933/therya-11-47

Harvey, E., Fletcher, D., Shortis, M. R., & Kendrick, G. A. (2004). A comparison of underwater visual distance estimates made by scuba divers and a stereo-video system: implications for underwater visual census of reef fish abundance. *Marine and Freshwater Research, 55*(6), 573-580. doi:10.1071/MF03130

Harvey, E. S., Newman, S. J., McLean, D. L., Cappo, M., Meeuwig, J. J., & Skepper, C. L. (2012). Comparison of the relative efficiencies of stereo-BRUVs and traps for sampling tropical continental shelf demersal fishes. *Fisheries Research, 125-126*, 108-120. doi:10.1016/j.fishres.2012.01.026

Humann, P., & Deloach, N. (2002). *Reef Fish Identification: Florida, Caribbean and Bahamas* (3rd. ed.). Florida, United States: New World Publications.

Jost, L. (2006). Entropy and diversity. *Oikos*, *113*(2), 363-375. doi:10.1111/j.2006.0030-1299.14714.x

Kramer, P., McField, M., Álvarez, L., Drysdale, I., Rueda, M., Giró, A., & Pott, R. (2015). 2015 Report Card for the Mesoamerican Reef. Florida: Franklin Dodd Communications.

Malcolm, H., Gladstone, W., Lindfield, S., Wraith, J., & Lynch, T. (2007). Spatial and temporal variation in reef fish assemblages of marine parks in New South Wales, Australia-baited video observations. *Marine Ecology Progress Series, 350*, 277-290.

McField, M., Kramer, P., Álvarez, L., Drysdale, I., Rueda, M., Giro, A., & Soto, M. (2018). 2018 Report Cad for the Mesoamerican Reef. Florida: Franklin Dodd Communications.

Meekan, M., & Meekan, M. (2006). *Surveys of shark and fin-fish abundance on reefs within the MOU74 Box and Rowley Shoals using baited remote underwater video systems.* Queensland, Australia: Australian Institute of Marine Science.

Mumby, P. J., Edwards, A. J., Arias-González, J., Lindeman, K. C., Blackwell, P. G., Gall, A., … Llewellyn, G. (2004). Mangroves enhance the biomass of coral reef fish communities in the Caribbean. *Nature, 427*(6974), 533-536. doi:10.1038/nature02286

Newman, J., Paredes, A., Sala, E., & Jackson, J., (2006). Structure of Caribbean coral reef communities across a large gradient of fish biomass. *Ecology Letters*, *9*(11), 1216-1227. doi: 10.1111/j.1461-0248.2006.00976.x

Núñez, L., Gonzales, C., Ruiz, M., Hernández, R., & Arias, E. (2003). Condition of coral reef ecosystems in central southern Quintana Roo (Part 2: Reef Fish Communities). *Atoll Research Bulletin, 496*(33), 598-610. doi:10.5479/si.00775630.496-33.598

Vásquez, L., Vega, E., Montero, J., & Sosa, E., (2011). High species richness of early stages of fish in a locality of the Mesoamerican Barrier Reef System: A small-scale survey using different samplings gears. *Biodiversity Conservation*, *20*, 2379-2389.

Watson, D. L., Harvey E. S., Anderson M. J., & Kendrick G. A. (2005). A comparison of temperate reef fish assemblages recorded by three underwater stereo-video techniques. *Marine Biology*, *148*(2), 415–425. doi:10.1007/s00227-005-0090-6

Ciencia, Tecnología y Salud
Vol. 5 Num. 2 2018
ISSN: 2410-6356 (electrónico) / 2409-3459 (impreso)

Artículo Científico / Scientific Article

Native species valuable timber plantations in Northern Guatemalan Humid Lowlands: ecological features and silvicultural feasibility

Plantaciones con especies nativas valiosas en Tierras Bajas del Norte de Guatemala: rasgos ecológicos y viabilidad silvícola

Boris A. Méndez-Paiz*, Adrián Serech-Van Haute

Agriculture and Environment Research Institute, University San Carlos de Guatemala

***Autor al que se dirige la correspondencia:** polancoenca@gmail.com

Recibido: 01 de junio de 2018 / Revisión: 31 de agosto 2018 / Aceptado: 22 de octubre 2018

Abstract

The Northern Humid Guatemalan Lowlands contains a significant diversity of tree species, including some valuable-timber producers; these species are threatened by commercial overexploitation and habitat loss due to deforestation. The cultivation of these species in forest and agroforest plantations is a potentially viable option for balancing their conservation and commercial harvesting, something that has been promoted with Government Incentives in Guatemala during the past two decades. However, these species have not been widely planted, among other constraints, because knowledge on their ecological requirements and silviculture is scarce. A characterization of monoculture and mixed plantations with 14 native valuable-timber species was made in the Humid Lowlands of Northern Guatemala, analyzing for each species frequency of association and accompanying species, planted area, the main ecological features and growth rates. To gather information, we combined field observation and measurements with interviews and literature review. Based on our survey, main management challenges for cultivation of the species were identified and described. Valuable-timber native trees could potentially be sustainably cultivated in the study zone in different types of forest plantations and agroforestry schemes of coffee, cacao, cardamom and cattle; considering their suitability to fit in diversified systems, growth performance and farmer's preferences, *Swietenia macrophylla*, *Cedrela odorata*, *Tabebuia donnell-smithii*, *Calophyllum brasiliense* and *Cordia alliodora* were the species with the higher potential for inclusion in plantations. However, several unsolved problems continue restricting the cultivation of these species in plantations; therefore, is essential a careful design and management.

Keywords Biodiversity conservation, threatened native species.

Resumen

Las Tierras Bajas y Húmedas del Norte de Guatemala contienen diversidad relevante de especies arbóreas, incluyendo algunas de madera valiosa; estas especies están amenazadas por sobre explotación comercial de su madera y deforestación. El cultivo de estas especies en plantaciones forestales y agroforestales es una opción potencialmente viable para equilibrar su conservación y aprovechamiento, lo cual ha sido promovido en Guatemala durante las dos décadas pasadas. Sin embargo, estas especies no se cultivan extensivamente, entre otras limitantes, debido al escaso conocimiento sobre su ecología y silvicultura. Se caracterizaron plantaciones puras y mixtas con 14 especies nativas maderables valiosas en Tierras Bajas y Húmedas del Norte de Guatemala, analizando para cada especie, presencia de especies, superficies plantadas, rasgos ecológicos y crecimiento. Para obtener información se combinó observaciones de campo, mediciones, entrevistas, consultas de archivo y revisión bibliográfica. Se identifican y describen los principales desafíos de manejo para cultivar las especies. Las especies nativas de madera valiosa podrían potencialmente ser cultivadas de manera sostenible, en diferentes tipos de plantación forestal y agroforestal con café, cacao, cardamomo y ganadería; considerando idoneidad para encajar en sistemas diversificados, tasas de crecimiento y preferencias de productores, *Swietenia macrophylla*, *Cedrela odorata*, *Tabebuia donnell-smithii*, *Calophyllum brasiliense* y *Cordia alliodora* fueron las especies que mostraron mayor potencialidad para ser incluidas en plantaciones en la zona. Sin embargo, aún persisten diferentes aspectos no resueltos que limitan el cultivo de estas especies en plantación, requiriéndose un cuidadoso diseño y manejo.

Palabras claves: Conservación de biodiversidad, especies nativas amenazadas.

La reproducción total o parcial del contenido e imágenes de esta publicación se rige de acuerdo a normas internacionales sobre protección a los derechos de autor, con criterio especificados en la licencia Creative Commons (CC BY-NC-SA 4.0)

Introduction

Deforestation continues to be an unsolved problem in Guatemala; a net annual reduction of 38,500 ha of forest cover is estimated at country level, representing for the period 2006-2010 a per year decrease of 1 % of the remaining forest cover (Universidad del Valle de Guatemala, Instituto Nacional de Bosques, Consejo Nacional de Areas Protegidas [Conap], & Universidad Rafael Landívar, 2011). Land-use change and commercial over exploitation entails the loss of plant genetic material, including valuable timber trees, whose populations are being reduced and eventually depleted, to the point of being regarded as endangered or threatened species.

Different arguments justify the inclusion of native species in plantations, including the high commercial value of the wood of some of them (Montagnini & Jordan, 2005) and the increasing scarcity of these in natural forests (Onyekwelu, Stimm, & Evans, 2011). The inclusion of native species in plantations represents a conservation approach in productive systems, in which threatened tree species can be simultaneously used and conserved for their utilitarian value (Newton, 2008); restoration of biodiversity and ecological functioning require new approaches to reforestation, to enhance potential for both overcoming forest degradation and addressing rural poverty (Lamb, Erskine, & Parrotta, 2005). Native species cultivation in the tropics have been studied, examining their performance along with exotics for land restoration (Carpenter, Nichols, Pratt, & Young, 2004) in pure and mixed stands (Montagnini & Piotto, 2011).

Trials have been settled for testing groups of species survival and productivity on a particular site (Butterfield & Espinoza, 1995) or their differentiated response when planted under diverse environmental conditions (Calvo-Alvarado, Arias, & Richter, 2007; Wishnie et al., 2007) and arrangements (Manson, Schmidt, Bristow, Erskine, & Vanclay, 2013), highlighting small-scale environmental heterogeneity as a driver of tree survival and initial growth within sites (Plath, Mody, Potvin, & Dorn, 2011).

Different topics of management with tropical valuable-timber native species have been identified, including the need for sophistication of reforestation treatments, including the comparisons of mixtures with monocultures, paying attention to potential complementary effects when combining species with different shade tolerance (Hung, Herbohn, Lamb, & Nhan, 2011), the need to advance in understanding the ecosystem services and functions (Forrester, 2014; Hall, Ashton, Garen, & Jose, 2011), the balance between production and conservation roles of plantations (Lamb et al., 2005; Pryde, Holland, Watson, Turton, & Nimmo, 2015), the potential advantages that can be gained when cultivating species in carefully designed mixtures instead of monocultures (Kelty, 2006), which can lead to increases in growth rates and economic gains if proper ecological combining ability among species can be achieved (Menalled, Kelty, & Ewel, 1998), adding as well other ecological benefits (Piotto, 2008).

In Guatemala, the establishment of forest plantations has been promoted over the past 20 years, mostly through government incentives; although native species accounts for a small proportion of total planted area (Instituto Nacional de Bosques, 2017a), their relevance arises when considered their potentially high timber commercial value and the environmental roles they can play. In Guatemala there is a lack of trials with native species plantations as the ones settled in other parts of the tropics (Calvo-Alvarado et al., 2007; Manson et al., 2013; Park et al., 2010; Petit and Montagnini, 2006; Wishnie et al., 2007), to allow the testing with statistical support of species performance in response to differentiated edapho-climatic factors. However, the existence of a diverse set of plantations with valuable-timber trees, with wide variation in species composition (monocultures and different kind of mixtures), ages (dominating young and intermediates classes), degrees of success, and management approaches, and the scarce information available on species autecology and silviculture, were the drivers for this research.

Our study examines the feasibility for cultivation of valuable timber native species in the Northern Humid Lowlands of Guatemala. The aim was to identify relevant biophysical and socio-economic factors that favor or constrains their cultivation in the study zone, with the hope that our findings could eventually contribute to take better decisions for designing and manage future plantations with the species of interest.

The objectives of the research were: (i) To establish species choices preference in both monoculture and mixed stands; (ii) Identify the main environmental requirements of species and their relationship with growth rates, and (iii) Describe and analyze relevant management challenges for the different species.

Materials and methods

Selected species

From the large diversity of native tree species present in the natural forests of warm and humid areas of Mesoamerica –including their remnants in northern Guatemala– we selected a group of commercially valuable-timber ones, regarded by National Forest Service as "precious" and "semi-precious" timber species (Instituto Nacional de Bosques, 2017b). Due to habitat loss and commercial over-exploitation of their timber, the biological and economic viability of these species is classified with different levels of threat by national and international standards (the Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora -Cites-, 2017; Conap, 2009). Taxonomic information, timber commercial category, and conservation status of the chosen species is summarized in Table 1.

Study area and sampling

This research covered the humid (above 2000 mm/year of average rainfall) lowlands (below 1,000 m altitude) of northern Guatemala, which comprises a large area, located to the north and east of the Sierra Madre mountain chain, including the so-called Northern Transverse Strip (FTN), the Polochic River Valley-Izabal Lake Basin, the southern half of Petén province and the Lower Motagua River Basin (Figure 1). The area subject of study is the one with the highest rate of forest cover loss in Guatemala, which had occurred during the last four decades and is still an ongoing process due to the conversion of forests to agricultural uses, induced by different factors, including the expansion of agro-fuels cultivation, subsistence crops and cattle ranching (Universidad del Valle de Guatemala, et al., 2011). The study zone has in general a more diverse and lower productive potential soils when compared with the southern (Pacific) lowlands of Guatemala.

A combination of criteria was applied to define the sample, looking for assuring inclusion of the species of interest -in both monoculture and mixed stands-, site characteristics based mostly on physiography and altitude within the four natural regions of the study area, stage of development (based on age), and management approach; all the plantations have been established with government subsidies (Incentives Program [Pinfor]), with only one exception. The survey included 51 points (sampling units) in 33 sites. Selection of sample units was based on inclusion of the widest possible situations using the above mentioned criteria; therefore, we did not define the sample following any quantitative statistical criterion. Location by zone are summarized in Table 2 and Figure 1.

FTN zone has a higher proportion of sample because that is the region with the largest number and diversity of plantations in terms of species composition and cultivation arrangements.

In sampled stands the following information was surveyed: species composition, plantation age, and initial and current stand density, diameter at breast height, total height, sanitary status, and foliar phenology. Measurements were taken following standardized procedures (Avery & Burkhart, 2002).

Sample units were plots of either 500 or 1,000 m^2 of surface (varying in response to stands size) with rectangular shape. Some of the plots are part of the Inab permanent monitoring system for forest plantations. Interviews were carried out with land owners or managers in each farm visited and also with Inab technical personnel, both local and at national headquarters with team members of the national program of forest incentives.

According to Holdridge's Life Zone system (Cruz de la, 1982), although most sites are within the subtropical wet forest life zone, eight samples were in the tropical wet forest and one in the subtropical moist forests (temperate) life zone; in general tree species planted face low environmental stress due to climatic condition, since the dry season entails no more than four months. The largest environmental variation and stress inducing for plantations in the study zone comes from soil condition, which is extremely variable because of the diverse origin material; soil water retention is associated with topographic position and soil texture and explains the differentiated capacity of species for survival and growth. Soil depth and rockiness might be as well limiting factors for some species.

Results

Species ecological features

Table 3 displays main ecological requirements of species -including wood density- and frequent arrangements and management challenges. Information comes from literature review and field observation.

Table 1
Species taxonomy, timber value, and conservation status

Common Names	Scientific Name	Botanic Family	Natural Distribution	Timber Commercial Category	Cites[1] Status	Conap[2] Status
Big Leaf Mahogany	*Swietenia macrophylla* King	Meliaceae	South Mexico-Amazon Basin	Precious	II	3
Pacific Coast Mahogany	*Swietenia humilis* Zuccarini	Meliaceae	Pacific dry Mexico to Costa Rica	Precious	II	2
Spanish Cedar, Cedro	*Cedrela odorata* L.	Meliaceae	Mexico to North Argentina	Precious	III	2
Rosewood, Granadillo	*Dalbergia retusa* Hemsl	Fabaceae	Pacific Mexico-Panama	Precious	III	2
Rosul, Rosewood	*Dalbergia stevensonii* Standl	Fabaceae	South Belize, North Guatemala and South Mexico	Precious	III	2
Sericote	*Cordia dodecandra* A. DC.	Boraginaceae	Atlantic Mexico, Belize & North Guatemala	Precious		3
Jocote fraile, Jobillo, Ronrón	*Astronium graveolens* Jacq.	Anacardiaceae	South Mexico to Brasil & Bolivia	Precious		3
Chichipate	*Sweetia panamensis* Benth.	Fabaceae	South Mexico to Colombia & Venezuela	Precious		
Palo Blanco, Primavera	*Tabebuia donnell-smithii* Rose	Bignoniaceae	Pacific Mexico - Honduras	Semi-precious		
Matilisguate, Roble Sabana	*Tabebuia rosea* Bertol.	Bignoniaceae	Mexico to North South America	Semi-precious		
Santa María	*Calophyllum brasiliense* Cambess.	Clusiaceae	South Mexico to Bolivia &Brasil, including Antilles	Semi-precious		
Laurel	*Cordia alliodora* (Ruiz &Pav.) Oken	Boraginaceae	North Mexico-Argentina & Caribbean	Semi-precious		
Conacaste	*Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb.	Fabaceae	South Mexico-North South America, dry zones	Semi-precious		3

(Continued)

Table 1

Species taxonomy, timber value, and conservation status (Cotinuation)

Common Names	Scientific Name	Botanic Family	Natural Distribution	Timber Commercial Category	Cites[1] Status	Conap[2] Status
San Juan	*Vochysia guatemalensis* Donn Sm.	Vochysiaceae	South Mexico, Central America and Colombia	Secondary		

Note. Sources: Consejo Nacional de Áreas Protegidas (Conap), 2009; Cordero et al, 2003; Instituto Nacional de Bosques, 2017b; Kew Royal Botanic Gardens et al., 2013; Standley et al., 1977; the Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora, 2017. [1]Conap Status: Conap stands for Guatemalan National Protected Area System Council; Category 1 for endangered of extinction species (proposed total restriction for commercial use); Category 2 for species with natural distribution restricted to one habitat (endemic species); Category 3 for species currently not in threat of extinction but that might become to be so if harvest is not regulated. Species in categories 2 and 3 can be harvested for scientific and commercial purposes if approved management plans guarantee their survival. [2]Cites List: The Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Flora and Fauna (Cites) regulates the global trade of threatened and endangered species. The level of trade restriction for each species varies from strict to lenient, depending on the level of the threat of extinction it faces. Cites has three appendices, which establish differing levels of permit requirements for the import and export of endangered species. Appendix I lists species threatened with extinction, prohibiting international commercial trade; Appendix II lists those species not yet threatened with extinction but that may become so if trade in them is not strictly controlled and monitored to avoid exploitation incompatible with species survival; Appendix III species are listed when a party currently protects the species under its domestic laws and now seeks the further cooperation of Cites parties to control its international trade (Hunter, Salzman, & Zaelke, 2002).

Surface planted, plantations arrangement and growth

None of the studied species have been planted extensively in Guatemala. The National Forest Service (Instituto Nacional de Bosques, 2017a) reports that *T. donnell-smithii* as the native valuable timber with the highest surface planted with Government incentives during the last 20 years in the country with 6,500 ha, followed by a bunch of species with surfaces above 1,000 ha, which includes *C. odorata*, *C. brasiliense, S. macrophylla,* and *T. rosea* (Table 5); these five species were among the top 10 species in terms of surface planted and interest for cultivation in the country because of promotion made by the Forest Service and the enthusiasm of growers for planting them. However, as is the case in other tropical countries, Pines, Teak and Gmelina are the species most widely planted at national scale in humid lowlands, due to seedlings availability of reliable quality and sufficient quantities, and because their silviculture is much better known and more simple when compared with the natives.

The rest of species of interest in our project have planted surfaces with incentives below 1,000 ha, with presence in not many projects, reflecting the low interest or possibilities for their cultivation; valuable and threatened species are less common in plantations than exotics; the scarce knowledge on their ecological requirements and hence their silvicultural needs along with restrictions to access reliable and sufficient seeds, seedlings and vegetative propagules, make their commercial cultivation a difficult task. We found 13 out of the 14 species of interest for the project present in plantations in the study zone. The only species not found in plantations was *C. dodencandra*, apparently because of its slow growth and reduced market opportunities.

Official statistics show a dominant trend of monocultures (Table 3). This trend is the result of a policy implemented by Inab since the inception of the incentives program in 1997. However, we found an important number of mixed stands, which initially were planted as monocultures and in response to different cultivation challenges, which leaded to high rates of tree mortality, landowners decided to associate the surviving trees of the originally planted valuables with other species as a mean to occupy the site, becoming in mixtures (Table 3). However, official numbers indicate the original composition of stands, since species composition infor-

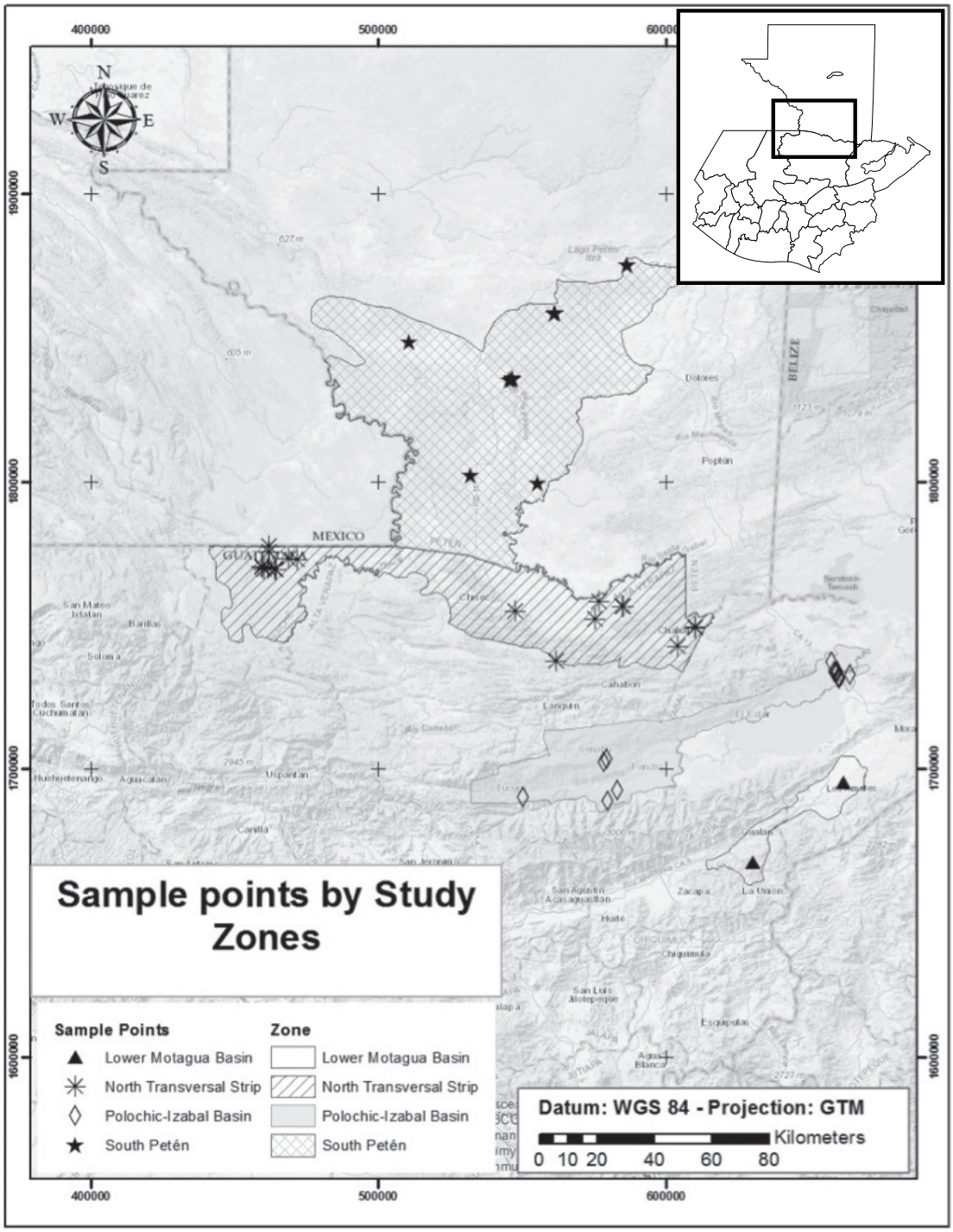

Figure 1. Study regions and sample point's location

Table 2
Sample geographic features

Natural Region	Sampled sites	Altitude m. average (range)	Physiographic region
Northern Transversal Strip (FTN)	21	192 (100-288)	Interior Lowlands of Peten; Izabal Depression; Sedimentary Highlandss
Southern Peten	11	188 (50-350)	Interior lowlands of Peten
Polochic-Izabal Basin	17	230 (18-995)	Izabal Lake depression
Lower Motagua River Basin	2	627 (570-700)	Izabal Lake depression and Crystalline lowlands

mation was never updated. Many landowners express their interest to diversify, either creating mixed stands or planting small size monocultures of different species, as a strategy to deal with biological and financial problems.

Height growth rates are displayed in Figure 2; planted surfaces as a total and in mixtures, stand proportion in terms of basal area, growth rates and plantations ages are synthesized in Table 5.

Although plantations ages varied between 5-23 years, most stands were between 10-15 years, dominating young (between 6-12 years) and intermediate (12-20 years) stages. Growth rates in height can be grouped in three categories: slow rates (below 1.0 m/year) for *S. macrophylla*, *D. retusa*, *D. stevensonii*, *A. graveolens*, *S. panamensis*, *T. rosea*, intermediate rates between 1-1.5 m/year for *S. humilis*, *C. odorata*, *T. donnell-smithii*, *C. brasiliense* and *V. guatemalensis* and finally high rate for *C. alliodora* with an average above 1.5 m/year. In the case of *E. cyclocarpum* although showed height growth slow rate, it was only one stand in the sample, with the oldest age, above 20 years, entering a mature stage, in which growth rates for height decline significantly. It is important to consider that those are average numbers, with wide spectrums in which both site conditions and genetic variability within species might lead to strong variations in growth rates.

Finally, diameter growth rates show as well high variability, with stand density as an additional inducing factor. To make more meaningful comparisons in growth and productivity rates, more in depth data is needed, restricting the number of species, site conditions and stand density management, ideally with accumulated measurements in permanent sample plots, all of which was beyond the scope of this exploratory analysis.

Plantations management in the zone

Three groups of species can be identified from a management perspective. The first one is the "traditional highly valuables", composed by historically exploited Neotropical Meliacea family species, which includes *S. humilis*, *S. macrophylla*, and *C. odorata*, characterized by their well-known valuable timber, both at national and international markets. Although commercial supplies have been yielded from natural forests and continues to being so in Guatemala, there has been a growing interest to cultivate them in plantations, resulting two of the species of this group among the top 10 trees planted with incentives during the past 20 years; shoot borer attack continues to be the most prevalent constraint for cultivation success in plantations, a biological problem difficult to be controlled. Although from the bunch of species analyzed, this group is the one which has received more attention in terms of its cultivation at international level, including their genetics (Navarro, Gillies, Wilson, & Hernandez, 2003); genetic by environment interactions (Ward & Lugo, 2003); regeneration (Grogan, Galvao, Simoes, & Verissimo, 2003; Snook, 2003) and silviculture (Francis, 2003; Negreros-Castillo & Mize, 2003), in Guatemala not much of that knowledge is readily available to producers, therefore the trial and error approach continues to be the predominant scheme when planting the Neotropical Meliaceae. The relatively large amounts of plantations with two of the three species of this group is the result of seed and seedling availability and high interest of landowners to plant them.

Table 3
Species frequency in sample

Species	# sampled stands		
	Monoculture	Mixtures	Total
S. macrophylla	4	15	19
S. humilis	0	2	2
C. odorata	3	6	9
D. retusa	1	3	4
D. stevensonii	4	6	10
A. graveolens	0	5	5
S. panamensis	0	2	2
T. donnell-smithii	0	5	5
T. rosea	0	3	3
C. brasiliense	1	7	8
C. alliodora	0	4	4
E. cyclocarpum	1	0	1
V. guatemalensis	1	7	8

Table 4
Species ecological features, prevailing arrangements and management challenges

Species	Ecological Requirements	Wood Density g/cm^3	Prevailing arrangement & management constraints
S. macrophylla	Light demanders	0.45-0.55	Planted in the study area in both monoculture and mixtures
S. humilis	Long-lived pioneers Moderately fast growth	0.54-0.60	Affected by shoot borer pest; low density planting (150 trees ha^{-1}) in mixtures and pruning suggested to overcome pest attack and improve growth rates (Cifuentes, 2010)
C. odorata	*C. odorata* tolerates some shade and weed competition at seedling stage but not at sapling stage and beyond (Menalled et al., 1998)	0.34-0.66	
D. retusa	Shade intolerant (pioneer) Long-lived pioneer Moderately fast growth	0.83-0.89	Shade tree in cocoa plantations at low densities; requires continues pruning
D. stevensonii	Light demanding Slow growth; evergreen Open expanded crown	0.71-0.82	Tolerates flooded soils
C. dodecandra	Light demanding Intermediate growth Tolerates flooded soils Columnar, deciduous crown (Snook, 1993)	0.53-0.77	Very scarce in plantations

(Continued)

Table 4
Species ecological features, prevailing arrangements and management challenges (continuation)

Species	Ecological Requirements	Wood Density g/cm^3	Prevailing arrangement & management constraints
A. graveolens	Tolerates both shade and full sunlight; adapted to strong disturbance	0.76-1.09	Very scarce in plantations Shade tree in cocoa plantations, possible to plant at high densities due to columnar compact crown
S. panamensis	Deciduous, Light demanding, slow-growth	0.80	Very scarce in plantations In mixtures at low densities with mahoganies
T. donnell-smithii	Partially shade tolerant	0.38-0.53	Intermediate densities in mixtures Partial shade needed at juvenile stages Deep and well drained soils
T. rosea	Long-lived pioneer (Griscom & Ashton, 2010); tolerates both humid (seasonally flooded and riparian areas) and dry conditions; high rates of survival under low input conditions (Butterfield & Espinoza).	0.48-0.72	Deciduous, broad crown; recommended to be planted at high densities to avoid profuse branching at low heights. Grows well in fertile, alluvial and well drained soils (Cordero et al., 2003).
C. brasiliense	Partially shade tolerant; requires humid climates and not long dry season (Calvo et al., 2007); long-lived pioneer; medium to slow growth rates (Butterfield & Espinoza, 1995); evergreen foliage. Grows well in clayey, humid and acid soils even on temporary flooded condition (Cordero et al., 2003).	0.47-0.70	As a shade with cacao or cardamom and mixed plantations with *S. macrophylla*; total mortality by pests in humid Costa Rica (Calvo et al., 2007; Montagnini & Piotto, 2011;)
C. alliodora	Pioneer, light-demanding (Francis & Lowe, 2000); evergreen as a seedling, semi-deciduous in dry season as a sapling, and deciduous in wet season as a mature tree (Menalled et al., 1998).	0.33 -0.73	Nutrient (specially N) and weed sensitive (Butterfield & Espinoza, 1995; Menalled, Kelty & Ewel, 1998)
E. cyclocarpum	Intolerant to shade and flooded soils; tolerates alkaline soils;	0.30-0.50	Common tree in seasonally dry cattle farms on Pacific of Central America (Griscom & Ashton, 2011); associated in dry Pacific zone to native Meliaceae tree species, *Dalbergia* sp. and *Astronium graveolens* (Francis & Lowe, 2000).
V. guatemalensis	Shade intolerant Long-lived pioneer Fast growth (Butterfield & Espinoza, 1995); Nitrogen fixer	0.31-0.45	Endures flooded soils; high timber productivity at 15 years in Costa Rica (Montagnini & Piotto, 2011).

Note. Sources: in addition to text citations, Authors field observation and interviews; Carpenter et al., 2004; Francis & Lowe, 2000; Griscom & Ashton, 2011; Kew & MGB, 2016; Pettit and Montagnini, 2004; World Agroforestry Organization, 2017.

Table 5
Planted surface, stand proportion, growth rates and plantation ages for studied species1

Species	Planted area National level ha (mixed stands)2	Stand Proportion % b. area Mean (Range)	Growth rate Mean annual increment Mean (Range)		Age years Mean (Range)
			DBH cm year^{-1}	Height m year^{-1}	
S. macrophylla	1,002 (16)	41 (5-100)	1.19 (0.61 - 2.25)	0.98 (0.61 - 1.94)	13 (6 - 19)
S. humilis	71 (2)	16 (2 - 30)	1.35 (1.23 - 1.46)	1.17 (1.11 - 1.23)	17 (13 - 20)
C. odorata	1,404 (8)	49 (2 - 100)	1.58 (0.70 - 2.43)	1.24 (0.49 - 2.19)	14 (5 - 20)
D. retusa	87 (58)	47 (3 - 51)	1.15 (0.74 - 1.51)	0.99 (0.64 - 1.48)	14 (6 - 19)
D. stevensonii	82 (0)	48 (5 - 100)	1.0 (0.59 - 1.31)	1.0 (0.82 - 1.43)	17 (13 - 19)
C. dodecandra	300 (5)	N/A3	N/A	N/A	N/A
A. graveolens	65 (9)	21 (1 - 78)	0.68 (0.29 - 1.26)	0.68 (0.38 -1.08)	16 (13 - 19)
S. panamensis	16 (2)	34 (1 - 67)	0.87 (0.83 - 0.91)	0.73 (0.70 - 0.76)	14.5 (14 - 15)
T. donnell-smithii	6,582	30 (7 - 77)	1.74 (0.88 - 2.88)	1.38 (0.83 - 1.96)	14 (13 - 15)
T. rosea	3,473 (15)	6 (3 - 10)	1.07 (0.87 - 1.12)	0.80 (0.25 - 1.34)	14 (9 - 18)
C. brasiliense	1,522 (17)	49 (8 - 91)	1.16 (0.74 - 1.45)	1.10 (1.04 - 1.31)	12 (8 - 19)
C. alliodora	138 (1)	15 (3 - 41)	1.85 (0.80 - 3.12)	1.65 (0.88 - 2.56)	14 (5 - 19)
E. cyclocarpum	280 (1)	100	1.82	0.73	23
V. guatemalensis	993 (6)	38 (4 - 91)	1.86 (0.46 - 3.89)	1.13 (0.35 - 2.07)	15 (8 - 19)

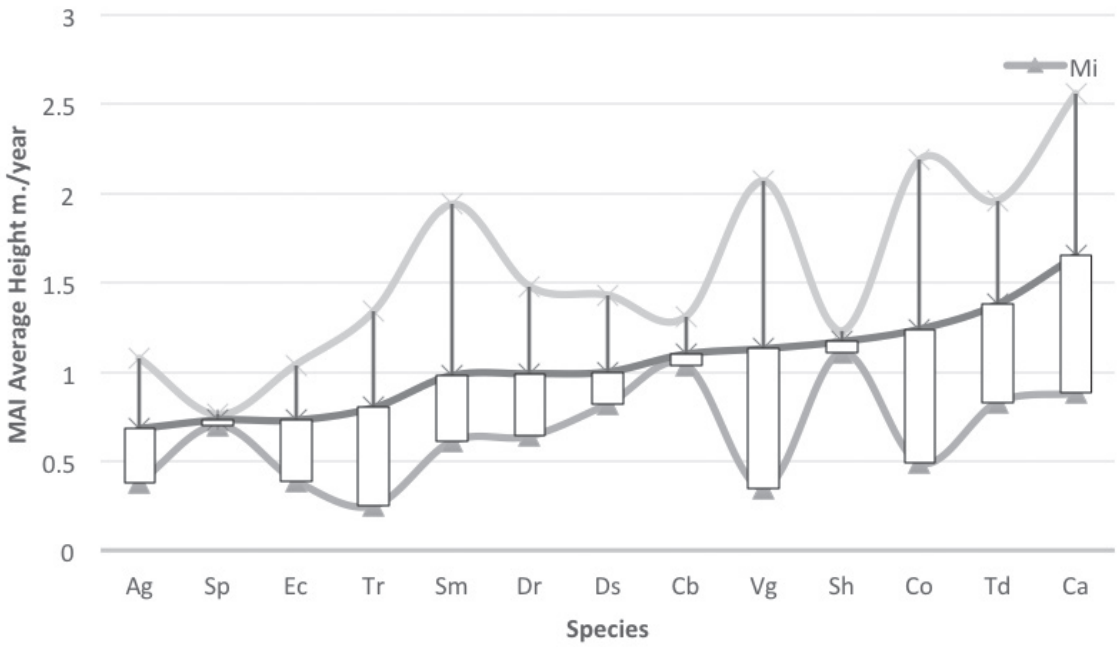

Figure 2. Height Mean Annual Increment by species. Ag: *Astronium graveolens*, Sp: *Sweetia panamensis*, Ec: *Enterolobium cyclocarpum,* Tr: *Tabebuia rosea*, Sm: *Swietenia macrophylla*, Dr: *Dalbergia retusa*, Ds: *Dalbergia stevensonii,* Cb: *Callophyllum brasiliense,* Vg: *Vochysia guatemalensis*, Sh: *Swietenia humilis*, Co: *Cedrela odorata*, Td: *Tabebuia donnell-smithii*, Ca: *Cordia alliodora.*

The second group is called "relic precious timbers", composed by *D. retusa, D. stevensonii*, *C. dodecandra, A. graveolens & S. panamensis.* The species of this group reach high prices at national and international markets, for their use in luxury crafts. The group is characterized by the scarcity of trees in natural forests, their not well-known current distribution, and the growing pressure for their exploitation, much of which is occurring illegally. Plantations surfaces and number of projects with these species are small. The two *Dalbergia* species have been included recently in the Cites Appendix as a Guatemalan initiative; is very likely that much of the current germplasm of these species in Guatemala remains in different agroforestry systems, especially throughout the northern lowlands, and the FTN zone. Not much is known regarding their genetics, autecology and silviculture.

Finally, we settle a third group, named as "semi-precious timbers", which includes *C. brasiliense, C. alliodora, E. cyclocarpum, V. guatemalensis, T. rosea & T. donnell-smithii.* Species of this group produce timber of lesser commercial value when compared with precious timber groups, although their quality still place them as widely used for cabinetry and other highly valuable applications. *E. cyclocarpum* is the only species of the group flagged with some degree of threat by the National Authority. Four of the species have been cultivated in high frequency in forest plantations with incentives, although with several unexpected problems that have leaded to species substitution after plantations establishment. Their performance in agroforestry schemes seems to be a more suitable option.

Discussion

Species preferences

In general, valuable-timber species are not the predominant choices when selecting species for commercial plantations in the Northern Humid Lowlands of Guatemala, although most of them are native to the zone. A reduced group of pioneers, fast-growing exotic species are preferred for their higher availability of seedlings of reliable origin, and knowledge on their

ecological requirements and because their silviculture is much better known and simple. However, even though valuable natives have different constraints that limit their use in plantations, there is a growing interest in Guatemala to increase their use, several of the landowners of sites visited during this research, are eager to continue testing different schemes for their cultivation. A critical issue that arises is the need for exploration and assessment for ex-situ conservation of diversified and phenotypically desirable materials for these species, as a key component for their long-term conservation and utilization, as suggested by different authors (Finkeldey, 2011; Finkeldey & Hattemer, 2007).

From the species selected for the study, four were the predominant in plantations in the study zone: *T. donnell-smithii, C. odorata*, *C. brasiliense* and *S. macrophylla,* all of them among the top 10 species in terms of surface planted and interest for cultivation at country level, because of the Forest Service promotion and grower's interest. Regarding stand composition of plantations with valuable natives, there is a trend from monoculture towards mixtures, in part due to landowner's previous experiences in associating crops in agroforestry systems; biological and financial constraints make more feasible to manage plantations with valuable timber species in mixtures.

Species autecology is key for cultivation

Even though the scope of this research did not allow to go in depth on this topic, species vary in their growth rates as a result of different environmental requirements, expressed in their light, soil (humidity, nutrients), and terrain (topographic position) conditions. To gain appropriate understanding of species survival, growth rates and productivity on plantations, is essential to have sufficient knowledge of their autecological requirements (silvics), something not well known at different levels for all the evaluated species. Several of the species evaluated in our survey showed low values of productivity (below 10 m^3/ha/year) when planted in monocultures at the typical initial densities of forest stands (Cifuentes, 2010); in contrast, at equivalent densities, traditional exotics planted in Guatemala, such as Caribbean Pine, Teak or Gmelina, achieve much higher yield values.

Based on growth rates and timber value, we settle three species groups: (i) "traditional highly valuables", composed by the Neotropical Meliaceae family species *S. humilis*, *S. macrophylla*, and *C. odorata*, with a strong interest for cultivation in plantations and regarded in national and international markets as "precious timbers"; (ii) "relic timbers" composed by *D. retusa*, *D. stevensonii*, *C. dodecandra, A. graveolens & S. panamensis,* which are raising high prices at international markets for luxury craft-making. Scarcity of trees in natural forests, not well-known current distribution and increasing pressure for their exploitation characterized this group; surface and number of planted stands with them are small; (iii) "semi-precious timbers", which includes *C. brasiliense, C. alliodora, E. cyclocarpum, V. guatemalensis, T. rosea, & T. donnell-smithii.* Although their timber commercial value is not that high as compared with precious-timbers, their quality still places them as widely used for cabinetry and other highly valuable applications. *E. cyclocarpum* is the only species of the group flagged with some degree of threat; species are common in agroforestry systems and four of them have been planted in forest stands with high frequency although with several unexpected problems that have leaded to species substitution.

Valuable-timber plantations viability in the zone

Cultivation of native valuable-timber producer species in the Humid Lowlands of Northern Guatemala faces different environmental and socio-economic constraints that need to be addressed. From the environmental side, there is a need for better understanding on the site requirements of species (edapho-climatic conditions), and the potentially differentiated response of provenances and families (genetic variation) under contrasting environments; for long-term conservation of the species, is essential to advance in assessing and collecting for ex-situ conservation a sufficiently wide phenotypes of desirable attributes. Some biological factors are of primary relevance for cultivating some of the valuable-timber species, such as the case of the shoot-borer for the three Meliaceae family species or the need for partial shade on *T. donnell-smithii*, *C. brasiliense* and *S. panamensis.*

Regarding the socio-economic perspective, there are several challenges to cope with for advance in making sustainable the cultivation of the species; the need for cash flow, and employment generation on farm have not been well considered by Forest Service when settled forest incentives to promote plantations establishment; we noticed that landowners, especially small ones, tend to abandon stands after the six-year period of subsidy payments from government. There is no profit in sell-

ing small diameter products from stand thinning and pruning; landholders usually are not associated, which impedes the allocation of products in collection centers to reduce transportation costs and increase potential selling value. Lack of association limits as well possibilities for getting access to training, technical advisory and credit. Combining the ecological and financial issues, mixed tree species plantations and some agroforestry systems might be suitable choices for cultivating valuable-timber natives. Several successful examples of such arrangements can be found in the study zone, highlighting coffee, cacao, cardamom and cattle production.

Trials to study performance of the different species of interest at differing sites and management conditions, with adequate number of replicates are needed to gain deeper knowledge on the silviculture of species, such as the ones developed in Australia by Manson and coworkers (2013), in Panama by Oelmann and coworkers (2010), Park and coworkers (2010), Wishnie and coworkers (2007), and in Costa Rica by Montagnini and Piotto (2011), Petit and Montagnini (2006), and Redondo and Montagnini (2006).

In the field work of this research, we found several promising cultivation schemes for setting this type of trials in Northern Guatemala, which should be designed for long-term research. Valuable-timber native trees could potentially be sustainably cultivated in forest stands and the agroforestry schemes of coffee, cacao, cardamom and cattle; considering their suitability to fit in diversified systems, growth performance and farmer's preferences, *S. macrophylla*, *C. odorata*, *T. donnell-smithii*, *C. brasiliense* and *C. alliodora* should be promoted as priority species for plantations in the study zone. Careful design and management in mixtures with species associated based on their ecological requirements are essential to cope with the biological and financial constraints of such productive systems.

Acknowledgments

To Direccion General de Investigación of University San Carlos de Guatemala, Project number 4.8.63.2.05., for providing funding for this research. To the Guatemalan Forest Service (Inab) for facilitating us access to plantations statistics and sample measurements in permanent plots and also for valuable logistic support for fieldwork.

References

Avery, T. E., & Burkhart, H. E. (2002). *Forest measurements* (5th. ed.). New York: McGraw-Hill.

Butterfield, R., & Espinoza, M. (1995). Screening trial of 14 tropical hardwoods with an emphasis of species native to Costa Rica: Fourth year results. *New Forests,* 9, 135-145. doi: 10.1007/BF00028686

Calvo-Alvarado, J. C., Arias, D., & Richter, D. (2007). Early growth performance of native and introduced fast growing tree species in wet to sub-humid climates of the Southern region of Costa Rica. *Forest Ecology and Management, 242*, 227-235. doi: 10.1016/j.foreco.2007.01.034

Carpenter, F. L., Nichols, J. D., Pratt, R. T., & Young, K. C. (2004). Methods of facilitating reforestation of tropical degraded land with the native timber tree, *Terminalia amazonia. Forest Ecology and Management, 202,* 281-291. doi: 10.1016/j.foreco.2004.07.040

Cifuentes, G. (2010). Evaluación y monitoreo de plantaciones forestales en Guatemala. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Instituto Nacional de Bosques.

Consejo Nacional de Áreas Protegidas. (2009). *Lista de especies amenazadas de Guatemala -LEA- y listado de especies de flora y fauna silvestres Cites de Guatemala* (2ª. ed.). Guatemala: Autor.

Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres. (2017). Recuperado de https://www.cites.org/esp/app/index.php.

Cordero, J., Mesen, F., Montero, M., Stewart, J., Boshier, D., Chamberlain, J... Detlefsen, G. (2003). Descripción de especies de árboles nativos de América Central. In J. Cordero & D. H. Boshier. (Eds.). *Árboles de Centroamérica* (pp. 915-916). Turrialba: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza,

Cruz de la, J. (1982). *Clasificación de zonas de vida de Guatemala a nivel de reconocimiento.* Guatemala: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación.

Finkeldey, R. (2011). Management of forest genetic resources. In S. Gunter, M. Weber, B. Stimm., & M.

Reinhard (Eds.), *Silviculture in the Tropics* (pp. 103-108). Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag.

Finkeldey, R., & Hattemer, H. (2007). *Tropical forest genetics*. Berlin: Springer.

Forrester, D. I. (2014). The spatial and temporal dynamics of species interactions in mixed-species forests: from pattern to process. *Forest Ecology and Management*, *312*, 282-292. doi: 10.1016/j.foreco.2013.10.003

Francis, J., & Lowe, C. (2000). *Silvics of Native and Exotic Trees of Puerto Rico and the Caribbean Islands* (General Technical Report IITF-15). Rio Piedras, Puerto Rico: United States Department of Agriculture, Forest Service, International Institute of Tropical Forestry.

Francis, J. K. (2003). Mahogany Planting and Research in Puerto Rico and the U.S. Virgin Islands. In A. Lugo, J. Figueroa & M. Alayón (Eds.), *Big-Leaf Mahogany Genetics, Ecology and Management* (pp. 329-341). New York: Springer-Verlag.

Griscom, H. P., & Ashton, M. S. (2011). Restoration of dry tropical forests in Central America: A review of pattern and process. *Forest Ecology and Management, 261,* 1564-1579. doi: 10.1016/j.foreco.2010.08.027

Grogan, J., Galvao, J., Simoes, L., & Verissimo, A. (2003). Regeneration of big-leaf mahogany in closed and logged forests of Southeastern Para, Brazil. In A. Lugo, J. Figueroa, & M. Alayón (Eds.), *Big-Leaf Mahogany Genetics, Ecology and Management.* (pp. 193-208). New York: Springer-Verlag.

Hall, J. S., Ashton, M. S., Garen, E. J., & Jose, S. (2011). The ecology and ecosystem services of native trees: Implications for reforestation and land restoration in Mesoamerica. *Forest Ecology and Management*, *261*, 1553-1557. doi: 10.1016/j.foreco.2010.12.011

Hung, T., Herbohn, J., Lamb, D., & Nhan, H. (2011). Growth and production between pair-wise mixture and monoculture plantations in North Viet Nam. *Forest Ecology and Management, 367,* 97-111. doi: 10.1016/j.foreco.2011.04.010

Hunter, D., Salzman, J., & Zaelke, D. (2002). *International environmental law and policy* (2nd. ed). New York: Foundation Press.

Instituto Nacional de Bosques. (2017a). *Programa de Incentivos Forestales.* Guatemala: Autor. Recuperado de http://www.inab.gob.gt

Instituto Nacional de Bosques. (2017b). *Valor de la madera en pie 2015-2016.* Guatemala: Autor. Recuperado de http://www.inab.gob.gt

Kelty, M. (2006). The role of species mixtures in plantation forestry. *Forest Ecology and Management*, *233*, 195-204.

Kew Royal Botanic Gardens, Missouri Botanical Garden. (2016). *The plant list. Version 1.1.* Retrieved from http://www.theplantlist.org/1.1/about

Lamb, D., Erskine, P., & Parrotta, J. (2005). Restoration of degraded tropical forest landscapes. *Science, 310,* 1628. doi: 10.1126/science.1111773

Manson, D. G., Schmidt, S., Bristow, M., Erskine, P., & Vanclay, J. (2013). Species-site matching in mixed species plantations of native trees in tropical Australia. *Agroforestry Systems, 87*, 233–250. doi:10.1007/s10457-012-9538-0

Menalled, F. D., Kelty, M. J., & Ewel, J. (1998). Canopy development in tropical tree plantations: A comparison of species mixtures and monocultures. *Forest Ecology and Management, 104,* 249-263. doi: 10.1016/50378-1127(97)00255-7

Montagnini, F., & Jordan, C. (2005). *Tropical forest ecology: the basis for conservation and management.* Heidelberg, Alemania: Springer.

Montagnini, F., & Piotto D. (2011). Mixed plantations of native trees on abandoned pastures: restoring productivity, ecosystem properties, and services on a humid tropical site. In S. Gunter, M. Weber, B. Stimm & M. Reinhard (Eds.), *Silviculture in the tropics* (pp. 501-511). Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag.

Navarro, C., Wilson, J., Gillies, A., & Hernandez, M. (2003). A new Mesoamerican collection of big-leaf mahogany. In A. Lugo, J. Figueroa, & M. Alayón (Eds.), *Big-Leaf Mahogany Genetics, Ecology and Management* (pp. 103-116). New York: Springer-Verlag.

Negreros-Castillo, P., & Mize, C. (2003). Enrichment planting of Big-Leaf Mahogany and Spanish Cedar in Quintana Roo, Mexico. In A. Lugo, J. Figueroa & M. Alayón (Eds.), *Big-Leaf Mahogany Genetics, Ecology and Management* (pp. 278-287). New York: Springer-Verlag.

Newton, A. (2008). Conservation of tree species through sustainable use: How can it be achieved in practice? *Oryx,* 42 (2), 195-205. doi: 10.1017/S003060530800759X

Oelmann, Y., Potvin, C., Mark, T., Werther, L., Tapernon, S., & Wilcke, W. (2010). Tree mixture effects on aboveground nutrient pools of trees in an experimental plantation in Panama. *Plant Soil*, *326*, 199-212.

Onyekwelu, J., Stimm, B., & Evans, J. (2011). Plantation forestry review. In S. Gunter, M. Weber, B. Stimm & M. Renhard (Eds.), *Silviculture in the tropics* (pp. 399-454). Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag.

Park, A., van Breugel, M., Ashton, M. S., Wishnie, M., Mariscal, E., Deago, J., Hall, J. S. (2010). Local and regional environmental variation influences the growth of tropical trees in selection trials in the Republic of Panama. *Forest Ecology and Management, 260,* 12-21. doi: 10.1016/j.foreco.2010.03.021

Petit, B., & Montagnini, F. (2004). Growth equations and rotation ages of ten native tree species in mixed and pure plantations in the humid Neotropics. *Forest Ecology and Management*, *199,* 243-257. doi: 10.1016/j.foreco.2004.05.09

Petit, B., & Montagnini, F. (2006). Growth in pure and mixed plantations of tree species used in reforesting rural areas of the humid region of Costa Rica, Central America. *Forest Ecology and Management*, *233,* 338-343. doi: 10.1016/j.foreco.2006.05.030

Piotto, D. (2008). A meta-analysis comparing tree growth in monocultures and mixed plantations. *Forest Ecology and Management*, *255,* 781-786. doi: 10.1016/j.foreco.2008.09.065

Plath, M., Mody, K., Potvin, C., & Dorn, S. (2011). Establishment of native tropical timber trees in monoculture and mixed-species plantations: Small-scale effects on tree performance and insect herbivory. *Forest Ecology and Management,* 261, 741-750. doi: 10.1016/j.foreco.2011.12.004

Pryde, E. C., Holland, G. J., Watson, S. J., Turton, S. N., &Nimmo, D G. (2015). Conservation of tropical forest tree species in a native timber plantation landscape. *Forest Ecology and Management, 339*, 96-104. doi: 10.1016/j.foreco.4.11.028

Redondo-Brenes, A., & Montagnini, F. (2006). Growth, productivity, aboveground biomass, and carbon sequestration of pure and mixed native tree plantations in the Caribbean lowlands of Costa Rica. *Forest Ecology and Management, 232*, 168-178. doi: 10.1016/j.foreco.2006.05.067

Snook, L. (1993). Stand dynamics of Mahogany (Swietenia macrophylla King) and associated species after fire and hurricane in the tropical forests of the Yucatan Peninsula, Mexico. Dissertation, School of Forestry and Environmental Studies of Yale University.

Snook, L. (2003). Regeneration, growth and sustainability of Mahogany in Mexico´s Yucatan forests. In A. Lugo, J. Figueroa & M. Alayón (Eds.), *Big-Leaf Mahogany Genetics, Ecology and Management* (pp. 169-192). New York: Springer-Verlag.

Standley, PC; Steyermark, JA; Swallen, JR; Williams, LO; McVaugh, R; Gentry, JL Jr; Nash, D; Williams, TP. (1977). *Flora of Guatemala* (Fieldiana: Botany, Vol. 24, 13 part.) Chicago, Illinois: Field Museum of Natural History.

Universidad del Valle de Guatemala, Instituto Nacional de Bosques, Consejo Nacional de Áreas Protegidas, & Universidad Rafael Landívar. (2011). *Mapa de Cobertura Forestal de Guatemala 2006 y Dinámica de la Cobertura Forestal 2001-2006.* Guatemala: Autor.

Ward, S., & Lugo, A. (2003). Twenty mahogany provenances under different conditions in Puerto Rico and the U.S. Virgin Islands. In A. Lugo, J. Figueroa & M. Alayón (Eds.), *Big-Leaf Mahogany Genetics, Ecology and Management* (pp. 29-93). New York: Springer-Verlag.

Wishnie, M. H., Dent, D. H., Mariscal, E., Deago, J., Cedeño, N, Ibarra, D., … Ashton, P. M. S. (2007). Initial performance and reforestation potential of 24 tropical tree species planted across a precipitation gradient in the Republic of Panama. *Forest Ecology and Management, 243*, 39-49. doi: 10.1016/j.foreco.2007.02.001

World Agroforestry Organization. Wood Density Database. (2017). Retrieved from http://db.worldagroforestry.org//wd/species/dalbergia_retusa

Ciencia, Tecnología y Salud
Vol. 5 Num. 2 2018
ISSN: 2410-6356 (electrónico) / 2409-3459 (impreso)

Artículo Científico / Scientific Article

Diversidad genética de aislados de *Phytophthora infestans* colectados en zonas productoras de papa y tomate de Guatemala

Genetic diversity of Phytophthora infestans isolates collected from tomato and potato producing areas in Guatemala

José A. Ruiz-Chután, Julio E. Berdúo-Sandoval, Amilcar Sánchez-Pérez*

Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala

***Autor al que se dirige la correspondencia:** gramisp@hotmail.com

Recibido: 16 de abril 2018 / Revisión: 12 de junio 2018 / Aceptado: 30 de julio 2018

Resumen

Phytophthora infestans (Mont) DeBary es el agente causal de la enfermedad conocida como tizón tardío, la cual ha sido catalogada como la enfermedad de plantas más devastadora reportada en la historia de la humanidad. Este patógeno afecta plantas de importancia económica de la familia solanaceae, como el tomate y la papa. *P. infestans* es un oomicete heterotálico y necesita de dos tipos de apareamiento, A1 y A2, para presentar reproducción sexual, la cual es la vía por la que este patógeno incrementa su grado de diversidad, a través de una recombinación de su material genético, que representa el mayor desafío para el manejo de la enfermedad. Este estudio determinó el nivel de variabilidad genética, a través del marcador molecular *amplified fragment length polymorphism* (AFLP), de 22 aislados de *P. infestans* colectados en diferentes zonas productoras de papa y tomate. Con el perfil de bandas generado por el marcador molecular, se realizó un análisis cluster y se elaboró un dendograma de tipo *unweighted pair group method with arithmetic mean* (UPGMA), con el índice de Dice, mediante una matriz de distancias genéticas. Los aislados fueron situados en tres grupos principales, los cuales responden al lugar de procedencia y al tipo de planta hospedera. Se encontró un valor de similitud de 0.49 entre los aislados analizados, por lo que se concluyó que la variabilidad genética de *P. infestans* en Guatemala es alta.

Palabras claves: amplified fragment length polymorphism (AFLP), similitud genética, unweighted pair group method with arithmetic mean (UPGMA), tizón tardío, tipo de apareamiento

Abstract

Phytophthora infestans (Mont) DeBary is the causal agent of late blight disease, which has been cataloged as the most devasting plant disease in the history of humankind. This pathogen is capable of affecting economically important plants of the solanaceae family, such as tomato and potato. *P. infestans* is a heterothallic oomycete for which it needs two types of mating known as A1 and A2 to present a sexual reproduction, which is the main way by this pathogen increases its degree of genetic diversity through a recombination of its genetic material; this condition represents the major defiance to control this disease. This study determined the level of genetic variability, through the molecular marker amplified fragment length polymorphism (AFLP), of 22 *P. infestans* isolates collected in different potato and tomato producing areas in Guatemala. With the band profile generated by the molecular marker AFLP, a cluster analysis was performed creating a UPGMA dendrogram with Dice´s index through a genetic distances matrix. The isolates were located in three main groups, which respond to the place of origin and the type of host plant. A similarity value of 0.49 was found among the analyzed isolates. It is concluded that genetic variability of the isolates analyzed is high.

Keywords: AFLP, genetic similarity, UPGMA, late blight, type of mating

La reproducción total o parcial del contenido e imágenes de esta publicación se rige de acuerdo a normas internacionales sobre protección a los derechos de autor, con criterio especificados en la licencia Creative Commons (CC BY-NC-SA 4.0)

Introducción

En Guatemala, la enfermedad conocida como tizón tardío, es causada por el oomicete *Phytophthora infestans* (Mont.) DeBary, el cual tiene su origen en México, de donde se dispersó a varias regiones alrededor del mundo (Goss et al., 2014), es considerado uno de los patógenos de plantas más devastadores del mundo, prueba de ello, la hambruna irlandesa de la papa, a causa de la destrucción del cultivo en dicha región entre 1845 y 1846, lo que resultó en la muerte y desplazamiento de millones de personas. En la actualidad está catalogada entre las peores enfermedades de plantas, a pesar de las muchas investigaciones y esfuerzos realizados a través de los años (Fry, 2008).

Dicho patógeno afecta principalmente a papa y tomate, aunque también ha sido reportada en otras solanáceas que coexisten en dicho agrosistema (Forbes et al., 1998). En papa y tomate, las infecciones de tizón tardío inician como una mancha circular irregular acuosa en las hojas inferiores, así como en los brotes tiernos (Figura 1). En países en desarrollo limita gravemente la producción de estos dos cultivos de importancia económica (Erwin & Ribeiro, 1996; Niederhauser, 1993). Bajo condiciones óptimas, *P. infestans* puede llegar a destruir el 100 % del cultivo de tomate, especialmente, la producción orgánica a campo abierto e invernadero (Chowdappa et al., 2013; Stroud, Shaw, Hale, & Steele, 2016) y entre el 50-70 % en el cultivo de papa, produciendo pérdidas cuantificadas en USD 6.7 billones en este cultivo (Chowdappa et al., 2015; Haq, Rashid, & Khan, 2008)

Phytophthora infestans es un patógeno hemibiotrófico y generalmente sobrevive entre cada temporada de cultivo en los tubérculos de papa, dispersándose asexualmente por vía de esporangios, los cuales pueden movilizarse por agua y viento, y así, extenderse a través de distancias más grandes (Aylor, 2003) además, es un oomicete heterotálico, lo cual significa que necesita de dos tipos de apareamientos conocidos como A1 y A2, necesarios para la reproducción sexual (Gallegly & Galindo, 1958). Cada tipo de apareamiento es bi-

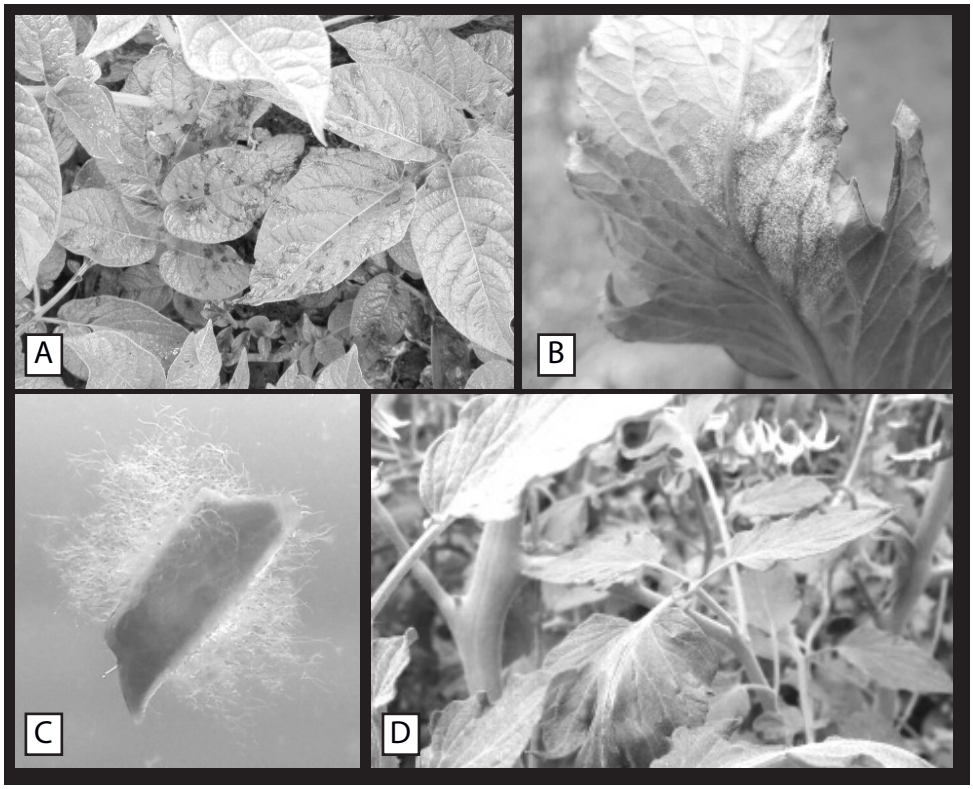

Figura 1. A, B, D Síntomas de daño por *Phytophthora infestans* en plantas de papa y tomate. C Aislamiento de *P. infestans* en medio de cultivo de arveja.

sexual, capaz de producir oogonios y anteridios cuando el tipo de apareamiento opuesto está presente, cuando ocurre la fusión entre gametangios de tipos opuestos, lo cual resulta en la formación de una oospora (espora sexual). Ambos tipos de apareamiento son considerados grupos de compatibilidad y no formas sexuales, ya que el anteridio u oogonio de un tipo puede aparearse con el oogonio o anteridio del tipo opuesto, respectivamente. (Galindo & Gallegly, 1960).

El valle de Toluca, localizado en la región central de México, es considerado como el centro de origen de *P. infestans* (Goodwin, Spielman, Matuszak, Bergeron, & Fry, 1992; Gründwald et al., 2001) debido a la diversidad genética de las poblaciones del patógeno en dicha área (Flier et al., 2003; Goss et al., 2014), los tipos de apareamiento existen en una relación 1:1 (Gründwald et al., 2001), las oosporas pueden ser observadas fácilmente en plantas hospederas (Fernández-Pavía, Gründwald, Díaz-Valasis, Cadena-Hinojosa, & Fry, 2004; Gründwald et al., 2001) y las poblaciones se reproducen sexualmente en función del equilibrio de vinculación observado entre los marcadores genéticos (Goss et al., 2014; Gründwald et al., 2001).

En otras regiones fuera de México, solo había prevalecido el tipo de apareamiento A1, que dio origen a un único genotipo clonal distribuido mundialmente y denominado US-1, cuya reproducción es típicamente asexual (Goodwin, Cohen, & Fry, 1994). La presencia del tipo de apareamiento A2 fuera de México, fue mencionada por primera vez en Suiza en 1984 (Hohl & Iselin, 1984). La presencia de reproducción sexual trajo como consecuencia cambios en la epidemiología del patógeno (Mayton et al., 2000) incremento de su adaptabilidad y por lo tanto, la manera en la cual la enfermedad debe ser abordada (Cooke et al., 2011; Yuen & Andersson, 2013).

Existen claros indicios de que la diversidad genética trajo consigo cambios en las poblaciones de *P. infestans* alrededor el mundo durante la última década, los cuales concuerdan con el incremento de la severidad de los brotes de tizón tardío en los cultivos de papa y tomate a causa del aparecimiento de cepas más virulentas y resistentes a fungicidas (Chowdappa et al., 2013, 2015; Cooke et al., 2012; Fry, 2008; Li et al., 2013). Para poder realizar la identificación de genotipos individuales y explorar la diversidad genética, los marcadores moleculares son la herramienta más adecuada debido a que son neutrales a condiciones ambientales, polimórficos y efectivos en el estudio de poblaciones de patógenos (Cooke & Lees, 2004).

El uso de marcadores moleculares ha sido ampliamente empleado alrededor del mundo en el estudio de *P. infestans* con la finalidad de conocer su diversidad y variación genética, así como el comportamiento de las poblaciones del patógeno (Alkher et al. 2015; Arafa, Elden, Olfat, Said, & Kenta, 2018; Brurberg et al., 2011; Cárdenas et al., 2011; Kiiker, Hansen, Williams, Cooke, & Runno-Paurson, 2018; Rekad et al., 2017; Shakya, Larsen, Cuenca, Lozoya, & Gründwald, 2018).

Para Guatemala, el tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es uno de los cultivos hortícolas de mayor importancia económica, ya que, según el informe del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (Maga) en el 2016, la cosecha de este cultivo se proyectó a los siete millones de quintales con un área cosechada de 11,700 manzanas. Por otra parte, el cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) es un alimento básico y de importancia a nivel nacional, tuvo una producción de 11.8 millones de quintales con un área cosechada de 30,000 manzanas (Maga, 2016). En Guatemala, ambos cultivos ven limitada su producción debido al severo ataque de *P. infestans* que resulta en la pérdida parcial, e incluso total, de las plantaciones de dichos cultivos (Erwin & Ribeiro, 1996; Niederhauser, 1993).

Ante esta situación, el objetivo de este estudio es conocer la variabilidad genética de *P. infestans* presente en Guatemala, debido a que los nuevos genotipos presentan resistencia a la aplicación de fungicidas y una alta adaptabilidad a diversas condiciones ambientales, lo que ha complicado el manejo de la enfermedad (Chowdappa et al., 2015; Fry, 2008) y ha repercutido negativamente en la producción de los agricultores del país. También es importante conocer la variabilidad del patógeno para realizar evaluaciones de materiales de papa y tomate que presentan resistencia genética ante el ataque de dicho patógeno, y que han sido desarrollados en centros de investigación internacionales, bajo condiciones bióticas y abióticas distintas a las presentes en Guatemala.

Para realizar dicho estudio, se tomaron muestras de tejido vegetal afectado por *P. infestans* provenientes de plantaciones de papa y tomate en Guatemala, a partir de las cuales se aisló el patógeno en medio de cultivo para realizar la extracción de ADN, a partir del micelio desarrollado. Posteriormente, se desarrolló el protocolo para el marcador molecular AFLP generando un dendrograma, a partir de la matriz de distancias genéticas generada con los datos obtenidos del gel de acrilamida.

Materiales y métodos

Colecta de tejido vegetal y aislamiento del patógeno

Para llevar a cabo esta investigación, fueron colectadas 45 muestras de plantas de tomate y 20 de plantas de papa, de las cuales se aisló el patógeno en siete muestras de tomate y 15 de papa. Dichas muestras provinieron de los municipios de Agua Blanca, Cobán, Zunil, Ipala, Jalapa, Patzicía, Patzún, Salamá, Sanarate, San Juan Ostuncalco, San Agustín Acasaguastlán, Tajumulco, Sololá y Todos Santos Cuchumatán, como puede observarse en la Tabla 1, en la cual se detalla la ubicación precisa de cada sitio de colecta. Las muestras fueron colectadas durante los meses de mayo a septiembre, periodo donde se presentan condiciones de alta humedad (80-100 %), temperaturas frescas (18-22 ºC) y periodos nublados; debido a que estas condiciones potencian el desarrollo del patógeno como menciona Rick y Chetelat (1995). Cada muestra consistió de 10 hojas por cada planta afectadas por *P. infestans* en los primeros estadios de desarrollo para disminuir el riesgo de contaminación con patógenos secundarios.

Las hojas colectadas fueron trasladadas en condiciones de frío hasta el momento de realizar el aislamiento en el laboratorio de Biotecnología Vegetal de

Tabla 1
Lista de aislados de Phytophthora infestans *obtenidos en diferentes regiones productoras de tomate y papa de Guatemala*

Aislado	Lugar de colecta	Cultivo	Departamento	Coordernadas	
P1	Agua Blanca	Tomate	Jutiapa	14.50926	-89.63408
P2	Cobán	Tomate	Alta Verapaz	15.238237	-90.252488
P3	Fuentes Georginas 1	Papa	Quetzaltenango	14.758588	-91.483474
P4	Fuentes Georginas 2	Papa	Quetzaltenango	14.763701	-91.483037
P5	Fuentes Georginas 3	Papa	Quetzaltenango	14.765284	-91.478927
P6	Ipala	Tomate	Chiquimula	14.535491	-89.66710
P7	Jalapa 1	Tomate	Jalapa	14.537358	-89.903819
P8	Jalapa 2	Papa	Jalapa	14.550435	-90.100101
P9	Jalapa 3	Papa	Jalapa	14.536762	-90.158174
P10	Patzicía 1	Papa	Chimaltenango	14.640814	-90.940335
P11	Patzicía 2	Papa	Chimaltenango	14.645522	-90.942162
P12	Patzicía 3	Papa	Chimaltenango	14.659235	-90.945065
P13	Patzún 1	Papa	Chimaltenango	14.68858	-90.99823
P14	Patzún 2	Papa	Chimaltenango	14.703891	-91.012587
P15	Salamá	Tomate	Baja Verapaz	15.077132	-90.282946
P16	Sanarate	Tomate	El Progreso	14.81018	-90.213296
P17	San Juan Ostuncalco	Papa	Quetzaltenango	14.866048	-91.602249
P18	San Agustín Acasaguastlán	Tomate	El Progreso	14.949777	-89.96101
P19	San Marcos 1	Papa	San Marcos	15.022028	-91.798506
P20	San Marcos 2	Papa	San Marcos	15.069238	-91.835866
P21	Sololá	Papa	Sololá	14.841253	-91.170777
P22	Todos Santos Cuchumatán	Papa	Huehuetenango	15.456613	-91.501255

la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Previo a la siembra se realizó un proceso de desinfección mediante inmersiones en etanol al 70 %, hipoclorito de sodio 1.25 % y agua destilada estéril. Posteriormente, las muestras fueron sembradas en placas de Petri, en un medio de cultivo sólido de arveja suplementado con 100 ppm de penicilina y 30 ppm de procloraz. Las placas de Petri fueron incubadas en condiciones de oscuridad a 20 ºC. Se realizaron resiembras del hongo en el mismo medio de cultivo de arveja, sin la adición de antibiótico ni fungicidas, a intervalos de cuatro semanas para estimular el crecimiento del patógeno, debido a que, la permanencia de éste en el mismo medio de cultivo durante largos períodos, no favorece su desarrollo. Para la resiembra se empleó el medio de cultivo de arveja sin antibiótico ni fungicida.

Extracción del ADN y protocolo de AFLP

Se tomó micelio de la superficie del medio de cultivo el cual fue macerado con micropistilo agregando 400 µL de amortiguador de extracción (200 mM Tris-HCl; 250 mM NaCl; 25 mM EDTA; 0.5 % SDS) en un tubo de 1.5 mL, luego los tubos se incubaron 65 ºC durante 1 h. Posteriormente, las muestras se dejaron a temperatura ambiente y se agregó 100 µL de acetato de amonio 2.0 M, colocándolas en hielo por 10 min. Posteriormente se centrifugó a 13,000 rpm durante 4 min y la fase líquida se transfirió a un nuevo tubo al cual se le agregó 300 µL de isopropanol, se centrifugó a 13.000 rpm durante 3 min y se descartó la fase líquida.

La pastilla de ADN generada se lavó con etanol al 70 % y se centrifugó a 13,000 rpm durante 2 min y se descartó la fase líquida. Tras la evaporación del etanol se suspendió la pastilla en 50 µL de TE (10mM Tris-HCl; 1mM EDTA) y se dejó reposar 1 h a temperatura ambiente. Finalmente fue almacenado a -20ºC. La integridad y cantidad del ADN obtenido fue medida mediante electroforesis en gel de agarosa al 1.0 %.

El marcador molecular AFLP (Vos et al., 1995) fue utilizado debido a la alta capacidad en la identificación de regiones polimórficas en el estudio de diversidad genética de *P. infestans* (Abu-El Samen, Secor, & Gudmestad, 2003; Mesa et al., 2008; Silva, Cotes, & Marín, 2010). El análisis se realizó con el Kit AFLP Análisis System I de Invitrogen® (Zabeau & Vos, 1993). La metodología empleada fue la siguiente: se utilizó ADN a una concentración de 25 ng/µL, el cual fue digerido con las enzimas de restricción EcoR1/MseI y se incubó por 2 h a 37 ºC, después a 70 ºC por 15 min. La ligación de los adaptadores se llevó a cabo con los reactivos del kit y se incubó durante 2 h a 20 ºC. Seguidamente se realizó una preamplificación con la reacción en cadena de la polimerasa; el programa empleado en el termociclador fue el siguiente: 94 °C por 30 s, 56 °C por 60 s, 72 °C por 60 s, por 20 ciclos. Los productos amplificados se visualizaron en un gel de agarosa al 2 %. Se hizo una amplificación selectiva con los cebadores E-AAC + M-CTC del kit los cuales produjeron mayor polimorfismo.

Los productos de PCR se visualizaron en un gel de acrilamida al 5 % para poder observar las bandas amplificadas. La tinción del gel se realizó con nitrato de plata mediante el siguiente procedimiento: inmersión en solución fijadora de ácido acético glacial 10 % v/v durante 35 min, agua destilada durante 20 min, solución de tinción (nitrato de plata 0.15 % p/v, formaldehído 0.15 % v/v) por 40 min, agua destilada por 10 s, solución de revelado de 5 a 6 min según la aparición de las bandas (carbonato de sodio 6 % p/v, formaldehído 0.3 % v/v, tiosulfato de sodio 5 ppm), solución fijadora para detener el proceso durante aproximadamente 5 min, finalmente se lavó en agua destilada. Se dejó secar por 2 días y posteriormente se realizó la lectura del perfil de las bandas, se utilizó el programa Molecular Evolutionary and Genetics Analysis MEGA 6 para observar las bandas amplificadas (Tamura, Stecher, Peterson, Filipski, & Kumar, 2013) y Numerical Taxonomy System NTSYS (Rolfh, 1997) para realizar el análisis filogenético de los aislado de *P. infestans* obtenidos en las diferentes regiones que contempló este estudio.

Análisis de datos

Se realizó un análisis de cluster mediante la elaboración de una matriz binaria basada en la presencia (1) o ausencia (0) de cada banda en los 22 aislamientos evaluados. Esta información se utilizó para calcular una matriz de similitud con el índice de Dice, mediante el programa MEGA 6 y NTSYS, a partir de la cual, se generó un dendrograma mediante el método *unweighted pair group method with arithmetic mean* (UPGMA) (Sokal & Michener, 1958) con los procedimientos Cluster y Tree.

Resultados

Con el par de cebadores utilizados, se obtuvo 26 bandas, de las cuales el 88 % fueron polimórficas. El dendrograma generado dividió los aislamientos en tres grupos principales (Figura 2). El primero de ellos incluyó cuatro aislados con un nivel de similitud de 0.54, lo que indica un alto grado de variación. El segundo grupo incluyó 13 aislados, con un nivel de similitud de 0.66 y finalmente el tercer grupo incluyó cinco aislados, con un nivel de similitud entre ellos de 0.77.

En los resultados se observa que los aislados del patógeno fueron agrupados siguiendo un patrón con base en su lugar de procedencia, de manera que, como puede observarse en el grupo 1, los aislados provenientes de la región oriental del país, Agua Blanca (P1) y San Agustín Acasaguastlán (P18), quedaron en un mismo grupo (subgrupo 1A). Dentro de este grupo también quedaron incluidos los aislados provenientes de algunos municipios de Zunil (P4) y San Juan Ostuncalco (P17) (subgrupo 1B). El subgrupo 1A incluyó los aislados a partir de tomate, mientras que el subgrupo 1B incluyó los aislados provenientes del cultivo de papa. El grado de similitud dentro del grupo I (0.54).

Los aislados incluidos dentro del grupo 2 también pueden ser divididos en 2 subgrupos. El subgrupo 2A incluye los aislados provenientes de los municipios de Cobán (P2) y Salamá (P15) los cuales corresponden al cultivo de tomate. Este subgrupo también incluye los aislados provenientes de los municipios de Zunil (P3), Patzicía (P10) y San Marcos (P20); de donde se obtuvieron muestras de cultivo de papa. El grado de similitud dentro de este subgrupo alcanzó un valor de 0.70. El subgrupo 2B incluyó los aislados de las muestras del cultivo de papa procedentes de la región del altiplano central y región occidente del país incluyendo los municipios de Zunil (P5), Todos Santos Cuchumatán (P22), Patzicía (P11) y (P12), Sololá (P21), Patzún (P13) y (P14) y San Marcos (P19). El grado de similitud dentro de subgrupo 2B fue de 0.74.

El grupo 3 incluye cinco aislados los cuales son divididos en dos subgrupos. El grupo 3A incluye únicamente al aislado proveniente de Ipala (P6) y muestra un coeficiente de similitud de 0.64 respecto al subgrupo

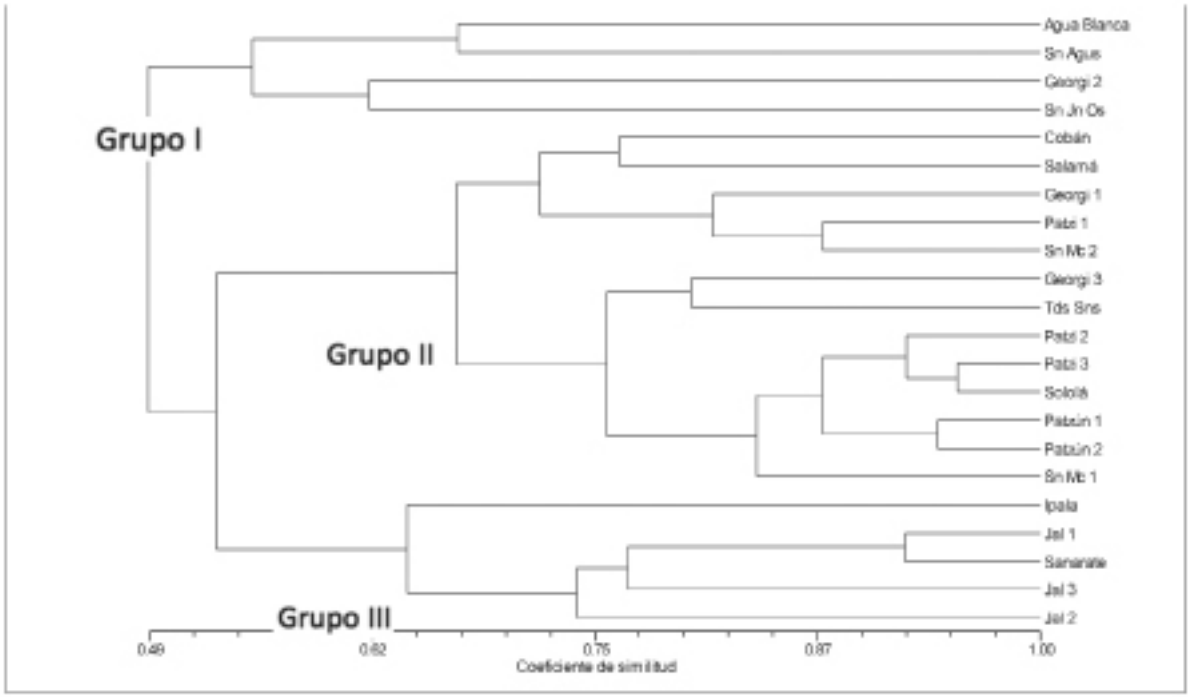

Figura 2. Dendrograma (UPGMA) generado a partir de 22 aislamientos de *Phytophthora infestans* mediante el marcador molecular *amplified fragment length polymorphism* (AFLP) que muestra la diversidad genética del patógeno en estudio en Guatemala.

3B que incluye los aislados obtenidos de los municipios de Jalapa (P7) (P8) y (P9) y Sanarate (P16) los cuales muestran un nivel de similitud de 0.74.

Discusión

El estudio de diversidad genética de *P. infestans* a través del marcador molecular AFLP con aislados provenientes de diferentes zonas productoras de papa y tomate para Guatemala, ha demostrado que en las zonas de estudio existe un alto grado de diversidad del patógeno. Esto puede asumirse debido a que el grado de similitud genética a través del índice de Dice mediante el método de UPGMA fue del 0.49. Al comparar dicho valor con el obtenido en el estudio de variabilidad genética de este patógeno en regiones del suroeste de Colombia (Mesa et al., 2008), mostró un nivel de similitud alrededor del 0.86, lo que indica una mayor homogeneidad de la población, con lo cual se logra apreciar la alta variabilidad presente en el Guatemala. Situación similar presentan Silva, Jaramillo y Marín, (2009) en su estudio de variabilidad genética de dicho patógeno, afirmando nuevamente el alto grado de variabilidad presente en el territorio guatemalteco. Raigosa, Amaya, Jaramillo, Lagos y Marín (2009), obtuvieron resultados coincidentes en cuanto a la alta similitud de sus aislados (0.83).

En Costa Rica se han llegado a encontrar valores de diferenciación genética de 0.22, donde se concluye que el flujo de genes entre poblaciones no ha sido una fuente de diversidad genética (Páez, Valverde, Gómez, & Brenes, 2004). El valor de diferenciación entre las poblaciones costarricenses se encuentra por debajo al encontrado en el presente estudio, al igual que los valores encontrados en otros estudios realizados en la región de Sur América como Ecuador, aunque en dicho país si se ha reportado la presencia de ambos tipos de apareamiento (Ordoñez et al., 2000). En el caso de Canadá, Alkher y colaboradores (2015) encontraron evidencia de recombinación genética y un incremento a la insensibilidad a mefenoxam, además de la segregación del gen Gpi, el cual según Ospina-Giraldo y Jones, 2003 es ampliamente utilizado en la caracterización de aislados de dicho patógeno por su condición multialélica, lo que ha resultado en el incremento de la diversidad de las poblaciones de *P. infestans*. Mediante el uso de microsatélites, uno de los estudios más recientes llevados a cabo en México demuestra que existe una alta diversidad genotípica, lo cual sugiere la presencia de reproducción sexual y asexual en la región central de dicho país (Shakya et al., 2018).

Dentro del subgrupo 1A los aislados incluidos responden a un lugar de procedencia cercano, así como a la misma planta hospedera, que para este caso correspondió al cultivo de tomate. Esto supone que los aislados ubicados en Agua Blanca (P1) y San Agustín Acasaguastlán (P18) han migrado en ambas vías, y por ello comparten parte de su material genético. Por otra parte, los aislados ubicados en el subgrupo 1B proceden entre ellos de una zona geográfica poco distante, razón por la cual se encuentran cercanas en cuanto a valores de distancia genética, sin embargo el grado de diversidad entre ambos subgrupos evidencia que existe una diferencia genética considerable entre ambos subgrupos (0.52)

La distribución obtenida para el caso del subgrupo 2A coloca a los aislados provenientes de la región norte agrupados entre sí, siendo el caso de Cobán (P2) y Salamá P15), ambas zonas productoras de tomate y considerablemente cercanas entre sí, sin embargo, también puede observarse la presencia de aislados provenientes de los municipios de Zunil (P3), Patzicía (P10) y San Marcos (P20); aunque estos últimos disminuyen considerablemente su similitud con los aislados provenientes de Salamá (P15) y Cobán (P2). En el subgrupo 2B aparecen los aislados con procedencia de las zonas del altiplano central y zona occidental. Al indagar dentro de cada subgrupo puede observarse que la diversidad de *P. infestans* está ligada a la planta hospedera, como el caso de papa y tomate, así como el lugar de procedencia; pues el dendrograma muestra que la similitud entre los aislados del subgrupo 2B es mayor a medida que su ubicación geográfica es más cercana. La relación entre la similitud genética y los factores de tipo de plantas hospederas también fue hallada por Raigosa y colaboradores (2009), mediante la aplicación del marcador molecular RAPD en aislados de *P. infestans*.

En cuanto a la diversidad obtenida dentro del grupo 3 puede observarse nuevamente que existe relación entre el lugar de colecta y el tipo de cultivo hospedero, aunque el grado de similitud entre los aislados ubicados en este grupo es menor que la observada en el grupo 2. El aislado correspondiente a la zona de Sanarate (P16) muestra un nivel de similitud de 0.92 respecto al aislado obtenido de la región de Jalapa, ambas zonas productoras de tomate. Una situación similar se presenta para los otros 2 aislados de la región de Jalapa (P7) y (P8) ya que muestran un alto nivel de similitud genética, lo cual responde a su cercanía geográfica y al mismo tipo de cultivo.

Burdon y Silk (1997) y Abu-El Samen y colaboradores (2003) establecen que la diversidad genética en la población de *P. infestans* puede estar dada por (a) el flujo de genes, (b) la recombinación sexual o asexual, y (c) por mutaciones. El presente estudio sugiere que la alta diversidad genética puede ser atribuida a la presencia de los dos tipos de apareamiento, lo cual se traduce en una reproducción sexual del patógeno incrementando de esta manera su variabilidad genética en diversas zonas del mundo, como lo demuestran los estudios de Kiiker y colaboradores (2018) y Shakya y colaboradores (2018), en los cuales la presencia de ambos tipos de apareamiento se relaciona con el incremento de la diversidad genética a causa de la reproducción sexual del patógeno.

Se sugiere que la presencia de ambos tipos de apareamiento en Guatemala puede ser debida a la cercanía geográfica con México, en donde existe una variedad de estudios que respaldan la presencia de los dos tipos de apareamiento (Gallegly & Galindo, 1958; Goodwin et al., 1992; Goss et al., 2014; Gründwald et al., 2001; Grünwald & Flier, 2005; Niederhauser et al., 1993; Shakya et al., 2018; Tooley, Fry, & Villareal, 1985) situación que potencia el incremento de la variabilidad genética de las poblaciones del patógeno (Sujkowski, Goodwin, Dyer, & Fry, 1994; van den Bosch et al., 2011). Esto, sumado a que el país es considerado como megadiverso, constituye otro factor que puede contribuir a que ambos tipos de apareamiento estén presentes en el territorio guatemalteco; además, el uso indiscriminado de fungicidas también contribuye al desarrollo de resistencia y mutaciones en el patógeno, lo cual incrementa la variabilidad genética del patógeno en el país.

Por último, es importante monitorear de forma constante la diversidad genética de *P. infestans* en el país, debido a que esta trae consigo cambios en las poblaciones y puede ser la causa de brotes severos de tizón tardío, los cuales pondrían en riesgo la producción nacional de papa y tomate a causa de la diseminación de nuevas cepas con mayor agresividad y resistencia, tanto al control químico como a los materiales desarrollados mediante mejoramiento genético. Este monitoreo podrá ayudar en el desarrollo de estrategias de control más eficientes ante futuros brotes de *P. infestans* en Guatemala.

Agradecimientos

Esta investigación fue cofinanciada por Digi-Usac-2017, Proyecto: 4.8.63.4.09.

Referencias

Abu-El Samen, F. M., Secor, G. A., & Gudmestad, N. C. (2003). Genetic variation among asexual progeny of *Phytophthora infestans* detected with RAPD and AFLP markers. *Plant Pathology*, *52*(3), 314-325. doi:10.1046/j.1365-3059.2003.00858.x

Arafa, R. A., Elden, N., Olfat, K. S., Said, M. M., & Kenta, M. K. (2018). Characterization of Egyptian *Phytophthora infestans* population using simple sequence repeat markers. *Journal of General Plant Pathology, 84*(2), 104-107. doi:10.1007/s10327-018-0763-x

Alkher, H., Islam, M., Wijekoon, C., Kalischuk, L., Kawchuk, L., Peters, R.,…Daayf, F. (2015). Characterization of *Phytophthora infestans* populations in Canada during 2012 Epidemiology. *Canadian Journal of Plant Pathology, 37*(3), 305-314.

Aylor, D. (2003). Spread of plant disease on a continental scale: Role of aerial dispersal of pathogens. *Ecology*, *84*(8), 1989-1997.

Brurberg, M., Elameen, A., Le, V., Nærstad, R., Hermansen, A., Lehtinen, A., … Yuen, J. (2011). Genetic analysis of *Phytophthora infestans* populations in the Nordic European countries reveals high genetic variability. *Fungal Biology*, *115*(4-5), 335–342. doi:10.1016/j.funbio.2011.01.003

Burdon, J. J., & Silk, J. (1997). Sources and patterns of diversity in plant pathogenic fungi. *Phytopathology, 87*(7), 664-9. doi:10.1094/PHYTO.1997.87.7.664

Cárdenas, M., Grajales, A., Sierra, R., Rojas, A., González-Almario, A., Vargas, A., … Restrepo, S. (2011). Genetic diversity of *Phytophthora infestans* in the Northern Andean region. *BMC Genetics*, *12*(23). doi:10.1186/1471-2156-12-23.

Chowdappa, P., Kumar, N., Madhura, S., Kumar, M., Myers, K., Fry, W., & Cooke, D. (2013). Emergence of 13_A2 blue lineage of *Phytophthora infestans* was responsible for severe out- breaks of late blight on tomato in South West India. *Journal of Phytopathology*, *161*(1), 49-58. doi:10.1111/jph.12031

Chowdappa, P., Kumar, N., Madhura, S., Kumar, M., Myers, K., Fry, W., & Cooke, D. (2015). Severe outbreaks of late blight on potato and tomato in south India caused by recent changes in the *Phytophthora infestans* population. *Plant Pathology*, *64*(1), 191-199. doi:10.1111/ppa.12228

Cooke, D. E. L., Cano, M., Raffaele, S., Bain, R., Cooke, L., Etherington, G., … Kamoun, S. (2012). Genome analyses of an aggressive and invasive lineage of the Irish potato famine pathogen. *Plos Pathogens*, *8*(10), e1002940. doi:10.1371/journal.ppat.1002940

Cooke, D. E. L., & Lees, A. (2004). Markers, old and new, for examining *Phytophthora infestans* diversity. *Plant Pathology*, *53*(6), 692-704. doi:10.1111/j.1365-3059.2004.01104.x

Cooke, D. E. L., Schepers, H., Hermansen, A., Bain, R., Dradshaw, N., Ritchie, F., … Nielsen, B. (2011). Epidemiology and integrated control of potato late blight in Europe. *Potato Research*, *54*, 183-222.

Erwin, D. C., & Ribeiro, O. K. (1996). Phytophthora *Diseases World Wide.* St. Paul, MN: American Phytopathology Society Press.

Fernández-Pavía, S., Gründwald, N., Díaz-Valasis, M., Cadena-Hinojosa, M., & Fry, W. (2004). Soilborne oospores of *Phytophthora infestans* in central Mexico survive winter fallow and infect potato plants in the field. *Plant Disease*, *88*(1), 29-33. doi:10.1094/PDIS.2004.88.1.29

Flier, W., Gründwald, N., Kroon, L., Sturbaum, A., van den Bosch, T., Garay-Serrano, E., … Turkensteen, L. (2003). The population structure of *Phytophthora infestans* from the Toluca Valley of central Mexico suggests genetic differentiation between populations from cultivated potato and wild *Solanum* spp. *Phytopatology*, *93*(4), 382-390. doi:10.1094/PHYTO.2003.93.4.382.

Forbes, G. A., Goodwin, S. B., Drenth, A., Oyarzun, P., Ordoñez, M. E., & Fry, W.E. (1998). A global database for *Phytophtora infestans*. *Plant Disease*, *82*(7), 811-818. doi:10.1094/PDIS.1998.82.7.811

Fry, W. (2008). *Phytophthora infestans*: The plant (and R gene) destroyer. *Molecular Plant Pathology*, *9*(5), 385-402. doi: 10.1111/j.1364-3703.2007.00465.x.

Galindo, J., & Gallegly, M. E. (1960). The nature of sexuality in *Phytophthora infestans. Phytopathology, 50*, 123-128.

Gallegly, M. E., & Galindo, J. (1958). Mating type and oospores of *Phytophthora infestans* in nature in Mexico. *Phytopathology, 48*, 274-277.

Goodwin, S. B., Cohen, B. A., & Fry, W. E. (1994). Panglobal distribution of a single clonal lineage of the Irish potato famine fungus. *Proceedings of the National Academy of Science, 91*(24)*,* 11591-11595.

Goodwin, S. B. , Spielman, L. J., Matuszak, J. M., Bergeron, S. N., & Fry, W. E. (1992). Clonal diversity and genetic differentiation of *Phytophthora infestans* populations in northern and central Mexico. *Phytopatology*, *82*(9), 955-961.

Goss, E. M., Tabima, J. F., Cooke, D. E. El, Restrepo, S., Fry, W. E., Forbes, G. A., … Gründwald, N. J. (2014). The Irish potato famine pathogen *Phytophthora infestans* originated in Central Mexico rather than the Andes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *111*(24), 8791-8796. doi:10.1073/pnas.1401884111

Gründwald, N. J., Flier, W. G., Sturbaum, A. K., Garay-Serrano, E., van den Bosch, T. B., Smart, C. D., … Fry, W. G. (2001). Population structure of *Phytophthora infestans* in the Toluca Valley region of central Mexico. *Phytopatology*, *91*(9), 882-890. doi:10.1094/PHYTO.2001.91.9.882.

Grünwald, N. J., & Flier, W. G. (2005). The Biology of *Phytophthora infestans* at Its Center of Origin. *Annual Review of Phytopathology*, *43*, 171-190. doi: 10.1146/annurev.phyto.43.040204.135906

Haq, I., Rashid, A., & Khan, S. (2008). Relative efficacy of various fungicides, chemicals and bio-chemicals against late blight of potato. *Pakistan Journal of Phytopathology*, *21*(1), 129-133.

Hohl, H. R., & Iselin, K. (1984). Strains of *Phytophthora infestans* from Switzerland with A2 mating type behaviour. *Transactions of British Mycological Society, 83*(3), 529-530. doi:10.1016/S0007-1536(84)80057-1

Kiiker, R., Hansen, M., Williams, I. H., Cooke, D. E. L., & Runno-Paurson, E. (2018). Outcome of sexual reproduction in the *Phytophthora infestans*

population in Estonian potato fields. *European Journal of Plant Pathology*. doi: 10.1007/s10658-018-1483-y

Li, Y., van der Lee, T., Zhu, J., Jin, G., Lan, C., Zhu, S., … Jacobsen, E. (2013). Population structure of *Phytophthora infestans* in China – Geographic clusters and presence of the EU genotype Blue_13. *Plant Pathology*, *62*(4), 932-942.

Mesa, M. V., Mideros, M. F., Jaramillo, S., Cotes, J. M., Lagos, L. E., Pineda, R. P., … Marín, M. (2008). Variabilidad genética de aislamientos de *Phytophthora infestans* procedentes del suroeste de Colombia. *Revista Iberoamericana de Micología*, *25*(3), 167-172. doi:10.1016/S1130-1406(08)70039-1

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación. (2016). El Agro en cifras, 2016. Guatemala: Dirección de Planeamiento del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación.

Mayton, H., Smart, C. D., Moravee, B. C., Mizubuti, E. S. G., Muldoon, A. E., & Fry, W. E. (2000). Oospore survival and pathogenicity of single oospore recombinant progeny from 23 a cross involving US-17 and US-8 genotypes of *Phytophthora infestans*. *Plant Disease*, *84*(11), 1190-1196. doi:10.1094/PDIS.2000.84.11.1190

Niederhauser, J. S. (1993). Internacional cooperation in potato research and development. *Annual Review of Phytopathology*, *31*,1-21. doi:10.1146/annurev.py.31.090193.000245

Ordoñez, M. E., Hohl, R. H., Velasco, J. A., Ramon, M. P., Oyarzun, P. J., Smart, C. D., … Erselius, L. J. (2000). A novel population of *Phytophthora*, similar to *P. infestans*, attacks wild Solanum species in Ecuador. *The American Phytopathological Society, 90*(2)*,* 197-202. doi:10.1094/PHYTO.2000.90.2.197

Ospina-Giraldo, M. D., & Jones, R. W. (2003). Characterization of the glucose-6-phosphate isomerase gene in *Phytophthora infestans* reveals the presence of multiple alleles. *Fungal Genetics and Biology*, *40*(3), 197–206. doi:10.1016/S1087-1845(03)00107-5

Páez, O., Valverde, R., Gómez, L., & Brenes, A. (2004). Determinación del tipo de apareamiento con marcadores moleculares en aislamientos de *Phytophthora infestans* recolectados en plantaciones de papa en Costa Rica. *Agronomía Costarricense, 28*(2), 09-16.

Raigosa, N., Amaya, M. C. , Jaramillo, S., Lagos, L. E., & Marín, M. (2009). Variabilidad genética de aislamientos colombianos de *Phytophothora infestans* (Mont) de Bary en solanáceas cultivadas en Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, *62*(1), 4761-4771.

Rekad, F. Z., Cooke, D. E. L., Puglisi, I., Randall, E., Guenaoui, Y., Bouznad, Z., … Cacciola, S. O. (2017). Characterization of *Phytophthora infestans* populations in northwestern Algeria during 2008–2014. *Fungal Biology*, *121*(5), 467-477. doi: 10.1016/j.funbio.2017.01.004

Rick, C., & Chetelat, R. (1995). Utilization of related wild species for tomato improvement. *Acta Horticulturae*, *4(12),* 21-38.

Rolfh, F. (1997). NTSYS - pc - Numerical Taxonomy and Multivariate Analysis System (Version 2.02) [*Software* de computación]. Exeter, New York: Applied Biostatistics.

Shakya, S. K., Larsen, M. M., Cuenca-Condoy, M. M., Lozoya-Saldaña, H., & Gründwald, N. J. (2018). Variation in genetic diversity of *Phytophthora infestans* populations in Mexico from the center of origins outwards. *Plant Disease*, *102*(8),1534-1540. doi: 10.1094/PDIS-11-17-1801-RE

Silva, B., Cotes, J. M., & Marín, M. (2010) Population structure of *Phytophthora infestans* in potato crops from Antoquia, Boyaca, Cundinamarca, and Norte de Santander (Colombia). *Agronomía Colombiana, 28*(3), 375-382.

Silva, B., Jaramillo, S., & Marín, M. (2009). Caracterización genética de aislamientos de *Phytophthora infestans* en las zonas productoras de papa de los departamentos de Antioquia, Boyacá, Cundinamarca y Norte de Santander (Colombia). *Actualidades Biológicas, 31(90),* 5-20.

Sokal, R. R., & Michener, C. D. (1958). A statistical method for evaluating systematic relationships. *University of Kansas Science Bulletin*, *38,* 1409–1438.

Sujkowski, L. S., Goodwin, S. B., Dyer, A. T., & Fry, W. E. (1994). Increased genotypic diversity via

migration and possible occurrence of sexual reproduction of *Phytophthora infestans* in Poland. *Phytopathology*, *84*(2), 201- 207. doi:10.1094/Phyto-84-201.

Stroud, J. A., Shaw, D. S., Hale, M. D., & Steele, K. A. (2016). SSR assessment of *Phytophthora infestans* populations on tomato and potato in British gardens demonstrates high diversity but no evidence for host specialization. *Plant Pathology*, *65*(2), 334–341. doi:10.1111/ppa.12407

Tamura, K., Stecher, G., Peterson, D., Filipski, A., & Kumar, A. (2013). MEGA 6: Molecular Evolutionary Genetics Analysis version 6.0. *Molecular Biology and Evolution*, *30*(12), 2725-2729. doi:10.1093/molbev/mst197

Tooley, P. W., Fry, W. E., & Villareal, M. J. (1985). Isozyme characterization of sexual and asexual *Phytophthora infestans* populations. *Journal of Heredity, 76*(6), 431-435. doi:10.1093/oxfordjournals.jhered.a110139

van Den Bosch, T., Li, Y., Evenhuis, B., Förch, M., Van Der Lee, T., & Kessel, G. (june 2011). The population structure of *Phytophthora infestans* in the Netherlands during the years 2000-2009. En H. Schepers (Presidencia), *Proceedings of the Thirteenth EuroBlight Workshop*, St. Petersburg, Russia.

Vos, P., Hogers, R., Bleeker, M., Reijans, M., van De Lee, T., Hornes,… Zabeau, M. 1995. AFLP: A new technique for DNA fingerprinting. *Nucleic Acids Research, 23,* 4407- 4414.

Yuen, J., & Andersson, B. (2013). What is the evidence for sexual reproduction of *Phytophthora infestans* in Europe? *Plant Patology*, *62*(3), 485-491. doi:10.1111/j.1365-3059.2012.02685.x

Ciencia, Tecnología y Salud
Vol. 5 Num. 2 2018
ISSN: 2410-6356 (electrónico) / 2409-3459 (impreso)

Artículo Científico / Scientific Article

Simulación del flujo de viento sobre el territorio de Guatemala utilizando un modelo climático regional

Simulation of wind flux over the Guatemala territory using a regional climate model

Enrique Pazos

Instituto de Investigación, Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas,
Universidad de San Carlos de Guatemala

***Autor al que se dirige la correspondencia:** epazos@ecfm.usac.edu.gt

Recibido: 04 de septiembre de 2017 / Fecha de 1era revisión: 16 de febrero de 2018 / Fecha de 2nda revisión: 23 de julio de 2018
Aceptado: 06 de agosto de 2018 / Disponible en línea: 06 de agosto de 2018

Resumen

Se presenta un análisis de la circulación del viento en la vecindad de la superficie terreste, para una región centrada alrededor de Guatemala. Para tal fin se utilizó el modelo climático regional (RegCM), con el cual se simuló la dinámica atmosférica sobre dicha región durante todo el 2016. El propósito del estudio es obtener la variación de mesoescala (decenas de kilómetros) del campo de velocidad del viento. Se puede observar que a medida que la resolución se incrementa se obtiene una representación más precisa de los detalles y características de la topografía del terreno, la cual influye en los patrones de circulación del viento a escalas de pocos kilómetros. Con una resolución fina de 2 km es posible observar zonas de flujo intenso de viento sobre la superficie; como en Palín, Escuintla. También se logra ver la presencia de patrones de circulación diurna que son producto del ciclo diario de calentamiento del terreno debido al sol y el consecuente enfriamiento durante la noche. Este es el primer reporte de una línea de estudio en donde se planea analizar las características climáticas propias de la región guatemalteca.

Palabras claves: RegCM, resolución, simulación, energía eólica, topografía

Abstract

We present an analysis of the wind circulation in the vecinity of the ground surface, for a region centered around Guatemala. We used the regional climate model RegCM to simulate the atmospheric dynamics above that region during the full year 2016. The purpose of the study is to obtain the mesoscale variation (tens of kilometers) of the wind velocity field. It can be seen that as resolution is increased, the details in topography are better represented, they in turn influence the wind circulation patterns on scales of a few kilometers. With a fine resolution of 2 km it is possible to confirm the existence of intense wind flux zones over the surface; such as Palín, Escuintla. We are also able to observe diurnally varying circulations, which are the product of the daily cycle of terrain heating due to the sun and the subsecuent cooling during the night. This is the first report in a line of studies where we plan to analyze the climatic features of the Guatemalan region.

Keywords: RegCM, resolution, simulation, wind power, topography

La reproducción total o parcial del contenido e imágenes de esta publicación se rige de acuerdo a normas internacionales sobre protección a los derechos de autor, con criterio especificados en la licencia Creative Commons (CC BY-NC-SA 4.0)

Introducción

Una de las maneras de estudiar el clima es por medio de modelos numéricos computacionales. Aquellos modelos que toman como sistema de estudio toda la atmósfera del planeta se les llama Modelos de Circulación General (MCG). Éstos son útiles para analizar y prever el comportamiento y tendencia global de la atmósfera. Las resoluciones horizontales típicas utilizadas están alrededor de los 100 km (Dosio, Panitz, Schubert-Frisius, & Lüthi, 2015; Salathé, Leung, Qian, & Zhang, 2010). Por otra parte, se encuentran los Modelos Climáticos Regionales (MCR) los cuales estudian la porción de la atmósfera que se encuentra sobre un dominio o región limitada de la superficie terrestre. Al ser un modelo de área limitada, un MCR posee fronteras laterales, en las cuales se utiliza la información generada por un MCG como condición de frontera. La ventaja de un MCR es que se pueden utilizar grillas de alta resolución horizontal para representar con fidelidad las características finas de la topografía del terreno. Un MCR con alta resolución es útil en estudios de adaptación e impacto ambiental (Lee & Hong, 2014; Wang et al., 2004).

Cuando se utiliza un MCR se habla de su valor agregado. Esto se refiere a la ganancia en información acerca de las variables climáticas al utilizar una grilla horizontal con una resolución de decenas de kilómetros o menos. Dicha ganancia en información está representada por la variación espacial y/o temporal de los campos meteorológicos al incrementar la resolución por encima de la de los datos suministrados (Lee & Hong, 2014).

En simulaciones donde el MCR incrementa la resolución de datos de reanálisis se ha reportado valor agregado en las variables de superficie, (temperatura y velocidad del viento a 10 m) en regiones caracterizadas por detalles orográficos en pequeña escala tales como regiones montañosas (Di Luca, de Elía, & Laprise, 2012). Al tener una mejor representación de las laderas de las montañas, el movimiento vertical de aire presenta un incremento adicional que no se observa en MCG. A mayor movimiento vertical, mayor es la precipitación dinámica, producida por el ascenso lento de masas de aire húmedo (Wallace & Hobbs, 2006), que a su vez resulta en una atmósfera más seca y cálida (Caldwell, 2010; Emanuel & Živković-Rothman, 1999; Jones, Murphy, & Noguer, 1995).

Los MCR se han utilizado para estudiar la sensibilidad de los modelos a la resolución. Se ha encontrado que con una alta resolución en el MCR se obtiene menos precipitación ligera y más del tipo fuerte sobre regiones montañosas como los Alpes en Europa (Giorgi & Marinucci, 1996), las cordilleras del estado de California (Leung & Qian, 2003) y las montañas del estado de Washington (Salathé et al., 2010). Otros estudios han tratado de encontrar mecanismos o explicaciones a fenómenos locales, tales como la canícula o veranillo en la región mesoamericana (Magaña, Amador, & Medina, 1999; Small, De Szoeke, & Xie, 2007). En la región de América del Sur se ha encontrado que la efectividad de un MCR depende de la parte de la Cordillera de los Andes que se estudie, siendo claves los análisis de sensibilidad para determinar las diferencias entre la información proporcionada por un MCR y un MCG (De Sales & Xue, 2011). Los MCR también se han utilizado en estudios de evaluación de energía eólica y variabilidad del viento (García-Bustamante et al., 2013).

En el presente estudio se utiliza el MCR llamado RegCM (Giorgi et al., 2012) para analizar la circulación horizontal del viento en la parte más baja de la capa de frontera planetaria, es decir, a pocos metros de altura sobre la superficie del terreno. El área de interés es el territorio guatemalteco, sobre el cual se utilizan dominios de extensión y resolución variable. El propósito de este trabajo es obtener el valor agregado de un MCR para los patrones de circulación del viento y el efecto que la topografía pueda tener sobre los mismos. En este caso, el valor agregado se encuentra en las variaciones del campo de velocidad a una escala menor que la de los datos iniciales. Dado que el valor de un campo en las celdas de la grilla representa el promedio de tal campo en el área que cubre, una mayor resolución proporciona valores promedio sobre áreas más pequeñas; obteniendo así información adicional sobre el patrón de flujo de viento.

Materiales y Métodos

Los resultados que se presentan en este estudio fueron obtenidos con el MCR llamado RegCM versión 4.5, el cual ha sido desarrollado en el *Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics* (ICTP). Se utiliza el núcleo no-hidrostático, el cual resuelve las ecuaciones de la dinámica de fluidos en las tres dimensiones espaciales. La topografía del terreno se incorpora en los cálculos mediante la coordenada vertical adimensional σ, la cual se define en términos de la presión atmosférica y la elevación del terreno (Giorgi & Marinucci, 1996).

La superficie de la tierra se representa con el va-

Tabla 1
Descripción del dominio computacional

corrida	no. de puntos	Δs [km]	dominio [km]
V0	30×30	60	1,800
V1	60×60	30	1,800
V2	120×120	15	1,800
V3	120×120	8	960
V4	60×60	2	120

lor constante $\sigma = 1$, mientras que la frontera superior de la atmósfera adquiere el valor $\sigma = 0$. RegCM utiliza el modelo de radiación *Community Climate Model* (CCM3) del *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), el cual toma en cuenta el efecto de la presencia de gases como O_3, H_2O, CO_2 y O_2 en la atmósfera (Kiehl et al., 1998). La interacción entre la parte inferior de la atmósfera, la vegetación y el contenido de humedad en el suelo se modela utilizando el *Biosphere-atmosphere transfer scheme* (BATS) (Dickinson, Kennedy, & Henderson-Sellers, 1993). La precipitación convectiva sobre el suelo se calcula mediante el esquema de Grell (1993) o el de Emanuel y Živković-Rothman (1999).

Los resultados que se presentan se obtuvieron haciendo cinco corridas diferentes con RegCM. Para las primeras cuatro (V0-V3) el dominio en consideración es una región cuadrada, centrada en la república de Guatemala. Según se muestra en la Tabla 1, éstas utilizan una resolución Δs que empieza en 60 km y se refina hasta llegar a 2 km. El parámetro Δs representa la separación entre los puntos de la grilla para ambas dimensiones horizontales. El dominio horizontal tiene una longitud de 1,800 km por lado para las corridas V0, V1 y V2. Para la corrida V3 el dominio tiene 960 km por lado. La reducción del tamaño del dominio obedece a la limitante impuesta por los recursos computacionales, lo cual se puede ver en el número de puntos que se utilizan para establecer la grilla horizontal. Utilizar más de 120×120 haría que el tiempo necesario para completar una simulación de un año tome más de dos semanas de ejecución ininterrumpida.

La Figura 3 ilustra el área cubierta por el dominio de 960 km por lado. La corrida V4 utiliza una resolución $\Delta s = 2$ km y cubre un área cuadrada de 120 km por lado en la región central de Guatemala, donde se ubican los volcanes de Acatenango, Fuego, Agua y Pacaya. La Figura 5 muestra el dominio utilizado en esta corrida.

Las corridas V0 a V3 abarcan un período de simulación del 1 de enero de 2016 hasta el 31 de diciembre del mismo año, mientras que en la corrida V4 la solución numérica se calcula solamente para los meses de noviembre y diciembre de 2016.

Los resultados de las simulaciones son almacenados en disco duro en el formato binario netCDF (Rew & Davis, 1990). Para las corridas que abarcan todo el 2016, la solución numérica se almacena cuando la simulación alcanza las 0, 6, 12 y 18 h, es decir que se tienen cuatro registros por día. Para la corrida V4, que comprende los últimos dos meses de 2016, el intervalo de salida de la simulación fue de 30 min, i.e. 48 registros por día. El objetivo de almacenar la solución con mayor frecuencia es poder tener una mejor representación en el tiempo de los procesos climáticos de período diurno.

Como en todo modelo climático regional, RegCM necesita condiciones iniciales y de frontera para poder resolver las ecuaciones diferenciales parciales de la dinámica de fluidos. En ambos casos se utilizaron los datos de reanálisis atmosférico global ERA-Interim, producidos por el *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) (Dee et al., 2011). El conjunto de datos ERA-Interim provee los valores de las variables dinámicas (temperatura, velocidad del viento, humedad, etc.) en función de las coordenadas longitud, latitud, altura y tiempo. La resolución en latitud y longitud es de 1.5°, lo cual equivale a una separación en distancia de 167 km (en el ecuador). La resolución utilizada en todas las corridas es mayor a la de ERA-Interim, lo cual implica que los datos globales son interpolados en la grilla más fina que se utiliza en las simulaciones con RegCM.

Las condiciones de frontera lateral son impuestas a intervalos de seis horas. Esta es la información externa al dominio que dicta el comportamiento de la solución numérica sobre la región que se analiza. El resultado de la simulación es la combinación de la dinámica climática local (producto de la solución numérica de las ecuaciones), y de la influencia de los patrones climáticos globales que son alimentados al dominio a través de las fronteras laterales.

Las corridas V0, V1 y V2 utilizan los datos ERA-Interim para imponer las condiciones de frontera lateral. RegCM permite utilizar los datos de salida de una simulación como condición de frontera, siempre que el dominio esté enteramente contenido dentro del dominio de la solución que proveerá dicha condición de frontera. En este caso el dominio de V3 está con-

tenido o anidado en el de V2, por lo que se utilizó la solución de la corrida V2 como datos de frontera para V3. La misma técnica fue empleada para darle condiciones de frontera a la corrida V4. La ventaja de usar una solución calculada previamente en lugar de los datos ERA-Interim como condición de frontera, es la incorporación de los patrones dinámicos locales que se desarrollan debido a una mejor representación tanto de la topografía del terreno como de la circulación del viento.

En todas las corridas se utilizó 18 niveles verticales, con una presión atmosférica tope de 50 mb en la frontera superior. En este artículo se analizan únicamente las componentes horizontales de la velocidad del viento para el nivel vertical más cercano al suelo. Esto quiere decir que la altura para cual se muestran los resultados es de aproximadamente 20 m sobre el suelo.

El análisis de las variables climáticas requiere realizar el cálculo de múltiples operaciones y de promedios aritméticos, tanto en tiempo como en espacio. Para tal fin se utilizó el software llamado *netCDF Operator* (NCO) (Zender, 2008), el cual consta de una serie de comandos de Linux para manipular archivos en formato binario netCDF.

Resultados

Comparación con datos de estación

La Figura 1 es una comparación de los resultados obtenidos de las corridas V0 a V3 y los datos recolectados por una estación meteorológica. La variable que se muestra es la magnitud de la velocidad horizontal del viento a lo largo del 2016 para la ubicación de la estación. Los datos que se utilizaron fueron recolectados por la estación La Aurora, perteneciente a la red de estaciones meteorológicas del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (Insivumeh). La gráfica muestra los promedios semanales a lo largo de todo el año. Para cuantificar la cercanía de cada corrida a los datos recolectados se calculó la norma L1 y L2 de las diferencias entre los datos de estación y las corridas. La norma L1 da como resultado: 387, 285, 213 y 211; para las diferencias con las corridas V0, V1, V2 y V3; respectivamente. De forma similar, los resultados para la norma L2 son: 56.9, 41.9, 31.0 y 32.0 (ambas normas fueron truncadas a tres cifras significativas).

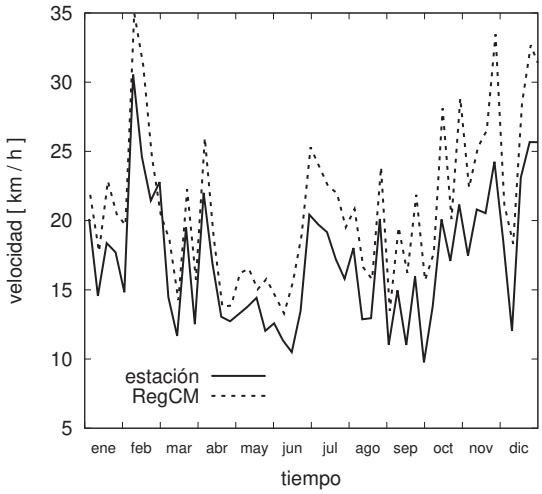

Figura 1. Comparación de la magnitud de la velocidad del viento para diferentes resoluciones con datos de estación meteorológica. Los datos fueron obtenidos del sitio web del Insivumeh para la estación La Aurora. Cada punto representa promedio semanal.

Velocidad promedio

En la Figura 2 se observan los promedios espaciales $\bar{u}$ y $\bar{v}$ de las componentes zonal u y meridional v del viento como función del tiempo. Los valores zonales positivos denotan dirección hacia el este y los negativos hacia el oeste, mientras que los valores meridionales positivos denotan dirección hacia el norte y los negativos hacia el sur. El promedio se calcula sobre el dominio de la corrida V3 (mismo que se muestra en la Figura 3). Cada variable depende de cuatro coordenadas: longitud, latitud, altura y tiempo. El promedio de una variable sobre una región espacial se calcula como

$$\bar{u}(\sigma_k, t_n) = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} u(x_i, y_j, \sigma_k, t_n), \qquad (1)$$

donde x_i e y_j son las coordenadas longitud y latitud para la ij-ésima celda de la grilla, σ_k es la altura del k-ésimo nivel vertical, t_n es el tiempo a lo largo del año y N_x, N_y es el número de puntos a lo largo de las coordenadas longitud, latitud. Las curvas de la gráfica corresponden a los diferentes valores de resolución Δs.

En la Figura 3 se gráfica el valor promedio a lo largo de todo el 2016 de la magnitud de la velocidad horizontal. Los diferentes paneles muestran la misma variable para diferentes valores de la resolución espacial Δs. La magnitud del vector velocidad horizontal V

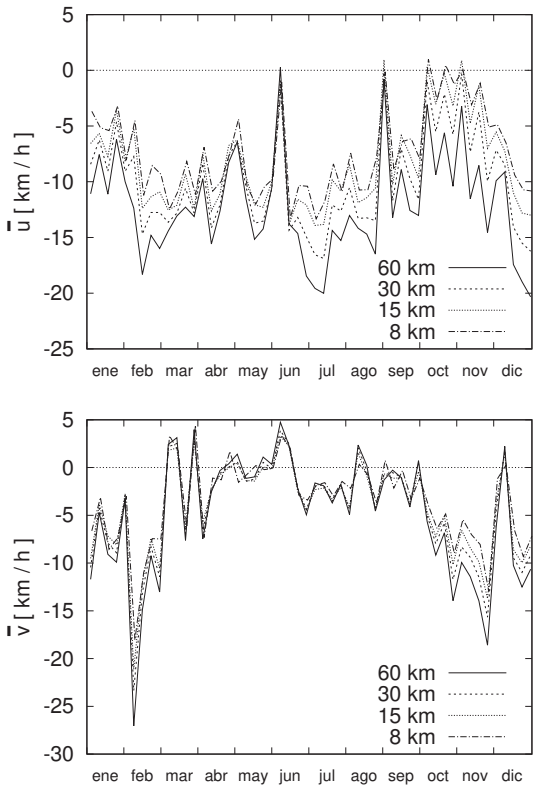

Figura 2. Componente zonal u y meridional v del viento promediadas sobre todo el dominio para diferentes resoluciones Δs.

en términos de u y v se calcula como $V = \sqrt{u^2 + v^2}$. El promedio en el tiempo se calcula con el valor de V en cada punto del dominio de acuerdo a

$$\langle V(x_i, y_j, \sigma_k) \rangle = \frac{1}{N_t} \sum_{n=1}^{N_t} V(x_i, y_j, \sigma_k, t_n), \qquad (2)$$

donde N_t es el número total de instantes en la dimensión temporal. Todos los casos de interés mostrados en este artículo se refieren al flujo del viento en las inmediaciones de la superficie terrestre, por lo cual σ_k corresponde al nivel vertical de menor altura.

En la Figura 4 se muestra de nuevo la magnitud de la velocidad horizontal del viento promediada durante el 2016 y se agrega a la gráfica la dirección de la velocidad promediada a lo largo del mismo intervalo de tiempo. La dirección promedio del vector velocidad $\mathbf{V}$ se calcula como $\langle \theta \rangle = \tan^{-1}(\langle v \rangle / \langle u \rangle)$, para cada celda de la grilla. El valor promedio en el tiempo para u y v se obtiene con una fórmula similar a la Ec. (2). En esta gráfica se ha hecho un acercamiento para mostrar más detalle sobre el territorio de Guatemala. Los resultados corresponden a la resolución $\Delta s = 8$ km.

En la Figura 5 se muestra la magnitud y dirección del viento promediada únicamente en los meses de noviembre y diciembre de 2016. En esta corrida se utiliza la resolución más fina, con $\Delta s = 2$ km. Esto representa un factor de 30 en el aumento de la resolución, comparada con el valor de la corrida V0, donde $\Delta s = 60$ km. Con una resolución de 2 km es posible lograr una buena representación de la orografía en la región central de Guatemala. En la gráfica se identifica la ubicación de los volcanes de la región central: Acatenango, Fuego, Agua y Pacaya. Esta gráfica también muestra algunos contornos de nivel con la altura marcada en metros sobre el nivel del mar. Si bien con una grilla de 2 km de resolución es posible representar detalles salientes de la orografía, todavía no es suficiente para ver detalles finos, tal como la separación entre las cumbres de los volcanes de Fuego y Acatenango, que es de 3 km. Ambas formaciones se ven como un mismo volcán. Para esta corrida, las variables climáticas se almacenaron a intervalos de tiempo de 30 min. Esto hace que hayan 48 registros por día, lo cual da una mayor resolución temporal para el estudio de fenómenos climáticos con un período de duración de un día, tal como se presenta a continuación.

Drenado de viento

La Figura 6 consta de dos partes. El panel inferior muestra el perfil de elevación del suelo para un corte norte-sur a una longitud constante de 90.6628°O. Para colocar la escala de latitud en contexto geográfico, vale la pena mencionar algunos puntos conocidos con su respectiva latitud. Por ejemplo: la ciudad de Escuintla está a 14.3°N, la ciudad de Guatemala se encuentra a 14.6°N, el punto mínimo que aparece aproximadamente a 14.85°N es la cuenca del río Motagua y el límite territorial entre Baja Verapaz y Quiché se encuentra a una latitud alrededor de 15.2°N. El panel superior de la gráfica muestra la componente meridional v del viento en función de la latitud y el tiempo. Viento hacia el norte es representado con grises claros y hacia el sur con grises oscuros. El tiempo está en unidades de días a partir de 1 de diciembre de 2016.

Discusión

A fin de comparar los resultados obtenidos de las simulaciones con mediciones reales, en la Figura 1 se

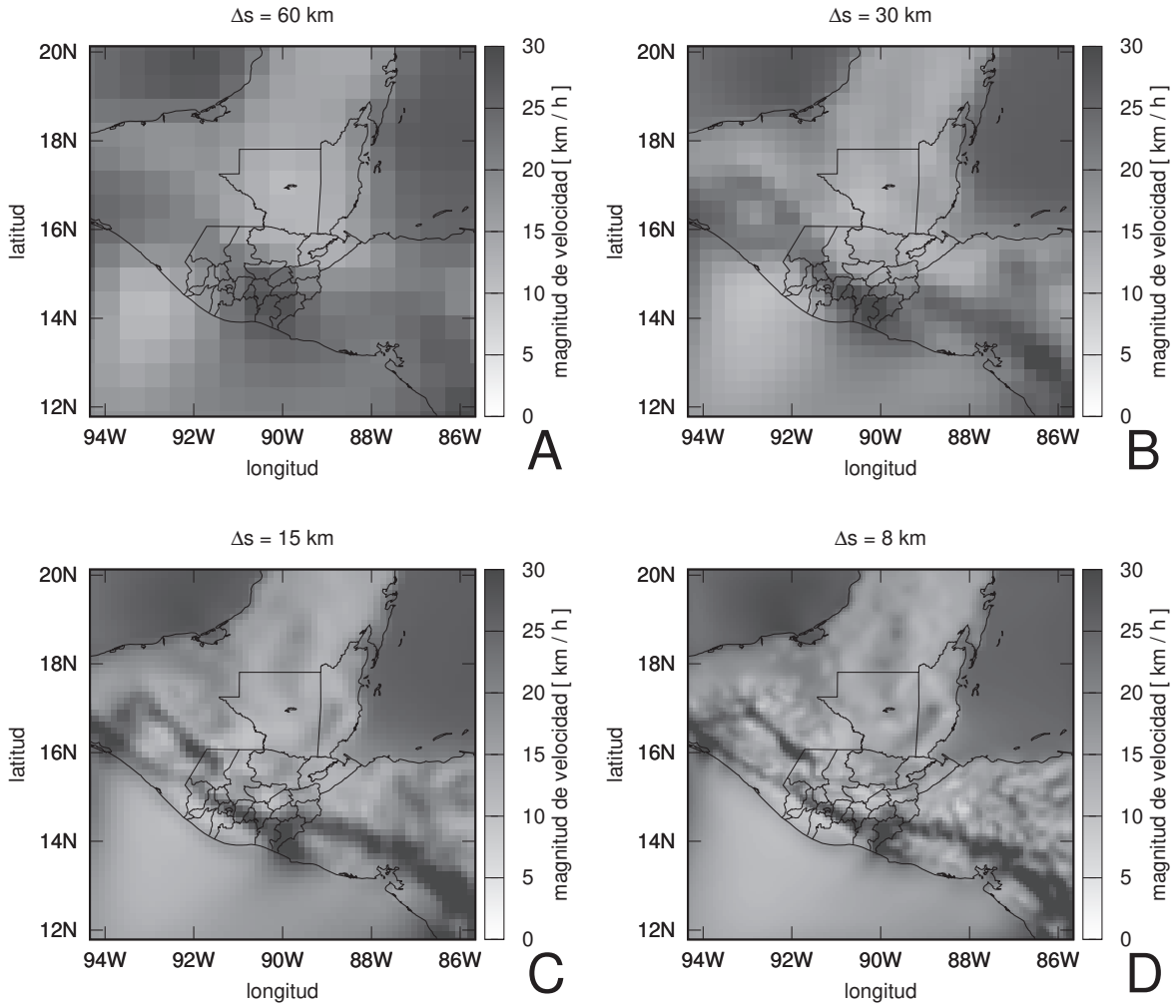

Figura 3. Magnitud de la velocidad del viento promediada a lo largo de todo el 2016. Las resoluciones utilizadas son 60, 30, 15 y 8 km.

grafica el promedio semanal de la magnitud de la velocidad del viento obtenida con RegCM y medida por la estación meteorológica La Aurora del Insivumeh. Se puede ver que existe concordancia con la tendencia general, sin embargo el modelo sobreestima la velocidad del viento para todas las resoluciones. Esto podría ser un error sistemático tanto en la simulación como en el instrumento de medición. Sin tener información sobre la calibración del instrumento es difícil concluir acerca del origen de la diferencia. Si bien es cierto que RegCM sobreestima la velocidad del viento, también se aprecia que al aumentar la resolución las diferencias entre la simulación y los datos de estación es menor. Esto lo verifican las normas L1 y L2, cuyo valor decrece al disminuir Δs, excepto para L2 con la máxima resolución. Estos resultados indican que el cálculo de la velocidad del viento puede mejorar al aumentar la resolución, pero existe un límite más allá del cual el MCR ya no mejora la estimación.

Se puede observar en la Figura 2 que la componente zonal u, es predominantemente negativa, lo que significa que el viento sopla hacia el oeste, el promedio de u a lo largo del 2016 es de -12.1 km/h. De forma similar, el promedio anual de la componente meridional v es de -5.0 km/h, lo cual indica que la dirección predominante es hacia el sur. En la componente meridional se observa que el viento sopla hace el sur durante los meses de enero, febrero y de octubre a diciembre.

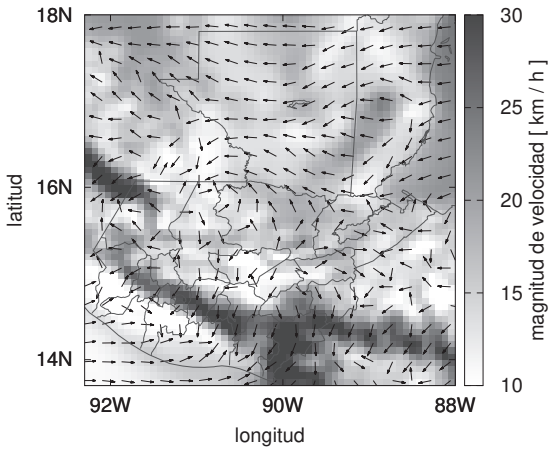

Figura 4. Magnitud y dirección del viento promediada a lo largo de todo el año 2016. La resolución utilizada es de 8 km.

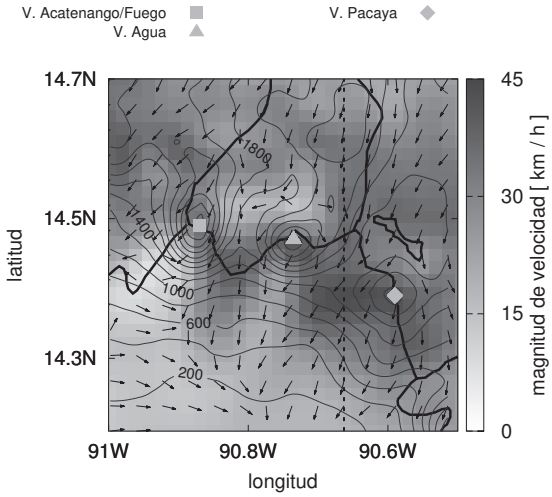

Figura 5. Magnitud y dirección del viento promediada durante los meses de noviembre y diciembre de 2016. La resolución espacial es de 2 km. La elevación del terreno se muestra por medio de curvas de nivel etiquetadas por su altura en metros sobre el nivel del mar.

Durante el resto del año el viento sopla hacia el norte. Este patrón en la dirección del viento es lo que se observa empíricamente a lo largo del año.

La velocidad promedio mostrada en la Figura 2 exhibe la tendencia de acercarse a cero a medida que se incrementa la resolución. Este efecto es más notorio para $\bar{u}$ que para $\bar{v}$, lo cual es entendible, pues se observa empíricamente que el viento tiende a soplar de norte a sur de manera constante durante la mayor parte del año. El efecto se acentúa para la componente zonal en los meses de junio, julio y agosto; donde $|\bar{u}|$ alcanza sus valores máximos en la dirección oeste, sobre todo para la resolución $\Delta s = 60$ km. Este comportamiento se explica al tomar en cuenta que un Δs menor (i.e. mayor resolución) implica una representación más fiel de la orografía (montañas) e irregularidades del terreno, cualidades que constituyen un obstáculo al flujo libre del viento. La diferencia es mínima en los picos de velocidad máxima, los cuales son influenciados en menor medida por el terreno y más por patrones de circulación sinóptica como ciclones y/o sistemas de alta y baja presión, originados más allá del dominio en consideración. Como consecuencia, el viento tiende a ser frenado, con la obvia implicación que $|\bar{u}|$ y $|\bar{v}|$ tienden a ser menores. La influencia de la elevación del terreno sobre el flujo del viento se verifica también al analizar las capas superiores de la atmósfera, en donde la velocidad permanece prácticamente invariante al cambiar la resolución de la grilla.

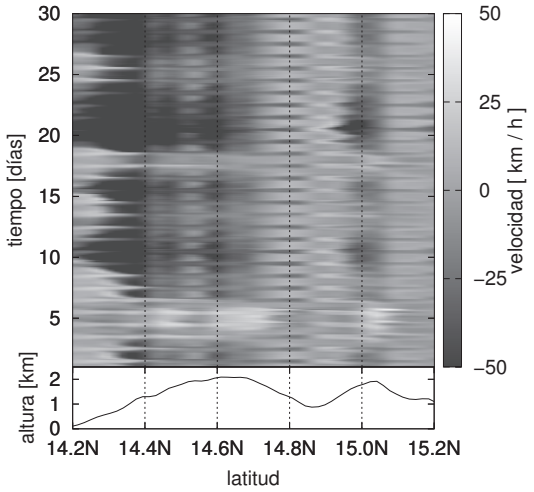

Figura 6. Panel superior: componente meridional v de la velocidad del viento para una sección norte-sur a una latitud fija de 90.6628°O. Esta sección corresponde a la línea vertical punteada que se muestra en la figura 5. Panel inferior: perfil de elevación del suelo por donde pasa la línea punteada antes mencionada.

En la Figura 3 se puede observar el aumento de detalle al aumentar la resolución. El panel A utiliza $\Delta s = 60$ km. Es evidente que a este nivel de detalle no se tiene suficiente información sobre el territorio

guatemalteco. Una sola celda de la grilla es suficiente para cubrir departamentos como Sacatepequez, Sololá o Totonicapán. Todo el detalle de la orografía y su influencia sobre la circulación local del viento está ausente. En los paneles B y C se utilizan resoluciones de 30 y 15 km, respectivamente. Se empieza a ver una distinción con más detalle de regiones de alta y baja velocidad. La característica saliente es que existe una franja de alta velocidad que coincide geográficamente con la Sierra Madre que atraviesa el territorio de Guatemala de oeste a este, siguiendo el perfil de la costa sur. En el panel D la resolución utilizada es de 8 km. Se puede observar que las regiones con velocidades más altas corresponden a las laderas montañosas de la Sierra Madre y la parte sur del departamento de Jutiapa. Los resultados mostrados en la Figura 3 ilustran la ventaja de utilizar un modelo climático regional, que es la capacidad de observar la influencia de los accidentes geográficos de mesoescala en el comportamiento promedio del flujo de viento. La información acerca del flujo del viento se completa en la Figura 4, en la cual se ha agregado también la dirección promedio del viento. La franja de alta velocidad que coincide con la Sierra Madre tiene una dirección predominante hacia el sur.

Es posible alcanzar todavía mayor detalle en la simulación de la dinámica atmosférica siempre que hayan características del terreno que aparezcan al aumentar la resolución. La Figura 5 muestra tal situación. Aquí se ha utilizado un $\Delta s = 2$ km, con lo cual se hacen evidentes las formaciones volcánicas más prominentes de la región central de Guatemala. Se puede apreciar que la dirección promedio en noviembre y diciembre es hacia el sur. El valor promedio máximo de la velocidad se alcanza en la región que se ubica entre los volcanes de Agua y Pacaya, que corresponde al municipio de Palín en el departamento de Escuintla. En la gráfica se puede apreciar que en esta región la dirección promedio es prácticamente perpendicular a las curvas de nivel del terreno. Esta peculiaridad se explica como un drenado de viento proveniente del área de la ciudad de Guatemala, la cual se encuentra a mayor altura. El viento que desciende desde el valle central tiende a acelerarse al bajar por el gradiente de altura que pasa por Palín. Un efecto similar, pero de menor proporción se observa entre los volcanes de Acatenango y Agua, donde la dirección promedio del viento también es perpendicular a las curvas de nivel del terreno. Si bien dos meses de simulación no son tiempo suficiente para considerar estos resultados como una característica climatológica estable, es un indicativo del potencial de estas regiones para la extracción de energía del viento. No es coincidencia que ya existe un parque eólico en las inmediaciones de Palín.

Utilizando una resolución de 2 km y registros de la velocidad del viento a cada media hora, es posible observar fenómenos de circulación térmica diurna, tal efecto se muestra en la Figura 6. Durante un día de buen tiempo, el sol calienta la pendiente de las montañas elevando su temperatura. El aire tiende a ascender a la largo de la pendiente, creando viento anabático. Durante la noche el terreno se enfría y la circulación se invierte, es decir, el aire baja por la pendiente estableciendo un viento katabático (Wallace & Hobbs, 2006). Las latitudes 14.8°N y 14.9°N son un ejemplo perfecto de la circulación anabática y katabática. Estas latitudes corresponden a puntos que están en los lados sur y norte (a la misma longitud) de la cuenca del río Motagua, respectivamente. Se puede apreciar que al mismo tiempo que el viento sopla hacia el sur en el lado sur de la cuenca, éste sopla hacia el norte en el lado norte de la cuenca. En otras palabras, el viento asciende en ambas laderas. Durante la noche la dirección de la circulación se invierte. Es notorio que la franja de tiempo de circulación anabática es más corta que la katabática. Un patrón similar puede observase en la latitud 14.2°N, donde los días de buen tiempo llegan hasta el 9 de diciembre y luego se observa fuerte viento proveniente del norte. En este caso, en los primeros días del mes no se alcanza una velocidad hacia el sur, el patrón de circulación es más bien un aumento y disminución de la velocidad hacia el norte, el cual tiene también un patrón diurno. En los días alrededor del 20 de diciembre el patrón se rompe debido a la entrada de un frente frío que hace que el viento sople hacia el sur.

En conclusión, se ha utilizado un MCR para realizar corridas de alta resolución sobre el territorio guatemalteco. El valor agregado que se puede extraer es la variación del campo de velocidad a una escala menor que la de los datos que proveen las condiciones iniciales y de frontera. En este caso el estudio ha sido enfocado a los patrones de circulación del viento en las inmediaciones de la superficie terrestre. Al contrario de lo que sucede a alturas superiores de la atmósfera donde el viento es geostrófico, la circulación del viento en la capa de frontera atmosférica está influenciada por la orografía, la textura del suelo y la presencia de ciudades. Se ha observado que la representación detallada de la topografía por medio de grillas de alta resolución influye marcadamente en la circulación del

viento a mesoescala. Aunque el incremento en resolución ha permitido mejorar la exactitud de la velocidad del viento, la norma de las diferencias entre los datos de estación (para un punto) y las simulaciones indican que hay una resolución más allá de la cual los cálculos ya no mejoran. Uno de los factores importantes del estudio y análisis de los patrones de circulación del viento es la creciente demanda de producción de energía limpia. Poder identificar zonas con un flujo fuerte y constante de viento es clave para el aprovechamiento de la energía eólica.

En trabajos futuros se analizarán las variables de precipitación y temperatura, las cuales tienen un efecto visible e inmediato sobre las diferentes actividades humanas.

Agradecimientos

A Vittorio M. Canuto del NASA Goddard Institute for Space Studies por haber presentado la ciencia del clima como un campo emocionante para investigar.

Referencias

Caldwell, P. (2010). California wintertime precipitation bias in regional and global climate models. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *49*(10), 2147-2158. doi:10 . 1175 / 2010JAMC2388.1

De Sales, F. & Xue, Y. (2011). Assessing the dynamic-downscaling ability over South America using the intensity-scale verification technique. *International Journal of Climatology*, *31*(8), 1205-1221. doi:10.1002/joc.2139

Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., . . . Vitart, F. (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *137*(656), 553-597. doi:10.1002/qj.828

Di Luca, A., de Elía, R., & Laprise, R. (2012). Potential for added value in precipitation simulated by high-resolution nested regional climate models and observations. *Climate Dynamics*, *38*(5-6), 1229-1247. doi:10.1007/s00382-011-1068-3

Dickinson, R. E., Kennedy, P., & Henderson-Sellers, A. (1993). *Biosphere-atmosphere transfer scheme (BATS) version 1e as coupled to the NCAR community climate model*. Boulder, Colorado: National Center for Atmospheric Research, Climate and Global Dynamics Division. doi:10 . 5065/D67W6959

Dosio, A., Panitz, H.-J., Schubert-Frisius, M., & Lüthi, D. (2015). Dynamical downscaling of CMIP5 global circulation models over CORDEX-Africa with COSMO-CLM: evaluation over the present climate and analysis of the added value. *Climate Dynamics*, *44*(9-10), 2637-2661. doi:10.1007/s00382-014-2262-x

Emanuel, K. A. & Živković-Rothman, M. (1999). Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models. *Journal of the Atmospheric Sciences*, *56*(11), 1766-1782. doi:10. 1175/1520-0469(1999)056<1766:DAEOAC>2. 0.CO;2

García-Bustamante, E., González-Rouco, J. F., Navarro, J., Xoplaki, E., Luterbacher, J., Jiménez, P. A., . . . Lucio-Eceiza, E. E. (2013). Relationship between wind power production and North Atlantic atmospheric circulation over the northeastern Iberian Peninsula. *Climate Dynamics*, *40*(3-4), 935-949. doi:10 . 1007 / s00382 - 012 - 1451-8

Giorgi, F., Coppola, E., Solmon, F., Mariotti, L., Sylla, M. B., Bi, X., . . . Brankovic, C. (2012). RegCM4: Model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Climate Research*, *52*, 7-29. doi:10.3354/cr01018

Giorgi, F. & Marinucci, M. R. (1996). A investigation of the sensitivity of simulated precipitation to model resolution and its implications for climate studies. *Monthly Weather Review*, *124*(1), 148-166. doi:10.1175/1520-0493(1996) 124<0148:AIOTSO>2.0.CO;2

Grell, G. A. (1993). Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. *Monthly Weather Review*, *121*(3), 764-787. doi:10 . 1175 / 1520 - 0493(1993) 121<0764 : PEOAUB>2.0.CO;2

Jones, R. G., Murphy, J. M., & Noguer, M. (1995). Simulation of climate change over europe using a nested regional-climate model. I: Assessment of control climate, including sensitivity to location of lateral boundaries. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *121*(526), 1413-1449. doi:10.1002/qj.49712152610

Kiehl, J., Hack, J., Bonan, G., Boville, B., Williamson, D., & Rasch, P. (1998). The national center for atmospheric research community climate model: CCM3. *Journal of Climate*, *11*(6),

1131-1149. doi:10 . 1175 / 1520 - 0442(1998) 011<1131:TNCFAR>2.0.CO;2

Lee, J. & Hong, S. (2014). Potential for added value to downscaled climate extremes over Korea by increased resolution of a regional climate model. *Theoretical and Applied Climatology*, *117*(3-4), 667-677. doi:10.1007/s00704-013-1034-6

Leung, L. R. & Qian, Y. (2003). The sensitivity of precipitation and snowpack simulations to model resolution via nesting in regions of complex terrain. *Journal of Hydrometeorology*, *4*(6), 1025-1043. doi:10 . 1175 / 1525 - 7541(2003) 004<1025:TSOPAS>2.0.CO;2

Magaña, V., Amador, J. A., & Medina, S. (1999). The midsummer drought over Mexico and Central America. *Journal of Climate*, *12*(6), 1577-1588. doi:10 . 1175 / 1520 - 0442(1999) 012<1577 : TMDOMA>2.0.CO;2

Rew, R. & Davis, G. (1990). NetCDF: An interface for scientific data access. *IEEE Computer Graphics and Applications*, *10*(4), 76-82. doi:10.1109/38.56302

Salathé, E. P., Leung, L. R., Qian, Y., & Zhang, Y. (2010). Regional climate model projections for the State of Washington. *Climatic Change*, *102*(1), 51-75. doi:10.1007/s10584-010-9849-y

Small, R. J. O., De Szoeke, S. P., & Xie, S.-P. (2007). The Central American midsummer drought: regional aspects and large-scale forcing. *Journal of Climate*, *20*(19), 4853-4873. doi:10 . 1175 / JCLI4261.1

Wallace, J. M. & Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric science: An introductory survey* (2nd. ed.). London: Academic press.

Wang, Y., Leung, L. R., McGregor, J. L., Lee, D.-K., Wang, W.-C., Ding, Y., & Kimura, F. (2004). Regional climate modeling: Progress, challenges, and prospects. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, *82*(6), 1599-1628. doi:10.2151/jmsj.82.1599

Zender, C. S. (2008). Analysis of self-describing gridded geoscience data with netCDF Operators (NCO). *Environmental Modelling & Software*, *23*(10), 1338-1342. doi:10.1016/j.envsoft.2008.03.004

Ciencia, Tecnología y Salud
Vol. 5 Num. 2 2018
ISSN: 2410-6356 (electrónico) / 2409-3459 (impreso)

Ensayo Científico / Scientific Essay

La epigenética: ¿el regreso de Lamarck?

Epigenetics: the return of Lamarck?

Laura M. Benítez-Cojulún
Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de San Carlos de Guatemala

***Autor al que se dirige la correspondencia:** laurambenitezc@ecfm.usac.edu.gt

Recibido: 16 de octubre 2017 / Revisión: 02 de marzo 2018 / Aceptado: 08 de mayo 2018

Resumen

Desde hace algunos años, numerosas publicaciones sugieren un regreso de Lamarck gracias a los hallazgos de la epigenética, puesto que este campo de investigación parece desempolvar la idea de la herencia de caracteres adquiridos. Un vistazo a la historia de las ciencias de la vida, a escritos del siglo XIX de Lamarck y al *Origen de las Especies* de Darwin revela que esta nueva popularidad de Lamarck se basa en varias creencias equivocadas: (1) que Lamarck fue el primero en proponer la idea de la herencia de caracteres adquiridos; (2) que esa idea era el punto más singular de su teorización sobre la evolución de los seres vivos; (3) que Darwin no compartía esa creencia. En realidad, parte de la confusión se ha generado por el calificativo de "neodarwiniana" que suele asignársele a la llamada síntesis moderna, la cual combina aportes de Darwin, de Mendel y de Weismann, siendo este último un gran opositor a la idea de la herencia de caracteres adquiridos. Respecto a los hallazgos de la epigenética, dentro de la cual hay espacio tanto para la transmisión de caracteres adquiridos como para el concepto de selección natural, tal vez sería más certero hablar del regreso de los neolamarckianos franceses, o incluso de cierto naturalista muy conocido, cuya creencia en la herencia de caracteres adquiridos es mucho menos conocida: el mismo Darwin.

Abstract

For some years, many publications are suggesting a return of Lamarck due to the findings of epigenetics, because this research field seems to dust off the idea of the inheritance of acquired characters. A closer look to the history of life sciences, to some nineteenth-century Lamarck's writings and to *The Origin of Species* by Darwin reveals that this new popularity of Lamarck is based on several misconceptions: (1) that Lamarck was the first to propose the idea of the inheritance of acquired characters; (2) that this idea was the most singular point in his theorizing about the evolution of living beings; (3) that Darwin did not share this belief. Actually, part of the confusion is due to the label "neo-Darwinian" often applied to the so-called modern synthesis, given that this one combines ideas coming from Darwin, Mendel and Weismann, and the latter was a strong opponent of the idea of the inheritance of acquired characteristics. As far as epigenetic findings are concerned, within which there is room both for the inheritance of acquired characters and for the concept of natural selection, it would possibly be more accurate to talk about the return of French neo-Lamarckians, or of a certain famous naturalist whose belief in the inheritance of acquired characters is far less famous: Darwin himself.

La reproducción total o parcial del contenido e imágenes de esta publicación se rige de acuerdo a normas internacionales sobre protección a los derechos de autor, con criterio especificados en la licencia Creative Commons (CC BY-NC-SA 4.0)

Introducción

Desde hace algunos años, se evoca frecuentemente el nombre de Lamarck en relación con el campo de la epigenética (Balter, 2000; Burkhardt, 2013), un nombre que, de por sí, está cada vez más presente en la literatura científica (Bucher, 2013; Burggren, 2014). Algunos títulos incluyen el nombre del investigador francés de una manera sugerente y hasta provocativa, por ejemplo "Why Lamarck won't go away" (Ho, 1996), "Inheritance of acquired traits in plants: Reinstatement of Lamarck" (Sano, 2010), "Science of epigenetics: Lamarck was right after all" (Sawan & Parvizi, 2013) o incluso "Epigenetics as a source of variation in comparative animal physiology –or– Lamarck is lookin' pretty good these days" (Burggren, 2014). Sano (2010) llega a proponer que se reevalúen las teorías de Lamarck para rescatar su reputación. Otros autores, más prudentemente, se han decidido por un título en forma interrogativa: "Was Lamarck just a little bit right?" (Balter, 2000), "¿Vuelve Lamarck?" (Francès, 2012), "The return of Lamarck?" (Bucher, 2013) o "Epigenética: ¿vuelve el Lamarckismo?" (Ruiz Rejón, 2015), por mencionar algunos.

Tomando en cuenta que Lamarck desarrolló su sistema teórico evolutivo hacia principios del siglo XIX, cabe preguntarse a qué se debe la reciente aparición de este discurso que sugiere el restablecimiento de su sistema teórico. Ello es especialmente interesante dado que dicho discurso asocia ese resurgimiento con descubrimientos en el campo de la epigenética, el cual empezó a desarrollarse como tal sobre todo a finales del siglo XX.

Una primera respuesta se impone rápidamente. Se trataría del regreso de la idea de la herencia de caracteres adquiridos, la cual había ido perdiendo terreno desde finales del siglo XIX, hasta quedar completamente derrotada a mediados del siglo XX, al menos en el mundo de los genetistas occidentales (Landman, 1993). Para responder menos precipitadamente a la interrogante que se plantea, a continuación se examinan con mayor detenimiento algunas ideas evolutivas de Lamarck, enseguida se explora el lugar que la herencia de caracteres adquiridos ocupa en el campo de la epigenética, para finalmente decidir si el discurso en cuestión parece justificado.

La evolución según Lamarck

Antes de presentar algunos de los puntos importantes de las ideas evolucionistas de Lamarck, es necesario esbozar ciertas circunstancias contextuales en medio de las cuales las propuso y desarrolló. En 1793, París empieza a contar con un Museo (Nacional) de Historia Natural, la institución prácticamente nueva en que se convirtió el antiguo Jardín del Rey (David, Cohen, & Dessaint, 2009). Pues bien, es ahí y en ese entonces cuando Lamarck obtiene la cátedra de los insectos, los gusanos y los animales microscópicos (Burkhardt, 2013).

De hecho, algunas de sus ideas relacionadas con la evolución de los seres vivos pueden encontrarse en su obra *Sistema de los animales sin vértebras*, publicada a principios del siglo XIX y que correspondería a su curso impartido en 1800 dentro del marco ya mencionado (Burkhardt, 2013). Lamarck (1801) la dirigió explícitamente a sus alumnos y a otros estudiantes del país (Francia); en otras palabras, se trataba prácticamente de un libro de texto.

Ya en la parte introductoria de ese libro (el discurso de apertura pronunciado al inicio de su curso del año), Lamarck manifiesta que los invertebrados muestran, más claramente que los vertebrados, una "degradación" (un gradiente, en sentido decreciente, podríamos decir) en la organización y en las "facultades" de los animales, desde los más complejos hasta los más simples. Enseguida, plantea la sospecha de que son estos últimos, los más simples, los primeros que surgieron y que, posteriormente, "la naturaleza […] con ayuda de mucho tiempo y de circunstancias favorables, formó a todos los demás" (Lamarck, 1801, pp. 11-12).

Respecto a los amplios períodos de tiempo requeridos, el historiador Burkhardt (2013) señala que, a juzgar por algún escrito ulterior, Lamarck tenía en mente miles o millones de siglos (algo que no deja de ser asombroso, pues era poco común para la época).

En cuanto a lo que Lamarck entendía por circunstancias favorables, estaban estrechamente ligadas a lo que hoy consideraríamos factores ambientales. En sus propias palabras, ellas nacían "de la influencia de los climas, de las variaciones de la temperatura de la atmósfera […], de la diversidad de los lugares", etc. Lo interesante es que en esta lista, incluye la influencia "de los hábitos, de los movimientos, de las acciones […]". Más adelante, Lamarck expone dos ideas acerca de las llamadas facultades de los animales: (1) que a consecuencia de las influencias aludidas, esas faculta-

des aumentaban y se fortalecían conforme los animales hacían uso de ellas; (2) que esas mismas facultades se diversificaban gracias a los nuevos hábitos que hubieran sido conservados durante mucho tiempo. Esta diversificación implicaba entonces el surgimiento de modificaciones en órganos y partes del cuerpo en general. Esos cambios, según la visión de Lamarck, se conservaban y se propagaban por medio de la "generación" (Lamarck, 1801). Aquí debe tomarse en cuenta que, en el contexto académico correspondiente, el concepto de generación estaba muy asociado con el actual concepto de reproducción (excepto en el caso de la "generación espontánea", que ocurría sin progenitores).

También en algunas publicaciones posteriores, Lamarck desarrolló posturas acerca del origen y la evolución de los seres vivos. Por ejemplo, compartía la idea de la generación espontánea, que para él consistía en la transformación de materia no viva en "tejido celular" (Lamarck, 1809) bajo ciertas condiciones favorables (como el calor) y gracias a un "fluido sutil" y penetrante. Así podían surgir los seres vivos más simples que, en generaciones sucesivas, iban dando paso a organismos más complejos, con órganos cada vez más numerosos y especializados. La manera en que dicha complejidad se iba acrecentando era por la influencia de fluidos internos que (mediante su naturaleza, sus cambios, movimientos, pérdidas y ganancias) iban causando modificaciones en las partes y órganos de cada organismo. A esto contribuían también las influencias de las "circunstancias" que ya se mencionaron, por ejemplo factores ambientales y hábitos. Posteriormente, era posible que ciertas modificaciones (que ahora se calificarían de adquiridas), mantenidas por largo tiempo, se transmitieran a la descendencia. Así, según Lamarck, la gran diversidad de "circunstancias" existentes había contribuido a la formación de las múltiples formas de vida presentes, en el transcurso de muchísimo tiempo (Lamarck, 1802).

Ya se vio que en el caso de los animales, tales "circustancias" incluían a los hábitos. En tal sentido, en varias de sus publicaciones Lamarck insistió en ilustrar mediante ejemplos que algunas características de los animales, como las patas curvadas de las aves perchadoras, las extremidades membranosas de los murciélagos… o el famoso cuello de las jirafas, eran consecuencia de sus hábitos, y no a la inversa (Burkhardt, 2013; Lamarck, 1802).

Así, en su *Filosofía zoológica*, Lamarck (1809) enunció dos principios como leyes. Según la primera de esas leyes, el uso de los órganos conllevaba, a la larga, su fortalecimiento y crecimiento, mientras que su falta de uso, si era prolongada, causaba su debilitamiento, deterioro o incluso desaparición. La segunda ley se refería a la transmisión de esas modificaciones adquiridas a los descendientes, indicando que se producía si y solo si tales modificaciones eran comunes a los progenitores.

Se puede identificar, entonces, inmersa en la teorización lamarckiana, la famosa idea de la herencia de caracteres adquiridos. Pero esa idea por sí sola no era en absoluto una originalidad de Lamarck: en su contexto, era una idea común (Burkhardt, 2013; Choi & Mango, 2014; Landman, 1993). Tampoco era el punto medular de su teorización (Burkhardt, 2013). De hecho, en su discurso de apertura del curso impartido a sus alumnos en 1802, la observación que Lamarck enfatiza como novedosa, de la cual pareciera estar orgulloso, es la del gradiente anteriormente mencionado, desde los animales más simples en organización, hasta los más complejos, con un correspondiente aumento progresivo de sus "facultades". Según Lamarck, se trababa de un hecho "que a pesar de su evidencia, no parece para nada haber llamado la atención de los naturalistas" (Lamarck, 1802, p. 12). Por el contrario, al referirse a la herencia de caracteres adquiridos, alguna vez escribió:

> […] esta ley de la naturaleza que hace transmitir a los nuevos individuos, todo lo que fue adquirido en la organización, durante la vida de los que los produjeron [los padres], es tan cierta, […] tan probada por los hechos, que no hay ningún observador que no haya podido convencerse de su realidad (Lamarck, 1815-1822, p. 200).

Parece muy probable que Lamarck no habría podido sospechar que en el futuro se le atribuiría la paternidad de la idea de la herencia de caracteres adquiridos, pero ello seguramente quedará más claro en la tercera parte de este ensayo. A continuación se examina la relación entre esa vieja idea y el campo de la epigenética.

La epigenética y la herencia de caracteres adquiridos

El término *epigenetics* habría sido originalmente propuesto por Conrad Hal Waddington en 1942 (como se citó en Burggren, 2014; Locker, s.f.) pero, desde entonces, múltiples definiciones de ese término han estado en circulación (Burggren, 2014; Choi & Mango, 2014; Heard & Martienssen, 2014). Dado que el presente aná-

lisis se centra en la asociación entre la epigenética y el nombre de Lamarck, las definiciones que interesan aquí son las que relacionan ese campo de investigación con la posibilidad de transmitir a la descendencia fenotipos adquiridos, particularmente en respuesta a cambios ambientales.

En ese sentido, la definición de epigenética considerada más amplia o tradicional es la que le atribuye a ese campo la tarea de estudiar la herencia transgeneracional (i.e. que se mantiene por generaciones, aunque este término también es un tanto polémico) de fenotipos nuevos que no se explican por cambios en la secuencia de los nucleótidos del genoma, es decir, que no se deben a mutaciones clásicas (Burggren, 2014; Choi & Mango, 2014; Heard & Martienssen, 2014). Este tipo de definiciones provendrían de la que el biólogo Nanney (1958) propuso originalmente, como lo señala repetidas veces Haig (2004; 2007; 2012). Lo que Nanney había hecho era considerar genéticos a los mecanismos de mantenimiento y replicación de una "biblioteca" de especificaciones, tanto expresadas como no expresadas, y epigenéticos a los "mecanismos auxiliares […] involucrados en determinar cuáles especificaciones deben ser expresadas en cualquier célula particular" (Nanney 1958, 712).

También existen definiciones más recientes que se refieren explícitamente a la influencia del ambiente sobre la expresión de los genes y la cromatina (Heard & Martienssen, 2014). No está de más recordar que la cromatina es el conjunto formado por el ADN y las proteínas a él asociadas (entre ellas, las histonas).

En las últimas décadas (sobre todo desde los años noventa, según puede inferirse indirectamente a partir de observaciones de Nicolosi y Ruivenkamp (2012) y de Morange (2013), por ejemplo), la epigenética ha avanzado en la comprensión de mecanismos moleculares que, según algunos, parecen estar a la base de la herencia epigenética transgeneracional. Ahora bien, como explican Choi y Mango (2014), para poder afirmar que un individuo les transmitió un fenotipo adquirido a generaciones siguientes, es necesario que se confirmen tres fenómenos: (1) la codificación de los cambios en el individuo de la generación P0 (parental); (2) la herencia de la información epigenética a la generación F1 (primera generación filial); (3) la reemergencia o recuperación (*retrieval* en inglés) del fenotipo en las futuras generaciones. Es en la primera de esas tres fases que el ambiente puede entrar en juego como detonante del cambio, siendo ejemplos de factores inductores de la herencia epigenética transgeneracional: la alimentación, las toxinas, los olores y las fuentes de estrés. Asimismo, ciertas modificaciones a nivel de las histonas (por ejemplo su metilación) pueden estar implicadas en una o más de esas fases. De hecho, tal como señalan Heard y Martienssen (2014), la metilación del ADN es el mecanismo de herencia epigenética transgeneracional más estudiado; y varios tipos de ARN son otros ejemplos de moléculas implicadas en la herencia epigenética transgeneracional, por ejemplo moléculas de ARN no codificantes.

De más está señalar que Lamarck no habría podido hablar de cromatina, metilación ni ARN. De hecho, al pensar en la teoría lamarckiana de la evolución y en la epigenética, viene a la mente el concepto kuhniano (i.e. de Thomas Kuhn) de inconmensurabilidad; por supuesto, en el caso de Lamarck y la epigenética no se trata del paso de un viejo paradigma coronado de éxito a otro, pero sí se tiene la impresión de una intraducibilidad entre los conceptos del mundo de Lamarck y los del actual. Hasta aquí sigue siendo entonces válida la interrogante: ¿cómo explicar mejor la frecuente asociación entre el nombre de Lamarck y el de la epigenética?

Lamarck y la epigenética: una asociación basada en errores

Antes que nada, la fuerte asociación entre Lamarck y la herencia de caracteres adquiridos se debe a la difundida creencia de que dicho francés fue el padre de esta idea. Por ejemplo Bucher (2013), en su reseña del libro *Epigenetics in Health and Disease*, asegura que la historia de la epigenética comienza con teorías "primero propuestas por Jean-Baptiste Lamarck" (p.1). En cuanto a Choi y Mango (2014), le asignan a la idea de la herencia de caracteres adquiridos una antigüedad de dos siglos. Por su parte, Heard y Martienssen (2014) sostienen que la herencia de caracteres adquiridos fue "primero" propuesta por botánicos: Lamarck y Lysenko.

En realidad, la idea es muchísimo más vieja, dado que se puede rastrear hasta la Antigüedad, por ejemplo en más de algún seguidor de Hipócrates (Landman, 1993). En la época de Lamarck se consideraba un hecho ampliamente aceptado (Burkhardt, 2013; Choi & Mango, 2014; Landman, 1993), como ya se había señalado. De hecho, entre los predecesores de Lamarck que defendieron la misma idea, pero en el siglo XVIII, puede mencionarse a LeRoy y al marqués de Condorcet (Burkhardt, 2013).

Para Burkhardt (2013), la originalidad de Lamarck respecto a esta noción antigua era en realidad la postura de que la herencia de caracteres adquiridos era "un agente de cambio ilimitado". Esta postura se oponía al fijismo que solía atribuírsele a la creación divina (la idea de un mundo creado por Dios, mundo que se concebía como acabado y fijo, al menos en lo que concierne a las criaturas vivientes) y hay quien considera que la de Lamarck fue "la primera teoría estructurada que proponía la transformación progresiva de las especies" (David, Cohen, & Dessaint, 2009, p. 2).

Por supuesto, es al entrar en estos terrenos cuando viene a la mente el nombre de Darwin, cuya teoría de la evolución establece un supuesto contraste respecto a Lamarck y su herencia de caracteres adquiridos. Dado que la síntesis moderna o síntesis neodarwiniana combinó el mecanismo darwiniano de la selección natural con una genética que incluía aportes mendelianos y aportes deterministas de Weismann, gran opositor de la idea de la herencia de caracteres adquiridos (Burkhardt, 2013; Landman, 1993), al parecer se formó una nebulosa de ideas en que se asocia fuertemente el nombre de Darwin con el determinismo genético (y a veces hasta con lo mendeliano); y a esa nebulosa hay que agregar, como añadido más reciente, a las mutaciones de las secuencias del ADN como fuente de variación.

El conjunto resultante se suele oponer a otra nebulosa, en la que el nombre de Lamarck se asocia fuertemente con la herencia de caracteres adquiridos por la influencia del ambiente (de hecho, otra creencia errónea es que para Lamarck, el ambiente tenía un efecto directo de modificación en los individuos). Por ejemplo, Smythies, Edelstein y Ramachandran (2014) mencionan que la teoría de Darwin contribuyó al eclipse de la teoría lamarckiana, según la cual los cambios ambientales provocaban cambios corporales (como si en Lamarck ese efecto fuera directo), pero que en la actualidad, al reconocerse el papel de factores ambientales en la modificación de la relación genotipo-fenotipo, las ideas de Lamarck, en una versión modificada, empiezan a gozar de cierta aceptación. Como se verá un poco más adelante, aquí lo cuestionable es oponer radicalmente la idea de la herencia de caracteres adquiridos a la teoría de Darwin, y asociar dicha idea solamente con Lamarck.

La confusión generada por los dos grandes grupos de ideas mencionados es aún más evidente al leer a Balter (2000), quien llega a afirmar que Darwin, a diferencia de Lamarck, había postulado que la adaptación era impulsada por la selección natural de alteraciones genéticas. Jablonka y Lamb (2005, citadas por West-Eberhard, 2007, p. 447) también se refieren a "la versión común de la teoría de la evolución, de Darwin" la cual consistiría en que "la adaptación ocurre a través de la selección natural de variaciones genéticas azarosas". En este caso, lo discutible sería la propiedad del adjetivo "genético", actualmente cargado de significados posteriores a la teoría de Darwin.

Por otro lado, en ocasiones la transmisión transgeneracional de fenotipos que no se explica por un cambio de la secuencia de los nucleótidos (de los genes normalmente considerados responsables de esos fenotipos) es automáticamente asociada con la herencia de caracteres adquiridos, y a veces hasta calificada de no genética. Es, por ejemplo, lo que da a entender el siguiente pasaje: "*Recently, the two-centuries old idea of the inheritance of acquired traits has been rekindled. Scientists started to notice the non-genetic inheritance of new phenotypes, which is now called transgenerational epigenetic inheritance*`" (Choi & Mango, 2014, p. 1440). Por ello, cuando la epigenética es definida como campo de estudio de "la emergencia y herencia de nuevos fenotipos en ausencia de cambios en la secuencia del ADN en el genoma" (Choi & Mango, 2014, p. 1440), al desafiar la manera clásica de pensar el determinismo genético, parece sacar automáticamente de su sepultura a la vieja idea de la herencia de caracteres adquiridos y, por lo tanto, a Lamarck.

De hecho, un planteamiento muy común es aquel según el cual Lamarck creía en la herencia de caracteres adquiridos, mientras que Darwin creía en la selección natural (sin duda somos muchos los que hemos tenido en nuestras manos más de algún libro de texto que establecía esa oposición). Francès (2012), por ejemplo, enuncia:

> Mientras Darwin afirmaba que aquellos que eran más aptos sobrevivían y transmitían sus características a la descendencia, originando así el cambio progresivo de las características de las diferentes especies, Lamarck afirmaba que las características que los individuos adquirían a lo largo de su vida se podían transmitir a la descendencia. (p. 5).

Sin embargo, ¡oh, sorpresa!, Darwin también creía en la herencia de caracteres adquiridos (Cubas, Vincent, & Coen, 1999, citados por Balter, 2000; Landman, 1993), así como en la influencia del uso y de la falta de uso de las partes corporales en dichos caracteres

heredados (Burkhardt, 2013; Choi & Mango, 2014; Ho, 1996). Es más, en el capítulo V de *El Origen de las Especies*, en la sección "Efectos del uso y de la falta de uso", Darwin emplea una retórica que se parece muchísimo a la de Lamarck en el siguiente pasaje (Locker, s.f.), aunque no haya citado explícitamente al francés (Ho, 1996): "puede haber poca duda de que el uso, en nuestros animales domésticos, fortalece y aumenta algunas partes, y la falta de uso las reduce; y que esas modificaciones son heredadas" (Darwin, 1859). Compárese con las dos leyes que había enunciado Lamarck en 1809 (recordando que, en su contexto académico, el término generación se refería más o menos a lo que hoy llamamos reproducción):

> Primera Ley.
> En todo animal que no ha sobrepasado el término de sus desarrollos, el empleo más frecuente y sostenido de un órgano cualquiera, fortalece poco a poco ese órgano, lo desarrolla, lo aumenta, y le da una potencia proporcional a la duración de ese empleo; mientras que la falta constante de uso de tal órgano, lo debilita insensiblemente, lo deteriora, disminuye progresivamente sus facultades, y termina por hacerlo desaparecer.
> Segunda Ley.
> Todo lo que la naturaleza ha hecho adquirir o perder a los individuos por influencia de las circunstancias a las que su raza se encuentra desde hace tiempo expuesta, y, en consecuencia, por influencia del empleo predominante de tal órgano, o por la [influencia] de una falta constante de uso de tal parte; ésta lo conserva mediante la generación a los nuevos individuos que provienen de aquellos […]. (Lamarck, 1809)

No obstante, más tarde el término neodarwinismo fue aplicado a Weismann y sus seguidores, todos los cuales se oponían a la herencia de caracteres adquiridos (Haig, 2007); esto ciertamente contribuyó a la confusión posterior, que se ha traducido en vincular directamente a Darwin con tales añadidos ulteriores.

En realidad, puede apreciarse que no es la presencia/ausencia de la idea de la herencia de caracteres adquiridos lo que hace la diferencia entre Lamarck y Darwin, sino la ausencia/presencia de la idea de selección natural. No es con Darwin, sino con la convicción de Weismann de que los cambios ocurridos a nivel somático no podían alcanzar las células germinales (Heard & Martienssen, 2014; Ho, 1996), que el azar entró en escena, expulsando a la posibilidad de influencia directa del ambiente sobre los caracteres heredados. Es por ello que los cambios epigenéticos, aun cuando son detonados por el ambiente y heredables a través de varias generaciones, no justifican el tipo de desenterramiento de que Lamarck está siendo objeto, puesto que se estima que están sometidos a la selección natural, y la combinación "cambios detonados por el ambiente heredables" + "selección natural" está en todo caso más cerca de la teoría de Darwin que de la lamarckiana. De hecho, en *El Origen de las Especies*, Darwin (1859) identificó "la herencia de caracteres adquiridos como una de las fuentes de variación sobre las cuales la selección natural actúa" (en palabras de Burkhardt, 2013, p. 802). En este sentido, aun Jablonka y Lamb, quienes se autocalifican como lamarckianas, reconocen que la herencia lamarckiana de caracteres puede explicar la adaptación, pero no la adaptabilidad, y que esta última solamente es explicable con la ayuda de la selección natural darwiniana (citado por Ho, 1996). En todo caso, como indican Heard & Martienssen (2014, p. 104), "a pesar de que la variación epigenética heredable claramente existe en la naturaleza, es muy importante distinguir entre la epivariación azarosa sobre la que actúa la selección y la variación epigenética inducida por el ambiente" (evidentemente, es esta segunda la que se aproximaría más a lo genuinamente lamarckiano).

Esta última cita ejemplifica las precauciones que es necesario tomar antes de hablar a la ligera sobre un regreso de Lamarck. Asimismo, según indica Szyf (2014), si bien es cierto que varios estudios epidemiológicos en humanos e investigaciones realizadas con modelos animales sugieren una transmisión no genética de la experiencia, y de caracteres adquiridos en respuesta a la exposición a pesticidas, y si bien algunos de esos estudios han demostrado que los rasgos adquiridos se transmitieron por la vía de la línea germinal más allá de la última generación cuya línea germinal fue directamente expuesta al factor de interés, falta determinar si se trata de un fenómeno organizado, dirigido, o si los factores a los cuales los padres fueron expuestos simplemente aumentaron el ruido estocástico en el epigenoma, resultando en una distribución modificada de fenotipos en las generaciones siguientes (lastimosamente, Szyf no especifica de qué estudios se trata exactamente).

Por otra parte, incluso Jablonka y Lamb (1995, citadas por Ho, 1996), quienes habrían presentado ejemplos de evidencias a favor de la existencia de variaciones epigenéticas dirigidas (no azarosas), habrían

reconocido que no todas son adaptativas, puesto que algunas son perjudiciales para el organismo correspondiente (Ho, 1996). De hecho, de acuerdo con Heard y Martienssen (2014), al igual que las mutaciones convencionales (genéticas), la mayor parte de variaciones epigenéticas son neutras o bien nocivas.

En ese sentido, tras leer por ejemplo al convincente Haig (2007), desenterrar a Lamarck resulta francamente ocioso, dado que no solo lo esencial de Darwin, sino incluso lo esencial del neodarwinismo parece salir invicto tras los descubrimientos epigenéticos. Las mutaciones epigenéticas no serían más que una fuente de variación adicional a la que proveen las mutaciones clásicas (Ho, 1996) y constituirían una propiedad del genoma mismo, que habría evolucionado gracias a la selección natural (Haig, 2007).

Haig (2007) añade que, por otra parte, las mutaciones convencionales también pueden deberse a la acción directa del ambiente (radiaciones, etc.), lo que contradice la naturaleza revolucionaria de los descubrimientos sobre la herencia de caracteres adquiridos en el caso de la epigenética –un malentendido que Haig atribuye al hecho de que este último término no tiene un significado único.

A propósito de polisemia, otra fuente de equivocación respecto a Lamarck es la diversidad de significados que adoptaron términos derivados de su nombre, como lamarckismo o lamarckiano (de la misma manera en que el término darwinismo no siempre corresponde a todo lo que Darwin sostuvo). Aquí la intención no es ahondar exhaustivamente en esa gama de matices, sino solamente referirnos a un caso, el del adjetivo neolamarckiano. De hecho, si los recientes descubrimientos de la epigenética han desenterrado a alguien, no parece tratarse de Lamarck, sino más bien de los neolamarckianos franceses de los siglos XIX-XX, ya que para ellos "la adaptación era el resultado de una acción físicoquímica directa del ambiente en los organismos y su protoplasma, y la transmisión de esas modificaciones a la descendencia" (Morange, 2010, p. 515). Además, a diferencia de Lamarck –por obvias razones–, consideraban esa transmisión como un complemento de la selección natural darwiniana. A ello puede añadirse que, desde su enfoque materialista, querían descubrir los mecanismos subyacentes gracias a experimentos de laboratorio (Morange, 2010). Caullery, por ejemplo, le habría acordado gran importancia tanto al ambiente (como motor de la evolución) como a la genética (Morange, 2010), una mezcla más cercana al discurso epigenético actual. De hecho, Morange propone otro punto en común entre tales neolamarckianos y los epigenetistas: las dificultades para conciliar "la existencia de la plasticidad y la transmisión hereditaria estable de las modificaciones adquiridas a través de esta plasticidad" (p. 517). En otras palabras, asociar la epigenética con lo lamarckiano tendría más cabida si se le antepone a este adjetivo el prefijo neo.

Ahora bien, existen indicios de que las mutaciones epigenéticas sí podrían tener el potencial de ser adaptativas y aun de "responder a desafíos ambientales" (Heard & Martienssen, 2014). Por otra parte, la importancia de tomar distancia respecto al neodarwinismo clásico reside en que las variaciones epigenéticas podrían permitir una adaptación al ambiente más rápida que la explicada por mutaciones clásicas (Richards, 2006, citado por Heard & Martienssen, 2014). ¿Sí está ocurriendo entonces una pequeña revolución, después de todo? De ser así, ¿habrá en ella cierto espacio para la contribución de Lamarck respecto de una evolución no sujeta a la selección natural –sino dirigida– y de la herencia de nuevos hábitos adquiridos en respuesta a cambios ambientales?

¿Está de vuelta una parte de Lamarck después de todo?

Hay que reconocer que en este siglo, ciertas investigaciones han revelado hechos sorprendentes que inspiran la evocación de Lamarck. Es el caso del estudio de Kaati, Bygren y Edvinsson (2002) sobre algunos efectos de la nutrición de niños (en un período específico de su crecimiento, previo a la pubertad) sobre la salud de sus futuros nietos. Si aquellos niños fueron sobrealimentados, los nietos correrían un mayor riesgo de morir por diabetes (cuatro veces más), y los investigadores sostenían que "un sesgo de selección parecía improbable" en su estudio.

Un segundo ejemplo sorprendente, aunque concerniente apenas a las generaciones P0, F1 y F2, es el de la herencia de un comportamiento adquirido por parte del ratón, aunque cabe aclarar que, tal como Heard y Martienssen (2014) lo exponen, cuando las transmisiones de caracteres adquiridos no alcanzan más que esas generaciones, pueden explicarse sin recurrir al concepto de transmisión transgeneracional, dado que el factor ambiental detonante del cambio podría afectar directamente a los gametos en las gónadas de la generación P0, alcanzando automáticamente a la generación F1 y, si el animal afectado es una hembra y está embarazada

al momento de ser expuesta al factor ambiental, tanto los fetos en su interior como los gametos de estos últimos pueden ser directamente afectados, alcanzándose automáticamente a la generación F2. Ahora bien, volviendo al caso sorprendente, se condicionó a ratones al asociar un olor específico (de acetofenona) a un choque eléctrico ligero que suscitaba una reacción de sobresalto, y resultó que esta reacción fue transmitida a los descendientes (F1 y F2) que no fueron sometidos al condicionamiento traumático; es más, ese comportamiento adaptativo no fue la única modificación que apareció en los descendientes, sino también diferencias identificables en los niveles neuroanatómico y epigenético (Dias & Ressler, 2014). Algunos descendientes nacieron incluso con un bulbo olfativo modificado, en el cual algunos glomérulos, que correspondían al olor específico, eran más grandes. Los investigadores se aseguraron de que la transmisión hubiera tenido lugar por la vía de la línea germinal y no a través de un aprendizaje cultural, pues se valieron de la fertilización in vitro (Szyf, 2014). Ahora bien, quedan en el aire dos interrogantes: si la trasmisión se habría dado más allá de la generación F2, y qué tan común o extraordinario es ese tipo de transmisión de un comportamiento.

En todo caso, en los mamíferos (a diferencia de lo que sucede con las plantas), las marcas epigenéticas que podrían ser transmitidas de una generación a otra (metilación del ADN, por ejemplo) son normalmente borradas en la línea germinal (Heard & Martienssen, 2014) y, al menos hasta hace recientemente, no se había documentado la transmisión de caracteres adquiridos por más de tres generaciones. El famoso ejemplo del cuello de la jirafa alargándose durante varias generaciones de una manera lamarckiana sigue constituyendo entonces un escenario difícil de concebir.

De hecho, parece que generalmente la transmisión epigenética transgeneracional de caracteres tiende a disminuir a lo largo de las generaciones hasta desvanecerse, una vez que el factor ambiental detonante del cambio ha desaparecido (Burggren, 2014). En este punto, podría injustamente pensarse que la transmisión de caracteres a lo largo de pocas generaciones sería incompatible con las ideas de Lamarck. Sin embargo, en su curso de 1802, explicó que una modificación adquirida por un órgano, por efecto de un hábito de uso suficiente, se transmitía (siempre y cuando fuera común a los progenitores) a los descendientes "sometidos a las mismas circunstancias" (Lamarck, 1802, p. 61). Así, en este caso sí que se le podría dar algo de razón a la luz de la epigenética.

En ese sentido, otro caso interesante que podría ser tildado de lamarckiano, pero que no corresponde con la observación anterior –y que por lo tanto, a pesar de las apariencias, se constituye en un punto en contra de la teoría de Lamarck– es el de la herencia de un comportamiento adquirido en el gusano *Caenorhabditis elegans*. Al parecer, si se exponen cuatro generaciones sucesivas a ciertas sustancias olorosas atrayentes, la mejora del comportamiento de quimiotactismo positivo se mantiene durante más de 40 generaciones (Remy, 2010).

Queda entonces claro que, con o sin Lamarck, vale la pena abrirle un espacio a la posibilidad de que comportamientos modificados a consecuencia de cambios ambientales jueguen un papel en la microevolución.

Conclusión

Hemos visto que la nueva popularidad de Lamarck relacionada con el desarrollo de la epigenética se basa en varias creencias erróneas, en parte debidas al desconocimiento de su obra y de la de Darwin, así como de la historia de las ciencias de la vida en general. Según esas creencias equivocadas, la herencia de caracteres adquiridos sería una creación original de Lamarck, así como la idea central de su teoría de la evolución, y habría estado ausente en el pensamiento de Darwin. En realidad, Darwin también estaba convencido de la herencia de caracteres adquiridos, por lo que, respecto a los hallazgos de la epigenética, dentro de la cual se le guarda un debido espacio al concepto de selección natural, probablemente sería más certero hablar del regreso de Darwin que del de Lamarck.

Como también se vio, si se trata de asociar este último nombre a la epigenética, en todo caso habría que tomar el adjetivo correspondiente (lamarckiano) y agregarle el prefjio neo para aludir a un cierto retorno de los neolamarckianos franceses, puesto que en ellos podían encontrarse elementos que se acercan a ciertas ideas epigenéticas recientes: una influencia directa del ambiente; el hecho de que esta influencia se produzca a nivel físicoquímico; la posibilidad de transmisión de los cambios resultantes a la progenie; y todo ello, sin excluir el mecanismo de selección natural darwiniano.

En cualquier caso, tomando en cuenta el componente innovador de la teorización de Lamarck, y dado que incluso en algunas palabras de Darwin pareciera haber ecos de sus conceptos, habría que reconocer, como habría dicho el genetista Coen según varias fuentes, que "Lamarck fue un verdadero pionero de la teoría evolutiva".

Referencias

Balter, M. (2000). Was Lamarck just a little bit right? *Science, 288*(5463), 38. doi: 10.1126/science.288.5463.38

Bucher, É. (2013). The return of Lamarck? *Frontiers in Genetics, 4*(10), 1-2. doi: 10.3389/fgene.2013.00010

Burggren, W. W. (2014). Epigenetics as a source of variation in comparative animal physiology – or – Lamarck is lookin' pretty good these days. *Journal of Experimental Biology 217* (5), 682-689. doi: 10.1242/jeb.086132

Burkhardt, R. W. (2013). Lamarck, evolution, and the inheritance of acquired characters. *Genetics, 194*(4), 793-805. doi: 10.1534/genetics.113.151852

Choi, Y., & Mango, S. E. (2014). Hunting for Darwin's gemmules and Lamarck's fluid: Transgenerational signaling and histone methylation. *Biochimica et Biophysica Acta, 1839*(12), 1440-1453. doi: 10.1016/j.bbagrm.2014.05.011

Cubas, P., Vincent, C., & Coen, E. (1999). An epigenetic mutation responsible for natural variation in floral symmetry. *Nature, 401*(6749), 157-161. doi: 10.1038/43657

Darwin, C. (1859). *The Origin of Species, Chapter 5: Laws of Variation.* Recuperado el 11 de Abril de 2017, de The TalkOrigins Archive: http://www.talkorigins.org/faqs/origin/chapter5.html

David, B., Cohen, G., & Dessaint, J.-P. (2009). *Génétique environnementale et épigénétique ou la réhabilitation de J. B. Lamarck.* Recuperado el 19 de Diciembre de 2014, de archives-ouvertes.fr: https://halshs.archives-ouvertes.fr/pasteur-00434412/document

Dias, B. G., & Ressler, K. J. (2014). Parental olfactory experience influences behavior and neural structure in subsequent generations. *Nature Neuroscience, 17*(1), 89-96. doi: 10.1038/nn.3594

Francès, F. (2012). ¿Vuelve Lamarck? *Gaceta Internacional de Ciencias Forenses,* (4), 5-6.

Haig, D. (2004). The (dual) origin of epigenetics. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology. LXIX*, págs. 67-70. New York: Cold Spring Harbor Laboratory Press.

Haig, D. (2007). Weismann rules! OK? Epigenetics and the Lamarckian temptation. *Biology and Philosophy, 22*(3), 415-428. doi: 10.1007/s10539-006-9033-y

Haig, D. (2012). Commentary: The epidemiology of epigenetics. *International Journal of Epidemiology, 41*(1), 13-16. doi: 10.1093/ije/dyr183

Heard, E., & Martienssen, R. A. (2014). Transgenerational epigenetic inheritance: Myths and mechanisms. *Cell, 157*(1), 95-109. doi: 10.1016/j.cell.2014.02.045

Ho, M. W. (1996). Why Lamarck won't go away. *Annals of Human Genetics, 60*(1), 81-84. doi: 10.1111/j.1469-1809.1996.tb01176.x

Jablonka, E., & Lamb, M. J. (1995). *Epigenetic Inheritance and Evolution: The Lamarckian Dimension.* Oxford: Oxford University Press.

Jablonka, E., & Lamb, M. J. (2005). *Evolution in Four Dimensions. Genetic, Epigenetic, Behavioral, and Symbolic Variation in the History of Life.* Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.

Kaati, G., Bygren, L., & Edvinsson, S. (2002). Cardiovascular and diabetes mortality determined by nutrition during parents' and grandparents' slow growth period. *European Journal of Human Genetics, 10*(11), 682-688. doi: 10.1038/sj.ejhg.5200859

Lamarck, J.-B. (1801). *Système des animaux sans vertèbres.* Recuperado el 3 de Diciembre de 2017, de Œuvres et rayonnement de Jean-Baptiste Lamarck: http://www.lamarck.cnrs.fr/ice/ice_book_detail.php?lang=fr&type=text&bdd=koyre_lamarck&table=ouvrages_lamarck&bookId=7&typeofbookId=1&num=0

Lamarck, J.-B. (1802). *Recherches sur l'organisation des corps vivans.* Recuperado el 4 de Diciembre de 2017, de Œuvres et rayonnement de Jean-Baptiste Lamarck: http://www.lamarck.cnrs.fr/ice/ice_book_detail.php?lang=fr&type=text&bdd=lamarck&table=ouvrages_lamarck&bookId=9&typeofbookId=1&num=0

Lamarck, J.-B. (1809). *Philosophie zoologique.* Recuperado el 4 de Diciembre de 2017, de Œuvres et rayonnement de Jean-Baptiste Lamarck: http://www.lamarck.cnrs.fr/ice/ice_book_detail.php?lang=fr&type=text&bdd=lamarck&table=ouvrages_lamarck&bookId=29&typeofbookId=1&num=0

Lamarck, J.-B. (1815-1822). *Histoire naturelle des animaux sans vertèbres.* Recuperado el 4 de Diciembre de 2017, de Œuvres et rayonnement de Jean-Baptiste Lamarck: http://www.lamarck.cnrs.fr/ice/ice_book_detail.php?lang=fr&type=text&bdd=lamarck&table=ouvrages_lamarck&bookId=38&typeofbookId=1&num=0

Landman, O. (1993). Inheritance of acquired characteristics revisited. *BioScience, 43*(10), 696-705. doi: 10.2307/1312341

Locker, D. (s.f.). *L'épigénétique ou Lamarck pourrait-il avoir raison ?* Recuperado el 17 de Diciembre de 2014, de http://daniel.locker.perso.sfr.fr/article%20vulgarisation/resume%20Darwincor2612010.pdf

Morange, M. (2010). What history tells us: XXII. The French neo-Lamarckians. *Journal of Biosciences, 35*(4), 515-517. doi: 10.1007/s12038-010-0058-7

Morange, M. (2013). What history tells us: XXXII. The long and tortuous history of epigenetic marks. *Journal of Biosciences, 38*(3), 451–454. doi: 10.1007/s12038-013-9354-3

Nanney, D. L. (1958). Epigenetic control systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 44*(7), 712-717. doi: 10.1073/pnas.44.7.712

Nicolosi, G., & Ruivenkamp, G. (2012). The epigenetic turn: Some notes about the epistemological change of perspective in biosciences. *Medicine Health Care and Philosophy, 15*(3), 309-319. doi: 10.1007/s11019-011-9342-z

Remy, J.-J. (2010). Stable inheritance of an acquired behavior in *Caenorhabditis elegans*. *Current Biology, 20*(20), R877-R878. doi: 10.1016/j.cub.2010.08.013

Richards, E. (2006). Inherited epigenetic variation--revisiting soft inheritance. *Nature Reviews Genetics, 7*(5), 395-401. doi: 10.1038/nrg1834

Ruiz Rejón, M. (2015). *Epigenética: ¿vuelve el Lamarckismo?* Recuperado el 13 de Abril de 2017, de OpenMind: https://www.bbvaopenmind.com/epigenetica-vuelve-el-lamarckismo/

Sano, H. (2010). Inheritance of acquired traits in plants, reinstatement of Lamarck. *Plant Signaling & Behavior, 5*(4), 346-348. doi: 10.4161/psb.5.4.10803

Sawan, H., & Parvizi, J. (2013). *Science of epigenetics: Lamarck was right after all.* Recuperado el 26 de Diciembre de 2014, de Orthopedics Today: http://www.healio.com/orthopedics/biologics/news/print/orthopedics-today/%7Bce137c67-1e1d-41a9-9892-2734f1b9b4c7%7D/science-of-epigenetics-lamarck-was-right-after-all

Smythies, J., Edelstein, L., & Ramachandran, V. (2014). Molecular mechanisms for the inheritance of acquired characteristics—exosomes, microRNAs huttling, fear and stress: Lamarck resurrected? *Frontiers in Genetics, 133*(5). doi: 10.3389/fgene.2014.00133

Szyf, M. (2014). Lamarck revisited: epigenetic inheritance of ancestral odor fear conditioning. *Nature Neuroscience, 17*(1), 2-4. doi: 10.1038/nn.3603

West-Eberhard, M. J. (2007). Dancing with DNA and flirting with the ghost of Lamarck. *Biology and Philosophy, 22*(3), 439-451. doi: 10.1007/s10539-006-9034-x

Ciencia, Tecnología y Salud
Vol. 5 Num. 2 2018
ISSN: 2410-6356 (electrónico) / 2409-3459 (impreso)

Reporte de Casos / Case Report

Modelo de negocio de restauración productiva de *Abies guatemalensis* Rehder utilizando plantas nodrizas para su establecimiento

Business model of productive restoration of Abies guatemalensis *Rehder using nurse plants for its establishment*

José Vicente Martínez Arévalo

Subárea Ciencias Biológicas, Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

***Autor al que se dirige la correspondencia:** josevm2000@yahoo.com

Recibido: 19 de agosto 2017 / Revisión: 19 de junio 2018 / Aceptado: 13 de agosto 2018

Resumen

El presente reporte de caso tuvo como objetivo generar el modelo de negocios para el pinabete (*Abies guatemalensis* Rehder) en restauración, no se pretende hacer un análisis profundo de la producción de árboles de pinabete, únicamente mostrar que la producción se puede combinar con la conservación. En la región alta del altiplano occidental de Guatemala hay muchas tierras degradadas fuera de bosques, donde la sucesión vegetal ha promovido el crecimiento de especies arbustivas, útiles como nodrizas en el establecimiento de pinabete para protegerlas de heladas y lograr establecimiento mayor a 80 %, lo cual ya se ha puesto en práctica por varios silvicultores locales. Se realizó un análisis técnico financiero sobre la producción de pinabete con doble propósito: especie comercial y para la restauración de áreas degradadas. El modelo de negocios se estableció para 0.25 ha, con un precio de venta por árbol de Q. 300, con y sin incentivos forestales, considerando establecer previamente plantas arbustivas. Los resultados indican que con una inversión de Q. 45,227 durante ocho años a una tasa de descuento del 13 %, el Valor Actual Neto (VAN) toma valores entre Q. 398,576 a 742,020 con una Tasa Interna de Rendimiento (TIR) entre 30 y 50 %. A la vez se preparó un plan de negocios utilizando la metodología Canvas, que establece un plan estratégico que permite visualizar lo que actualmente se está realizando y qué situaciones hay que mejorar. El modelo propuesto puede utilizarse de una forma mixta para la conservación al dejar al menos un 30 % de los árboles, la otra parte se puede utilizar para comercialización a partir del octavo al 12do año de forma sostenible.

Palabras claves: Conservación, restauración, plan de negocios, plantas nodrizas, Tasa interna de rendimiento

Abstract

The present case study aimed to generate the business model for the Guatemalan fir (*Abies guatemalensis* Rehder) under restoration process. In the highlands of the altiplano region in western Guatemala there are many degraded lands outside of forests, where the ecological succession has promoted the growth of shrub species that help to the establishment of the fir and to protect it from frost. This condition also helped the specie to achieve more than 80 % of survival rate. The method has been implemented by several local silvicultors. A technical and financial analysis was carried out on the production of fir with two objectives: production of commercial Christmas trees and for the restoration of degraded areas. The business model was established for an area of 0.25 ha, with an estimated market price per tree of Q. 300, with and without forestry incentives, assuming previously establish shrub plants. The results indicate that with an investment of Q. 45,227 for eight years at a discount rate of 13 %, the Net Present Value (NPV) takes values between Q. 398,576 to 742,020 with an Internal Rate of Return (IRR) ranging between 30 and 50 %. At the same time, a business plan was prepared using the Canvas methodology, which establishes a strategic plan that allows visualizing what is currently being done and what areas need improvement. The proposed model can be used in a mixed way for conservation by leaving at least 30 % of the trees; the other part can be used for trading the trees from the eighth to the twelfth years old in a sustainable way.

Keywords: Conservation, restoration, business plan, nurse plants, internal rate of return

La reproducción total o parcial del contenido e imágenes de esta publicación se rige de acuerdo a normas internacionales sobre protección a los derechos de autor, con criterio especificados en la licencia Creative Commons (CC BY-NC-SA 4.0)

Introducción

La restauración de ecosistemas se conceptualiza de varias formas, en este documento se reconoce la de restauración del paisaje forestal (RPF), que se define como el "*proceso destinado a recuperar la integridad ecológica y mejorar el bienestar humano en zonas deforestadas o paisajes forestales degradados*" (Organización Internacional de las Maderas Tropicales, & Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, 2005). La RPF se asocia con la rehabilitación, relacionada con la capacidad del bosque de proporcionar bienes y servicios de nuevo (Newton & Tejedor, 2011; Laestadius, Buckingham, Maginnis, & Saint-Laurent, 2015).

Es importante mostrar los beneficios tangibles que las comunidades humanas pueden tener de la restauración de ecosistemas, lo que es posible a través de la valoración de los servicios ecosistémicos (Ministerio del Medio Ambiente de Suecia, 2013). A partir de esto, se podrían elaborar modelos y planes de negocios. Un modelo de negocios se puede proponer para una actividad que ya está en funcionamiento y se desea mejorar, tal es el caso de *Abies guatemalensis* Rehder. Este análisis sirve para reducir el riesgo al fracaso, cuidar la imagen del empresario y conocer el rendimiento económico y financiero que se espera del negocio. Del modelo de negocios se puede desarrollar el plan de negocios que es un documento con el resultado de un proceso de planeamiento (Weinberger, 2009).

A. guatemalensis, conocida como pinabete es una especie endémica de Guatemala que crece en bosques en altitudes de 2,800 a 3,400 m de altitud; actualmente los bosques de pinabete están bastante reducidos, por lo que considera una especies en peligro de extinción y está protegida por el Convenio sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES) y el Estado de Guatemala, por lo que no es permitido hacer aprovechamiento a partir de bosques naturales (Andersen, Prado, Sorensen, & Kollmann, 2008; Martínez, Pérez, Rivera, & Velásquez, 2013). Sin embargo, los árboles y ramas de *A. guatemalensis*, tienen demanda en el mercado nacional como planta ornamental para la época navideña. Como alternativa el Instituto Nacional de Bosques (Inab) fomenta el establecimiento de plantaciones. Para el 2015 se tuvieron 499 plantaciones registradas con un área de 245.82 ha (Inab, 2016). El precio promedio por árbol puesto en el mercado es de Q. 460, además se elaboran coronas y guirnaldas con ramilla a un costo de Q. 60 cada una. Las plantaciones generalmente se establecen en monocultivo de acuerdo a criterios silviculturales convencionales. En las partes altas entre 2,800 a 3,400 m de altitud, la ocurrencia de heladas entre noviembre a febrero es alta, lo que constituye una razón para que el porcentaje de establecimiento del pinabete sin protección sea bajo.

Varios silvicultores tienen experiencias de establecimiento de árboles de pinabete, con fines de conservación y para aprovechamiento, utilizando criterios de restauración ecológica, que consisten en no realizar una limpia completa de sus áreas al momento de la siembra y utilizar arbustos ya establecidos, como plantas nodrizas. El porcentaje de establecimiento en esta modalidad, después de tres años es de 86 ± 6.29 % (Martínez et al., 2013).

Presentación del caso

Este ejercicio se realizó como una contribución de Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y Recursos Naturales, para alimentar la información de la Estrategia Nacional de Restauración del Paisaje Forestal y como insumo en la elaboración de reglamentos para la modalidad de Restauración de Tierras Degradas de la Ley de Fomento al Establecimiento, Recuperación, Restauración, Manejo, Producción y Protección de Bosques en Guatemala (Probosque). Se determinaron los costos de producción de plantación de pinabete para árbol de navidad, asumiendo áreas en proceso de restauración (Figura 1), en terrenos donde la sucesión ecológica inicia y lo que hay son plantas herbáceas y algunos arbustos dispersos (A en la Figura 1). Corresponden a tierras fuera de los actuales parches de bosques de *A. guatemalensis*, en su mayoría de propiedad municipal o privada.

El establecimiento de la plantación supone primero establecer arbustos como Salvia (*Buddleia megalocephala* Donn.-Sm.), Mozote (*Acaena elongata* L.), Mora (*Rubus trilobus* Ser.), Malacate (*Symphoricarpos microphyllus* Kunth), Arrayán (*Baccharis vaccinioides* Kunth) y Chicajol (*Stevia polycephala* Bertol.) (B en la Figura 1), dos a tres años después establecer los árboles de *A. guatemalensis* bajo la protección de los arbustos (C en la Figura 1).

Se determinaron costos, ingresos, Tasa Interna de Rendimiento (TIR) y Valor Actual Neto (VAN) (Andía, 2011; Carrazco & Domínguez, 2011), utilizando los siguientes escenarios: (1) Con incentivos forestales (50 % inversión de los primeros ocho años); (2) Con

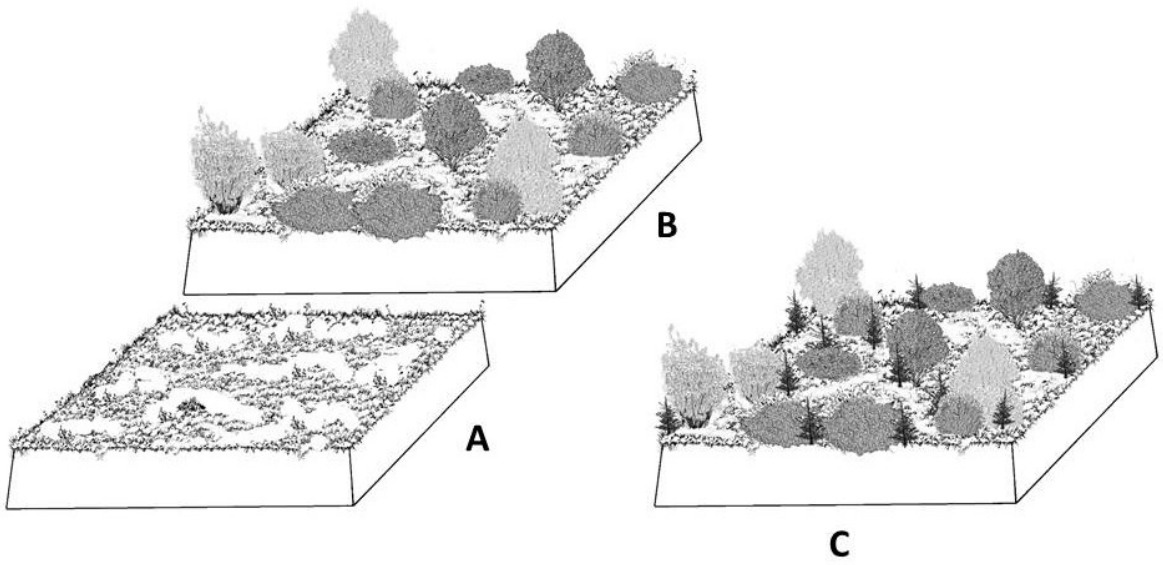

*Figura 1***.** Resumen visual del modelo propuesto para realizar el establecimiento de *A. guatemalensis* con protección de plantas nodrizas. A: Área abierta sin arbustos; B: Área abierta donde se establecen arbustos C: Área con arbustos, donde se establece pinabete.

incentivos forestales (80 % inversión de los primeros ocho años). (3) Con incentivos forestales PINPEP (los que actualmente se están otorgando) con venta en la ciudad capital de Guatemala; (4) Con incentivos forestales PINPEP (los que actualmente se están otorgando) venta en plantación; (5) Sin incentivos.

Se hizo el cálculo de costos e ingresos por un periodo de 12 años y para el cálculo de TIR y VAN se consideró la inversión de los primeros ocho años. En los cuales los primeros dos años son para el establecimiento de plantas nodrizas. El establecimiento de pinabete en el tercero y cuarto año. El precio de venta por árbol es de Q. 480 puesto en la ciudad capital, y precio de árbol en plantación Q. 300. Se supuso que a partir del tercer año hay ingresos por venta de leña de plantas nodrizas y subproductos de pinabete (coronas y/o guirnaldas). A partir del año ocho hay venta de árboles navideños, del octavo al doceavo año se estiman 538 árboles aprovechados en 0.25 ha. Se asume que para solventar los gastos totales el silvicultor tendrá que gestionar un préstamo bancario, por lo que calculó una tasa de descuento del 13 % (Figura 2).

Se elaboró un plan de negocios a partir de revisión de información secundaria y de entrevistas en campo, utilizando la metodología Canvas, que establece los siguientes nueve pasos principales: (1) Segmentos de mercado: define los diferentes grupos de personas u organizaciones a la cual una empresa apunta a alcanzar y servir; (2) Propuesta de valor: describe el paquete de productos y servicios que crean valor para un segmento de clientes específico; (3) Canales: describe como la empresa se comunica y alcanza a sus segmentos de mercado para entregar una propuesta de valor; (4) Relación con los clientes: describe los tipos de relaciones que una empresa establece con un segmento específico de mercado; (5) Fuentes de ingresos: representa el dinero que la empresa genera de cada segmento de mercado; (6) Recursos claves: describe los más importantes activos requeridos para hacer funcionar el modelo de negocios; (7) Actividades claves: describe las cosas más importantes que una empresa debe hacer para que un modelo de negocios funcione; (8) Socios claves: describe la red de abastecedores y socios que hacen que un modelo de negocios funcione; e, (9) Estructura de costos: describe todos los costos incurridos para operar un modelo de negocios (Osterwalder & Pigneur, 2010).

En la Tabla 1 se presentan los diferentes escenarios donde se aplicó el análisis financiero que determina

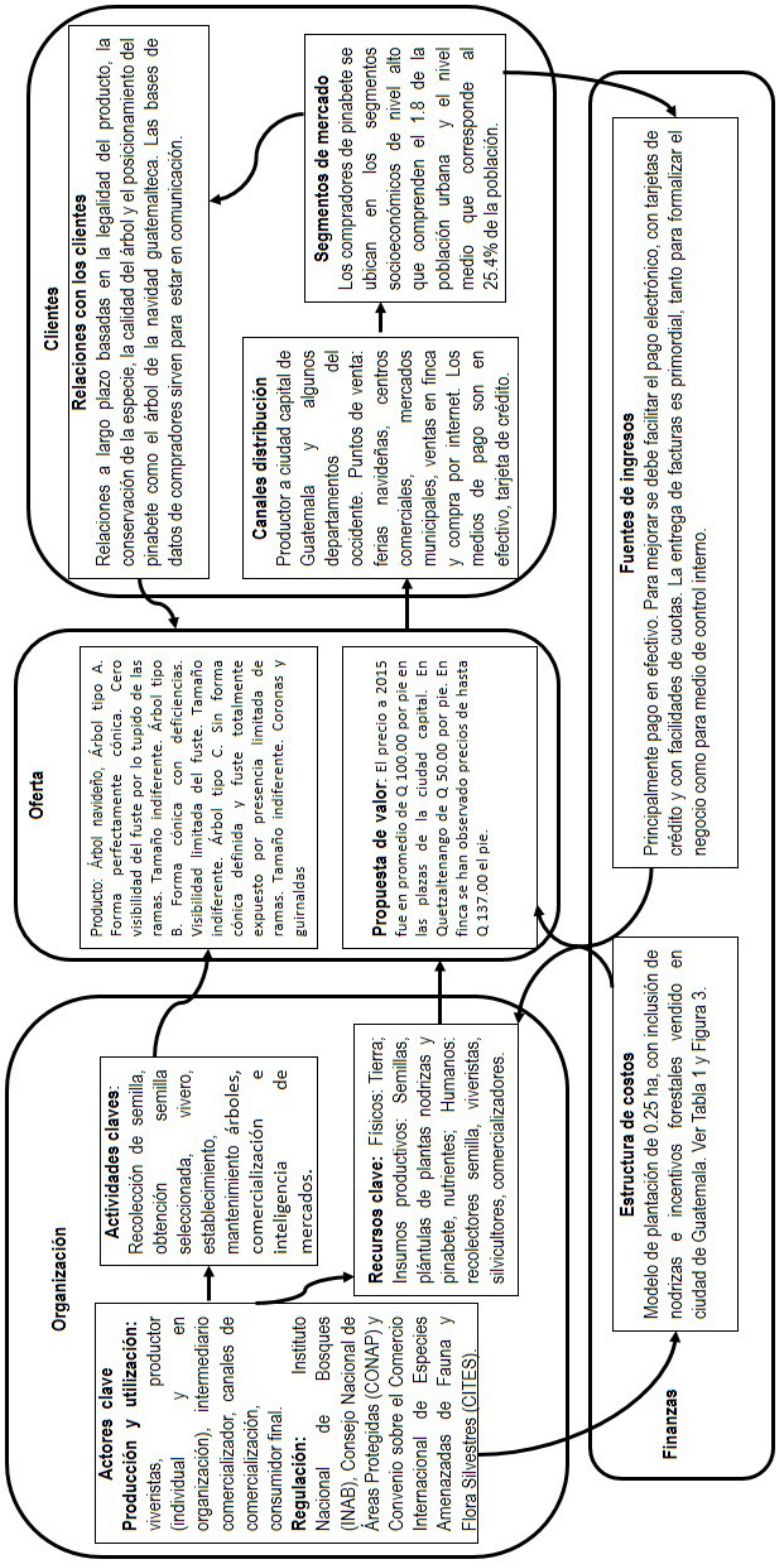

Figura 2. Modelo de negocios de la producción y comercialización de *A. guatemalensis*, con incentivos forestales, bajo el modelo de establecer primero plantas nodrizas y con la venta de los árboles en la ciudad de Guatemala.

Tabla 1
Cálculo de costos y beneficios del modelo de restauración productiva, con establecimiento de nodrizas en cinco supuestos para un área de 0.25 ha. Valor en quetzales

	Supuestos				
	1	2	3	4	5
Costos					
Establecimiento plantas nodrizas	3,023	3,023	3,023	3,023	3,023
Mano de obra	13,634	13,634	13,634	13,634	13,634
Insumos	19,063	19,063	19,063	19,063	19,063
Pago marchamos	4,569	4,569	4,569	4,569	4,569
Herramientas	444	444	444	444	444
Total costos variables	40,732	40,732	40,732	40,732	40,732
Costos fijos	4,695	4,695	4,695	4,695	4,695
Costo total	45,427	45,427	45,427	45,427	45,427
Ingresos					
Incentivos	14,134	22,614	4,578	4,578	0
Ingresos plantación	272,134	280,614	262,578	165,828	161,250
Ingresos-Costos total	226,708	235,188	217,152	120,402	115,823
VAN	725,030	742,020	703,920	405,785	398,576
TIR (%)	46	50	44	33	30

Nota. 1. Con incentivos forestales (50 % de la inversión de los primeros 8 años); 2. Con incentivos forestales (80 % de la inversión de los primeros 8 años). 3. Con incentivos forestales PINPEP (los que actualmente se están otorgando) con venta en ciudad capital; 4. Con incentivos forestales PINPEP (los que actualmente se están otorgando) venta en plantación; 5. Sin incentivos forestales.

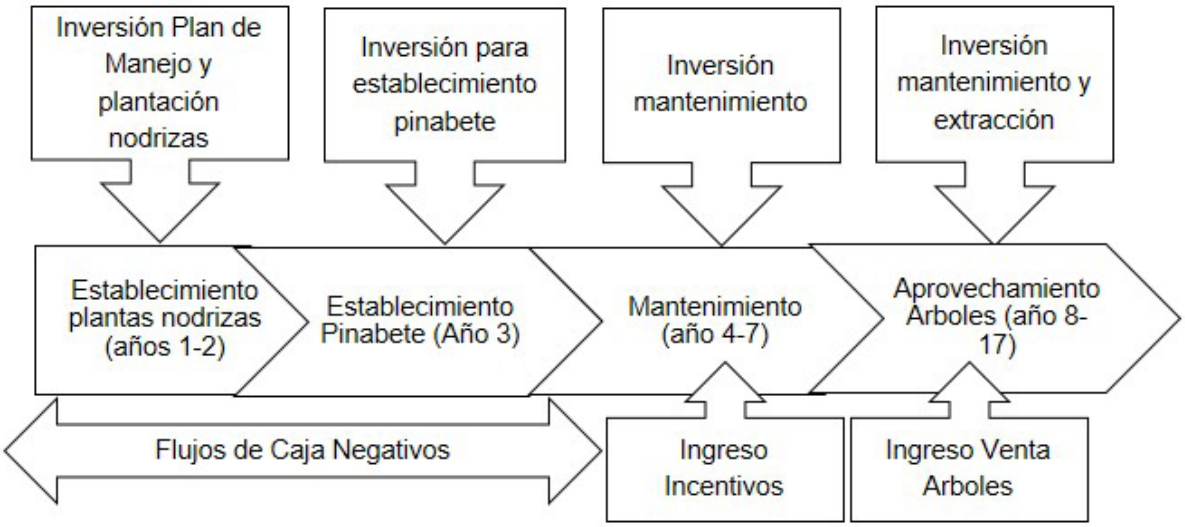

*Figura 3***.** Plan de establecimiento con plantas nodrizas y manejo de plantación de pinabete con fines de producción de árboles navideños.

la factibilidad del negocio. Se presume un mismo costo para los cinco modelos propuestos. Las mejores VAN y TIR se obtienen en los dos modelos donde se suponen el 50 y 80 % de incentivos sobre los costos de los primeros ocho años. En todos los escenarios hay ganancias, el de valor más bajo es aquel donde la actividad no tiene incentivo.

En la parte de organización, es muy importante señalar que las organizaciones de productores como la Asociación de Productores de Pinabete de Guatemala (Anpropigua), han contribuido a una mejor comercialización de los árboles de pinabete para navidad. También la Estrategia Nacional para la Conservación del pinabete ha contribuido para que tanto el tema de conocimiento como de regulación de la comercialización del pinabete tengan mejores frutos, ya que por medio de campañas anuales se estimula la utilización de árboles producidos en plantaciones y comercializados con marchamo y se desestimula la extracción ilegal. En el tema de oferta se puede notar que además de los árboles navideños, se ofrecen subproductos como las guirnaldas y las coronas que tienen mucha aceptación en los compradores.

En el tema de clientes se enfatiza en la relación que estos tienen con los canales de distribución y los segmentos de mercado. Y en el tema de finanzas, los costos y beneficios que presentaron resumidos en la Tabla 1 en la sección anterior, muestran que para el modelo el VAN y TIR económicamente se considera apropiado para el negocio. Como se indica en la Figura 3 el flujo de caja es negativo hasta el séptimo año, debido a que en esta etapa se empieza a obtener los primeros árboles para la venta.

Se presenta el modelo de plantación con inclusión de nodrizas e incentivos forestales vendido en ciudad de Guatemala; este análisis se calculó para un terreno de 0.25 ha. La estructura de costos para este modelo de negocio sugerido, se resume en el flujo de la Figura 3.

Discusión

Se muestra, que, a partir de una especie en peligro de extinción, cuyos bosques han sido depredados por mucho tiempo, especialmente en la época cercana a la navidad, para ofrecer como producto el árbol navideño (Andersen et al., 2008), se pueden encontrar soluciones para seguir una tradición, por medio de su producción sostenible. Cada año hay más productores de árboles de navidad de pinabete; esto muestra el interés que este mercado ha despertado, y los indicadores económicos presentados aquí, muestran que es un buen negocio. La propuesta presentada es asociada con la recuperación de ecosistemas destruidos en el altiplano occidental de Guatemala (Martínez et al., 2013), lo que le da mayor valor ambiental a un negocio verde (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014). Son muchas las áreas que están en estas condiciones entre los 2,300 a 2,800 m de altitud que pueden integrarse a esta actividad y que además pueden ser sujetas a incentivos forestales, ya que el recientemente aprobado Decreto de la Ley de fomento al establecimiento, recuperación, restauración, manejo, producción y protección de bosques en Guatemala (Probosque), contempla para el otorgamiento de incentivos este tipo de actividad (2015) (Figrua 3).

En el plan de negocios para pinabete aún se puede considerar una demanda insatisfecha ya que, cada año más de 1,000 árboles de *Abies* spp. son importados de países del norte en la época navideña. Para mejorar las ventas es importante la ampliación de formas de pago como la utilización de tarjetas de crédito, a través de sus programas de pagar por cuotas.

A pesar de que ya hay varios grupos organizados de productores de pinabete, es necesario ampliar esta organización a nivel local, ya que muchos silvicultores solos no pueden comercializar su producto en los principales mercados que se localizan en áreas urbanas. Las opciones presentadas en la producción de pinabete, utilizando plantas nodrizas para su protección muestran una alta rentabilidad. Son importante en este tema los incentivos ya que esto puede propiciar que más silvicultores ingresen en el negocio, lo que está contribuyendo también a la recuperación de áreas degradadas.

El modelo de negocios presentado, ordena las actividades que se realizan rutinariamente en la producción de árboles de pinabete de navidad y muestra que hay mejoras que pueden realizarse, para hacer de esto un verdadero negocio verde.

Agradecimientos

A la Oficina en Guatemala de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y Recursos Naturales (UICN), por el apoyo financiero a este estudio. A Liliana López y Juan José Ochaeta por su participación en el análisis económico. A la Mesa Nacional de Restauración del Paisaje Forestal, a través del Programa Nacional Forestal del Inab por sus contribuciones en la validación de este estudio.

Referencias

Andersen, U. S., Prado, J. P., Sorensen, M., & Kollmann, J. (2008). Conservation through utilization: A case study of the vulnerable *Abies guatemalensis* in Guatemala. *Oryx, 42*(2), 206-213. doi:10.1017/S0030605308007588

Andía, W. (2011). Indicador de Rentabilidad de Proyectos: El valor Actual Neto (VAN) o el Valor Económico Agregado (EVA). *Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial, 14*(1), 15-18.

Carrazco, G., & Domínguez, J. M. (2011). ¿Qué es la TIR de un proyecto de inversión? *Extoikos,* (2), 129-130.

Decreto de la Ley de fomento al establecimiento, recuperación, restauración, manejo, producción y protección de bosques en Guatemala (PROBOSQUE), 2-2015. Diario de Centroamérica (27 de octubre 2015).

Instituto Nacional de Bosques. (2016). *Estadísticas producción pinabete*. Delegación de pinabete, Departamento de Ecosistemas Estratégicos Forestales Estratégicos, Dirección de Manejo y Conservación de Bosques. Guatemala: Autor

Laestadius, L., Buckingham, K., Maginnis S., & Saint-Laurent, C. (2015). Before Bonn and beyond: the history and future of forest landscape restoration. *Unasylva, 66*(3), 11-18.

Martínez, J. V., Pérez, M., Rivera M., C. O., & Velásquez, M. M. (2013). Integración del conocimiento científico y el tradicional en los procesos de restauración de los bosques de pinabete (*Abies guatemalensis* Rehder), San Marcos, Guatemala. *Tikalia, 31*(1), 73-91.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). *Plan nacional de negocios verdes*. Bogotá, Colombia: Autor

Ministerio del Medio Ambiente de Suecia. (2013). *Haciendo visibles los valores de los servicios ecosistémicos*. *Propuestas para mejorar el bienestar mediante la biodiversidad y servicios ecosistémicos* (Resumen de SOU 2013:68). Estocolomo: Autor.

Newton, A. C., & Tejedor, N. (Eds.). (2011). *Principios y práctica de la restauración del paisaje forestal: Estudios de caso en las zonas secas de América Latina*. Gland, Suiza: Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y Madrid, España, Fundación Internacional para la Restauración de Ecosistemas.

Organización Internacional de las Maderas Tropicales, & Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza. (2005). *Restaurando el paisaje forestal*. *Introducción al arte y ciencia de la restauración de paisajes forestales* (Serie Técnica OIMT No. 23). Yokohama, Japón: Autor

Osterwalder, A., & Pigneur, Y. (2010). *Generación de modelo de negocios*. Barcelona, España: Grupo Planeta.

Weinberger, K. (2009). *Plan de negocios. Herramienta para evaluar la viabilidad de un negocio*.

Ciencia, Tecnología y Salud
Vol. 5 Num. 2 2018
ISSN: 2410-6356 (electrónico) / 2409-3459 (impreso)

Reporte de Casos / Case Report

Detección de residuos de quinolonas en carne bovina de venta en mercados municipales de la ciudad de Guatemala

Quinolone antibiotic residues in beef meat sold in municipal markets of Guatemala City

Miriam J. Canet-Elgueta[1]*, Amílcar Dávila[1], Roderico Hernández[1], Manuel Lepe-López[2]

[1]Departamento de Investigación y Extensión, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad de San Carlos de Guatemala;[2] PhD Program in Conservation Medicine, Facultad de Ciencias de la Vida, Universidad Andrés Bello, Santiago, Chile.

***Autor al que se dirige la correspondencia:** miriamjcanet@hotmail.com

Recibido: 30 de noviembre 2017 / Revisión: 07 de marzo 2018 / Aceptado: 09 de octubre 2018

Resumen

La resistencia bacteriana es una amenaza creciente para la salud pública mundial. El mal uso y uso excesivo de antimicrobianos en personas y animales está acelerando este proceso. En el caso de residuos antimicrobianos en productos de origen animal, se sabe que producen reacciones alérgicas, así como inducción de resistencia en bacterias transmitidas por alimentos como *Salmonella*, *Campylobacter* y *Escherichia coli*. Este estudio tuvo como objetivo detectar la presencia de residuos de quinolonas en carne bovina de venta en mercados municipales de la ciudad de Guatemala. Se obtuvieron 161 muestras para análisis. La detección de quinolonas se realizó por metodología de Inmunoensayo Asociado a Enzima (Elisa). Siete de 161 (5%) contenían residuos de quinolonas. Los niveles medios (desviación estándar) detectados fueron 16.497(1.69) µg/kg; ningún límite fue superior al límite máximo residual permitido (100 µg/kg). Este estudio indicó que existen residuos de antibiótico en algunas carnes de res en Guatemala.

Palabras claves: Circulación, antibióticos, alimentos, resistencia

Abstract

Antimicrobial resistance is an increasingly serious threat to global public health. The misuse and overuse of antimicrobials in people and animals is an accelerating factor for this process. In the case of antimicrobial residues in animal origin products, it is known that they cause allergic reactions as well as induction of resistance in bacteria such as *Salmonella*, *Campylobacter* and *Escherichia coli*. This study aimed to find the presence of quinolones residues in beef meat. A total of 161 samples were collected from municipal markets in Guatemala City for analysis. Extraction and determination of quinolones was performed by Enzyme–linked Immunoassay (Elisa) methodology. Seven of 161 (5%) contained quinolone residues. The mean levels (±SE) of quinolones were 16.497(1.69) µg/kg; no limit was superior than the maximum residual limit allowed (100 µg/kg) by FDA. Even though none of the samples exceeded the upper limit it is important that some residues of quinolone were found.

Keywords: Circulation, antibiotics, resistance, food

La reproducción total o parcial del contenido e imágenes de esta publicación se rige de acuerdo a normas internacionales sobre protección a los derechos de autor, con criterio especificados en la licencia Creative Commons (CC BY-NC-SA 4.0)

Introducción

La resistencia bacteriana es una emergencia pública mundial y representa una amenaza a la salud humana y animal, generando una mayor morbilidad, mortalidad, estancia hospitalaria prolongada, así como fuertes repercusiones económicas para el sistema sanitario (Casellas, 2011). El principal factor de riesgo para el desarrollo de resistencia bacteriana es el uso inadecuado y abuso de los antibióticos en medicina humana y veterinaria (Meek, Vyas, & Piddock, 2015). En el sector de la producción animal los antimicrobianos son utilizados como promotores de crecimiento, con fines terapéuticos y profilácticos (Grande, Falcón, & Gándara, 2000) siendo los principales grupos las tetraciclinas, beta lactámicos, macrólidos, quinolonas y lincosaminas. Los antibióticos utilizados como promotores de crecimiento suponen un mayor riesgo ya que los mismos son utilizados por períodos prolongados de tiempo en concentraciones sub terapéuticas facilitando la presión selectiva de bacterias resistentes (Landers, Cohen, Wittum, & Larson, 2012). Los residuos de estas sustancias o sus metabolitos en la carne y otros alimentos de origen animal pueden causar efectos adversos en la salud de los consumidores (Landers et al., 2012).

Las quinolonas merecen un mayor escrutinio ya que no solamente pueden tener un efecto directamente tóxico y producir reacciones de hipersensibilidad, sino que además están asociadas a una mayor inducción de resistencia en bacterias transmitidas por alimentos como *Salmonella*, *Campylobacter* y *Escherichia coli* (Subbiah, Mitchell, & Call, 2016). Las mutaciones bacterianas ante el uso de quinolonas pueden ocurrir rápidamente, incluso durante la terapia antimicrobiana. El uso excesivo y continuo de tan solo un antibiótico perteneciente a esta familia de antimicrobianos puede generar resistencia a todo el grupo de quinolonas, limitando su efectividad en un futuro cercano (Bennett, Dolin, & Blaser, 2014).

La detección de residuos de quinolonas en diferentes productos de origen animal, desde carnes de animales terrestres y acuícolas hasta productos de miel de abeja (Chang, Wang, & Tsai, 2010; Karbiwnyk, Carr, Turnipseed, Andersen, & Miller, 2007; van Vyncht et al., 2002; Zhao, Li, Jiang, Li, & Shen, 2007), ha incrementado la preocupación en países de la Unión Europea, China y Estados Unidos resultando incluso en la prohibición del uso de enrofloxacina en varios sistemas de producción, tal como el caso de la avicultura (Food and Drug Administration, 2005).

La seguridad alimentaria exige la vigilancia y control de sustancias y residuos, tanto de origen animal como vegetal, en toda la cadena alimentaria desde la producción primaria hasta la distribución final (Garzón, 2009). Dentro de las técnicas existentes para la detección de residuos de antibiótico se destacan el empleo de biosensores por inmuno absorción ligado a enzimas (Elisa), así como cromatografía de gases (GC), cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) y cromatografía de gases acoplada a la espectrometría de masas (GC/MS) (Talero-Pérez, Medina, & Rozo-Núñez, 2014). El límite máximo residual (LMR) se define como aquella concentración aceptable de una sustancia en los tejidos comestibles de un animal (músculos, hígado, riñones, grasa, leche, miel y huevos) y que al ser ingerida por el ser humano no constituye ningún riesgo para su salud. Los LMR se fijan para cada especie animal y para cada tejido siendo el LMR permitido de quinolonas en el músculo de carne de vacuno de 100 µg/kg de acuerdo a lo establecido por la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA) de Estados Unidos y la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) (Garzón, 2009).

En Guatemala no existen leyes que regularicen el uso de antimicrobianos en medicina humana y veterinaria. No obstante, la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización de Salud Animal (OIE) han ofrecido directrices sobre el buen uso de antimicrobianos bajo el enfoque de 'una salud', dada la interrelación entre salud humana y salud animal. Estas estrategias internacionales priorizan entre sus objetivos mejorar la vigilancia y la investigación de la disponibilidad de residuos en alimentos.

El presente estudio exploró la circulación de quinolonas en carne de bovino expendida en mercados municipales de la ciudad capital respondiendo a dos preguntas de investigación: ¿Existe circulación de quinolonas en carne de bovino comercializada en los mercados municipales de ciudad de Guatemala? y de existir tales residuos, ¿Las cantidades de quinolonas circulantes son cercanas al límite máximo residual? Se espera que las respuestas a estas preguntas colaboren a entender la disponibilidad de este importante grupo de antimicrobianos en carne bovina expendida en Guatemala, dada la amenaza que la resistencia bacteriana representa para la salud humana.

Presentación del caso

Se realizó un muestreo no probabilístico por conveniencia recolectándose un total de 161 muestras de

carne corte costillar de los 23 mercados municipales ubicados en la ciudad de Guatemala durante los meses de junio y julio del 2017. Se analizó costillar por ser útil para monitoreo a bajo costo. Fueron muestreados la totalidad de puestos de carne en cada mercado municipal. Se preguntó a los vendedores de carne si conocían el origen del rastro donde procedía la carne. Las muestras fueron identificadas con lugar y fecha y conservadas en una hielera para preservar una temperatura de 7°C. Inmediatamente después de la recolección, las muestras fueron trasladadas al Laboratorio de Desarrollo de Soluciones Globales (DSG) en donde se realizó el análisis.

Los residuos de quinolonas se determinaron mediante la metodología Elisa usando la prueba Ridascreen Quinolones/Elisa ® (R-Biopharm AG, Darm stadt, Alemania). El ensayo se realizó de acuerdo con las directrices del fabricante con un único análisis por cada una de las muestras. La prueba mostró especificidad a ciprofloxacina (100 %), norfloxacina, enrofloxacina, marbofloxacina, danofloxacina, difloxacina, flumequin, ofloxacina (> 100%), sarafloxacina (43 %) y ácido oxolínico (24 %). El límite inferior de detección de la prueba es de 10 ppb (10 µg/kg).

Los datos fueron tabulados en MS Excel analizándose mediante el software XL STAT. Para las variables categóricas se realizó descripción de frecuencias y porcentajes y para las variables continuas, se estimó media y desviación estándar.

Siete muestras resultaron positivas a residuos de quinolonas, equivalente al 5 % del total de carne de bovino analizada (n = 161). Los niveles medios (desviación estándar) de residuos de quinolonas fueron de 16.49 (1.69) µg/kg en muestras positivas. Ninguna de las muestras presentó un límite superior al límite máximo residual permitido (100 µg/kg). Otras 80 muestras resultaron poseer trazas de quinolonas.

En relación a la ubicación de los rastros de donde provienen las muestras de carne, los vendedores informaron que 58/161 (36 %) ignora su origen, 38/161 (24 %) proviene de Petén y 14/161 (9 %) de Izabal y Chinautla, respectivamente. El resto de muestras provenían de Palencia, Retalhuleu, Jocotales, Villa Nueva, San José Pinula y Escuintla. En 11 % de los casos los vendedores se negaron a proporcionar el origen de la carne. Del total de muestras que provienen de Petén, 5/38 (13 %) fueron positivas para residuos de quinolonas. Del total de muestras positivas, 5/7 (71 %) provenían de rastros del departamento de Petén.

Discusión

Los residuos de antibióticos en los alimentos de origen animal suponen un problema de salud pública y un riesgo para la salud humana, ya que éstos han sido relacionados con reacciones de hipersensibilidad, así como inducción de cepas resistentes (Nisha, 2008). Teniendo en cuenta la importancia y las estrictas regulaciones en seguridad alimentaria, en muchos países se realizan periódicamente muestreos de residuos de antibióticos en alimentos como aves de corral, ganado y leche (Garzón, 2009). Respecto a residuos de antibiótico en ganado, en Turquía, Kaya, Yavuz, Akar, Liman y Filazi (1992) informaron que la tasa de residuos de antibióticos en bovino era del 18 % (15/85 muestras analizadas). En Sudán, 52/300 (17 %) bovinos mostraron resultados positivos para la presencia de antibióticos en uno o más órganos en muestras post mortem (riñón 10%, hígado 7.66 % y músculo 3 %) (Alla, Mohamed, & Abdelgadir, 2013). En Ghana, la prevalencia total de residuos de antibióticos en alimentos de origen animal fue del 21 % en 634 muestras analizadas (30 % en carne de res) (Donkor et al., 2011). Otro estudio demostró que 60/104 (57%) muestras de carne de res fueron positivas para quinolonas con niveles medios (desviación estándar) de 6.64 (1.11) µg/kg (Er et al., 2013). En Egipto de 600 bovinos analizados, 2 % presentó resultado positivo para residuos de oxitetraciclinas; 1 % por encima del LMR permitido (Morshdy, El-Atabany, Hussein, & Darwish, 2013). Omotoso y Omojola (2015) demostraron que mediante análisis microbiológico el 50, 55 y 40 % de las carnes de res, pollo y cerdo, respectivamente, fueron positivos para la presencia de residuos de antibióticos. En Vietnam se llevó a cabo un plan de seguimiento de antibióticos residuales en alimentos de origen animal entre 2012 y 2013 obteniendo un 7 % de positividad en las muestras de res analizada (Yamaguchi et al., 2015).

En Guatemala, no se conocían hasta ahora datos de la circulación de residuos de quinolonas en bovinos. En comparación con lo reportado en la literatura, se evidencia un menor porcentaje de positividad de detección de residuos de quinolonas (5 %). Esto puede deberse a múltiples factores entre los que cabe mencionar el alto costo de las quinolonas en el mercado y su mayor utilización en el sector avícola comparado con el sector ganadero. Por otra parte, estos resultados están sujetos a la cantidad de muestras obtenidas y a la carencia de repeticiones temporales y espaciales. Es preocupante

que se encontraron residuos de quinolonas únicamente con una muestra por sitio, sugiriendo que la probabilidad de encontrar residuos con muestreos más extensos sería mucho mayor a lo presentado en estos datos. Estudios realizados en el país han demostrado la presencia de cepas de *Salmonella* sp y *Campylobacter* sp aisladas en carne de pollo resistentes a enrofloxacina en un 52 y 59 %, respectivamente, cifra mayor a la reportada en el continente americano y otros continentes (Jarquín et al., 2015) demostrando de manera indirecta la utilización de quinolonas en el ámbito avícola veterinario.

Si bien la presencia de residuos de quinolonas fue baja en este estudio, debe considerarse que sean otros grupos de antimicrobianos los que se encuentren circulando en mayor cantidad, por lo que estudios que consideren su tamizaje son necesarios (Draisci et al., 2001). En Guatemala la presencia de residuos de antibióticos en productos para consumo humano ha sido estudiada; Martínez (2009) demostró que 12 % de 48 muestras de leche procedentes de 16 fincas ganaderas ubicadas en ocho departamentos (Chimaltenango, Chiquimula, Escuintla, Guatemala, Jutiapa, Santa Rosa, Suchitepéquez y Zacapa) contenían residuos de beta-lactámicos y tetraciclinas en tanto que Ramírez y Miranda (2015) encontraron tetraciclina en pechugas de pollo procedentes de una granja avícola ubicada en ciudad de Guatemala con niveles por encima del LMR permitido.

Nuestros resultados están basados en las capacidades del método Elisa, existiendo otras técnicas con mayor sensibilidad y especificidad para la búsqueda de residuos de antimicrobianos, de alto costo y poca disponibilidad en Guatemala, como la cromatografía líquida y la espectrofotometría de masa (Blasco, Picó, & Torres, 2007). No obstante el método Elisa es recomendado como una forma de tamizaje de muestras de una población carente de exploración, como en el presente caso que los esfuerzos no fueron dirigidos a un ingrediente activo particular (enrofloxacina) sino más bien a la presencia de una familia de antibióticos, dado que las reacciones cruzadas entre diferentes antibióticos relacionados estructuralmente otorgaron un aumento de la probabilidad de obtener un resultado positivo de las muestras (Aga et al., 2005). Lo anterior hace necesario continuar los esfuerzos de investigación de este grupo de antibióticos de forma singular, según los antimicrobianos con alta demanda comercial para el área de veterinaria en Guatemala.

Las bajas cantidades de residuos encontrados podrían ser explicados además por un cumplimiento en el tiempo de retiro de estos fármacos, ya sea por parte del productor o por exigencia del personal de rastro. Es importante tomar en cuenta que la ubicación de los rastros de donde provenían las carnes fue proporcionada por el vendedor al momento de la toma de muestra, limitando así la confiabilidad del dato. Cabe resaltar que una tercera parte de las personas que ofrecen carne de bovino en los mercados municipales de ciudad de Guatemala ignoran la procedencia del producto. Lo anterior es preocupante en términos de inocuidad de los alimentos, debido a que la trazabilidad es una práctica que debería ser habitual ofreciendo acceso a la información de la ubicación del origen y la trayectoria del producto hasta el consumidor final (Neira, 2003). Sin embargo, los esfuerzos gubernamentales de trazabilidad bovina se implementaron en Guatemala a partir del 2014 siendo éstos a la fecha inefectivos y por lo tanto poco útiles para medir resultados (Leal, 2016).

Por otra parte, el desconocimiento de la procedencia de la carne analizada podría ser explicado por la posibilidad de contrabando de carne de bovino al país, similar a otras actividades de este tipo consolidadas en Guatemala (Galemba, 2012). Es sabido que la mayoría de fincas productoras de ganado bovino del país se encuentran establecidas en la zona norte (Pérez, Holmann, & Schuetz, 2006), por lo que esto explicaría la cantidad de muestras positivas procedentes de Petén en nuestro análisis.

En el país existen varios rastros que no son aprobados por el Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación, debilitando el control, calidad e inocuidad del producto. Estudios que sean dirigidos a Petén deben realizarse considerando que es el departamento con mayor producción de ganado en el país. Lo anterior significaría que en dicha área se estén utilizando antimicrobianos de menor espectro y bajo costo diferente a las quinolonas, con el fin de reducir el impacto económico ante los desafíos que esta actividad presenta para Centroamérica (Guillen, Pomareda, Umaña, & Pérez, 1998).

Se considera que las muestras de carne obtenidas durante el período de estudio excluyen los riesgos para la salud en términos de la presencia de quinolonas, aunque se desconocen datos de la exposición crónica a estos residuos. En términos de prevención de la resistencia a los antibióticos en humanos, la baja cantidad de residuos de quinolonas observada en este estudio representa un resultado positivo. Debe sin embargo mantenerse un estricto control y monitoreo en el uso

de antimicrobianos en el sector veterinario debido a que en el país no existen políticas de Estado ni leyes que regulen su uso controlado. Los resultados obtenidos son válidos para una visión transversal del problema; empero, los resultados pueden ser de mayor valor ante un enfoque longitudinal, y, por lo tanto, ya verificada la circulación de quinolonas son necesarios los esfuerzos en monitoreo continuo para prevenir niveles cercanos al LMR.

La verificación en la circulación de quinolonas en productos de origen animal en ciudad de Guatemala abre la discusión sobre el uso de antimicrobianos en la ganadería guatemalteca, debido a la escasez de estudios en este tema y a la necesidad de incrementar los esfuerzos de investigación sobre los antimicrobianos y otros fármacos utilizados en la industria cárnica (e.g. clembuterol).

Agradecimientos

Esta investigación fue cofinanciada por Digi-Usac-2017, Proyecto: 4.8.63.1.02. Se agradece también a Wilson Valdez y a Luis Morales por sus comentarios y sugerencias para redactar la propuesta ingresada a la DIGI para obtener el financiamiento.

Referencias

Aga, D. S., O'Connor, S., Ensley, S., Payero, J. O., Snow, D., & Tarkalson, D. (2005). Determination of the persistence of tetracycline antibiotics and their degradates in manure-amended soil using enzyme-linked immunosorbent assay and liquid chromatography− mass spectrometry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 53*(18), 7165-7171. doi:10.1021/jf050415+

Alla, M. B. W., Mohamed, T. E., & Abdelgadir, A. E. (2013). Detection of antibiotics residues in beef in Ghanawa Slaughterhouse, Khartoum State, Sudan. *African Journal of Food Science, 5*(10), 574–580.

Bennett, J. E., Dolin, R., & Blaser, M. J. (2014). Mandell, Douglas, and Bennett's Principles and Practice of Infectious Diseases (8ª edición). Elsevier Health Sciences.

Blasco, C., Picó, Y., & Torres, C. M. (2007). Progress in analysis of residual antibacterial in food. *Trends in Analytical Chemistry*, *26*(9), 895-913. doi: 10.1016/j.trac.2007.08.001

Casellas, J. M. (2011). Antibacterial drug resistance in Latin America: Consequences for infectious disease control. *Revista Panamericana de Salud Pública*, *30*(6), 519-528.

Chang, C. S., Wang, W. H., & Tsai, C. E. (2010). Simultaneous determination of 18 quinolone residues in marine and livestock products by liquid chromatography/tandem mass spectrometry. *Journal of Food and Drug Analysis, 18*(2), 87-97.

Donkor, E. S., Newman, M. J., Tay, S. C., Dayie, N. T., Bannerman, E., & Olu-Taiwo, M. (2011). Investigation into the risk of exposure to antibiotic residues contaminating meat and egg in Ghana. *Food Control*, *22*(6), 869-873. doi:10.1016/j.foodcont.2010.11.014

Draisci, R., i Quadri, F. d., Achene, L., Volpe, G., Palleschi, L., & Palleschi, G. (2001). A new electrochemical enzyme-linked immunosorbent assay for the screening of macrolide antibiotic residues in bovine meat. *Analyst*, *126*(11), 1942-1946.

Er, B., Onurdağ, F. K., Demirhan, B., Özgacar, S. Ö., Öktem, A. B., & Abbasoğlu, U. (2013). Screening of quinolone antibiotic residues in chicken meat and beef sold in the markets of Ankara, Turkey. *Poultry Science*, *92*(8), 2212-2215. doi:10.3382/ps.2013-03072

Food and Drug Administration (July 28, 2005). FDA Announces Final Decision About Veterinary Medicine. Recuperado de http://m.bfr-meal-studie.de/cm/343/fda_announces_final_decision_about_veterinary_medicine.pdf

Galemba, R. (2012). Taking contraband seriously: Practicing "legitimate work" at the Mexico-Guatemala border. *Anthropology of Work Review*, *33*(1), 3-14. doi:10.1111/j.1548-1417.2012.01072.x

Garzón, T. (2009). La inocuidad de alimentos y el comercio internacional. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, *22*(3), 330-338.

Grande, B. C., Falcón, M. G., & Gándara, J. S. (2000). El uso de los antibióticos en la alimentación

animal: perspectiva actual. The use of antibiotics in animal feeds: An actual perspective. *CyTA-Journal of Food*, *3*(1), 39-47.

Guillen, R., Pomareda, C., Umaña, V., & Pérez, E. (1998). Desafíos y oportunidades para la ganadería e industrias afines, en Centroamérica. Costa Rica: Unidad Regional de Asistencia Técnica.

Jarquín, C., Álvarez, D., Morales, O., Morales, A. J., López, B., Donado, P., ... Doyle, M. P. (2015). Salmonella on raw poultry in retail markets in Guatemala: Levels, antibiotic susceptibility, and serovar distribution. *Journal of Food Protection*, *78*(9), 1642-1650. doi: 10.4315/0362-028X.JFP-15-117

Karbiwnyk, C. M., Carr, L. E., Turnipseed, S. B., Andersen, W. C., & Miller, K. E. (2007). Determination of quinolone residues in shrimp using liquid chromatography with fluorescence detection and residue confirmation by mass spectrometry. *Analytica Chimica Acta, 596*(2), 257-263. doi:10.1016/j.aca.2007.06.018

Kaya, S., Yavuz, H., Akar, F., Liman, B. C. & Filazi, A. (1992). Mezbahadan sağlanan sığır et, karaciğer ve bobrek orneklerinde antibiyotik kalıntıları. *Ankara Üniversity Veteriner Fakültesi* Dergisi, *39*(1-2), 13–29.

Landers, T. F., Cohen, B., Wittum, T. E., & Larson, E. L. (2012). A review of antibiotic use in food animals: Perspective, policy, and potential. *Public Health Reports, 127*(1), 4-22

Leal, L. A. (2016). Trazabilidad de productos de ganado bovino. *Revista Análisis de la Realidad Nacional, 5*(102)*,* 64-74

Martínez, D. E. (2009). *Determinación de residuos de antibióticos beta lactámicos y tetraciclinas en leche cruda en productores de COPROLECHE* (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Veterinaria, Guatemala.

Meek, R. W., Vyas, H., & Piddock, L. J. V. (2015). Nonmedical uses of antibiotics: Time to restrict their use? *PLoS Biology*, *13*(10). e1002266. doi: 10.1371/journal.pbio.1002266

Morshdy, A. E., El-Atabany, A. I., Hussein, M. A., & Darwish, W. S. (2013). Oxytetracycline residues in bovine carcasses slaughtered at Mansoura Abattoir, Egypt. *Japanese Journal of Veterinary Research*, *61*, S44-S47.

Neira, M. (2003). En qué dirección va la seguridad alimentaria. *Revista Española de Salud Pública*, *77*(3), 307-311.

Nisha, A. R. (2008). Antibiotic residues-A global health hazard. *Veterinary World*, *1*(12), 375-377.

Omotoso, A. B., & Omojola, A. B. (2015). Fluoroquinolone residues in raw meat from open markets in Ibadan, Southwest, Nigeria. *International Journal of Health, Animal Science and Food Safety*, *2*(1), 32-40. doi:10.13130/2283-3927/4739

Pérez, E., Holmann, F. J., & Schuetz, P. (2006). *Evolución de la ganadería bovina en países de América Central: Costa Rica, Guatemala, Honduras y Nicaragua* (Documento de trabajo no. 205). Cali, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical e International Livestock Research Institute.

Ramírez, B. A. O., & Miranda, R. V. (2015). Determinación de residuos de tetraciclina en carnes de pollo que se consumen en la ciudad de Guatemala. *Revista Científica de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia*, *11*(1), pp. 1-5.

Subbiah, M., Mitchell, S. M., & Call, D. R. (2016). Not all antibiotic use practices in food-animal agriculture afford the same risk. *Journal of Environmental Quality, 45*(2), 618-629. doi:10.2134/jeq2015.06.0297.

Talero-Pérez, Y. V., Medina, O. J., & Rozo-Núñez, W. (2014). Técnicas analíticas contemporáneas para la identificación de residuos de sulfonamidas, quinolonas y cloranfenicol. *Universitas Scientiarum*, *19*(1), 11-28.doi:10.11144/Javeriana.SC19-1.taci

van Vyncht, G., Jànosi, A., Bordin, G., Toussaint, B., Maghuin-Rogister, G., De Pauw, E., & Rodriguez, A. R. (2002). Multiresidue determination of (fluoro) quinolone antibiotics in swine kidney using liquid chromatography–tandem mass spectrometry. *Journal of Chromatography A, 952*(1-2), 121-129. doi: 1016/S0021-9673(02)00092-4

Yamaguchi, T., Okihashi, M., Harada, K., Konishi, Y., Uchida, K., Do, M. H. N., ... Dao, K. T. V. (2015). Antibiotic residue monitoring results for pork, chicken, and beef samples in Vietnam in 2012–2013. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *63*(21), 5141-5145. doi:10.1021/jf505254y

Zhao, S. J., Li, C., Jiang, H. Y., Li, B. Y., & Shen, J. Z. (2007). Simultaneous determination of 7 quinolones residues in animal muscle tissues by high performance liquid chromatography. *Chinese Journal of Analytical Chemistry, 35*(6), 786-790. doi:10.1016/S1872-2040(07)60056-5

Ciencia, Tecnología y Salud
Vol. 5 Num. 2 2018
ISSN: 2410-6356 (electrónico) / 2409-3459 (impreso)

Reseña / Review

Estadística para la investigación (ISBN 978-9929-620-22-3)

Statistics for research (ISBN 978-9929-620-22-3)

Gerardo Arroyo
Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala

***Autor al que se dirige la correspondencia:** gerarroyo@gmail.com

La aplicación de la estadística es fundamental para el diseño, análisis e interpretación de la información en las diversas formas que tiene la ciencia de realizar sus investigaciones. En esta oportunidad tengo el agrado de presentar esta reseña sobre el libro *Estadística para la investigación* de mi amigo y colega Federico Nave, el cual es una compilación valiosa de artículos publicados, en su mayoría, en el Boletín de Investigación y Posgrado de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

La invitación inicial que se hiciera a Federico Nave para que escribiera un artículo sobre estadística en el boletín divulgativo de la Digi obtuvo una respuesta inmediata, entusiasta y constante, que llevó a que en todos, menos en tres de ellos, contáramos con un artículo de diferentes temáticas. El libro tiene además artículos inéditos que complementan una colección original de importante valor académico.

La forma de abordar los temas es también poco tradicional, quizás influenciada por el inicio de la escritura de los temas, que fue de artículos divulgativos para un boletín. Sin embargo, esta misma peculiaridad, hace que el enfoque sea mucho más atractivo para el lector interesado para entender con claridad, los conceptos estadísticos más importantes. A diferencia de un texto tradicional, usualmente plagado de fórmulas y números, el autor nos enseña conceptos y reflexiones, con ejemplos prácticos, que hacen fácil entender y aplicar la estadística.

Nave coordina desde hace cuatro años, el Programa Universitario de Asesoría Estadística para Investigación, y su dedicación al trabajo, disciplina académica y sencillez, lo han convertido en una pieza clave en la investigación que gestiona la Digi. La visión de los investigadores ha cambiado para mejorar. Ahora entienden la importancia del soporte estadístico en los proyectos de investigación, incluso en el área de investigación cualitativa donde no hace mucho, hablar de estadística

La reproducción total o parcial del contenido e imágenes de esta publicación se rige de acuerdo a normas internacionales sobre protección a los derechos de autor, con criterio especificados en la licencia Creative Commons (CC BY-NC-SA 4.0)

era impensable. Otra área en que la aplicación de los amplios conocimientos de Nave ha sido determinante, es el apoyo en la publicación de artículos científicos en las Revistas Centroamericanas de Investigación y Postgrado, *Ciencia, Tecnología y Salud* y *Ciencias Sociales y Humanidades*. Todos los artículos, antes de ser enviados a revisión por pares externos, son cuidadosamente revisados por Nave, quien recomienda mejoras para incrementar la calidad de las publicaciones.

Sin lugar a dudas, el, libro que hoy tengo el agrado de reseñar, será bienvenido por la comunidad académica y especialmente por los investigadores, quienes encontrarán una guía práctica para resolver problemas en sus proyectos de investigación científica.

El libro estará disponible a la venta en la Unidad de Publicaciones y Divulgación de la Dirección General de Investigación a precios populares.

Ciencia, Tecnología y Salud
Vol. 5 Num. 2 2018
ISSN: 2410-6356 (electrónico) / 2409-3459 (impreso)

Instrucciones para autores

Ciencia, Tecnología y Salud es la Revista de Investigación y Postgrado de la Universidad de San Carlos de Guatemala, orientada a divulgar los conocimientos de las áreas científicas, tecnológicas y de la salud humana y animal a la comunidad científica nacional e internacional. Constituye una publicación de carácter semestral no lucrativa en formato digital (Open Journal System-OJS) y en forma impresa, cuyos manuscritos, aceptados para publicación son sometidos a procesos de revisión y arbitraje por pares ciegos y externos, lo que garantiza al lector y autores un alto nivel y rigor académico.

Instrucciones generales (lea detenidamente todas las instrucciones para autor)

1. La Revista publica los siguientes tipos de manuscritos:

    a. Artículos científicos
    b. Artículos de revisión
    c. Ensayos
    d. Reseñas
    e. Reporte de casos
    f. Resúmenes de congresos

2. La revista presta consideración editorial a artículos originales inéditos en idioma español e ingles. Si el material a publicar ha sido presentado en forma parcial en algún Congreso Científico, indiquelo al final del resumen o en carta al editor.

3. Para enviar un manuscrito registrese como autor en la plataforma OJS, (sección registrarse), los artículos incompletos que no cumplan las Instrucciones para Autores, serán devueltos sin evaluación.

4. Todos los trabajos deben presentarse en formato MS Word (versión 2007) o formato LaTeX (por medio de la plantilla que puede descargar en https://github.com/hepfpeh/ctsDIGI). Tamaño carta, letra Times New Roman 12 puntos, interlineado de 1.5, márgenes de 2.5 cm, a una columna, sin justificar, páginas numeradas y las citas y referencias de acuerdo al Manual de Publicaciones de la *American Psycochological Association* (APA) 6a edición. El sistema de medidas utilizado debe ser el sistema métrico decimal y las palabras en otro idioma deben aparecer en cursiva, excepto las abreviaturas comunes en el idioma en que se escribe (et al., per se, a priori, etc.)

5. Todos los trabajos deben incluir una portadilla, donde se consigne el título corto (no mayor a 11 palabras), título en español e inglés, los nombres de los autores (nombre, apellido), su afiliación institucional (utilizar números arábicos en superíndice) y dirección electrónica para enviar correspondencia (se indicará al autor con un asterisco).

6. Los manuscritos que informen investigaciones con seres humanos o animales, deben incluir una sección de Aspectos Éticos del trabajo, incluyendo la aprobación por un Comité de Ética cuando corresponda, el consentimiento informado en caso de estudios con seres humanos y los procedimientos utilizados para el manejo ético de animales de laboratorio.

7. Las tablas, figuras e imágenes, deben ser enviadas en archivos separados (archivos complementarios OJS) y en el formato original utilizado (Ej. .doc, .docx, .xls, .xlsx, .png, .jpg, TIFF). Las imágenes en colores, deben tener un mínimo de 300 dpi de resolución. Para el caso de mapas, se debe colocar los créditos, sistema de coordenadas y escala.

Instrucciones específicas:

Se recomienda a los autores revisar un número anterior de la revista para visualizar el contenido del artículo previo a su envío.

1. Artículo científico

Son artículos que informan sobre resultados de proyectos de investigación. La extensión máxima es de 20 páginas e incluye lo siguiente:

a. Resumen: Objetivos, metodología, resultados más relevantes y conclusión. No más de 250 palabras, Incluir 5 palabras clave
b. Abstract (inglés): Objetivos, metodología, resultados más relevantes y conclusión. No más de 250 palabras, incluir 5 keywords

La reproducción total o parcial del contenido e imágenes de esta publicación se rige de acuerdo a normas internacionales sobre protección a los derechos de autor, con criterio especificados en la licencia Creative Commons (CC BY-NC-SA 4.0)

c. Introducción
d. Métodos
e. Resultados
f. Discusión
g. Agradecimientos (incluir fuente y número de financiamiento)
h. Referencias (Normas APA)
i. Tablas y Figuras (Normas APA)

2. Artículos de revisión

Los artículos de revisión presentan temas de importancia tratados por expertos y únicamente se aceptan por invitación del Consejo Editorial. La extensión máxima es de 20 páginas y deben incluir lo siguiente:

a. Resumen: no más de 250 palabras. Incluir 5 palabras clave
b. Abstract (inglés) incluir 5 keywords
c. Introducción
d. Contenido
e. Conclusiones
f. Referencias (mínimo 50 referencias)
g. Tablas y Figuras (Normas APA)

3. Ensayos

Los ensayos son trabajos en que el autor aborda su interpretación de un tema relevante a la ciencia, la tecnología o la salud. Plantea argumentos y opiniones personales basados en literatura científica, concluyendo con una posición sobre el tema seleccionado. La extensión máxima es de 20 páginas e incluye lo siguiente:

a. Resumen: no más de 250 palabras. Incluir cinco palabras clave
b. Abstract
c. Introducción
d. Contenido
e. Conclusiones
f. Referencias (Normas APA)

4. Reseñas

Las reseñas son revisiones y comentarios sobre nuevos libros (con ISBN), videos u otras obras. Su extensión máxima es de dos páginas y su formato es libre. Debe incluir la referencia bibliográfica completa, fotografía de la obra y dirección electrónica cuando aplique.

5. Reporte de casos

Estos artículos presentan en forma detallada y documentada casos especiales que merezcan la atención del ámbito de la revista. Pueden ser casos clínicos, tecnológicos o de otros campos de la ciencia. La extensión máxima es de 10 páginas e incluye lo siguiente:

a. Resumen: no más de 250 palabras. Incluir 5 palabras clave
b. Abstract: incluir 5 keywords
c. Introducción
d. Presentación del caso
e. Discusión
f. Referencias (Normas APA)
g. Tablas y Figuras (Normas APA)

6. Congresos científicos

Se publicarán ponencias orales o de poster, trabajos innovadores que cumplan con:

a. Título en español e inglés
b. Nombre y afiliación de los autores
c. Nombre del autor responsable al que se dirige la correspondencia
d. Resumen: objetivo, metodología, resultados más relevantes y conclusión. Máximo 250 palabras, incluir 5 palabras clave.
e. Abstract (resumen en inglés), incluir 5 keywords.
f. Nombre del Congreso, lugar y fecha, y modo en que fue presentado (Oral o Póster)

Proceso de publicación

El proceso de publicación tiene tres etapas. La primera realizada por el Comité Editorial para revisar formato, redacción, estructura y estadística; con las observaciones se devuelve al autor para su corrección. La segunda etapa consiste en el envío a pares ciegos externos, en caso de opiniones contradictorias, se enviará a un tercer par. La última etapa consiste en la edición final (filología), diagramación y aceptación de prueba de imprenta. Los autores deberán contestar las demandas de corrección en cada etapa, en un máximo de 30 días, en caso contrario, el manuscrito se declarará rechazado y deberá comenzar el trámite de aceptación nuevamente.

Ciencia, Tecnología y Salud

ISSN: 2409-3459 Vol. 5 Num. 2 jul/dic 2018

Revisores de este volumen

Juan J. Alvarado,
Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología, Universidad de Costa Rica, Costa Rica

Danilo Alvarez
Centro de Estudios en Salud, Universidad del Valle de Guatemala, Guatemala

Carolina Arévalo Váldez
Instituto Guatemalteco de Seguridad Social, Guatemala

Alejandro Arrivillaga
Proyecto de Biodiversidad de Guatemala

Roberto Cáceres
Centro Mesoamericano de Estudios sobre Tecnología Apropiada, Guatemala

Miriam J. Canet
Hospital Roosvelt, Guatemala

Iris Cazali
Hospital Roosvelt, Guatemala

José A. Cornejo Guerra
Instituto Nacional de Cardiología - Ignacio Chávez, México

Sully M. Cruz
Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala

Danilo Dardón
Instituto de Ciencia y Tecnología Agricolas, Guatemala

Raymundo Dávalos
Instituto de Ecología, México

Guillermo Detlefsen
Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Costa Rica

Miguel A. Domínguez Cortazar,
Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, México

Sergio Dubon
University of Padua, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Italia

Jackeline Escobar Muoz
Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala

Alejandro Espinoza
Instituto de Ecología, México

Erik M. Espinoza
Independiente

Dennis Guerra-Centeno
Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala

Juan Hérnandez
Asociación Sociedad Mesoamericana para la Biología y la Conservación, Guatemala

Cristian Kraker-Castañeda
El Colegio de la Frontera Sur, México

Ciencia, Tecnología y Salud

ISSN: 2409-3459 Vol. 5 Num. 2 jul/dic 2018

Revisores de este volumen

Julio López
Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Guatemala

Vivian Matta
Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala

José A. Marengo
Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais, Brasil

Pedro F. Morales-Almazan
Mathematics Department, The University of Texas at Austin, USA

Eduardo Naranjo
El Colegio de la Frontera Sur, México

Dario A. Navarrete Gutiérrez
Laboratorio de Análisis de Información Geográfica y Estadística, El Colegio de la Frontera Sur, México

Werner Ovalle
Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña, Guatemala

Jorge Paramo
Facultad de Ingeniería, Universidad del Magdalena

Rodimiro Ramos-Reyes
El Colegio de la Frontera Sur, México

Carlos Vergara-Chen,
Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

Editorial

Artículos Científicos

Dinámica temporal de la disponibilidad de agua y microclima en aguadas del biotopo protegido Dos Lagunas, Petén, Guatemala
Manolo J. García, Andrea L. Aguilera, Gerber D. Guzmán-Flores, Dana I. Rodríguez, Vivian R. González

Relación entre áreas y variables ambientales espaciales con el atropellamiento y cruce de la fauna silvestre en la carretera de la Franja Transversal del Norte, Cobán, Guatemala
Oscar Rojas, Carlos Avendaño

Riqueza y abundancia de peces arrecifales en el Caribe de Guatemala utilizando Estaciones Remotas de Video Subacuático con Carnada
Francisco Polanco-Vásquez, Alerick Pacay, José R. Ortíz-Aldana, Ana Hacohen-Domené, Cristopher Avalos-Castillo

Native species valuable timber plantations in Northern Guatemalan Humid Lowlands: ecological features and silvicultural feasibility
Boris A. Mendez-Paiz

Diversidad genética de aislados de* Phytophthora infestans *colectados en zonas productoras de papa y tomate de Guatemala
José A. Ruiz-Chután, Julio E. Berdúo-Sandoval, Amilcar Sánchez-Pérez

Simulación del flujo de viento sobre el territorio de Guatemala utilizando un modelo climático regional
Enrique Pazos

Ensayos Científicos

La epigenética: ¿el regreso de Lamarck?
Laura M. Benítez-Cojulún

Reporte de Casos

Modelo de negocio de restauración productiva de* Abies guatemalensis *Rehder utilizando plantas nodrizas para su establecimiento
José V. Martínez-Arévalo

Detección de residuos de quinolonas en carne bovina de venta en mercados municipales de la ciudad de Guatemala
Miriam J. Canet-Elgueta, Amílcar Dávila, Roderico Hernández, Manuel Lepe-López

Reseña

Estadística para la investigación
Gerardo Arroyo

Los artículos científicos son indexados en:

latindex ROAD

DOAJ DIRECTORY OF OPEN ACCESS JOURNALS

LILACS

BASE

http://digi.usac.edu.gt/ojsrevistas