ISSN 1609-0152 (Impreso)
ISSN 2415-0940 (En línea)

TECNOCIENCIA

Revista de la Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología
Universidad de Panamá

Tecnociencia 2017, Vol. 19, Nº 2: 5-31
julio-diciembre 2017

DESCRIPCIÓN PRELIMINAR DE LA COMPOSICIÓN HERPETOFAUNÍSTICA EN LOCALIDADES PANAMEÑAS IMPACTADAS POR QUITRIDIOMICOSIS

Luis Elizondo
Programa de Maestría en Ciencias Biológicas, Universidad de Panamá, Vicerrectoría de Investigación y Postgrado
Email: elizondolui@gmail.com

RESUMEN

Se presentan datos sobre la composición de comunidades de anfibios y reptiles en localidades del Parque Nacional Santa Fé (PNSF) y del Parque Nacional General de División Omar Torrijos Herrera (PNGDOTH). Ambas áreas protegidas fueron impactadas respectivamente en el año 2002 y 2004 por la quitridiomicosis, una enfermedad exclusiva para los anfibios y causada por el hongo *Batrachochytrium dendrobatidis*. Se realizaron muestreos en transectos, aplicando la técnica de encuentro visual de día y de noche. Los muestreos se hicieron en febrero de 2013 en el PNSF y en septiembre de 2012 en el PNGDOTH. En el PNSF se registran 56 anfibios de 12 especies y 43 reptiles de 11 especies. En el PNGDOTH 91 anfibios de 19 especies y 42 reptiles de 17 especies. Según el muestreo la diversidad de anfibios en ambas localidades, medida a través de índices ecológicos, es medianamente alta y sin dominancia de una especie. El arreglo de reptiles en la localidad del PNSF es poco diverso y con dominancia de un par de especies en comparación al arreglo en la localidad del PNGDOTH. Es necesario un esfuerzo de muestreo estandarizado en ambas localidades para mayor certeza comparativa. Muchas especies que se registran en este trabajo son valiosas para la conservación en Centroamérica y resaltan para mejorar la gestión de ambas áreas protegidas.

PALABRAS CLAVES

Composición de especies, anfibios, reptiles, quitridiomicosis, bosque submontano, áreas protegidas.

PRELIMINARY HERPETOFAUNISTIC COMPOSITION IN PANAMANIAN LOCALITIES IMPACTED BY CHYTRIDIOMYCOSIS

ABSTRACT

Information on the composition of amphibian and reptile communities in localities of the Santa Fe National Park (PNSF) and the General of Division Omar Torrijos Herrera National Park (PNSF) is presented. Both protected areas were impacted respectively in 2002 and 2004 by chytridiomycosis, a disease exclusive to amphibians and caused by the fungi *Batrachochytrium dendrobatidis*. Transect sampling using the technique of visual encounter survey during day and night were used. In february 2013 in the PNSF and september 2012 in the PNGDOTH. In the PNSF I recorded 56 amphibians of 12 species and 43 reptiles of 11 species. In the PNGDOTH 91 amphibians of 19 species and 42 reptiles of 17 species. According to the sampling, the diversity of amphibians in both localities, measured through ecological indexes, is moderately high and without dominance of a species. The arrangement of reptiles in the locality of the PNSF has a lower diversity and with dominance of a pair of species in comparison to the arrangement in the locality of PNGDOTH. A standardized sampling effort is needed at both locations for increase comparative certainty. In this work are registered many species valuable for conservation in Central America and stand out in order to improve the management of both protected areas.

KEYWORDS

Species composition, amphibians, reptiles, chytridiomycosis, submontane forest, protected areas.

INTRODUCCIÓN

La quitridiomicosis, enfermedad especifica para los anfibios y causada por el hongo patógeno *Batrachochytrium dendrobatidis* (*Bd*), es una de las amenazas que más fuerte impacta en los ecosistemas boscosos causando extinciones o cambios poblacionales en las comunidades de anfibios (Berger *et al*., 2016; Fisher *et al*., 2009). En Panamá los impactos por quitridiomicosis en los anfibios se detectaron inicialmente en la década de 1990 en la Reserva Forestal Fortuna en Chiriquí, luego continuó su expansión y efectos desastrosos en comunidades de anfibios en áreas protegidas y no protegidas en Veraguas, Coclé, Panamá y Colón, y recientemente el *Bd* fue

registrado en Darién (Brem & Lips 2008; Lips 1999; Lips *et al*., 2006; Rebollar *et al*., 2014; Rodriguez-Brenes *et al*., 2016; Woodhams *et al*., 2008).

Hoy dia los anfibios son foco de conservación y la comprensión de sus comunidades, luego de la quitridiomicosis, es necesario para lograr medidas adecuadas de conservación tanto para los anfibios como sus hábitats (Beebee & Griffiths 2005). La comprensión de las comunidades de los reptiles también es importante porque existe la posibilidad que depredadores de anfibios, como las serpientes, sean afectados en el largo plazo en respuesta al déficit de sus presas (Beaupre & Douglas, 2009; Vitt & Caldwell, 2009). Además, algunos reptiles son potenciales vectores y hospederos del *Bd* (Kilburn *et al*., 2011) y esto incrementa su importancia por su rol en la epidemiologia de la enfermedad.

Aqui presento datos preliminares para describir la composición de comunidades de anfibios y reptiles en localidades especificas de dos áreas protegidas, Parque Nacional Santa Fé (PNSF) en la provincia de Veraguas y Parque Nacional General de División Omar Torrijos Herrera (PNGDOTH) en la provincia de Coclé, cuyas poblaciones de anfibios fueron diezmadas por la quitridiomicosis entre el 2002 y el 2004 (Brem & Lips 2008; Lips *et al*., 2006; Crawford *et al*., 2010). Estos datos son importantes para conocer arreglos contemporáneos de especies de herpetofauna influenciados por amenazas a la biodiversidad y con potencial para mejorar las estrategias de conservación en el PNGDOTH y el PNSF.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El PNSF está ubicado al Norte de Veraguas, Panamá (Figura 1) y posee una extensión de 72636 hectáreas, su punto más alto a 1964 msnm, temperatura ambiental anual entre 26 y 18 °C y una precipitación anual de 2000 mm^3 en la vertiente Pacífica y 5000 mm^3 en el Caribe. En cambio el PNGDOTH está ubicado al norte de la provincia de Coclé, Panamá (Figura 1), posee una extensión de 25275 hectáreas, su punto

más alto a 1314 msnm, temperatura ambiental anual entre 25 y 20 °C y una precipitación anual de 2000 mm^3 en la vertiente del Pacífico y 4000 mm^3 en el Caribe. Ambas áreas protegidas poseen zonas de vida similares que abarcan desde bosques húmedos submontanos en sus tierras más bajas y bosques nubosos en la cima de sus montañas. En el PNSF muestreé inmediaciones boscosas cerca del centro de visitantes del área protegida, sector Tercer Brazo del Río Mulaba, Cerro Cabeza de Toro, entre 6 y 10 km al noroeste del poblado de Santa Fé. Mientras, en el PNGDOTH el muestreo lo hice específicamente en El Copé en las inmediaciones de los senderos cuerpo de paz, los helechos, las ranas, y los monos, todos cerca del centro principal de visitantes. Lips *et al*. (2006) describen las características específicas de temperatura y precipitación para esta localidad. Las localidades muestreadas en ambas áreas protegidas están en la vertiente del Pacífico entre los 650 y 850 msnm y corresponden a bosques submontanos con influencia por nubes durante el día y la noche. Además, muchos de los árboles están cubiertos con plantas briófitas y epífitas, la hojarasca es abundante y húmeda, y también existen varias quebradas de agua lo que permite a la herpetofauna tener disponibilidad de varios microhábitats en el entorno.

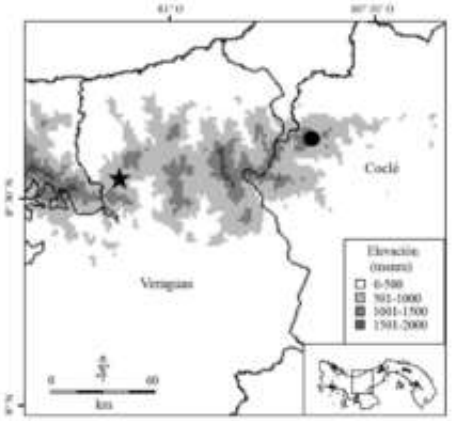

Fig. 1 Localización de los sitios de muestreo, el círculo negro denota la localidad en el PNGDOTH y la estrella negra la localidad en el PNSF donde fueron colocados los transectos.

Diseño de Muestreo y Colecta de Datos

En ambas localidades ubiqué tres transectos de 400 m lineales. Uno de ellos a lo largo del suelo del bosque, otro en una quebrada, y otro que mezclara tanto el suelo del bosque como una quebrada. Esta metodología ha sido estandarizada en nuestro país para fines de monitoreo (Ibáñez 2014). Al PNSF lo visité en el mes de febrero de 2013 y el PNGDOTH en septiembre de 2012. En cada visita invertí un día para muestrear cada transecto en aproximadamente cuatro horas en la mañana (entre 7:00 a.m. y 11:00 a.m) y cuatro horas en la noche (entre 7:00 p.m. y 11:00 p.m). Tres o dos personas me acompañaron en cada muestreo para hacer un esfuerzo de 69 horas/hombre en la localidad del PNSF y 108 horas/hombre en la localidad del PNGDOTH. En cada muestreo identifiqué los ejemplares directamente en campo. Resalto que esta no es una comparación entre las dos localidades, es una descripción preliminar de la herpetofauna en cada una de ellas basada en muestreos específicos. Más adelante discuto la importancia de esta descripción para la conservación de la herpetofauna y de las áreas protegidas que visité.

Análisis de Datos

Para la composición de especies me basé en la riqueza absoluta de especies. Además, para tener una idea cuantitativa de la comunidad en cada localidad, anoté las abundancias de cada especie registrada y cuantifiqué índices ecológicos de diversidad de Shannon-Wiener (*H*), de dominancia de especies de Simpson (*1-D*) y de homogeneidad distribucional de Pielou (*J*) usando el programa estadístico PAST. También calculé la riqueza y abundancia relativa en función del esfuerzo de muestreo para cada localidad.

Por la problemática de conservación que atraviesan los anfibios y reptiles y la particularidad de muchas de estas especies para la conservación local y regional también usé el Valor de Vulnerabilidad Ambiental (VVA) y los criterios de amenaza contemplados en la Lista Roja de Especies Amenazadas de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN). El VVA sirve para identificar especies con altas probabilidades de sufrir cambios importantes de darse más perturbaciones naturales. Categoriza a las especies en base a

tres tipos de parámetros. Los primeros dos parámetros son para ambos grupos, anfibios y reptiles, y corresponden a la distribución geográfica regional y la distribución ecológica local; el tercer parámetro corresponde al tipo de modo reproductivo para anfibios y el grado de persecución humana para reptiles. Una vez evaluados los parámetros para cada especie, el VVA oscila entre 3 y 20. Existen rangos específicos para la herpetofauna de Panamá que corresponden a baja vulnerabilidad entre 3 y 8, mediana vulnerabilidad entre 9 y 11, y alta vulnerabilidad entre 12 y 20 (Jaramillo *et al*., 2010). También rangos actualizados a nivel centroamericano que corresponden a baja vulnerabilidad entre 3 y 9, mediana vulnerabilidad entre 10 y 13 y alta vulnerabilidad entre 14 y 20 (Johnson *et al*., 2015). Utilicé los rangos tanto a nivel local para Panamá como a nivel regional para Centroamérica.

Los criterios de la lista roja de especies amenazadas de la UICN corresponden desde especie no evaluada (NE), con datos deficientes (DD), de preocupación menor (LC), casi amenazada (NT), vulnerable (VU), en peligro (EN), en peligro crítico (CR), extinta en estado silvestre (EW) y extinta (EX). Para los anfibios en la localidad del PNGDOTH también incluí las categorías exclusivas para anfibios de esta localidad desarrolladas en Crawford *et al*. (2010) basados en la abundancia antes y después del impacto por quitridiomicosis. Estas categorías corresponden a especie con datos deficientes (DD), de preocupación menor (LC), declinada (De), en peligro crítico (Cr) y extirpada del sitio (Ex).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Riqueza y abundancia absoluta de especies

En la localidad del PNSF registré 56 individuos de anfibios, todos anuros y agrupados en 12 especies (cuadro 1). Además, 43 individuos de reptiles, 40 lagartijas y tres serpientes, agrupados en 11 especies, nueve de lagartijas y dos de serpientes (cuadro 1). El PNSF cuenta con estudios relacionados a declinaciones por quitridiomicosis y con estudios enfocados específicamente para conocer la diversidad herpetológica de esta área protegida. El *Bd* fue detectado en el PNSF en diciembre de 2002 al encontrarse ranas muertas de la especie

Atelopus varius en una quebrada cercana a Quebrada Tigre, aproximadamente a unos 6 km al Norte de Santa Fé (Brem & Lips 2008). Los transectos que yo muestreé en el 2013 están al oeste de la comunidad de Santa Fé a una distancia lineal aproximada de 10 km al Suroeste de Quebrada Tigre. Asumiendo la rápida propagación del *Bd*, y dado que también fue detectado en un transecto en quebrada Mula a casi 30 km al Noroeste de las localidades que muestreé, es posible que las localidades evaluadas en este estudio también hayan sido impactadas por quitridiomicosis. Aunque estrictamente no hay evidencia sobre el estatus del *Bd* en los transectos que muestreé así que es muy difícil inferior sobre una posible comparación antes y después de la quitridiomicosis. Aun así, presento la información que recopilé sobre riqueza de especies antes, durante y después de las declinaciones en masa de anfibios por quitridiomicosis.

Antes de la quitridiomicosis existe un registro histórico de 60 especies de anfibios en las inmediaciones montañosas aledañas al poblado de Santa Fé. Esta cifra la obtuve analizando los listados de especies presentados para Cerro Narices y Cerro Anselma (28 especies, ver Martínez *et al*., 1994), Cerro Tute y áreas adyacentes (27 especies, ver Martínez & Rodríguez 1992), Cerro Negro (24 especies, ver Carrizo 2010), un conjunto de especímenes colectados en 1977 y 1978 y que reposan en *University of Michigan Museum of Vertebrate Zoology* (21 especies, ver Brem & Lips 2008), evaluaciones pre-quitridiomicosis al Norte de Santa Fé y cerca de Cerro Narices, (24 especies, ver Brem & Lips 2008), y a la especie nueva para la ciencia *Craugastor evanesco* en cuya descripción designaron dos paratipos colectados en Quebrada Tigre en el año 2002 (Ryan *et al*., 2010). Casi todas las especies que registré habían sido registradas también en el conjunto histórico de especies de anfibios para Santa Fé, a excepción de individuos de *Diasporus vocator* que los observé en el transecto terrestre y el más alejado de Santa Fé. El registro de anfibios en el PNSF luego de la quitridiomicosis, específicamente cerca al poblado de Santa Fé, también ha sido intenso. Actualmente hay registros de 41 especies de anfibios. Esta cifra la obtuve analizando las listas de especies registradas en Cerro Negro, Cerro Tute, Cerro Narices y una quebrada afluente del Río Mulabá (27 especies, ver Carrizo 2010),

Alto de Piedra (25 especies, ver Carrizo 2010 en donde analiza el trabajo de Aguilar & Pérez 2006), Cerro Mariposa (26 especies, ver Stadler 2010), evaluaciones luego de la detección de quitridiomicosis al Norte del poblado de Santa Fé (19 especies, Brem & Lips 2008), e incluyendo las dos especies nuevas para la ciencia que han sido descritas después del año 2005 en las inmediaciones boscosas aledañas a la localidad de Santa Fé (*Diasporus citrinobapheus* [Hertz *et al*., 2012] y *Ecnomiohyla veraguensis* [Batista *et al*., 2015]). Con la excepción de *D. vocator,* todas las otras especies que registré en mis muestreos del 2013 también habian sido registradas luego del impacto del *Bd* en el área, asi que podría incrementarse la cifra a 42 especies de anfibios persistiendo en las inmediaciones boscosas aledañas al poblado de Santa Fé después del impacto por quitridiomicosis.

El registro de reptiles del orden Squamata en las zonas montañosas aledañas al poblado de Santa Fé corresponde a 82 especies. Este dato lo obtuve analizando las listas de especies presentadas para Cerro Tute (36 especies, Martinez & Rodríguez 1992), en Cerros Narices y Anselma (28 especies, Martínez *et al*., 1994), Cerro Negro (24 especies, ver Carrizo 2010), Alto de Piedra (24 especies, ver Carrizo 2010 en donde analiza el trabajo de Aguilar & Pérez 2006), Cerro Negro, Cerro Tute, Cerro Narices y una quebrada afluente del Río Mulabá (30 especies, ver Carrizo 2010), Cerro Mariposa (28 especies, ver Stadler 2010), el trabajo de Lotzkat (2010) en Cerro Negro, Cerro Mariposa y Río Chilagre, el cual presenta un registro acumulativo de 62 especies, y la inclusión de la nueva especie de culebra *Sibon noalamina* (Lotzkat *et al*., 2012) y la reciente consideración de resurrección para la lagartija *Anolis brooksi* (Poe & Ryan 2017). Yo solo registro 11 especies de reptiles del orden Squamata pero las diferencias relacionadas al esfuerzo de muestreo entre mi trabajo y los arriba expuestos necesitan considerarse. Yo acumulé 69 horas/hombre de muestreo durante tres dias en un espacio puntual de la estación seca de 2013. En cambio, la inversión fue más de 45 dias de muestreo en los Cerros Narices y Anselma (Martinez *et al*., 1994), más de 60 días de muestreo en Cerro Tute y áreas adyacentes (Martinez & Rodriguez 1992), 40 dias de muestreo en Cerro Mariposa (Stadler 2010), 55 días de muestreo en el trabajo de Carrizo (2010) en Cerro Negro, Cerro Tute, Cerro Narices y una quebrada afluente del Río Mulabá, y 122

horas/hombre en más de 15 dias en el trabajo de Lotzkat (2010) en Cerro Negro, Cerro Mariposa y Río Chilagre. Además todos estos trabajos abarcaron tanto la estación seca como la estación lluviosa, así que es necesario un muestreo estacional para alcanzar cifras de riqueza de reptiles del orden Squamata más altas para esta localidad. Gráficos de rarefacción de especies basados en la cantidad de individuos registrados sugieren la necesidad de invertir más esfuerzo de muestreo tanto para anfibios como reptiles, pero principalmente para los reptiles (figura 2A y 2B).

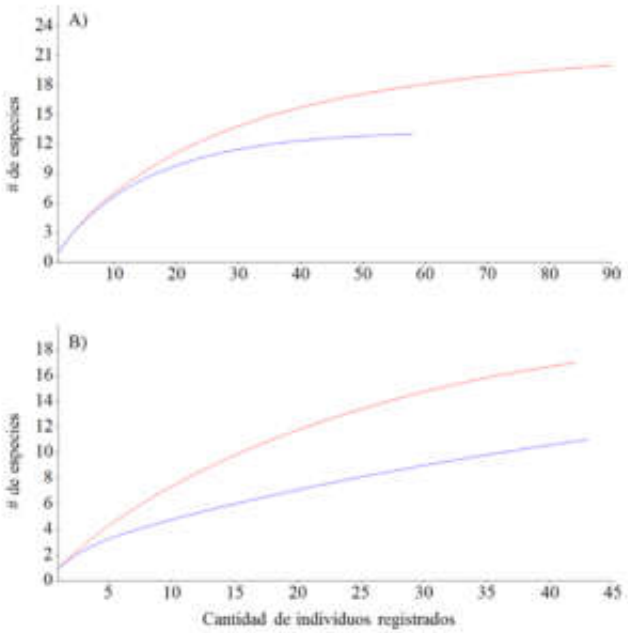

Fig. 2 Curvas de acumulación de especies para anfibios (A) y reptiles (B) basadas en la cantidad de individuos registrados en los transectos establecidos en el PNGDOTH (linea roja) y en el PNSF (linea azul)

En la localidad del PNGDOTH (El Copé) registré 91 individuos de anfibios que corresponden a 90 anuros y una salamandra. Estos anfibios están agrupados en 19 especies, 18 anuros y una salamandra (cuadro 1). De reptiles registré 42 individuos, 34 son lagartijas y ocho son serpientes, y agrupados en 17 especies que corresponden a 10 de lagartijas (Suborden Sauria) y siete de serpientes (Suborden Serpentes) (cuadro 1).

Cuadro 1. Riqueza y abundancia absoluta (S) y (P) respectivamente, y riqueza y abundancia relativa en función del esfuerzo de muestreo (S') y (P') respectivamente, para anfibios y reptiles durante el muestreo en las localidades en el PNGDOTH y el PNSF.

Taxa	**PNGDOTH**				**PNSF**			
	S	S'	P	P'	S	S'	P	P'
Anfibios	19	0.17	91	0.84	12	0.17	56	0.81
Ranas y Sapos	18	0.16	90	0.83	12	0.17	56	0.81
Salamandras	1	0.01	1	0.01	--	--	--	--
Reptiles	17	0.15	42	0.38	11	0.15	43	0.62
Lagartijas	10	0.09	34	0.31	9	0.13	40	0.57
Serpientes	7	0.06	8	0.07	2	0.02	3	0.04

Para inicios del 2004, antes de la llegada del *Bd* al Copé, había un registro histórico de 68 especies de anfibios de las cuales 47 presentaron infecciones por el patógeno cuando fue detectado en septiembre de 2004 (Crawford *et al*., 2010; Lips *et al*., 2010). En esta cifra incluyo también a las tres especies de anfibios descritas como nuevas para la ciencia y cuyo material tipo fue colectado antes del impacto por el *Bd* (*Bolitoglossa copia* [Wake *et al*., 2005], *C. evanesco* [Ryan *et al*., 2010] e *Incilius karenlipsae* [Mendelson III & Mulcahy 2010). Inmediatamente después de detectar el hongo patógeno las declinaciones de poblaciones resultaron en mortandad masiva extirpando al menos 31 especies por la enfermedad quitridiomicosis (Lips *et al*., 2010). Durante la mortandad masiva a

finales de 2004 Lips *et al*. (2010) registraron 48 especies. En Crawford *et al*. (2010), haciendo una evaluación de diversidad ecológica y evolucionaria en la localidad de El Copé luego de la quitridiomicosis, y con un extensivo muestreo en 2006, 2007 y 2008, destacan que luego de la enfermedad solo eran detectables aproximadamente unas 38 especies dado que casi un 45% del total previo había sido extirpado. Durante mis muestreos en el 2012 registré cuatro especies de las consideradas extirpadas por Crawford *et al*. (2010) (ver adelante en subsección Especies Importantes) y esto hace un total de 42 especies detectables en El Copé. Esta cifra no incluye las tres especies nuevas mencionadas (*B. copia, C. evanesco* e *I. karenlipsae*) dado que no hay registros de las mismas luego del *Bd*.

Las 19 especies de anfibios que registro en El Copé es un dato puntual ocho años después de la mortandad masiva por quitridiomicosis y su efecto devastador en la comunidad de anfibios. Existen diferencias entre el esfuerzo de muestreo en este estudio y el trabajo de Lips *et al*. (2010) con más de 700 horas de muestreo y el de Crawford *et al*. (2010) con más de 200 horas de muestreo. Por lo tanto, las comparaciones son un poco limitadas así que mis datos de la cantidad de especies no pueden verse como un proceso continuo de pérdida de anfibiofauna en el largo plazo luego de la quitridiomicosis. Por el contrario, es alentador dada la cantidad de especies en solo tres días, en un mes muy cerca al punto temporal histórico en que ocurrieron las mortandades masivas en esta localidad, octubre a diciembre 2004, en cual en promedio se detectaron 22 especies por mes (Lips *et al*., 2010). Además, algunas de las especies que registro, como veremos más adelante en la subsección Especies Importantes, habían sido consideradas como extirpadas y otras declinadas a nivel local en Crawford *et al*. (2010). La información sobre diversidad de reptiles en el PNGDOTH enfocada a la descripción de la comunidad es muy escasa. Pero el lector puede consultar los patrones de distribución geográfica presentados en Köhler (2011) para hacerse una idea de las vastas posibilidades sobre la ocurrencia de reptiles en esta área protegida. También junto a la descripción de nuevas especies (i.e. *Celestus adercus* [Savage *et al*., 2008]), la ampliación distribucional de algunas especies de serpientes (i.e. *Tantilla alticola* [Myers *et al*.,

2013], *Trimetopon barbouri* [Ray *et al*., 2013]), o la reciente resurrección de la lagartija *A. brooksi* (Poe & Ryan 2017). El análisis sobre la diversidad de reptiles en el PNGDOTH es un desafío actual para la comunidad científica de Panamá. Este trabajo es un paso preliminar para conocer parte de esta comunidad como veremos más adelante en las siguientes subsecciones.

En ambas localidades detecté anfibios y reptiles fuera de los transectos y no los consideré para los análisis. Estos corresponden a aproximadamente 15 individuos de *Smilisca phaeota* y una víbora "equis" *Bothrops asper* en los alrededores y cerca del centro de visitantes del PNSF, y cuatro *Incilius coniferus* y aproximadamente 25 *Leptodactylus fragilis* que vocalizaban en charcas temporales en el camino frente a la estación de visitantes del PNGDOTH. Estas especies las incluí solo como parte del registro de especies. Todas las especies registradas y la cantidad de individuos para cada una de ellas, tanto dentro como fuera de los transectos, están en los anexos 1 y 2.

Riqueza y abundancia relativa

Las diferencias en la cantidad absoluta de especies de anfibios y reptiles, y la cantidad de individuos de anfibios podrían asociarse a la estacionalidad entre un muestreo y otro; ó, a diferencia anual dado que las localidades las muestreé en un periodo consecutivo pero de años diferentes, 2012 y 2013. Sin embargo, las cifras de riqueza y abundancia relativa basadas en el esfuerzo de muestreo son muy similares, 0.17 para riqueza de anfibios en ambas localidades, 0.81 y 0.84 para abundancia de anfibios en la localidad del PNSF y del PNGDOTH respectivamente, y 0.15 para riqueza de reptiles en ambas localidades (cuadro 1). Entonces esto nos ayuda a entender que las diferencias en cantidades absolutas también son producto de la necesidad de invertir más esfuerzo de muestreo (figura 2A y 2B). Algo para resaltar es que aunque se invirtió menos esfuerzo de muestreó en el PNSF, la abundancia absoluta de reptiles fue casi igual en ambas localidades (cuadro 1) y con una abundancia relativa mayor en la localidad en el PNSF (0.62 en contraste a 0.38 en PNGDOTH). Segregando los reptiles en lagartijas y serpientes hubo una alta abundancia relativa de lagartijas en el PNSF (0.57) en comparación a lo registrado en el PNGDOTH (0.31), y una ligera superioridad en la

abundancia relativa de serpientes en la localidad en el PNGDOTH (0.07 en contraste a 0.04 en PNSF) (cuadro 1), sugiriendo que la abundancia de serpientes podría limitar la abundancia de las lagartijas. No obstante, como ya mencioné, es necesario más esfuerzo de muestreo, estandarizado para ambas localidades y abarcando ambas estaciones, y con un diseño estadístico apropiado para dar robustez y certeza estadística a esta asunción.

Índices Ecológicos

Los índices ecológicos, basados en el muestreo, sugieren que en la localidad muestreada en el PNSF los anfibios poseen una mediana diversidad ecológica, sin dominancia aparente de una especie y con una alta homogeneidad en la distribución de los individuos, mientras que los reptiles con una baja diversidad, un pequeño grado de 25% de dominancia de una o dos especies, las lagartijas *A. lemurinus* y *A. lionotus*, y casi un 30% de heterogeneidad en la distribución de los individuos (cuadro 2). En cambio, para la localidad en el PNGDOTH la herpetofauna es medianamente diversa, tanto para anfibios como para reptiles, sin grado aparente de dominancia por una especie y con un alto grado de homogeneidad distribucional (cuadro 2). Pero reitero que se necesita más esfuerzo de muestreo, y estandarizado entre las localidades, para obtener mayor certeza comparativa.

Cuadro 2. Índice de diversidad de Shannon-Wiener (*H*), de dominancia de Simpson (1-*D*) y de homogeneidad distribucional de Pielou (*J*) para anfibios y reptiles durante los muestreos en los transectos en cada localidad del PNGDOTH y el PNSF.

Taxa	**PNGDOTH**			**PNSF**		
	H	1-*D*	*J*	*H*	1-*D*	*J*
Anfibios	2.57	0.88	0.87	2.26	0.87	0.91
Reptiles	2.55	0.89	0.9	1.73	0.74	0.72

Especies Importantes

En el PNSF registré especies como *Sachatamia albomaculata*, *Silverstoneia flotator*, *Lithobates warszewitschii*, *Pristimantis caryophyllaceus* y *P. cruentus* (Anexo 1) las cuales fueron impactadas previamente por la quitridiomicosis pero aún persisten en el entorno (Brem & Lips 2008). En el PNGDOTH, registré individuos de *Espadarana prosoblepon, S. albomaculata, Craugastor talamancae, S. flotator, Hyloscirtus colymba, P. cruentus, P. museosus*, y *Oedipina parvipes* (Anexo 1), de los cuales Lips *et al*. (2010) reportaron individuos muertos y con indicios de quitridiomicosis en el PNGDOTH. De todos los anfibios registrados *P. museosus* es una especie endémica nacional (Anexo 1). Entre los reptiles hay que considerar que registré potenciales hospederos de *Bd* como la culebra *Imantodes cenchoa*, y las lagartijas *Anolis humilis* y *A. lionotus* (Kilburn *et al*., 2011). Estos tres reptiles los registré en las localidades de ambas áreas protegidas y *A. lionotus*, a pesar de solo registrarlo en las quebradas, fue el más abundante de todos los reptiles registrados (Anexo 2), asi que deben ser considerados en estrategias de manejo de la quitridiomicosis. Algunos reptiles también son endémicos como el propio *A. lionotus* y *Echinosauria panamensis* registrado en PNGDOTH y PNSF, y la culebra *Geophis bellus* registrada en PNGDOTH (Anexo 2). Aunque *G. bellus* solo la registré en el PNGDOTH y anteriormente era conocida solo por el holotipo (Myers 2003) hoy sabemos que también está presente en el PNSF (Elizondo *et al*., 2015).

Según el VVA para Panamá 13 especies de anfibios que registré, el 52% del total, son vulnerables a más perturbaciones ambientales. De estas, diez especies, el 40%, son medianamente vulnerables y tres, el 12%, son altamente vulnerables. Sorprendentemente cuando las especies son analizadas a nivel centroamericano las cifras incrementan sustancialmente a 21 especies, el 80%, con vulnerabilidad a cambios importantes de darse más perturbaciones de tipo natural. Ocho especies, el 30%, son medianamente vulnerables (*S. albomaculata, C. crassidigitus, C. fitzingeri, Agalychnis callidryas, H. colymba, S. phaeota, L. warszewitschii* y *P. ridens*). El incremento es por la consideración de 13 especies, el 50%, como de alta vulnerabilidad ambiental y corresponden a *C. noblei*, *C. talamancae, Colostethus*

pratti, S. flotator, Diasporus diastema, D. vocator, P. caryophyllaceus, P. cerasinus, P. cruentus, P. gaigeae, P. museosus, P. pardalis y *O. parvipes* (Anexo 1).

Nueve especies de los reptiles, el 39% del total registrado, tienen un grado de vulnerabilidad ambiental a más perturbaciones ambientales según los rangos establecidos para Panamá. Seis especies, el 26%, con un grado de mediana vulnerabilidad y tres especies, el 13%, con alto grado de vulnerabilidad. Al igual que los anfibios también existe un incremento de estas especies vulnerables cuando se analiza el registro a escala centroamericana. Del total registrado 19 especies, el 82%, son vulnerables a cambios poblacionales por perturbaciones naturales. Nueve especies de reptiles, 39% del total corresponden a especies de mediana vulnerabilidad y son *Corytophanes cristatus, Ptychoglossus plicatus, Enyalioides heterolepis, A. capito, Lepidoblepharis xanthostigma, Holcosus festivus, Dipsas temporalis,* un individuo del género *Geophis* que por su distribución la ubiqué como *G. hoffmani*, y la víbora *Bothrops asper.* Los reptiles de alta vulnerabilidad que registré en mi muestreo corresponden a 10 especies, 43% del total registrado, y son *E. panamensis, Loxopholis southi* (=*Leposoma*), *A. humilis, A. insignis, A. limifrons, A. lionotus, H. leptophrys, D. articulata, G. bellus* y *Sibon argus* (Anexo 2). En relación a los criterios de UICN la rana *H. colymba* está en peligro crítico, *P. museosus* está "en peligro", y *P. caryophyllaceus* y *P. pardalis* están "casi amenazadas" (Anexo 1). Ningún reptil de los que registré está en alguna categoría de amenaza de la lista roja de UICN (Anexo 2). Sin embargo, esto podría cambiar próximamente ya que la actualización de la lista roja para los reptiles a nivel mundial y para Panamá aún está en proceso. Pero hago mención de la culebra endémica *G. bellus* que en la versión previa de la lista roja era catalogada como "vulnerable".

En su evaluación sobre diversidad e historia evolucionaria de anfibios antes y después de la quitridiomicosis, localidad PNGDOTH, Crawford *et al*. (2010) agruparon a las especies en categorías de declinación según sus registros de diversidad. Especies como *E. prosoblepon*, *S. flotator*, *P. cerasinus*, y *P. cruentus* fueron categorizadas como especies que sufrieron declinación; y otras

como *S. albomaculata* y *H. colymba* fueron categorizadas en "estado crítico". Llama la atención que de *H. colymba*, registré un macho y una hembra en interacciones como reproductivas y hasta un metamorfo en una de las quebradas en los transectos del PNGDOTH, lo que indica que esta especie todavía logra reproducirse. Lo aliciente es el registro de las especies *C. pratti*, *P. gaigeae*, *P. ridens* y *Oedipina parvipes* en el Copé (Anexo 1), y que habían sido considerados como extirpadas de dicha localidad por Crawford *et al.* (2010). El registro de estas especies es un aliciente de conservación. En otras localidades tropicales algunas poblaciones de anfibios se han recuperado luego de la quitridiomicosis e incluso re-expandido su distribución más allá de su ámbito distribucional histórico (Newell *et al.*, 2013; Scheele *et al.*, 2014).

Esta información, tanto de anfibios como de reptiles, sugiere que ambas áreas protegidas albergan diversidad de herpetofauna importante no solo para Panamá sino también a nivel centroamericano. La investigación sobre la herpetofauna en ambas áreas protegidas requiere mayor esfuerzo para determinar patrones demográficos e interacciones ecológicas contemporáneas bajo la amenaza aún de la quitridiomicosis y entonces reforzar las medidas actuales de conservación para los anfibios y los reptiles y estas áreas protegidas.

CONCLUSIÓN

Los datos preliminares que muestro sobre composición de especies de herpetofauna es una muestra de que en algunas localidades de ambas áreas protegidas, PNGDOTH y PNSF, aún persisten ensambles de herpetofauna con componentes de importancia local y regional luego de la quitridiomicosis como *C. noblei, S. albomaculata, S. flotator, H. colymba, P. gaigeae, P. museosus* y *O. parvipes* en el caso de los anfibios, y de *E. heterolepis, D. temporalis, E. panamensis, A. lionotus, G. bellus* y *S. argus* en el caso de reptiles. Preliminarmente estos ensambles de especies no muestran grados fuertes de dominancia, y la combinación de riqueza y abundancia indica que poseen buenos grados de diversidad. Estos datos aportan información importante para mejorar la conservación de la herpetofauna en el

PNSF y PNGDOTH. Sin embargo, la investigación de ambos grupos, anfibios y reptiles, debe ser más intensa en ambas localidades abarcando múltiples aspectos sean demográficos, ecológicos, fisiológicos, conductuales y continuar con las evaluaciones epidemiológicas del *Bd* para mejorar continuamente la gestión de la herpetofauna y sus hábitats en estas áreas protegidas.

AGRADECIMIENTOS

Al CBMAP II del Ministerio de Ambiente (MiAmbiente) (antes Autoridad Nacional del Ambiente), Contrato de Préstamo No. BIRF 7439-PAN y del Acuerdo de Donación del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM) No. GEF TF 056628, por el apoyo logistico y financiero a través del Sistema de Monitoreo de la Diversidad Biológica. A los biólogos Yostin Añino y Alberto García, y el conjunto de guardaparques de MiAmbiente en PNGDOTH y PNSF por su ayuda y asistencia en campo.

REFERENCIAS

Aguilar, D., & J. Pérez. 2006. Variación Poblacional de Anfibios y Reptiles en la Localidad de Alto de Piedra, Santa Fé, Provincia de Veraguas. Tesis no publicada. Centro Regional Universitario de Veraguas, Universidad de Panamá. Santiago, Veraguas, Panamá. 112 pp.

Batista, A., A. Hertz, K. Mebert, G. Koehler, S. Lotzkat, M. Ponce, & M. Vesely. 2014. Two new fringe-limbed frogs of the genus *Ecnomiohyla* (Anura: Hylidae) from Panama. Zootaxa 3826(3): 449-474.

Beaupre, S., & L. Douglas. 2009. Snake populations as indicators of ecosystem health. Pp: 244-261, en: S. Mullin y R. Seigel (eds). Snakes: Applied Ecology and Conservation. Cornell University Press. 373 pp.

Beebee, T., & R. Griffiths. 2005. The amphibian decline crisis: a watershed for conservation biology?. Biol. Conser. 125(3): 271-285.

Berger, L., A. A. Roberts, J. Voyles, J. E. Longcore, K. A. Murray, & L. F. Skerratt. 2016. History and recent progress on chytridiomycosis in amphibians. Fungal. Ecol. 19: 89-99.

Brem, F., & K. Lips. 2008. *Batrachochytrium dendrobatidis* infection patterns among Panamanian amphibian species, habitats and elevations during epizootic and enzootic stages. Dis. Aquat. Organ. 81(3): 189-202.

Carrizo, A. 2010. Riqueza y Abundancia de la Herpetofauna de la Cuenca Alta del Rio Santa Maria, Santa Fé, Veraguas. Tesis no publicada. Universidad Autónoma de Chiriquí. Chiriquí, Panamá. 123 pp.

Crawford, A. J., K. Lips, & E. Bermingham. 2010. Epidemic disease decimates amphibian abundance, species diversity, and evolutionary history in the highlands of central Panama. P. Nat. Acad. Sci. USA 107(31): 13777-13782.

Elizondo, L., A. Sosa-Bartuano, P. Ruback, & J. Ray. 2015. Range extension and natural history observations of a rare Panamanian snake, *Geophis bellus* Myers, 2003 (Colubridae: Dipsadinae). Check List 11(4): 1675.

Fisher, M. C., T. Garner, & S. Walker. 2009. Global emergence of *Batrachochytrium dendrobatidis* and amphibian chytridiomycosis in space, time, and host. Annu. Rev. Microbiol. 63: 291-310.

Hertz, A., F. Hauenschild, S. Lotzkat, & G. Köhler. 2012. A new golden frog species of the genus *Diasporus* (Amphibia, Eleutherodactylidae) from the Cordillera Central, western Panama. ZooKeys 196: 23-46.

Ibañez R. 2014. Anfibios y Reptiles. Pp 104-118. En: Puerta-Piñero C., Gullison R.E., Condit R.S. Metodologias para el Sistema de Monitoreo de la Diversidad Biológica de Panamá (versión en Español). DOI http://dx.doi.org/10.5479/si.ctfs.0001.

Jaramillo, C., L. Wilson, R. Ibáñez, & F. Jaramillo. 2010. The Herpetofauna of Panama: Distribution and Conservation Status. In: L. Wilson, J. Townsend & J. Jhonson (Eds). Conservation of Mesoamerican Amphibians and Reptiles. pp. 605-671. Eagle Mountain Publishing. Utah, USA.

Johnson, J. D., V. Mata-Silva, & L. D. Wilson. 2015. A conservation reassessment of the Central American herpetofauna based on the EVS measure. Amphib. Reptile Conserv. 9(2): 1–94.

Kilburn, V., R. Ibáñez, O. Sanjur, E. Bermingham, J. Suraci, & D. Green. 2010. Ubiquity of the pathogenic chytrid fungus, *Batrachochytrium dendrobatidis*, in anuran communities in Panama. EcoHealth 7(4): 537-548.

Kilburn, V., R. Ibáñez, & D. Green. 2011. Reptiles as potential vectors and hosts of the amphibian pathogen *Batrachochytrium dendrobatidis* in Panama. Dis. Aquat. Organ. 97(2): 127-134.

Lips, K. 1999. Mass mortality and population declines of anurans at an upland site in western Panama. Conserv. Biol. 13(1): 117–125.

Lips, K., F. Brem, R. Brenes, J. Reeve, R. Alford, J. Voyles, C. Carey, L. Livo, A. Pessier, & J. Collins. 2006. Emerging infectious disease and the loss of biodiversity in a Neotropical amphibian community. P. Natl. Acad. Sci. USA 103(9): 3165-3170.

Lotzkat, S. 2010. Diversity, taxonomy, and biogeography of the reptiles inhabiting the highlands of the Cordillera Central (Serrania de Talamanca and Serrania de Tabasará) in western Panama. Tesis Doctoral, Goethe-Universität. Frankfurt, Alemania. 931 pp.

Lotzkat, S., A. Hertz, & G. Koehler. 2012. A new species of *Sibon* (Squamata: Colubroidea: Dipsadidae) from the Cordillera Central of western Panama, with comments on other species of the genus in the area. Zootaxa 3485(1): 26-40.

Martinez, V., & A. Rodriguez. 1992. Del primer inventario en "Cerro Tute". Amphibia: Caudata y Anura. Reptilia: Squamata. Sauria y Serpentes. Scientia (Panamá) 7: 29-53.

Martinez, V., N. Pimentel, & A. Hurdaneta. 1994. Diversidad herpetofaunística en los Cerros "Narices" y "La Anselma", Provincia de Veraguas. Distrito de Santa Fé. Scientia (Panamá) 9: 59-79.

Mendelson III, & D. Mulcahy. 2010. A new species of toad (Bufonidae: *Incilius*) from central Panama. Zootaxa 2396: 61-68.

Myers, C. 2003. Rare snakes—five new species from eastern Panama: reviews of northern *Atractus* and southern *Geophis* (Colubridae: Dipsadinae). American Museum Novitates 3391: 1-47.

Myers, E., S. Ruane, K. Knight, J. Knight, & J. Ray. 2013. Distribution record of *Tantilla alticola* Boulenger, 1903 (Squamata: Colubridae) in Coclé Province, Republic of Panama. Check List 9(1): 151-152.

Newell, D., R. Goldingay, & L. Brooks. 2013. Population recovery following decline in an endangered stream-breeding frog (*Mixophyes fleayi*) from subtropical Australia. PLoS One 8(3): e58559.

Poe, S., & M. Ryan. 2017. Description of two new species similar to *Anolis insignis* (Squamata: Iguanidae) and resurrection of *Anolis* (Diaphoranolis) *brooksi*. Amphib. Reptile Conserv. 11(2): 1-16(e141).

Ray, J., K. DeCero, P. Ruback, J. Wedow, & J. Knight. 2013. Geographic distribution notes on *Trimetopon barbouri* Dunn 1930 from western Panama. Check List 9(6): 1573-1575.

Rebollar, E., M. Hughey, R. Harris, R. Domangue, D. Medina, R. Ibáñez, & L. Belden. 2014. The lethal fungus *Batrachochytrium dendrobatidis* is present in lowland tropical forests of far eastern Panama. PloS One 9: e95484.

Ryan, M., J. Savage, K. Lips, & J. Giermakowski. 2010. A new species of the *Craugastor rugulosus* series (Anura: Craugastoridae) from west-central Panama. Copeia 2010(3): 405-409.

Savage, J., K. Lips, & R. Ibáñez. 2008. A new species of *Celestus* from west-central Panama, with consideration of the status of the genera of the Anguidae: Diploglossinae (Squamata). Rev. Biol. Trop. 56(2): 845-859.

Scheele, B., F. Guarino, W. Osborne, D. Hunter, L. Skerratt, & D. Driscoll. 2014. Decline and re-expansion of an amphibian with high prevalence of chytrid fungus. Biol. Conserv. 170: 86-91.

Stadler, L. 2010. Diversität, Taxonomie und Zoogeographie der Herpetofauna der Umgebung von Alto de Piedra (Veraguas, Panama). Tesis no publicada. Justus-Liebig-Universität Gießen. Hessen, Alemania. 290 pp.

Vitt, L., & J. Caldwell. 2009. Herpetology: An Introductory Biology of Amphibians and Reptiles. Third Edition. Academic Press, Elsevier. 697 pp.

Wake, D., J. Hanken, & R. Ibáñez. 2005. A new species of big black *Bolitoglossa* (Amphibia: Caudata) from central Panama. Copeia 2005(2): 223-226.

Whiles, M., K. Lips, C. Pringle, S. Kilham, R. Bixby, R. Brenes, S. Connelly, J. Colon-Gaud, M. Hunte-Brown, A. Huryn, C. Montgomery, & S. Peterson. 2006. The effects of amphibian population declines on the structure and function of Neotropical stream ecosystems. Front. Ecol. Environ. 4(1): 27-34.

Woodhams, D. C., V. L. Kilburn, L. K. Reinert, J. Voyles, D. Medina, R. Ibánez, A. Hyatt, D. Boyle, J. Pask, D. Green, & L. A. Rollins-Smith. 2008. Chytridiomycosis and amphibian population declines continue to spread eastward in Panama. EcoHealth 5: 268–274.

Anexo 1. Listado de anfibios, y su cantidad de individuos, registrados en las localidades muestreadas en el PNGDOTH y el PNSF, y sus aspectos de conservación relacionados a la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), él método del valor de vulnerabilidad ambiental (VVA) para Panamá (Jaramillo *et al*., 2010) y para Centroamérica (Johnson *et al*., 2015), y valores locales para El Copé basado en Crawford *et al*., 2010. Especies registradas fuera de los transectos tienen sus abundancias con un guión anterior al número. Especies con asterisco son endémicas nacionales.

TAXA	**PNGDOTH**	**PNSF**	**Aspectos de Conservación**			
	# de individuos	# de individuos	VVA (Panamá)	VVA (Centroamérica)	UICN	Crawford *et al*., 2010
ORDEN ANURA						
Familia Bufonidae						
Incilius coniferus	-4	--	6	8	LC	LC
Rhinella horribilis	2	2	5	3	LC	DD-LC
Familia Centrolenidae						
Espadarana prosoblepon	4	--	7	9	LC	De
Sachatamia albomaculata	3	4	8	12	LC	Cr
Familia Craugastoridae						
Craugastor crassidigitus	5	3	9	12	LC	
C. fitzingeri	6	5	8	12	LC	LC
C. noblei	2	--	9	16	LC	DD
C. talamancae	1	--	9	17	LC	LC

TAXA	PNGDOTH	PNSF	Aspectos de Conservación			
	# de individuos	# de individuos	VVA (Panamá)	VVA (Centroamérica)	UICN	Crawford *et al*., 2010
Familia Dendrobatidae						
Colostethus pratti	7	--	9	15	LC	Ex
Silverstoncia flotator	6	4	12	16	LC	De
Familia Eleutherodactylidae						
Diasporus diastema	25	6	7	15	LC	LC
Diasporus vocator	7	15	10	15	LC	?
Familia Hylidae						
Agalychnis callidryas	--	1	7	11	LC	DD-LC
Hyloscirtus colymba	3		10	13	CR	Cr
Smilisca phaeota	--	-15	5	11	LC	LC
Familia Leptodactylidae						
Leptodactylus fragilis	-25	--	6	5	LC	DD-LC
Familia Ranidae						
Lithobates warszewitschii	--	6	6	10	LC	Ex
Familia Strabomantidae						
Pristimantis caryophyllaceus	--	3	8	15	NT	LC
P. cerasinus	3	--	9	16	LC	De
P. cruentus	5	5	8	14	LC	De

Anexo 1 (Continuación)

Anexo 1 Continuación)

TAXA	PNGDOTH	PNSF	Aspectos de Conservación			
	# de individuos	# de individuos	VVA (Panamá)	VVA (Centroamérica)	UICN	Crawford *et al*., 2010
P. gaigeae	2	--	9	16	LC	Ex
*P. museosus**	1	--	13	17	EN	LC
P. pardalis	3	--	12	17	NT	LC
P. rickens	5	2	9	12	LC	Ex
ORDEN CAUDATA						
Familia Plethodontidae						
Oedipina parvipes	1	--	9	15	LC	Ex
TOTAL	91	56				

VVA (Panamá): de 3 a 8 baja vulnerabilidad ambiental; de 9 a 11mediana vulnerabilidad ambiental; de 12 a 20 alta vulnerabilidad ambiental.
VVA (Centroamérica): de 3 a 9 baja vulnerabilidad ambiental; de 10 a 13 mediana vulnerabilidad ambiental; de 14 a 20 alta vulnerabilidad ambiental.
UICN y Crawford *et al*. 2010: LC= "preocupación menor", EN= "en peligro", NT= "casi amenazada", De= "declinada", Ex= "extirpada", Cr= "en estado crítico", DD= "datos deficientes". Ver sección Metodología (Análisis de Datos) para conocer mejor sobre estos rangos y categorías.

Anexo 2. Listado de reptiles, y su cantidad de individuos, registrados en las localidades muestreadas en el PNGDOTH y el PNSF, y sus aspectos de conservación relacionados a la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) y el método regional del valor de vulnerabilidad ambiental (VVA). Especies registradas fuera de los transectos tienen sus abundancias con un guión anterior al número. Especies con asterisco son endémicas nacionales.

TAXA	PNGDOTH	PNSF	Aspectos de Conservación		
	# de individuos	# de individuos	VVA (Panamá)	VVA (Centroamérica)	UICN
ORDEN SQUAMATA					
SUB ORDEN SAURIA					
Familia Corytophanidae					
Corytophanes cristatus	2	1	8	10	LC
Familia Gymnophtalmidae					
*Echinosauria panamensis**	5	1	11	14	NE
Leposoma southi	2	--	8	14	LC
Ptychoglossus plicatus	2	--	8	11	LC
Familia Hoplocercidae					
Enyalioides heterolepis	3	--	8	13	LC
Familia Polychrotidae					
Anolis capito	--	1	8	11	NE
A. humilis	2	3	11	14	NE
A. insignis	--	1	11	14	NE

Anexo 2 (continuación)

TAXA	PNGDOTH	PNSF	Aspectos de Conservación		
	# de individuos	# de individuos	VVA (Panamá)	VVA (Centroamérica)	UICN
A. lemurinus	4	15	8	7	NE
A. limifrons	--	2	8	15	NE
*A. lionotus**	10	15	12	14	LC
Familia Sphaerodactylidae					
Lepidoblepharis xanthostigma	2	--	8	13	LC
Familia Teiidae					
Holcosus festivus	2	--	8	10	LC
H. leptophrys	--	1	11	16	LC
SUB ORDEN SERPENTES					
Familia Colubridae					
Dipsas articulata	1	--	10	15	LC
D. temporalis	2	--	8	13	LC
*Geophis bellus**	1	--	13	16	DD
Geophis sp. (aff. hoffmani)	1	--	7	12	NE
Imantodes cenchoa	1	2	6	6	NE

Anexo 2 (continuación)

TAXA	PNGDOTH	PNSF	Aspectos de Conservación		
	# de individuos	# de individuos	VVA (Panamá)	VVA (Centroamérica)	UICN
Oxybelis aeneus	--	1	8	5	NE
Sibon argus	1		12	16	LC
S. nebulatus	1		8	5	NE
Familia Viperidae					
Bothrops asper	--	-1	9	10	NE
TOTAL	42	43			

VVA (Panamá): de 3 a 8 baja vulnerabilidad ambiental; de 9 a 11mediana vulnerabilidad ambiental; de 12 a 20 alta vulnerabilidad ambiental.
VVA (Centroamérica): de 3 a 9 baja vulnerabilidad ambiental; de 10 a 13 mediana vulnerabilidad ambiental; de 14 a 20 alta vulnerabilidad ambiental.
UICN: LC= "preocupación menor", VU= "vulnerable", DD= "datos insuficientes". Ver sección Metodologia (Análisis de Datos) para conocer mejor sobre estos rangos y categorias.

Recibido 22 de abril del 2016, aceptado 25 de octubre de 2017.

Tecnociencia 2017, Vol. 19, N° 2: 33-46
julio-diciembre 2017

INFORME DE UNA MUERTE TRAUMÁTICA OCURRIDA EN "POTRERO SECO", PROVINCIA DE CHIRIQUÍ, RESUELTO MEDIANTE EL USO DE LA ENTOMOLOGIA FORENSE

[1]Percis A. Garcés & [2]Wilfredo P. Morales
[1] Universidad de Panamá, Departamento de Zoología, República de Panamá.
[2] Instituto de Medicina Legal, Agencia de Chiriquí, República de Panamá.
E-mail: perchysg@gmail.com

RESUMEN
El estado físico en que se encuentra un cadáver presenta señales claras del tiempo que ha transcurrido, y esto asociado a la fauna que él mismo presenta puede ayudar a esclarecer el intervalo *postmortem*. En "Potrero Seco", provincia de Chiriquí se descubrió un cadáver en estado avanzado de putrefacción, colonizado por larvas de moscas. Se colectaron las larvas al azar y se colocaron en cámaras de crías para permitir que continuaran su desarrollo en tanto que otras larvas fueron colocadas en alcohol al 70 % para detener su desarrollo. Las larvas más grandes tenían un tamaño de 12.0 mm, y este tamaño fue recuperado en larvas que tenían 168 horas de exposición. Esto se basó en el análisis del tamaño que tenían las larvas al momento que fueron recuperadas del cadáver. De acuerdo con el experimento, la especie que se recuperó del cadáver correspondió a *Cochliomyia macellaria* y su ciclo de vida demoró 24 a 26 días, desde la fase de huevos hasta la obtención de los ejemplares adultos.

PALABRAS CLAVES
Intervalo *postmortem*, cadáver, *Cochliomyia macellaria*, putrefacción.

REPORT OF A TRAUMATIC DEATH OCCURRED IN POTRERO SECO, PROVINCE OF CHIRIQUI, SOLVED BY MEANS OF FORENSIC ENTOMOLOGY

ABSTRACT

The physical state in which you find a human corps, shows clearly signs of the time elapsed, this, associated to its faunal, can be used to clarify the post-mortem interval. In Potrero Seco, province of Chiriquí, a human corps was discovered in advanced state of putrefaction and colonized by larvae from flies. Larvae were collected randomly and then put in breed chambers, to complete their development, meanwhile others were set in alcohol 70%, to stop their development. The larvae's sizes were of 12.0 mm, the same size recovered in larvae with 168 hours of exposition. This was based on the analysis of the size of larvae at that moment recovered from the corps. According to the experiment, the species recovered from the corps corresponded to, *Cochliomyia macellaria*, and its life cycle, takes 24 to 26 days from the egg stage to adult.

KEYWORDS

Postmortem interval, corps, *Cochliomyia macellaria*, putrefaction.

INTRODUCCIÓN

Cuando se descubre un cadáver humano con claros indicios de que la persona ha sido torturada o asesinada es cuando entra en escena el personal del Instituto de Medicina Legal y Ciencias Forenses, del Ministerio Público para tratar de investigar la manera de muerte, la causa de muerte y establecer o aproximar las causas y la posible fecha en que se produjo el deceso. En estos casos donde los cuerpos aparecen en estados avanzados de descomposición no es fácil determinar el tiempo en que se produjo la muerte. Los métodos tradicionales en medicina legal no tienen mucha aplicabilidad. No obstante, la entomología forense puede proveer el único medio para estimar el tiempo de muerte. La entomología forense se basa en el estudio de los insectos y otros artrópodos involucrados en las investigaciones criminales (Catts & Goff, 1992). Dípteros y coleópteros constituyen los principales actores en los procesos de descomposición cadavérica entre los insectos necrófagos (Turchetto & Vanin, 2004).

Entre los dípteros, las familias de mayor importancia forense son las Calliphoridae y Sarcophagidae (Carvalho *et al*., 2001). En los casos que nos ocupan, los insectos encontrados en la escena en asociación con el estado que presenta el cadáver, pueden proporcionar una idea del tiempo requerido para el desarrollo de los primeros insectos colonizadores, hasta alcanzar el tamaño/o el estadio que se colecta al momento de su hallazgo. Para estimar el intervalo *postmortem* (IPM), se debe determinar la edad de la larva más grande. Esto pasa por conocer su longitud o el peso seco de las larvas más grandes y compararlas con los datos que se tienen de referencia sobre la edad de la misma larva.

La tasa de desarrollo de una larva va a depender de la temperatura ambiental en la cual se desarrolla. Cada estadio tiene una temperatura que requiere la especie y, ha sido definida como el número de Grado Horas Acumuladas (GHA) o Grado días Acumulados para completar su desarrollo. Es decir, la historia termal de la larva debe ser comparada con la temperatura que se registró en la escena, al momento de descubrir o levantar un cadáver, para tratar de determinar el IPM. Las condiciones ambientales, así como los parámetros climáticos entre los cuales la temperatura tienen un fuerte impacto en la tasa de desarrollo de las especies encontradas (Gennard, 2007), también afectan el comportamiento de los adultos, el desarrollo larval y la sucesión de los insectos (Schoenly & Reid, 1987; Davies, 1990; Yusseff, 2007). El conocimiento del microclima bajo el cual se desarrollan los insectos, en un cuerpo, es fundamental para la entomología forense (Catts, 1992). Este proceso involucra la acumulación apropiada de datos para el desarrollo de las especies, en una variedad de temperaturas, además de la consideración de los otros factores bióticos y abióticos que pueden afectar la tasa de desarrollo de los insectos.

El presente trabajo trata de dilucidar el IPM de un varón adulto de 34 años de edad, quien había sido reportado como desaparecido el 19 de julio de 2015, el mismo había sido visto con vida por última vez en horas de la tarde de ese dia. El 28 de julio del 2015, en horas de la

noche, se reporta el hallazgo de un cadáver que colgaba de un árbol, en el sector de "Potrero Seco", área de Paso Ancho, en Cerro Punta, provincia de Chiriquí.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se inició el día 29 de julio del 2015. La primera fase consistió en tomar una muestra de larvas colectadas de los restos del cadáver; vestia pantalón "jeans" color azul, zapatillas negras marca Nike; además presentaba una soga azul con blanco atada al cuello con un nudo corredizo (Fig. 1). El mismo fue trasladado a la Morgue Judicial de David. Un día más tarde, es decir, el 29 de julio del año en curso, diez horas después del hallazgo se realizó la autopsia médico legal. Presentaba larvas de diferentes tamaños, por lo cual se tomó una muestra al azar de las mismas. Algunas se colocaron en alcohol al 70% para detener su crecimiento y así obtener el tamaño que presentaban las mismas al momento de la autopsia. Otras larvas fueron colocadas vivas en cámaras de emergencia que contenían hígado descompuesto para que continuaran su desarrollo hasta adultos, con la finalidad de conocer el tiempo real que las larvas demoraban en alcanzar el tamaño recuperado en la escena. El tejido se colocó en una caja de cartón y junto a las larvas eran observados diariamente hasta que se obtuvieron las primeras emergencias de moscas adultas (Fig. 2).

Fig. 1 Cadáver en estado de putrefacción, infestado con larvas de mosca

Fig. 2 Sustrato con las larvas obtenidas durante la necropsia; Primera fase experimental. (Fotografía: Eivar Villarreal)

La segunda fase consistió en criar las moscas que fueron obtenidas en la primera fase. Estas se colocaron en un recipiente para hacer que se reprodujeran, y las larvas eclosionadas se alimentaron con hígado descompuesto. Estas larvas fueron medidas cada 24 horas, hasta la obtención de los adultos. Las observaciones de estos adultos emergidos se realizaba cada día, con el fin de documentar el momento preciso en que estas moscas colocaban sus huevos e iniciaban el desarrollo de sus larvas.

Estos adultos fueron colocados en un recipiente de "foam" cubierto con una malla de "tul" y además, con agua azucarada para que los individuos adultos maduraran sus huevos (Fig. 3). El sistema completo se colocó dentro de la Morgue Judicial a una temperatura constante de 20 °C, tratando de aproximarla a la temperatura que fue registrada en el sitio donde se encontró el cadáver.

Durante esta fase, las larvas que emergieron eran retiradas cada 24 horas, hasta lograr obtener el tamaño de la larva recuperada sobre el cadáver, con lo cual se pretendía asociar el tiempo transcurrido del cadáver. La tercera fase, consistió en visitar y colectar moscas adulta con carne de cerdo como atrayente, en el sitio donde ocurrió el deceso

y, así confirmar la identificación de los adultos emergidos en la segunda fase. Para la identificación de los Calliphoridae se utilizó la clave de Amat *et al.* (2008). Los materiales empleados durante la fase experimental son presentados en el Cuadro 1.

Fig. 3 Caja de "foam", cubierta con una malla metálica, conteniendo además, tierra, sustrato y agua, y cuatro individuos adultos emergidos durante la primera fase. (Fotografía: Eivar Villarreal)

Cuadro 1 Materiales empleados durante la fase experimental

MATERIALES UTILIZADOS EN EL EXPERIMENTO, SEGÚN LA FASE	
FASES	**MATERIALES**
PRIMERA FASE	1- Caja de cartón con arena. 2- Sustrato para nutrir las larvas (Hígado descompuesto). 3- Dos tubos de ensayo de plásticos.
SEGUNDA FASE	1- Caja de hielo seco con malla metálica para sellar la caja. 2- Tierra. 3- Sustrato (hígado, corazón y carne de cerdo) para la alimentación de larvas y de las moscas adultas. 4- Agua.
TERCERA FASE	1- Red entomológica para atrapar los insectos en el área. 2- Alcohol al 70 %. 3- Sustrato (carne de cerdo). 4- Envases de plásticos con tapas enroscables.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De la autopsia, se concluyó que la muerte se produjo por "Asfixia por Ahorcadura" por lo que al parecer el cuerpo de la víctima estuvo colgando desde el momento del deceso hasta el descubrimiento del mismo. Según el reporte médico, el cadáver se encontraba en avanzado estado de putrefacción, en la fase enfisematosa. La necropsia reportó, flictemas, desprendimiento de epidermis, cara de negro, ausencia de ambos ojos, protrusión de la lengua y gran cantidad de larvas ubicadas en el rostro, cuello, abdomen y en la pelvis. Las larvas recuperadas del cuerpo tenian una longitud de 12.0 mm (Fig. 4). Encontramos que la primera mosca emergió a los 15 dias de iniciado el experimento. En tanto que la mayor emergencia de moscas se registró después 16 días de su exposición.

Fig. 4 La longitud de la larva de 11.0 mm obtenida durante la segunda fase experimental, se obtuvo a 168 horas de iniciado el experimento. (Fotografía: Eivar Villarreal)

Los primeros huevos de las moscas adultas se observaron un día después de su emergencia. Aproximadamente, 48 horas después, se observaron las primeras larvas de primer *instar*. Al noveno dia del experimento, se obtuvieron larvas de aproximadamente 12.0 mm que casi coincidian con el tamaño de las larvas encontradas sobre el cadáver. El crecimiento máximo de estas larvas se dio entre 144 - 216 horas de haber iniciado el experimento.

Los individuos emergidos durante la segunda fase del experimento pertenecían a la especie *Cochliomyia macellaria* (Fabricius, 1775). Coincidiendo con las moscas colectadas en el sitio del deceso, que también fueron de la especie *C. macellaria*, documentando de esta manera que fue la misma especie que colonizó el cuerpo del occiso (Fig. 5).

Fig. 5 Individuos criados e identificados en la escena del hecho y durante la fase experimental, (*Cochliomyia macellaria*) junto a un ejemplar de Sarcophagidae. (Fotografía: Eivar Villarreal, Dr Wilfredo Pitti Morales.)

En el Cuadro 2 se resumen los resultados obtenidos en cada fase de crecimiento larval y el tiempo trascurrido de la especie en mención.

La entomología forense es utilizada para estimar el lapso de tiempo entre la muerte de una víctima de homicidio y su descubrimiento (Goff, 1992; Anderson, 1995). A menudo, es el único método disponible para determinar el tiempo después de las 72 horas del deceso. Sin embargo, también puede ser usada en las primeras 72 horas, particularmente en crímenes de alto perfil, para confirmar parámetros o bien cuando solo una parte del cuerpo ha sido encontrada (Vanlaerhoven & Anderson, 2001).

Cuadro 2 Fases del experimento que contienen el tamaño de las larvas vs el tiempo

RESULTADOS DEL EXPERIMENTO N 2015-07-29-231 POR FASES

FASES	REGISTRO			
PRIMERA FASE:	1. 29-7-15=Inicio de la fase experimental. 2. 13-8-15 =Emergencia de individuos (#1 adultos). 3. 14-8-15 = Emergencia de individuos (#4 adultos).			
SEGUNDA FASE:	1. Cambio de hábitat 16-8-15; 1:00 pm			
Las mediciones se realizaron cada 24 horas, la temperatura se mantuvo constante en 20 grados.	**FECHA**	**ESTADIO**	**HORAS**	**LONGITUD**
Las larvas comenzaron a abandonar el sustrato hacia el 29 y 30 de agosto pasando a otra fase de su ciclo de vida (Pupas).	20-8-15	Huevo	0 (12:00pm)	----------
El día 14 de septiembre del 2015 emergieron los primeros individuos adultos, de las larvas criadas durante la segunda fase; transcurrieron 23 días para que las moscas completaran su ciclo desde huevos hasta la obtención de ejemplares adultos. La temperatura en este periodo no fue controlada osciló entre 22 y 38 grados.	22-8-15	Larva	48 hrs	0.15mm
	24-8-15	Larva	72 hrs	0.4 mm
	25-8-15	Larva	96 hrs	0.6 mm
	26-8-15	Larva	120 hrs	0.8 mm
	27-8-15	Larva	144 hrs	10 mm
	28-9-15	Larva	168 hrs	11 mm
	29-8-15	Larva	192 hrs	10 mm
	30-8-15	Larva	216 hrs	10 mm
	31-8-15	Pupa	240 hrs	----------
	14-09-15	Adultos emergidos	----------	----------
TERCERA FASE: 1. Identificación de las moscas adultas por el entomólogo forense.	1. Especie: *Cochliomyia macellaria*			
2. Colecta e identificación de las moscas en el sitio del deceso, la temperatura registrada en el sitio fue 16 °C.	2. Especie: *Cochliomyia macellaria*			

Un cuerpo en descomposición atrae selectivamente a ciertos dípteros de importancia médico legal, iniciando con los Calliphoridae. Estas han sido reportadas en muchos estudios, debido a su aparición temprana sobre los cuerpos, incluso antes de la muerte (agonía) (Smith, 1986). Se sabe que colonizan rápidamente los orificios naturales u orificios ocasionados por agentes externos como los impactos de bala o lesiones por arma blanca. El cadáver en estudio

presentaba masas larvales en los ojos y en el área genital. Se conoce que en estas condiciones la temperatura interna de la masa larval puede ser significativamente más elevada que la temperatura ambiental, por lo que el metabolismo produce una frenética actividad por alimentarse.

Durante la autopsia se concluyó que el occiso murió por "asfixia por horcadura". De acuerdo con nuestro experimento el tiempo transcurrido desde la última vez que fue vista la persona con vida, hasta el hallazgo del cuerpo, transcurrieron aproximadamente 237 horas. Las larvas de mayor tamaño encontradas en el cuerpo tenian una longitud aproximada de 12.0 mm. Se determinó que estas larvas alcanzaron esta longitud entre las 144 - 216 horas, posterior a la ovipostura, haciendo una media de 180 hrs, lo que da un total de 7.5 días. (Cuadro 2). En su fase inicial, a partir de la colocación de huevos, estos pasan a larvas y, las larvas atraviesan tres fases denominadas *instares*, las cuales son separadas por la muda de la piel. Estas larvas continúan desarrollándose en tamaño y en atributos fisicos a través de los *instares* (Adair, 2012).

Considerando el sitio donde fue localizado el cadáver, o sea, en un área abierta, con terreno escarbado, con vegetación escasa, sobresaliendo matorrales, es decir, en un potrero alejado de la presencia humana y, con tan solo un árbol donde se ahorcó el sujeto, todo estos datos asociados con las bajas temperaturas y alta humedad que podrían fluctuar durante los días, lo que lograría acelerar o retardar el crecimiento de las larvas. De allí, que muchos investigadores señalen la importancia de la temperatura y la humedad al momento de realizar estos estudios, sobre los ciclos de vida, tomando en cuenta los GHA para determinadas especies. En síntesis una alta temperatura hace que el metabolismo de las larvas se acelere y consecuentemente las larvas se desarrollen más rápidamente o menor tiempo. Caso contrario ocurre cuando la temperatura es baja.

Durante la visita al sitio, se observó muy poca actividad de moscas en el área, no obstante al momento de colocar la carne de cerdo, aparecieron cuatro especímenes de *C. macellaria* en el área. Estos individuos fueron incrementando en número a medida que el olor se dispersaba hasta donde ellos se encontraban y el mismo era percibido por las moscas. Por lo cual, pueden llegar en forma masiva hasta el

sustrato y/o llegar en distintas oleadas y ovipositar sobre el cadáver, con lo que se podria explicar la diferencia en los tamaños de las larvas encontradas sobre el cadáver. Se encontró la misma especie que emergió de las larvas recuperadas del cadáver. También, se determinó una especie de la familia Sarcophagidae junto a la especie *C. macellaria*, cuyo ciclo duró 24 a 26 días, desde la fase de huevos hasta la obtención de los individuos adultos.

En tanto que el ciclo completo, desde la ovipostura hasta la emergencia de las moscas adultas obtenidas en el experimento, a partir de las larvas obtenidas en la segunda fase del estudio, tuvo una duración de 23 días. Vélez & Wolff, (2008) obtuvieron la eclosión de los huevos de *C. macellaria,* 15 horas después de la oviposición, con una temperatura de 25.3 °C. Además, reportaron ejemplares adultos a 294.5 horas o 12.2 días después de haber sido colocados. Estos resultados comparados con otros estudios donde temperaturas más altas, dentro de un rango óptimo, pueden producir un acelerado desarrollo (Byrd & Allen, 2001; Grassberger *et al.*, 2003; Krüger *et al.*, 2003). Por otro lado, si tenemos bajas temperaturas el ciclo de las moscas demorará más tiempo en alcanzarse. Otros autores también han reportado a esta especie asociada a cadáveres humanos (Barreto *et al.*, 2002; Andrade *et al*., 2005; Oliva, 2007).

Los hallazgos entomológicos sugieren que el cuerpo del occiso pudo haber permanecido en el sitio en forma prolongada, tomando en cuenta la distancia de un sitio que no era frecuentado por las personas del lugar, lo que hacia dificil su localización. Las bajas temperaturas del sitio no facilitaron la dispersión del olor, lo que pudo tener un efecto retardador en la colonización y desarrollo de las larvas. A todo esto, los moradores señalaron que descubrieron el cadáver al ver muchos gallinazos en el área, lo que los alertó pensando que se trataba de un animal muerto.

De acuerdo con los datos obtenidos en el presente estudio podemos concluir que el tiempo que demoró la larva recuperada del cadáver duró 12.2 días, por lo que, la muerte del occiso se produjo el 19 de julio fecha en que se alertó de su desaparición.

De acuerdo con Vélez & Wolff, (2008) *Cochliomyia macellaria"* tiene un ciclo de vida que oscila entre 257 a 332 horas, a 25 ºC, contados desde la ovipostura hasta obtención de los individuos adultos, y, este ciclo puede ser fuertemente influenciado por los cambios de temperatura y humedad. Es decir, que son los factores que más pudieron influir en nuestros resultados; por ello, la necesidad de realizar estos experimentos con temperaturas controladas similares a las de las escenas, aun cuando sabemos que las temperaturas ambientales oscilan frecuentemente y que los cadáveres al aire libre están expuestos a estas fluctuaciones. Sin embargo, reconocemos el primer intento por conocer las especies de importancia médico legal que llegan a los cuerpos en descomposición, como un esfuerzo notable que permite a los entomólogos forenses tener una idea de las especies que pudieran estar desarrollándose en los cuerpos en descomposición y con ello ampliar en panorama de la entomofauna local.

CONCLUSIONES

Las variaciones de temperatura y humedad además, así como la disponibilidad de ciertos sustratos pueden afectar los resultados experimentales, teniendo en cuenta que son los factores más limitantes en los estudios.

Las larvas de mayor tamaño encontradas en el cuerpo tenían una longitud aproximada de 12.0 mm.

Se determinó durante el experimento que estas larvas alcanzaron esta longitud entre las 144 - 216 horas, posterior a la ovipostura, lo que dio un total de 7.5 días aproximadamente.

REFERENCIAS

Adair, T. 2012. Aspects Influencing the Entomological Postmortem Interval in Crime Scene Reconstruction. J. Assoc. Crime Scene. Reconstr. 18:17-19.

Andrade, H.T., A.A. Varela-Freire; M.J. Araujo Batista & J.F. Medeiros. 2005. Calliphoridae (Diptera) coletados em cadáveres humanos no Rio Grande do Norte. Neotrop. Entomol. 34: 855-856.

Amat, E.; M.C. Vélez & M. Wolff. 2008. Clave ilustrada para la identificación de los géneros y las especies de Califóridos (Diptera: Calliphoridae) de Colombia. Caldasia 30 (1): 231-244

Barreto, M., M.E. Burbano & P. Barreto. 2002. Flies (Calliphoridae, Muscidae) and Beetles (Silphidae) from Human Cadavers in Cali, Colombia. Mem. Inst. Oswaldo Cruz. 97: 137-138.

Byrd, J.H. & J. Allen. 2001. The development of the black blow fly, *Phormia regina* (Meigen), Forensic Sci, Int. 120:79-88.

Catts, E.P. 1992. Problems in estimating the postmortem interval in death investigation, J. of Agric. Entomol. 9: 245–255.

Catts, E.P. & M.L. Goff. 1992. Forensic entomology in criminal investigations. Annu. Rev. Entomol. 37:253–72.

Carvalho, L.M., A.X. Linhares & J.R. Trigo 2001. Determination of drug levels and the effect of diazepam on the growth of necrophagous flies of forensic importance in southeastern Brazil. Forensic Sci. Int. 120: 140-144.

Davies, L. 1990. Species composition and larval habitats of blowfly (Calliphoridae) populations in upland areas in England and Wales. Med. Vet. Entomol. 4: 61–8.

Gennard, D.E. 2007. Forensic Entomology: An Introduction, John Wiley & Sons, Chichester, UK. Pp. 244.

Grassberger, M., E. Friedrich & C. Reiter. 2003. The blowfly *Chrysomyia albiceps* (Wiedemann) (Diptera: Calliphoridae) as a new indicator in Central Europe. International J. Legal Med. 117:75-81.

Oliva, A. 2007. Frecuencia y distribución temporal de moscas cadavéricas (Diptera) en la ciudad de Buenos Aires. Rev. Mus. Argentino Nat. 9: 5-14.

Krüger, R.F., P.B. Ribeiro & P.R. Peixoto Costa. 2003. Ciclo de vida de *Sarcophaga (Liopygia) crassipalpis* (Macquart) (Diptera: Sarcophagidae). Entomología y Vectores. 10: 85-98.

Schoenly, K. & W. Reid. 1987. Dynamics of heterotrophic succession in carrion arthropod assemblages: discrete series or a continum of change? Oecologia. 73:192–202.

Smith, K.G.V. 1986. A Manual of Forensic Entomology. The Trustees of the British Museum (Natural History), London. Pp. 475.

Turchetto, M. & S. Vanin. 2004. Forensic entomology and climatic change. Forensic Sci. Int. 146: 207-209.

Vanlaerhoven, S.H & G.S. Anderson. 2001. Implications of using development rates of blow fly (Diptera: Calliphoridae) eggs to determine postmortem interval. J. Entomol. Soc. Brit. Columbia 98. 189-194.

Vélez, M.C. & M. Wolff. 2008. Rearing five species of Diptera (Calliphoridae) of forensic importance in Colombia in semicontrolled field conditions. Pap. Avulsos Zool. (São Paulo). 48: 41-47.

Yusseff, S.Z. 2007. Efectos de la temperatura sobre el desarrollo de *Chrysomya rufifacies* y *Cochliomyia macellaria* (Diptera: Calliphoridae), dos especies importantes para la entomología forense en Puerto Rico, Tesis de Maestría, 85p.

Recibido 28 de agosto de 2017, aceptado 25 de octubre de 2017.

Tecnociencia 2017, Vol. 19, Nº 2: 47-65
julio-diciembre 2017

RIQUEZA Y ABUNDANCIA DE LAS ESPECIES DE MURCIÉLAGOS DE DONOSO, PROVINCIA DE COLÓN, PANAMÁ

Jacobo Arañz G.
Universidad de Panamá. Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología
Departamento de Zoología, Escuela de Biología.
E-mail: jarauzg@cwpanama.net

RESUMEN

A finales de 2010 y comienzos de 2011 se efectuaron inventarios de murciélagos en seis sitios de la concesión del proyecto de Minera Panamá S.A, Distrito de Donoso, provincia de Colón. Los objetivos fueron caracterizar los quirópteros en áreas próximas a las instalaciones de la compañía y conocer sobre este grupo de mamíferos en la región. Los murciélagos fueron capturados con redes de niebla de 12 m de largo por 2.6 m de alto, desplegadas en tres sitios simultáneos cada noche, con cinco redes en cada una y colocadas a 0.5 m sobre el suelo. Se capturaron 419 murciélagos de 32 especies y cuatro familias. De Phyllostomidae hubo 407 individuos (97% de la capturas), incluidos en 29 especies que representan el 85% de las especies registradas. En Mormoopidae, Vespertilionidae y Molossidae sólo se registró una especie para cada una. La especie más abundante fue *Carollia perspicillata* con 217 individuos (52%). Otras especies moderadamente abundantes fueron *C. castanea* con 50 ejemplares (12%), *Dermanura watsoni* con 37 individuos (9%) y *D. phaeotis* con 32 individuos (8%) de las capturas totales. Estas especies incluyeron el 80% de los murciélagos atrapados. Las otras 28 especies incluyeron 13 o menos individuos y de 16 especies, sólo se capturó un individuo. La presente información aumenta a 46 especies los murciélagos conocidos en el sector entre el río Coclé del Norte y el río Belén, área del Distrito de Donoso, provincia de Colón.

PALABRAS CLAVES

Murciélagos, diversidad, abundancia, riqueza de especies, hábito alimentarios, Donoso.

RICHNESS AND ABUNDANCE OF DONOSO BAT SPECIES, PROVINCE OF COLON, PANAMA

ABSTRACT

Between August 2010 and March 2011, inventories of bats was carried out done in six locations of the Copper Project concession of Minera Panamá, S.A. in the District of Donoso, Colon province. The objective was to characterize the bats in areas near of the company infrastructures and to contribute to the general knowledge of this group of mammals in the region. The bats were caught with mist nets of 12 m length by 2.6 m height, spread out in three simultaneous sites each night, with five nets in each one and placed at 0.5 m above the ground. The study recorded 419 bats, belonging to 32 species and 4 families. The Phyllostomatidae familily reported 407 individuals (97% of the captures) and 29 species (85% of total species). On the other hand, the Mormoopidae, Vespertilionidae and Molossidae families only registered one species each one. The most abundant species was *Carollia perspicillata* with 217 individuals (52%). The other abundant species were *C. castanea* with 50 specimen (12%), *Dermanura watsoni* with 37 individuals (9%) and *Dermanura watsoni* with 37 individuals (9%) and *D. phaeotis* with 32 individuals (8%). These species represent 80% of total bat captures. The abundance of the 28 species was included 13 or less individuals. The results of this study increases to 46 the bats known from the region between Cocle del Norte and Belen rivers, area of Donoso District, Colon province.

KEYWORDS

Bats, diversity, abundance, species richness, food habits, Donoso.

INTRODUCCIÓN

Se conocen unas 380 especies de murciélagos en la Región Neotropical (Solari & Martínez-Arias 2014), de las cuales unas 118 han sido registradas para Panamá (Samudio & Pino 2014), cifra que representa el 31% de esa riqueza de quirópteros neotropicales. Sin embargo, se carece de información sobre diferentes aspectos de la historia natural para la mayoría de las especies panameñas, tales como su ecología, distribución y abundancia, especialmente en zonas donde no se han realizado trabajos que contribuyan a conocer aspectos sobre este grupo de mamíferos. Los murciélagos neotropicales son un componente importante de la fauna de mamíferos y en el caso de Panamá, abarcan el 49.5% de los mamíferos terrestres del país (Samudio & Pino 2014).

En Panamá, áreas como la costa abajo de Colón cuenta con pocos datos sobre sus murciélagos. Para esa región, la información disponible es escasa, y entre las pocas referencias están el trabajo de Arosemena & Araúz (1996), que informaron sobre 12 especies en el área de Petaquilla, mientras que Araúz (2006) aportó información sobre 34 especies registradas en varias localidades en los alrededores del río Coclé del Norte y San Juan. Por su parte, un informe de CBMAP-ANCON (2008) aportó datos sobre 14 especies observadas en los alrededores de Punta Rincón. No obstante, áreas ubicadas al oeste del Río Petaquilla son poco conocidas en lo que se refiere a su fauna de quirópteros.

El estudio de línea base de fauna para el Proyecto Mina de Cobre, de Minera Panamá S.A. (MPSA) (Golder 2010) no consideró la caracterización de los murciélagos del área. Posteriormente, hubo interés de parte de MPSA en complementar y generar información sobre varios grupos de organismos dentro de su área de concesión, por lo que a finales de 2010 se inició una campaña de inventarios, entre los cuales y por recomendaciones de especialistas nacionales, se contemplaron los murciélagos, especialmente en áreas directamente relacionadas con las operaciones de exploración y cercanas a infraestructuras de la compañía. Otros grupos incluidos en esta etapa de inventarios incluyeron plantas, insectos, anfibios, reptiles, aves, murciélagos y mamíferos grandes, y de esa forma, obtener una visión integral de la biota presente en el área de

concesión y alrededores. En virtud de ello, el objetivo de este trabajo es difundir parte de la información obtenida sobre la fauna de quirópteros en el área de concesión de Minera Panamá S.A., lo que contribuye a un mejor conocimiento sobre este grupo de mamíferos en esa región del país.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó entre agosto de 2010 y marzo de 2011 en el área de concesión del proyecto de cobre de Minera Panamá S.A., ubicada en Distrito de Donoso, Provincia de Colón (Figura 1). En la zona predomina el bosque tropical perennifolio de hojas anchas de tierras bajas, caracterizado por un sotobosque abierto. Sin embargo, en algunas zonas intervenidas el sotobosque es denso y en otras predominan rastrojos muy cerrados (Golder 2010). También hay zonas de bosque secundario producto de alteraciones humanas donde se practicó la agricultura por parte de campesinos e indígenas, y áreas intervenidas por actividades de MPSA, como son plataformas de perforación y caminos de acceso.

Los principales cuerpos de agua en el área son el río Petaquilla, Caimito, San Juan y sus respectivas afluentes, pero también existen numerosas afluentes menores. La topografía del área del proyecto se caracteriza por colinas relativamente estrechas y con pendientes pronunciadas. Este patrón topográfico y geomorfológico, se mantiene en casi todo el área del proyecto, salvo muy pocas excepciones (Golder 2010).

Las condiciones climáticas del área de estudio son bastante uniformes y según la clasificación de Köppen, el clima corresponden al denominado Tropical muy Húmedo (Afi), presentando precipitaciones que fluctúan entre 3,500 y 5,000 mm/año. La precipitación es abundante y ocurre en promedio por lo menos una vez al día, más a menudo en los meses más húmedos (por ejemplo, noviembre y diciembre). En las zonas más alejadas de la costa, los patrones de lluvia cambian y se asemejan a otras áreas del país, donde se presentan periodos con lluvias claramente definidos (Tosi, 1971).

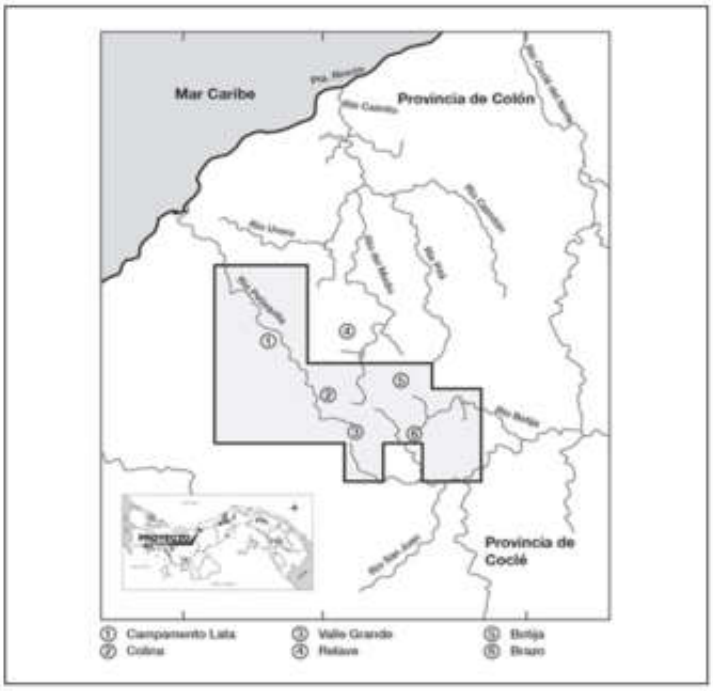

Fig. 1 Mapa del área de estudio. El área sombreada corresponde a los terrenos de la concesión de Minera Panamá S.A. y los números a los sitios donde se realizaron las capturas de murciélagos

Captura de murciélagos

Las capturas de murciélagos se efectuaron en seis sitios próximos a diferentes instalaciones de la empresa. Cada sitio fue visitado dos veces durante el estudio, no obstante el esfuerzo para cada uno varió según el comportamiento de las lluvias. Se conformaron tres grupos que trabajaron simultáneamente en sitios diferentes cada noche, cada uno con cinco redes de 12 m de largo por 2.5 m de alto y tamaño de malla de 30

mm, colocadas a 0.5 m sobre el suelo. Las redes fueron abiertas desde las18:30 hasta las 23:30 horas y ubicadas en senderos, claros de bosque, riachuelos y otros sectores adecuados para capturar murciélagos (Kunz & Kurta 1988).

A los ejemplares capturados se les tomó información sobre hora de captura, número de red, identificación hasta especie, longitud del antebrazo, masa corporal, sexo, edad y estado reproductivo. Los murciélagos fueron identificados con las claves para quirópteros de Handley (1981) y Timm *et al*. (1999). También se usó la guia pictórica de Reid (2009) para discernir características morfológicas y distribución geográfica. Como la naturaleza del estudio fue de corta duración, no se marcaron los ejemplares capturados y se asumió cada captura como un individuo diferente. Una vez tomada la información, los murciélagos fueron liberados en el sitio de captura. El arreglo taxonómico utilizado para el reconocimiento de las especies fue según Solari & Martinez-Arias (2014).

Para evaluar la efectividad del esfuerzo de muestreo se elaboraron curvas de rarefacción y la curva acumulativa de especies mediante el programa EstimateS Win9.1.0 (Colwell 2013). Los datos totales sobre la composición y abundancia de las especies fueron analizados según indices para medir la diversidad según Shannon-Wiener (Moreno 2001).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Capturas: Se colocaron 195 redes durante 13 noches, donde se obtuvo un esfuerzo de total de muestreo 909 horas red. Se capturaron 419 murciélagos, pertenecientes a 32 especies y cuatro familias (Cuadro 1). Cabe señalar que el 50% de las 32 especies registradas se detectaron durante las tres primeras sesiones de muestreos. La curva acumulativa muestra el número de especies registradas durante las 13 sesiones de inventarios (Figura 2). Según los estimadores no paramétricos ACE y CHAO 1 utilizados para estimar la riqueza esperada, la cantidad fluctúa entre 55 y 58 especies respectivamente, por lo que los resultados abarcaron entre el 55 y 58% de las especies de la zona (Figura 2). De acuerdo a estos estimadores, el esfuerzo de muestreo no fue suficiente para obtener una buena evaluación de la riqueza de

murciélagos de la zona. Parte de esta falencia pudo deberse a la afectación que tuvieron las lluvias sobre las horas de trabajo obtenidas, y por otro lado, que no se trabajaron redes ubicadas a más de 3 m de altura.

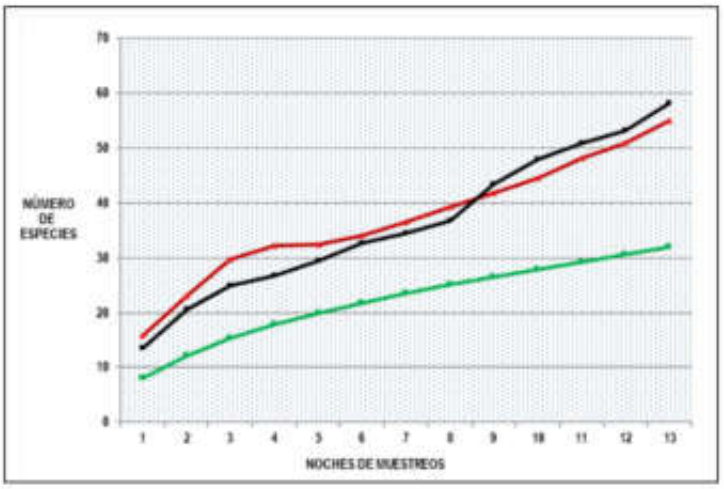

Fig. 2 Curva acumulativa de especies (verde) y curvas de rarefacción según los estimadores no paramétricos CHAO 1 (rojo) y ACE (negro)

Cuadro 1 Diversidad taxonómica y abundancia por sexo y total de las especies de murciélagos registrados

FAMILIA	SUBFAMILIA	NOMBRE CIENTÍFICO	MACHOS	HEMBRAS	TOTAL	ABUNDANCIA RELATIVA (%)
Mormoopidae		*Pteronotus mesoamericanus*	2	7	9	2.14
Phyllostomidae	Micronycterinae	*Micronycteris schmidtorum* *	1	0	1	0.23
	Desmodontinae	*Desmodus rotundus*	0	1	1	0.23
	Phyllostominae	*Chrotopterus auritus* *	1	0	1	0.23
		Lophostoma silvicolum	0	1	1	0.23
		Phyllostomus discolor	2	0	2	0.47
		Phyllostomus hastatus	0	1	1	0.23
		Tonatia saurophila	1	0	1	0.23
		Trachops cirrhosus	1	0	1	0.23
	Glossophaginae	*Glossophaga commissarisi*	3	4	7	1.67
		Glossophaga soricina	2	1	3	0.71
		Hylonycteris underwoodi *	1	0	1	0.23
	Lonchophyllinae	*Lonchophylla robusta*	1	4	5	1.19
	Carolliinae	*Carollia brevicauda*	11	2	13	3.1
		Carollia castanea	29	21	50	11.93
		Carollia perspicillata	116	101	217	51.78
	Glyphonycterinae	*Glyphonycteris sylvestris* *	0	1	1	0.23
	Stenodermatinae	*Artibeus jamaicensis*	3	4	7	1.67
		Artibeus lituratus	4	1	5	1.19
		Chiroderma villosum	0	1	1	0.23
		Dermanura phaeotis	25	7	32	7.63
		Dermanura tolteca	0	1	1	0.23
		Dermanura watsoni	22	15	37	8.83
		Platyrrhinus helleri	1	0	1	0.23
		Platyrrhinus vittatus	0	1	1	0.23
		Vampyressa thyone	3	3	6	1.43
		Vampyressa nymphaea	2	0	2	0.47
		Sturnira lilium	1	2	3	0.71
		Sturnira ludovici *	0	1	1	0.23
		Sturnira luisi *	1	3	4	0.95
Molossidae	Molossinae	*Molossus molossus* *	1	0	1	0.23
Vespertilionidae	Myotinae	*Myotis nigricans* *	0	2	2	0.47
TOTALES			234	185		419

Arreglo taxonómico según Solari & Martínez-Arias (2014). M : machos. H : hembras. *: nuevos registros para la zona

DIVERSIDAD DE TAXA

La familia mejor representada en el inventario fue Phyllostomidae con 29 especies (91%), que a su vez incluyó siete subfamilias (Micronycterinae, Desmodontinae, Phyllostominae, Glossophaginae, Carolliinae, Glyphonycterinae y Stenodermatinae). Las familias Mormoopidae, Vespertilionidae y Molossidae incluyeron una especie cada una (Cuadro 1 y 2). Las especies con mayor cantidad de capturas fueron *Carollia perspicillata* (52%), *C. castanea* (12%), *Dermanura watsoni* (8.8%) y *D. phaeotis* (7.6%). Las 28 especies restantes sólo comprendieron cerca del 20% de las capturas (Cuadro 1). En su trabajo en las áreas del Río Coclé del Norte y en el Río San Juan, Araúz (2006) obtuvo registros de 32 especies, con una similitud del 69% de las especies respecto al presente trabajo.

Cuadro 2 Riqueza y abundancia de especies capturadas por familias y subfamilias

FAMILIAS	SUBFAMILIAS	INDIVIDUOS CAPTURADOS	CANTIDAD DE ESPECIES
MORMOOPIDAE		9	1
PHYLLOSTOMIDAE	Micronycterinae	1	1
	Desmodontinae	1	1
	Phyllostominae	7	6
	Glossophaginae	11	3
	Lonchophyllinae	5	1
	Carolliinae	280	3
	Glyphonycterinae	1	1
	Stenodermatinae	102	13
MOLOSSIDAE	Molossinae	1	1
VESPERTILIONIDAE	Myotinae	2	1

Arreglo taxonómico según Solari & Martínez-Arias (2014).

Durante este trabajo se detectaron ocho especies observadas por primera vez para la zona, por lo que si se toman en cuenta las especies registradas en trabajos anteriores (e.g. Arosemena & Araúz 1996; Araúz 2006; CBMAP-ANCON 2008) se obtiene una riqueza total de 46 especies de murciélagos para esa región del país (Apéndice 1). Sin

embargo, es apropiado señalar que los muestreos con redes colocadas en el sotobosque sólo reflejan una parte de la riqueza de murciélagos, en vista de que estos animales, según sus hábitos de búsqueda de alimento se desplazan en los diferentes niveles del bosque (sotobosque, subdosel, dosel, arriba del dosel). Por ello, por el momento sólo se tiene una visión parcial de la quirofauna de Donoso, pero que no deja de tener relevancia ante la escasa información disponible.

Se estimó un índice de diversidad medio (Shannon-Wiener) para los resultados totales, obteniéndose un valor de 1.90 bits/ind, equidad (0.55) y dominancia (0.30). La diversidad es baja, en virtud de la gran abundancia de algunas especies (e.g. *Carollia* spp.). Por su parte, la equidad tuvo un valor medio, mientras que el valor para la dominancia indica que el ensamble de murciélagos está dominado por algunas especies, entre ellas *Carollia perspicillata* y *C. castanea*.

La deforestación y fragmentación de los bosques afectan principalmente a las poblaciones de murciélagos especialistas; sin embargo, facilita la expansión de hábitas intervenidos, que parecen propiciar las abundancias de unas pocas especies aptas para este tipo de paisajes (Fenton *et al*. 1992; Medellin *et al*. 2000). Aun cuando los remanentes boscosos sustentan un número importante de especies sensibles de la subfamilia Phyllostominae, su abundancia fue escasa (2% de todas las capturas) durante los muestreos. De esta forma, en contraste con las especies comunes, la mayor parte de las especies raras son propias de áreas boscosas en mejor estado de conservación, o pertenecen a grupos de murciélagos de difícil detección por medio de redes de niebla.

Chiroptera es de los grupos de fauna más importantes en la evaluación del impacto de la fragmentación sobre la diversidad del paisaje, ya que los murciélagos son abundantes, diversos y fáciles de muestrear (Medellin *et.al.* 2000), y constituyen entre un 40 - 50% de los mamíferos de los bosques tropicales (Estrada *et al*. 1993). Debido a su abundancia local, riqueza de especies y diversidad ecológica, estos animales han sido reconocidos como un grupo indicador de la perturbación antropogénica (Fenton *et al*. 1992; Medellín *et al*. 2000). Entre las especies que se consideran indicadoras de hábitats

perturbados está *C. perspicillata*, la cual resultó la más abundante en este inventario. Por otra parte, otros estudios revelan que si bien algunas especies suelen usar campos agrícolas y vegetación secundaria, también prefieren ubicar sus sitios de descanso en el bosque maduro (Evelyn & Stiles 2003). Estos resultados resaltan la función de los bosques remanentes en la conservación de estos mamíferos, especialmente en los paisajes rurales tropicales formados a partir de la deforestación y el reemplazo de bosques por áreas agrícolas y ganaderas.

Además, se considera a los bosques secundarios y riparios (ribereños) como los hábitats que presentan las mejores condiciones (refugio, alimento y conectividad) para la conservación de los murciélagos (Laval & Rodríguez 2002) en el paisaje (refugio, alimento y conectividad) y que alberga una mayor cantidad de especies especialistas (de áreas cerradas) de hábitos boscosos, por lo que es necesario elaborar planes de manejo y conservación basado en este tipo de hábitats.

HÁBITOS ALIMENTARIOS

Según los hábitos alimentarios, 16 especies son consideradas primariamente frugívoras, siete son insectívoras, cuatro nectarívoras-polinívoras, dos carnívoras, dos omnívoras y una hematófaga (Cuadro 3). Las especies frugívoras abarcaron 381 individuos (91%), mientras que los insectívoros 20 individuos (4.8%), los nectarívoros-polinívoros 12 individuos (3%), y las especies omnívoras, carnívoras y hematófagas con ≤ 3 individuos ($\leq 0.71\%$).

Hubo un dominio de especies frugívoras del sotobosque, a nivel de riqueza y abundancia, y en particular de las que buscan alimento en áreas perturbadas (e.g. *Carollia* spp.). Por otro lado, los murciélagos carnívoros pobremente representados en el inventario, son reconocidos como un grupo sensible al efecto de borde y responden negativamente a la perturbación y a la fragmentación (Medellín *et al*. 2000)

El gremio de murciélagos frugívoros en el Neotrópico integra una gran parte de la fauna tropical de mamíferos, tanto en número de especies como en número de individuos. La considerable abundancia de

murciélagos frugivoros del género *Carollia* es importante, ya que desempeñan un papel clave para el bosque por su rol en la dispersión de semillas. Cualquier impacto negativo sobre las poblaciones de frugívoros provocaría problemas a la conservación y regeneración del bosque en paisajes fragmentados y perturbados (Aguiar & Marinho-Filho 2007; de Lima & dos Reis 2004). Estas especies son responsables de la restauración ecológica de áreas perturbadas (Galindo-Gonzales 1998).

Cuadro 3 Hábitos alimentarios de las especies registrada

FAMILIA	SUBFAMILIA	NOMBRE CIENTÍFICO	HÁBITO ALIMENTARIO
Mormoopidae		*Pteronotus*	Insectívoro aéreo
Phyllostomidae	Micronycterinae	*Micronycteris*	Insectívoro de sustrato
	Desmodontinae	*Desmodus rotundus*	Hematófago
	Phyllostominae	*Chrotopterus auritus*	Carnívoro
		Lophostoma silvicolum	Insectívoro de sustrato
		Phyllostomus discolor	Omnívoro
		Phyllostomus hastatus	Omnívoro
		Tonatia saurophila	Insectívoro de sustrato
		Trachops cirrhosus	Carnívoro
	Glossophaginae	*Glossophaga*	Nectarívoro-polinívoro
		Glossophaga soricina	Nectarívoro-polinívoro
		Hylonycteris underwoodi	Nectarívoro-polinívoro
	Lonchophyllinae	*Lonchophylla robusta*	Nectarívoro-polinívoro
	Carollinae	*Carollia brevicauda*	Frugívoro del
		Carollia castanea	Frugívoro del
		Carollia perspicillata	Frugívoro del
	Glyphonycterinae	*Glyphonycteris sylvestris*	Insectívoro de sustrato
	Stenodermatinae	*Artibeus jamaicensis*	Frugívoro del dosel
		Artibeus lituratus	Frugívoro del dosel
		Chiroderma villosum	Frugívoro del dosel
		Dermanura phaeotis	Frugívoro del dosel
		Dermanura tolteca	Frugívoro del dosel
		Dermanura watsoni	Frugívoro del dosel
		Platyrrhinus helleri	Frugívoro del dosel
		Platyrrhinus vittatus	Frugívoro del dosel
		Vampyressa thyone	Frugívoro del dosel
		Vampyressa nymphaea	Frugívoro del dosel
		Sturnira lilium	Frugívoro del
		Sturnira ludovici	Frugívoro del
		Sturnira luisi	Frugívoro del
Molossidae	Molossinae	*Molossus molossus*	Insectívoro aéreo
Vespertilionidae	Myotinae	*Myotis nigricans*	Insectívoro aéreo

Arreglo taxonómico según Solari & Martínez-Arias (2014).

CONCLUSIONES

La comunidad de murciélagos en las áreas próximas a las edificaciones de la concesión Minera Panamá S.A. comprende aproximadamente el 33% de los murciélagos de tierras bajas de Panamá. Esto sin contar que los inventarios no estuvieron centrados en las áreas mejor conservadas en los alrededores.

Si se toman en cuenta las especies observadas en el presente estudio y en los antecedentes informados por otros autores, los resultados sugieren una riqueza de especies alta para la región, con casi el 50% de los murciélagos de tierras bajas conocidas para Panamá.

Phyllostomidae fue la familia mejor representada en este estudio, cuyos miembros en Panamá ocupan cerca del 60% de los murciélagos conocidos para el país. Los resultados muestran una visión parcial de la diversidad en la zona, en virtud que sólo se utilizaron redes a nivel del sotobosque, áreas donde se desplazan muchos filostómidos, a diferencia de los miembros de otras familias. Esta particularidad coincide con lo obtenido en otros estudios en el neotrópico y con igual metodología aplicada.

El predominio en las capturas la especie *Carollia perspicillata*, refleja la perturbación en los alrededores de las instalaciones de Minera Panamá S.A., lo que coincide con lo observado en otros estudios, en virtud que esta especie de murciélago consume los frutos de plantas propias en áreas en recuperación.

La abundancia de las especies, según sus gremios tróficos es similar a lo observado en diferentes sitios del Neotrópico. La ubicación de las redes muy cerca del suelo aumenta la probabilidad de capturar murciélagos que buscan alimento a baja altura, tal como es el caso de muchos frugívoros. Lo contrario ocurre con la mayoría de los insectívoros, por lo que hay alta probabilidad de quedar poco representados en la muestra.

AGRADECIMIENTOS

A Blanca Araúz de Minera Panamá S.A., por su apoyo y confianza durante todas las etapas de los trabajos de campo. Nuestros reconocimientos a Samuel Valdés coordinador general del proyecto y a Alexis Guevara quien dirigió de manera eficiente la logística de campo. A los biólogos Mario Arosemena, Percis Garcés, Eduardo Santamaria, Melquiades Castillo, Rubén Guardia y Alexander Vinda quienes contribuyeron a la compilación de los datos de campo. Nuestra gratitud a Rafael Samudio, Jr., de SOMASPA, por sus comentarios que contribuyeron a mejorar la presentación de este trabajo.

REFERENCIAS

Aguiar, L.M.S. & J. Marinho-Filho. 2007. Bat frugivory in a remnant of Southeastern Brazilian Atlantic forest. Acta Chiropterologica 9: 251-260.

Araúz G., J. 2006. Riqueza de especies y abundancia de murciélagos en algunas localidades de Panamá central. *Tecnociencia* 8(2):171-190.

Arosemena, M & J. Araúz G. 1996. Terrestrial Fauna (Mammalogy). 7-1--7-7. *In*: Valdespino, I.A., D. Santamaria, E. Ijjász, E. Ebersole, R. Warner & L. Solórzano-Vincent (eds.). Rapid Terrestrial and Aquatic Ecological Evaluation for the Petaquilla Mining Project. ICF Kaiser-Asociación Nacional para la Conservación de la Naturaleza (ANCON).

CBMAP (Corredor Biológico del Atlántico Panameño) & ANCON (Asociación Nacional para la Conservación de la Naturaleza). 2008. Evaluación Ecológica Rápida para la creación de un área protegida en el Distrito de Donoso, provincia de Colón.

Colwell, R.K. 2013. Estimates: Statistical estimation of species richness and shared species from samples. Version 9.1.0 user guide and applications. http://viceroy.eeb.uconn.edu/estimates. University of Connecticut, Storrs, C.F.

de Lima, I.P. & N.R. dos Reis. 2004. The availability of Piperaceae and the search for this resource by *Carollia perspicillata* (Linnaeus) (Chiroptera, Phyllostomidae, Carolliinae) in Parque Municipal Arthur Thomas, Londrina, Paraná, Brazil. Revista Brasileira de Zoologia 21: 371.

Estrada A., R. Coates-Estrada & J.D. Merritt. 1993. Bat species richness and abundance in tropical rain forest fragments and in agricultural habitats at Los Tuxtlas, Mexico. Ecography 16: 309-318.

Evelyn, M.J. & D.A. Stiles. 2003. Roosting requirements of two frugivorous bats (*Sturnira lilium* and *Artibeus intermedius*) in fragmented Neotropical forest. Biotropica 35: 405-418.

Fenton M.B., L. Acharya, D. Audet, 1992. Phyllostomid bats (Chiroptera: Phyllostomidae) as indicators of habitat disruption in the Neotropics. Biotropica 24: 440-446.

Galindo-Gonzales J. 1998. Dispersión de semillas por murciélagos: Su importancia en la conservación y regeneración del bosque subtropical. Acta Zoológica Mexicana 73:57–74.

Golder. 2010. Estudio de impacto ambiental y social proyecto de cobre Minera Panamá. Minera Panamá S.A. y Golder Associates, Panamá. 2312 pp.

Handley, C.O. 1981. Key to the bats of the lowlands of Panama. U.S. Natl. Mus. Washington, D.C. 17 p.

Kuntz, T.H. & A. Kurta. 1988. Capture methods and holding devices. Pp.1-28 En: Kuntz T. H. (ed.). Ecological and behavioral methods for the study of bats. Smithsonian Institution Press. Washington, D. C. London.

Laval, R. & B. Rodriguez-H. 2002. Murciélagos de Costa Rica. 1ª ed.-- Santo Domingo de Heredia, Costa Rica: Instituto Nacional de Biodiversidad, INBIO, 2002. 320 pp.

Medellín, R.A., M. Equihua & M.A. Amin. 2000. Bat diversity and abundance as indicators of disturbance in Neotropical rainforests. Conservation Biology 14: 1666-1675.

Moreno, C.E. 2001. Métodos para medir la biodiversidad. M & T-Manuales y Tesis SEA, vol. 1. Zaragoza. 84 pp.

Reid, F.A. 1997. A field guide to the mammals of Central America and southeast Mexico. Oxford University Press, Inc. 334 p.

Samudio, Jr., R. & J.L. Pino. 2014. Historia de la mastozoología en Panamá. Pp. 331- 344. En J. Ortega, J.L. Martínez & D.G. Tirira (Eds.). Historia de la mastozoología en América Latina. Editorial Murciélago Blanco y Asociación Ecuatoriana de Mastozoología. 448 pp.

Solari, S. & V. Martínez-Arias. 2014. Cambios recientes en la sistemática y taxonomía de murciélagos Neotropicales (Mammalia: Chiroptera). Therya 5(1):167-196.

Timm, R.M., R.K. Laval & B. Rodríguez-H. 1999. Clave de campo para los murciélagos de Costa Rica. Brenesia 52:1-32.

Tosi, J. 1971. Zonas de vida: Una base ecológica para las investigaciones silvícolas e inventariación [inventario] forestal en la República de Panamá. PNUD-FAO. Informe técnico. 89p.

Apéndice 1 Murciélagos registrados en el área de Donoso, Colón según los diversos estudios realizados

FAMILIA	SUB-FAMILIA	NOMBRE CIENTÍFICO	Fuente			
			Arcaemena & Araúz (1996)	Araúz (2006)	CBMAP-ANCON (2008)	ESTE TRABAJO
EMBALLONURIDAE	Emballonurinae	*Rhynchonycteris naso*		X		
		Saccopteryx bilineata	X			
MORMOOPIDAE		*Pteronotus mesoamericanus*		X		X
PHYLLOSTOMIDAE	Micronycterinae	*Lampronycteris brachyota*			X	
		Micronycteris hirsuta		X		
		Micronycteris microta		X		
		Micronycteris schmidtorum				X
	Desmodontinae	*Desmodus rotundus*	X	X	X	X
	Phyllostominae	*Chrotopterus auritus*				X
		Lophostoma brasiliense		X		
		Lophostoma silvicolum	X	X		X
		Mimon crenulatum		X		
		Phylloderma stenops		X		
		Phyllostomus discolor		X		X
		Phyllostomus hastatus		X		X
		Tonatia saurophila		X		X
		Trachops cirrhosus	X			X
	Glossophaginae	*Glossophaga commissarisi*		X	X	X
		Glossophaga soricina	X			X
		Hylonycteris underwoodi				X
		Lichonycteris obscura		X		

Apéndice 1 (Continuación)

FAMILIA	SUB-FAMILIA	NOMBRE CIENTÍFICO	Fuente			
			Arcesmena & Araúz (1996)	Araúz (2006)	CSMAP-ANCON (2008)	ESTE TRABAJO
	Lonchophyllinae	*Lonchophylla robusta*		X	X	X
	Carollinae	*Carollia brevicauda*		X	X	X
		Carollia castanea	X	X	X	X
		Carollia perspicillata	X	X	X	X
	Glyphonycterinae	*Glyphonycteris sylvestris*				X
	Stenodermatinae	*Artibeus jamaicensis*	X	X	X	X
		Artibeus lituratus	X	X		X
		Chiroderma salvini		X		
		Chiroderma villosum		X	X	X
		Dermanura phaeotis	X	X	X	X
		Dermanura tolteca		X		X
		Dermanura watsoni		X	X	X
		Enchisthenes hartii		X	X	
		Platyrrhinus helleri	X	X		X
		Platyrrhinus vittatus		X		X
		Uroderma bilobatum		X	X	
		Vampyressa thyone		X		X
		Vampyressa nymphaea		X		X
		Vampyrodes major		X	X	
		Sturnira lilium	X	X		X
		Sturnira ludovici				X
		Sturnira luisi				X

Apéndice 1 (Continuación)

FAMILIA	SUB-FAMILIA	NOMBRE CIENTÍFICO	Fuente			
			Acosmena & Araúz (1996)	Araúz (2006)	CBMAF-ANCON (2008)	ESTE TRABAJO
MOLOSSIDAE	Molossinae	*Molossus molossus*				X
VESPERTILIONIDAE	Vespertilioninae	*Eptesicus furinalis*		X		
	Myotinae	*Myotis nigricans*				X

Arreglo taxonómico según Solari & Martínez-Arias (2014).

Recibido 8 de agosto de 2017, aceptado 7 noviembre de 2017.

Tecnociencia 2017, Vol. 19, N° 2: 67-86
julio-diciembre 2017

TRANSICIÓN ELÉCTRICA EN MULTICAPAS DELGADAS DE VO_2/SiO_2 y VO_2/TiO_2, SINTETIZADAS EN SUBSTRATOS DE Si(100)

[1]Evgeni S. Cruz de Gracia, [2]Marciano Santamaría L. & [3]Luiz F. Schelp
[1]Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ingeniería eléctrica. Laboratorio de Sistemas Nano Estructurados
[2]Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Física, Centro de Investigaciones con Técnicas Nucleares
[3]Departamento de Física - UFSM, 97105-900, Santa María, RS, Brasil
email: evgeni.cruz@utp.ac.pa

RESUMEN
Multicapas de VO_2/SiO_2 y VO_2/TiO_2 de tres periodos fueron sintetizadas sobre substratos monocristalinos de Si (100) con buffer de SiO_2 y TiO_2, respectivamente. La caracterización estructural por difracción de rayos X (XRD) de ambas multicapas, a temperatura ambiente, mostraron el pico de difracción correspondiente al plano cristalográfico (011) bien definido evidenciando la presencia de la fase VO_2 (M1). Para $[VO_2/TiO_2]$ x 3, el pico de difracción originado por los planos (011), mostró un ligero corrimiento hacia valores más bajos del ángulo, en relación al pico patrón. Las medidas del transporte electrónico en función de la temperatura, para las multicapas $[VO_2/SiO_2]$ x 3, mostraron transición eléctrica a temperaturas de 55 °C y 58 °C y ancho de histéresis (ΔH), de 9 °C y 6 °C, respectivamente. En el sistema $[VO_2/TiO_2]$ x 3, la transición eléctrica ocurrió a 74 °C, con un ancho de histéresis sumamente estrecho (~2 °C). Nuestros resultados sugieren que el comportamiento de la histéresis, así como el corrimiento mostrado por el pico experimental del plano (011), puede ser interpretado como consecuencia de la difusión de iones de Ti^{+4} hacia los sitios del V^{+4} en el VO_2, debido a la alta temperatura del sustrato durante la deposición. Así, las impurezas de Ti^{+4} difundidas, actúan como núcleos de transformación de fase en el VO_2, disminuyendo la energía de activación de la transformación de fase, explicando de esta manera la estreches de la histéresis observada.

PALABRAS CLAVES
Multicapas, Transición Metal–Aislante (MIT), Temperatura de Transición Metal–Aislante (T_{MIT}), Histéresis, Difusión.

ELECTRICAL TRANSITION IN VO_2/SiO_2 AND VO_2/TiO_2 THIN FILMS MULTILAYERS DEPOSITED ON Si (100) SUBSTRATES

ABSTRACT

Three-period VO_2/SiO_2 and VO_2/TiO_2 multilayers were synthesized on Si(100) monocrystalline substrates with SiO_2 and TiO_2 buffer, respectively. The X-ray diffraction (XRD) characterization of both multilayers at room temperature showed a well-defined diffraction peak corresponding to the plane Crystallographic (011) strongly suggesting the presence of VO_2 (M1) phase. For $[VO_2/TiO_2]$ x 3, the diffraction peak originated by the crystallographic plane (011), showed a slight shift towards lower values of the angle, relative to the standard peak. The measurements of the electronic transport as a function of temperature for the $[VO_2/SiO_2]$ x 3 multilayers showed an electrical transition at temperatures of 55 °C and 58 °C and hysteresis (ΔH), 9 °C and 6 °C, respectively. In the $[VO_2/TiO_2]$ x 3 system, the electrical transition occurred at 74 °C, with a very narrow hysteresis width (~2 °C). Our results suggest, that the behavior of the hysteresis as well as the displacement shown by the experimental peak of the plane (011), can be interpreted as a consequence of the diffusion of Ti^{+4} ions to the V^{+4} sites in VO_2 due to the high substrate temperature during deposition. Thus, diffused Ti^{+4} impurities act as nuclei of phase transformation in the VO_2, decreasing the activation energy of the phase transformation, thus explaining the narrowing of observed hysteresis.

KEYWORDS

Multilayers, Metal–Insulator Transition (MIT), Metal–Insulating Transition Temperature (T_{MIT}), Hysteresis, Diffusion.

INTRODUCCIÓN

En los metales de transición, tales como el vanadio, hierro, y sus óxidos, los electrones experimentan una fuerte repulsión de Coulomb debido al confinamiento espacial en sus orbitales. Esta fuerte interacción electrónica, colectiva o correlacionada, tiene efectos profundos en la propiedades físicas de estos materiales, pudiendo exhibir toda una multiplicidad de fenómenos exóticos (eléctricos, ópticos y magnéticos) y haciéndolos extremadamente sensibles a pequeños cambios en parámetros externos, tales como temperatura, presión o dopaje (Kotliar & Vollhardt, 2004), y más recientemente, la aplicación de un campo eléctrico (Zhou *et al.*, 2013).

Muchos de los óxidos de metales de transición exhiben una transición metal-aislante (MIT, del inglés Metal Insulator Transition), cuya manipulación es un paso esencial hacia su uso, aplicación y desarrollo de dispositivos electrónicos novedosos, basada en materiales que exhiben correlación electrónica fuerte o "Mottronics", un término recientemente acuñado para identificar este comportamiento y que se refiere a la capacidad de un material de cambiar entre distintas fases electrónicas y magnéticas a partir de un voltaje de control (Liu *et al*., 2013).

Uno de estos óxidos, el VO_2, es un material con un prototipo de MIT, que al presentarse en estado monocristalino puro, tiene una temperatura crítica cerca de la temperatura ambiente (~ 68 °C) (Andreev *et al*., 2013), donde su resistencia cambia de 3 a 5 órdenes de magnitud, dependiendo del método y de las condiciones de síntesis. En concomitancia con la MIT, el VO_2 también experimenta una transición de fase estructural, presentando una estructura cristalina monoclínica con comportamiento semiconductor, por debajo de su temperatura crítica, y una estructura cristalina tetragonal rutilo con comportamiento metálico, cuando su temperatura alcanza valores por encima de la temperatura crítica, mostrando histéresis eléctrica de unos cuantos grados Celsius (Yamin *et al*., 2016), comportamiento este, característico de las transiciones de fase de primer orden en sólidos, y que depende igualmente del método y de las condiciones de síntesis. Como si esto no fuera suficiente, el VO_2 también experimenta cambios drásticos en su comportamiento óptico cuando se sobrepasa su temperatura crítica, siendo un material relativamente transparente a la radiación infrarroja en su fase monoclínica, y la refleja, en su fase metálica (Mlyuka *et al*., 2009).

Dado que durante la MIT, sus propiedades tales como la resistividad eléctrica, susceptibilidad magnética, transmitancia óptica y su rigidez mecánica, cambian abruptamente, el VO_2 es un material promisorio para ser utilizado en muchas aplicaciones, incluyendo los "Mottronics". Por ejemplo, se ha aprovechado la abrupta amplificación de portadores de carga eléctrica libres durante el cambio experimentado en su resistividad en la MIT, para diseñar transistores de efecto de campo con transición de fase híbrida (hyper-FET). Esto se

logra incorporando una película de VO_2, del orden de los micrómetros, en serie con la fuente (canal) de un n-MOSFET de Si, para crear un amplificador de corriente en el momento en que la MIT del VO_2 es desencadenada a partir de un voltaje de control aplicado entre la compuerta y el drenaje del hiper-FET, proporcionando un rendimiento mejorado sobre el MOSFET convencional (Shukla *et al*., 2015). Otra de las posibles aplicaciones, muy investigadas en la actualidad, es el empleo de VO_2 como material termocrómico, dado que sus propiedades ópticas cambian significativamente y reversiblemente con la temperatura (Miller, 2016). La transmitancia óptica del VO_2 en la región infrarroja disminuye sustancialmente en relación a la región visible cuando conmuta a la fase metálica. Dado que su temperatura de transición está relativamente cerca de la temperatura ambiente, es posible que una fina película de VO_2 se pueda utilizar como un revestimiento de ventana inteligente para la regulación de la irradiación solar, actuando como bloqueo del calor. Sin embargo, la fabricación de películas delgadas de VO_2 de alta calidad, requiere una alta temperatura de deposición por encima de 400 °C, lo que limita su implementación a gran escala, así como su compatibilidad con substratos sensibles a la temperatura (Loquai *et al*., 2016).

Otra limitante en las posibles aplicaciones del VO_2, es la temperatura de transición, la cual es claramente muy elevada para aplicaciones en recubrimientos en ventanas, haciendo imperativo que el mismo deba estructurarse bajo determinadas condiciones que optimicen su transición a temperaturas más próximas a la temperatura ambiente. A través de algunos procedimientos experimentales ha sido posible el decrecimiento de la temperatura de transición en el VO_2, como el dopaje con tungsteno (Mlyuka *et al*., 2009) y en películas delgadas epitaxiales crecidas sobre substratos de TiO_2(001), donde la disminución de la temperatura de transición es el resultado del efecto del estrés uniaxial a lo largo del eje *c* (Muraoka & Hiroi, 2002). Películas delgadas de VO_2 han sido intensamente estudiadas por varios años a partir técnicas de producción industrialmente viables, que incluyen películas sintetizadas mediante magnetrón sputtering RF (Jin *et al*., 2003), magnetrón sputtering DC reactivo (Mlyuka *et al*., 2009), ablación laser (Aliev *et al*., 2006), Sol-Gel (Asgharinezhad *et al*., 2016), deposición por vapor químico (CVD) a presión atmosférica (Manning *et al*., 2004), etc.

En este estudio reportamos resultados concernientes al comportamiento de los parámetros de la transición eléctrica de multicapas delgadas de VO_2, recubiertas con SiO_2 en la forma $[VO_2/SiO_2]$ x 3, y recubiertas con TiO_2 en la forma $[VO_2/TiO_2]$ x 3, producidas por la técnica de Magnetrón Sputtering RF, en ambiente reactivo. Ambos conjuntos de muestras fueron sintetizadas sobre substratos de $Si(100)/SiO_2$, con calentamiento del mismo a 460 °C, durante la deposición del VO_2.

MATERIALES Y MÉTODOS

Películas delgadas de VO_2 fueron recubiertas con materiales antireflectivos, tipo sándwiches, estructurándose en sistemas de multicapas de tres periodos $[VO_2/SiO_2]$ x 3 y $[VO_2/TiO_2]$ x 3. Ambos sistemas fueron sintetizados sobre substratos monocristalinos de Si (100) con buffer de SiO_2 y TiO_2, respectivamente. Las muestras fueron producidas mediante la técnica de magnetrón sputtering RF, en ambiente reactivo, utilizando un sistema Balzers modelo BAK 600, capaz de alcanzar una presión de base menor a 6×10^{-6} Pa y constituido por cuatro cañones para erosión iónica de blancos metálicos o aislantes de 51 mm de diámetro, porta–substrato, posicionado 50 mm arriba de los cañones, y equipado con una lámpara calefactora de 1000 W y sensor de temperatura, un obturador (*shutter* en inglés) giratorio con abertura circular, situado entre los cañones y el porta–substrato, para permitir la exposición del substrato al plasma débilmente ionizado. El VO_2 que constituyó a cada multicapas, fue sintetizado a partir de un blanco de vanadio metálico de alta pureza (99,5%) bajo condiciones de deposición previamente establecidas en el estudio de monocapas de VO_2, (Santamaría *et al*., 2013). El "*buffer*" de 2000 Å de SiO_2, en las multicapas $[VO_2/SiO_2]$ x 3, fue depositado sobre el substrato de Si (100) a temperatura ambiente, a partir de un blanco de SiO_2 (99,99%) y sin el uso de máscara. El "*buffer*" de 1000 Å de TiO_2, en las multicapas $[VO_2/TiO_2]$ x 3, fue depositado sobre el substrato de Si (100) a temperatura ambiente, a partir de un blanco de TiO_2 de alta pureza (99,95%) y sin el uso de máscaras. Se puede observar en la tabla 1 los parámetros de deposición para ambas multicapas:

Tabla 1: Parámetros para deposición del VO_2. El flujo de O_2 especificado corresponde a aproximadamente 2,5% de O_2 en la cámara según medido por el analizador de gas residual.

Muestra	Substrato	Temperatura substrato	Flujo de O_2 (sccm)	Periodo	Espaciador	Tiempo de Deposición	Potencia (W)
1451	Si (100)	460	1,00	3	SiO_2	01h:00min	70 RF
1452	Si (100)	460	0,59	3	SiO_2	01h:20min	15 RF
1457	Si (100)	460	0,84	3	SiO_2	01h:15min	50 RF
1464	Si (100)	RT	0,0	1	TiO_2	02h:00min	40 RF
1465	Si (100)	460	0,84	3	TiO_2	01h:15min	50 RF

Las muestras 1451, 1452 y 1457, depositadas con potencia RF, son las multicapas y pueden ser representadas esquemáticamente como:

Muestra: 1451 [VO_2 (20:00 min)/SiO_2 (54 Å] X N= 3
Muestra: 1452 [VO_2 (40:00 min) /SiO_2 (54 Å] X N= 3
Muestra: 1457 [VO_2 (25:00 min) /SiO_2 (54 Å] X N= 3,

donde la película delgada de SiO_2 (espaciador) se mantuvo constante y el periodo es bajo para controlar el crecimiento de la rugosidad. Este conjunto fue depositado con el objetivo de mejorar las características estructurales y eléctricas del VO_2 a través de la disminución del tipo de potencia aplicada. Por otro lado, la potencia RF nos ha mostrado un mejor crecimiento de grano que la potencia aplicada DC.

La muestra 1465, depositada con potencia RF, es el otro sistema de multicapa y puede ser representada esquemáticamente como:

Muestra: 1465 [VO_2 (25:00 min) /TiO_2 (54 Å] X N= 3,

donde el espaciador es una película delgada de TiO_2 y el periodo es bajo para controlar el crecimiento de la rugosidad. Este conjunto fue depositado con el objetivo de mejorar las características estructurales y ópticas del VO_2.

La muestra 1464 es una monocapa de TiO_2 y fue depositada con el objetivo de determinar la tasa de deposición de este material y estudiar sus características estructurales.

El análisis estructural y la determinación de fases presentes en las multicapas sintetizadas fue realizado mediante la extracción de

difractogramas de rayos X empleando el difractómetro Bruker D8 Advance (emisión K_α del cobre, λ = 1,5416 Å), en la configuración geometría Bragg-Brentano. La caracterización de transporte electrónico, por medición de la resistencia eléctrica en función de la temperatura, se realizó empleando el método patrón de cuatro puntas, en ciclos cerrados de calentamiento-enfriamiento de las muestras, en el intervalo de temperatura entre 25 °C y 100 °C. Se estudió el efecto de los recubrimientos antirreflectivos (SiO_2 y TiO_2) en el VO_2, al estructurarlo en multicapas alternadas de tres periodos, sobre los parámetros de transición eléctrica de las muestras producidas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 1 se presentan los patrones de difracción (XRD) obtenidos en la simetría θ-2θ, para las multicapas [VO_2/SiO_2] x 3, depositadas sobre substratos de silicio monocristalino con orientación cristalográfica (100) y buffer de SiO_2. Los resultados muestran la formación y presencia de varios óxidos de vanadio, en la que destacamos la aparición de un leve pico de intensidad muy baja para las multicapas 1451 y 1457, para un ángulo de difracción de 27,8° (Anderson, 1954), correspondiente al plano cristalográfico [011] de la fase monoclínica del VO_2. Un pico de mayor intensidad, correspondiente al plano cristalográfico [220], para esta misma fase del VO_2, es observado en todas las multicapas para un ángulo de difracción de 55,4° (Longo & Kierkegaard, 1970). Sin embargo, el pico de difracción más intenso lo presenta la muestra 1451, evidencia esta, que sugiere que las condiciones de síntesis para la multicapa 1451 fueron más apropiadas para la formación de la fase monoclínica del VO_2, en cuanto a potencia y tiempo de deposición. Películas de óxido de vanadio extremadamente delgadas no promueven la formación de VO_2, posiblemente por el corto tiempo al que se somete a la alta temperatura, el óxido de vanadio depositado en el substrato. Así, el tiempo de deposición es importante para la definición de parámetros estructurales (stress, crecimiento de granos, etc), eléctricos (temperatura de transición) y ópticos (constantes ópticas). Hemos encontrado que muestras producidas con tiempo igual o mayor de una 1h de deposición presentan histéresis térmica. Por debajo de ese tiempo, no presentan. Por ejemplo, esto explica porque las muestras de

las multicapas VO_2/SiO_2 de la serie 1451 y 1457 (1h de deposición RF) presentan transición. Ver figura 2.

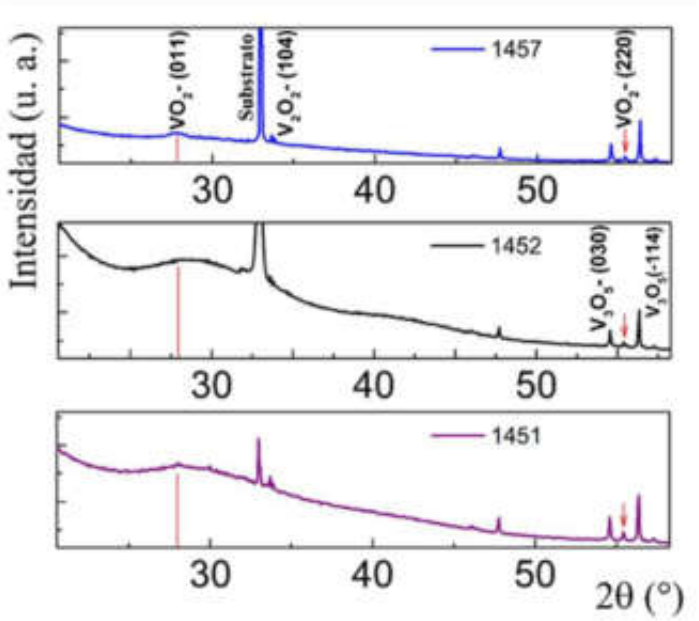

Fig. 1 Espectros de difracción de rayos X (XRD) de multicapas $[VO_2/SiO_2]$ x 3, a temperatura ambiente, depositadas sobre sustrato de Si(100) con buffer de SiO_2 de 2000 Å. Todas sintetizadas a 460 °C. En cada espectro de difracción se indica el tiempo de deposición de cada uno de los componentes de la multicapa y la potencia empleada en el caso de la síntesis del VO_2

La formación de fases adicionales de óxido de vanadio también es observada en los resultados de la figura 1. El pico correspondiente al ángulo de difracción de 33,9°, corresponde al plano cristalográfico [104] de la estructura romboédrica del V_2O_2, según ficha cristalográfica JCPDS 00-034-0187, y los picos a 54,5° y 56,4°, concuerdan con la presencia de una red monoclínica que corresponde al compuesto V_3O_5 (Asbrink, 1980).

La formación de fases diferentes al VO_2 en la síntesis de las multicapas $[VO_2/SiO_2]$ x 3, se debe a posibles alteraciones en las condiciones de

deposición, variación en el porcentaje de oxígeno en la cámara de erosión iónica y tiempo de exposición insuficiente a la alta temperatura del óxido de vanadio depositado en el substrato, que promueva la formación de VO_2.

Resaltamos de la figura 1, las semejanzas existentes en los espectros XRD obtenidos para las tres multicapas [VO_2/SiO_2], en cuanto a la formación de prácticamente las mismas fases de óxidos de vanadio, con excepción de la muestra 1452 que no mostró pico de difracción para la fase monoclínica de VO_2 correspondiente al plano [011]. Por otra parte, no fue posible identificar el compuesto cuyo plano cristalográfico dio origen al pico de difracción que se manifiesta a 47,7° en todos los espectros.

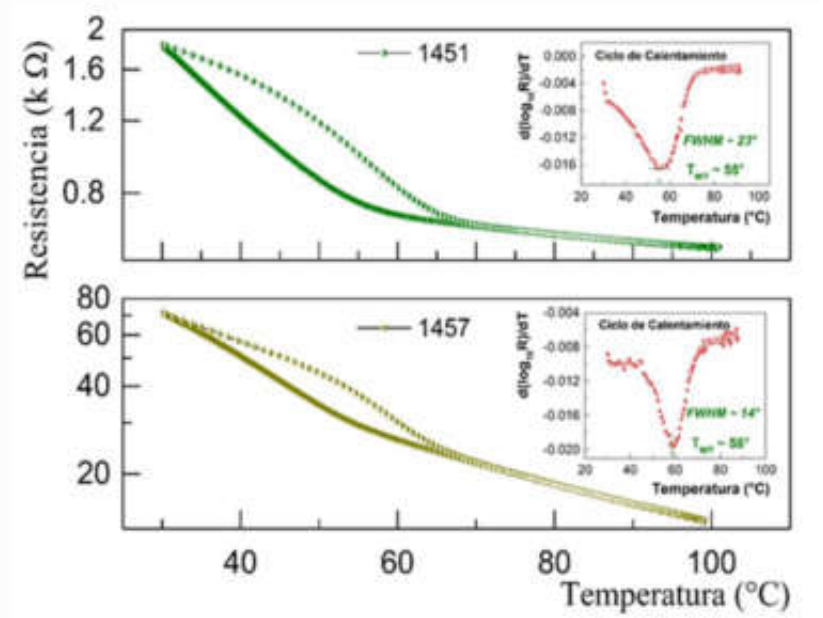

Fig. 2 Curvas de resistencia eléctrica en función de la temperatura, mostrando el lazo de histéresis característico del VO_2, en ciclos cerrados de calentamiento-enfriamiento, para multicapas 1451 y 1457 [VO_2/SiO_2] x 3, sintetizadas sobre substratos de Si(100)/SiO_2. Inset corresponde al comportamiento de la derivada logarítmica de la resistencia eléctrica con la temperatura, durante el calentamiento de las multicapas

En la figura 2 se muestra el comportamiento de la resistencia eléctrica como función de la temperatura para las multicapas [VO_2/SiO_2], para un ciclo cerrado de calentamiento-enfriamiento, correspondiente a las muestras 1451 y 1457. Ambas muestras evidencian la aparición de una transición eléctrica, debido al cambio brusco experimentado por la resistencia eléctrica en el intervalo entre 50 °C y 60 °C, dando evidencia de la formación de la fase VO_2(M1), y en concordancia con los patrones de difracción exhibidos por ellas y que fueron mostrados en la figura 1. Adicionalmente, es notable la baja resistencia eléctrica exhibida por la muestra 1451, en comparación con la muestra 1457, intervalo de transición (FWHM) más amplio (23 °C y 14 °C, respectivamente), así como un mayor ancho de histéresis eléctrica (ΔH, el intervalo de temperatura entre el pico de la derivada durante el calentamiento y el enfriamiento, esta última, no mostrada en la figura 2) (Pellegrino *et al*., 2012), ~9 °C y ~ 6 °C, respectivamente. Resaltamos el corrimiento en la temperatura de transición manifestado experimentalmente por ambas muestras (1451 y 1457), en comparación con los resultados previamente obtenidos para monocapas depositadas sobre este tipo de substratos a la misma temperatura de síntesis (460 °C) (Santamaría *et al*., 2013). Otro aspecto importante que debemos destacar de los resultados presentados en la figura 2, es el menor intervalo de temperatura durante la transición, así como el menor ancho de histéresis, manifestado por la muestra 1457, en comparación con la muestra 1451. Este comportamiento lo interpretamos como una consecuencia del mayor tiempo de deposición (25 min) al que se ha expuesto la síntesis de las distintas películas de VO_2 que conforman a la multicapa 1457, en comparación a la muestra 1451. En general, estos resultados sugieren que la deposición de multicapas delgadas de VO_2/SiO_2, promueve la disminución de la temperatura de transición del dióxido de vanadio, a valores más próximos a la temperatura ambiente; sin embargo, debe notarse también que la forma de estructurar el VO_2 en películas delgadas alternadas, separados con SiO_2, disminuye drásticamente los cambios en el valor de la resistencia, alrededor de la temperatura de transición, si lo comparamos con las monocapas de VO_2 sintetizadas sobre este tipo de sustrato (hasta tres órdenes de magnitud de variación en la resistencia eléctrica) y bajo las mismas condiciones (Santamaría *et al*., 2013).

La figura 3 muestra el comportamiento de la resistencia eléctrica como función de la temperatura de la muestra 1452, en la que puede observarse que no hay manifestación de una transición eléctrica en el intervalo de temperatura estudiado. Este comportamiento eléctrico está de acuerdo con el patrón de difracción obtenido para la muestra 1452 (figura 1), donde no se manifiesta la presencia de la fase monoclínica del VO_2.

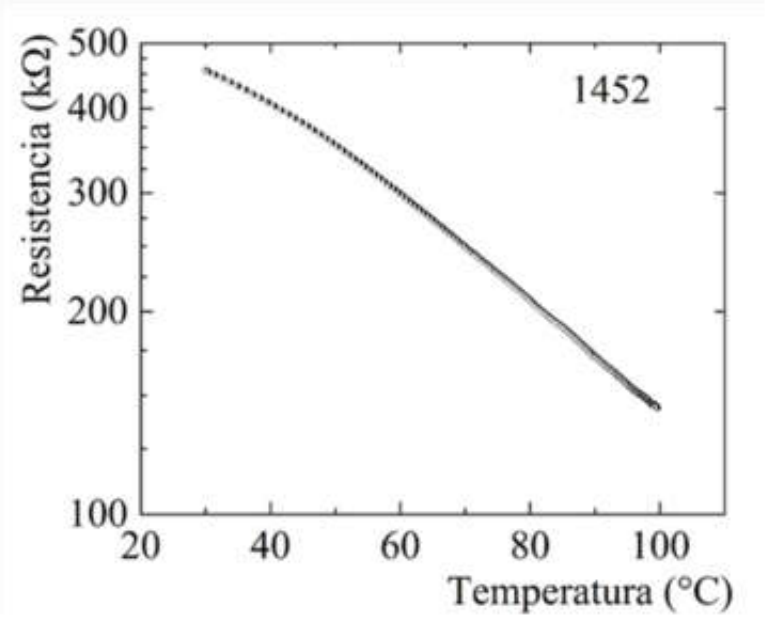

Fig. 3 Curva de resistencia eléctrica en función de la temperatura para la multicapa 1452, sintetizada sobre substrato de Si (100)/SiO_2. No se aprecia transición eléctrica en el intervalo de temperatura estudiado

La figura 4A muestra la curva de XRD para una mono capa de TiO_2 depositada con potencia aplicada RF. Puede observarse en estos resultados que la película de TiO_2 está texturizada en la dirección de crecimiento [200]. La figura 4B presenta el resultado obtenido de la caracterización estructural obtenida a temperatura ambiente, para la multicapa [VO_2/TiO_2] x 3, depositadas sobre sustrato de Si(100) con buffer de TiO_2. El espectro XRD mostrado en la figura 4B, corrobora

la formación de la fase VO_2 (M1) en la multicapa 1465, lo que es evidente debido a la presencia del pico de difracción correspondiente al plano cristalográfico (011) a 27,74°, además, de la dirección de crecimiento [200] para el TiO_2.

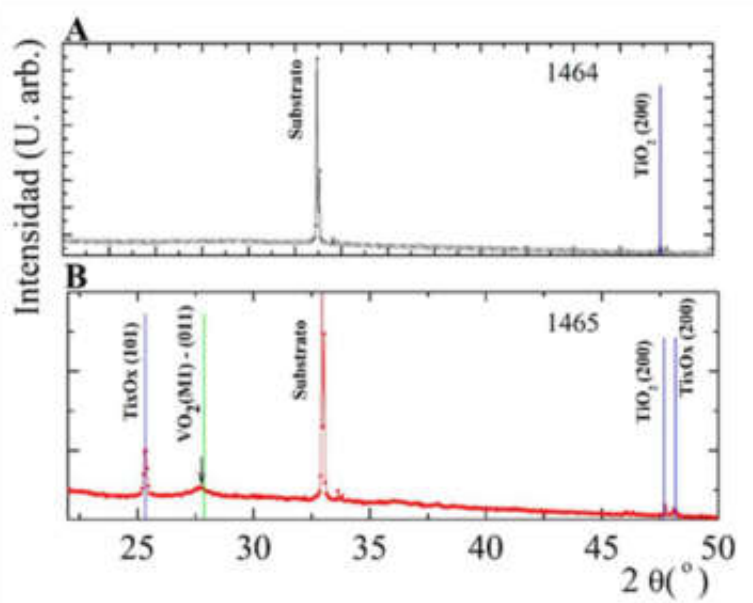

Fig. 4 A) Espectro XRD de la monocapa de TiO_2, muestra 1464 y **B)** Espectro XRD de multicapas [VO_2/TiO_2] x 3, muestra 1465, a temperatura ambiente, depositada sobre sustrato de Si (100) con buffer de TiO_2 de 1000 Å y sintetizada a 460 °C. Se observa un ligero corrimiento hacia la izquierda, del pico de difracción correspondiente a la fase VO_2 (M1), en relación a la posición del pico patrón reportado en la ficha cristalográfica 00-009-0142 (línea en color verde)

De acuerdo a la ficha cristalográfica 09-0142 del ICDD (*International Centre for Diffraction Data*, en inglés), la posición del pico patrón del plano (011) de la fase monoclínica (M1) del VO_2, corresponde con $2\theta \cong 27{,}86°$ (línea color verde en la figura 4B). El resultado obtenido en el espectro XRD mostrado en la figura 4B, sugiere que el pico de difracción obtenido para la fase VO_2 (M1), identificada en la multicapa 1465, presenta un ligero corrimiento hacia un valor más bajo del ángulo de difracción, en relación al pico patrón.

Nótese también en la figura 4B la formación de otros óxidos de titanio (Ti_xO_x) en la multicapa sintetizada, con dirección de crecimiento [101] que no aparece en la monocapa (figura 4A), donde los picos de difracción posicionados a 25,3° y 48,0°, corresponde a una de las fases polimórficas del TiO_2, conocida como Anatase (Alemany *et al*., 2000). Por lo tanto, la formación de estas fases polimórficas del óxido de titanio, por un lado, puede deberse al hecho que durante el proceso de erosión del blanco puro de TiO_2, para la producción de las multicapas VO_2/TiO_2, el Ti se está ligando con oxigeno residual de la cámara de deposición, cambiando su estequiometria (hay más oxígeno presente para la misma cantidad de Ti); y por otro, que la alta temperatura para la deposición de las películas de VO_2, promueve la difusión de los iones de Ti hacia la capa de VO_2. Este resultado, así como el corrimiento mostrado por el pico de difracción correspondiente al plano cristalográfico (011) de la fase VO_2(M1), respecto a la posición del pico patrón, apreciado en la figura 4B para la muestra 1465 (muestra más rica en Ti), sugieren que el Ti está dopando la capa de VO_2.

La figura 5 muestra el comportamiento de la resistencia eléctrica como función de la temperatura para la multicapa [VO_2/TiO_2], para un ciclo cerrado de calentamiento-enfriamiento, correspondiente a la muestra 1465. El cambio de pendiente mostrado en el comportamiento de la resistencia en el intervalo de temperatura entre 65 °C y 80 °C, es evidencia de la manifestación de una transición eléctrica en el material, corroborando la formación de la fase VO_2 (M1), en concordancia con el patrón de difracción exhibido por ella y que es mostrado en la figura 4B.

Es notable la alta resistencia eléctrica exhibida por la muestra 1465, sin embargo, durante el intervalo de temperatura en el que experimenta la transición, el cambio en la resistencia del material es inferior a un orden de magnitud. Por otra parte, tal como se indica en el gráfico inset de la figura 5, la temperatura de transición exhibida por esta multicapa es de aproximadamente 74 °C, un poco mayor que la T_{MIT} experimentada por monocapas de VO_2 sintetizadas bajo las mismas condiciones de deposición (~68 °C). La muestra 1465 manifiesta un intervalo de transición bastante amplio (~25 °C) y un ancho de

histéresis térmica sumamente estrecho (~2 °C), en comparación con los resultados de las multicapas presentadas en la figura 2. Este último resultado sugiere que combinando VO_2 con TiO_2, y estructurándolo en multicapas de tres periodos [VO_2/TiO_2] x 3, es posible reducir el ancho de la histéresis térmica observado en el material, cuando el mismo es sometido a ciclos cerrados de calentamiento-enfriamiento de manera continua.

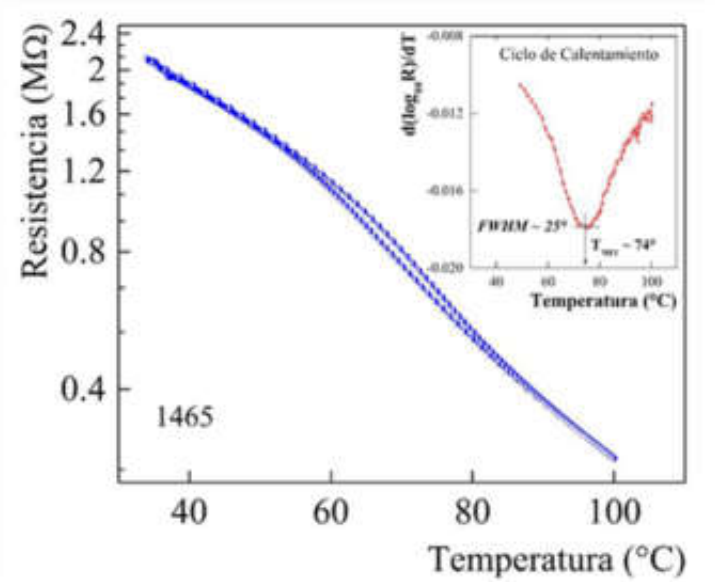

Fig. 5 Curvas de resistencia eléctrica en función de la temperatura, mostrando el lazo de histéresis característico del VO_2, en ciclos cerrados de calentamiento-enfriamiento, para la multicapa 1465 [VO_2/TiO_2] x 3, sintetizadas sobre substratos de Si (100)/TiO_2. Inset corresponde al comportamiento de la derivada logarítmica de la resistencia eléctrica con la temperatura, durante el calentamiento de las multicapas

Puesto que en las multicapas de VO_2/TiO_2, el VO_2 es depositado a alta temperatura (460 °C), una posible interpretación para el comportamiento manifestado en el gráfico R-T (figura 5), ancho de histéresis térmica y T_{MIT}, es que la alta temperatura de deposición del substrato durante la deposición del VO_2, promueve la difusión de iones Ti hacia la películas de VO_2 que conforman la multicapa, produciendo

que los iones de Ti difundidos ocupen algunos sitios de la red cristalina del VO_2.

Dado que el radio iónico efectivo del titanio (Ti^{+4}) y del vanadio (V^{+4}), es de 0,61 A y 0,51 A, respectivamente, la incursión de los iones de Ti^{+4} en los sitios del V^{+4} de la estructura cristalina del VO_2, puede provocar una expansión de los parámetros de red *b* y *c*, con un consecuente incremento de la distancia interplanar entre planos (011).

Previamente fue reportado, que una posible consecuencia del incremento de la temperatura de transición en el VO_2, cuando el mismo es crecido en forma de películas delgadas sobre el TiO_2 a temperaturas superiores a 400 °C, sea precisamente la difusión de iones de Ti en la película de VO_2 (Muraoka & Hiroi, 2002). Este comportamiento es observado en la figura 5, donde la temperatura de transición T_{MIT} para las multicapas [VO_2/TiO_2] x 3 sintetizadas, se manifiesta a 74 °C, un poco arriba de la temperatura reportada para películas delgadas de VO_2 monocristalino puro (~68 °C).

Nishikawa *et al*. (2011), reportaron resultados del incremento del parámetro de red *c* en películas de VO_2, debido al dopaje con iones de Ti. En este estudio se reportó igualmente, como consecuencias de introducir iones tetravalentes de Ti, como impurezas, en los sitios ocupados por el vanadio, en las películas de VO_2, un corrimiento en el pico de difracción de VO_2, hacia valores más bajos del ángulo de difracción, en relación al pico patrón.

Este mismo comportamiento es observado en los resultados mostrados en el espectro XRD presentado en la figura 4B. Este resultado lo interpretamos como consecuencia del incremento de los parámetros de red *b* y *c* de la estructura del VO_2, debido a la difusión de impurezas de radio iónico mayor, en este caso Ti^{+4}, que el radio iónico de vanadio, hacia la red cristalina del VO_2, lo que ocasiona un incremento en la distancia interplanar de los planos cristalinos (011) y el consecuente corrimiento del pico difracción hacia un valor menor del ángulo de difracción, en relación a la posición del pico patrón tal como se manifiesta en el resultado presentado en la figura 4B.

Así mismo, vemos de los resultados mostrados en la figura 5, que el ancho de la histéresis eléctrica manifestada por la multicapa [VO_2/TiO_2] x 3, es de aproximadamente 2 °C. Esto también puede ser interpretado como una consecuencia de la difusión de impurezas de iones sustitutivos de Ti en los sitios de vanadio de la red cristalina de VO_2. Los distintos valores observados en la temperatura de transición durante el calentamiento y enfriamiento del dióxido de vanadio, así como el ancho dela histéresis térmica, obtenida durante la transición de fase semiconductor-metal, es consecuencia de una nucleación heterogénea del VO_2 durante la síntesis, producto de los defectos estructurales (vacancias, impurezas, dislocaciones de pared, etc.) que actúan como núcleos de transformación de fase (Lopez *et al*., 2002). Estos defectos, disminuyen la energía libre requerida para formar núcleos estables. Así, la difusión de impurezas de Ti en la red cristalina del VO_2, disminuye la energia de activación de la transformación de fase estructural y eléctrica, permitiendo que ocurra a temperaturas muy próximas durante el calentamiento y el enfriamiento (Nishikawa *et al*., 2011).

Por otro lado, la gran amplitud del intervalo de temperatura para la transición eléctrica en la multicapas VO_2/TiO_2, puede deberse a la pobre correspondencia o falta de semejanza entre la red cristalina de las capas circundantes de TiO_2 y las peliculas de VO_2 depositadas.

CONCLUSIONES

En este trabajo hemos reportado resultados concernientes al comportamiento de los parámetros de la transición eléctrica de multicapas delgadas de VO_2/SiO_2 y VO_2/TiO_2, sintetizadas sobre substratos de Si(100). Los espectros XRD para las multicapas [VO_2/SiO_2] y [VO_2/TiO_2], revelaron la formación de la fase VO_2 (M1) en la mayoría de las muestras, observándose un ligero corrimiento hacia un valor más bajo del ángulo de difracción, en relación al pico patrón (27,86°), en la multicapa con espaciador de [VO_2/TiO_2].

Las medidas Resistencia-Temperatura en las multicapas [VO_2/SiO_2], mostraron un corrimiento de la temperatura de transición eléctrica, hacia valores más bajos (55 °C y 58 °C), en relación al valor reportado

para muestras monocristalinas de VO_2 (~68 °C) (Morin, 1959). El menor intervalo de temperatura y ancho de histéresis, (14 °C y 6 °C, respectivamente) observado en la muestra 1457, fue interpretado como una consecuencia del mayor tiempo de síntesis de las distintas películas de VO_2 que conforman la multicapa.

La multicapa [VO_2/TiO_2], manifestó transición eléctrica a una temperatura de 74 °C e histéresis térmica de ~2 °C. La estrechez en el comportamiento de la histéresis térmica, fue interpretada como una posible consecuencia de la difusión de iones de Ti^{+4} hacia los sitios del V^{+4} en las películas de VO_2, ocasionada por alta temperatura del substrato durante la deposición del VO_2. Esta interpretación es coherente con el corrimiento mostrado por el pico de difracción correspondiente al plano (011) de la fase VO_2(M1), en relación al pico patrón, pues la difusión de impurezas de radio iónico mayor (Ti^{+4}) hacia sitios iónicos de radio menor (V^{+4}), incrementa los parámetros de red *b* y *c*, así como la distancia entre planos cristalinos (011). De esta manera, las impurezas de Ti^{+4} difundidas en la red cristalina del VO_2, actúan como núcleos de transformación de fase, disminuyendo la energía de activación de la transición de fase estructural y eléctrica, permitiendo que ocurra a temperaturas muy próximas durante el calentamiento y el enfriamiento, explicando de esta manera la estreches de la histéresis eléctrica observada en nuestros resultados.

AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de este trabajo ha sido posible gracias al proyecto de Colaboración Internacional "Ventanas Inteligentes" COL10-036 financiado parcialmente por la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) de la República de Panamá. Igualmente, se agradece el apoyo de las siguientes Instituciones brasileñas de apoyo a la investigación: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) y Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul. (FAPERGS).

REFERENCIAS

Alemany, L. J., Bañares, M. A., Pardo, E. & Martin-Jiménez, F., 2000. Morphological and structural characterization of a titanium dioxide system. *Elsevier,* Volume 44, p. 271–275.

Aliev, R. A., Andreev, V. N., Kapralova, V. M., Klimov, V. A., Sobolev, A. I. & Shadrin, E. B., 2006. Effect of Grain Sizes on theMetal–Semiconductor Phase Transition in Vanadium Dioxide Polycrystalline Thin Films. *Physics of the Solid State,* p. 929–934.

Anderson, G., 1954. Studies on Vanadium Oxide, I. Phase Analysis. *Acta Chem. Scand.,* 8(9), pp. 1599-1606.

Andreev, V. N., Klimov, V. A. & Kompan, M. E., 2013. Metal–Semiconductor Phase Transition in Transplanted Thin Polycrystalline Vanadium Dioxide Films. *Technical Physics Letters,* pp. 57-62.

Asbrink, S., 1980. The crystal structure of and valency distribution in the low-temperature modification of V3 O5. The decisive importance of a few very weak reflexions in a crystal-structure. *Acta Crystallographica B,* Volume 36, pp. 1332 - 1339.

Asgharinezhad, M., Eshaghi, A. & Arab, A., 2016. Fabrication and characterization of optical and electrical properties of vanadium doped titanium dioxide nanostructured thin film. *Elsevier, Optik,* p. 8130–8134.

Jin, P., Xu, G., Tazawa, M. & Yoshimura, K., 2003. Design, formation and characterization of a novel multifunctional window with VO2 and TiO2 coatings. *Applied Physics A. Materials Science & Processing,* p. 455–459.

Kotliar, G. & Vollhardt, D., 2004. Strongly Correlated Materials: Insights From Dynamical Mean-Field Theory. *Physics Today,* pp. 53-59.

Liu, M., Hoffman, J., Jing, W., Zhang, J., Nelson-Cheeseman, B. & Bhattacharya, A., 2013. Non-volatile ferroelastic switching of the

Verwey transition and resistivity of epitaxial Fe3O4/PMN-PT (011). *Nature, Scientific Reports,* pp. 1-7.

Longo, J. M. & Kierkegaard, P., 1970. A Refinement of the Structureof VO2. *Acta Chem. Scand.,* 24(2), pp. 420-426.

Lopez, R., Haynes, T. E. & Boatner, L. A., 2002. Size effects in the structural phase transition of VO2 nanoparticles. *Physical Review B,* 65(22), pp. 1-5.

Loquai, S., Baloukas, B., Zabeida, O., Klemberg-Sapieha, J.E. & Martinu, L., 2016. HiPIMS-deposited thermochromic VO2 films on polymeric substrates. *Elsevier. Solar Energy Materials & Solar Cells,* pp. 60-69.

Manning, T. D., Parkin, I. P., Pemble, M. E., Sheel, D. & Vernardou, D., 2004. Intelligent Window Coatings: Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition of Tungsten-Doped Vanadium Dioxide. *Chem. Mater.,* pp. 744-749.

Miller, M. J., 2016. *Advancements in Optical Properties of Thermochromic VO2 films through Experimental and Numerical Investigations,* s.l.: s.n.

Mlyuka, N. R., Niklasson, G. A. & Granqvist, C. G., 2009. Thermochromic VO2 based multilayer films with enhanced luminous transmittance and solar modulation. *Phys. Status Solidi A 206,* pp. 2155-2160.

Morin, F. J., 1959. Oxide which Show a Metal-to-Insulator Transition at the Neel Temperature. *Physical Review Letters,* pp. 34-36.

Muraoka, Y. & Hiroi, Z., 2002. Metal–insulator transition of VO2 thin films grown on TiO2 (001) and (110) subtrates. *Appl. Phys. Lett.,* 80(4), pp. 583-585.

Nishikawa, M., Nakajima, T., Kumagai, T., Okutani , T. & Tsuchiya, T., 2011. Adjustment of thermal hysteresis in epitaxial VO2 films by

doping metal ions. *Journal of the Ceramic Society of Japan,* 119(7), pp. 577-580.

Pellegrino, L., Manca, N., Kanki, T., Tanaka, H., Biasotti, M., Bellingeri, E., Siri, A. S. & Marré, D., 2012. Multistate Memory Devices Based on Free-standing VO2/TiO2 Microstructures Driven by Joule Self-Heating. *Advanced Materials,* 24(21), p. 2929–2934.

Santamaría, M., Cruz De Gracia, E., Schelp, L. F., Mori De A., T. & Domínguez Della Pace, R., 2013. Efecto de la Temperatura deDeposición en los Parámetros Estructurales y de Transición Metal Aislante, de Películas Delgadas de VO2. *Tecnociencia,* 15(2), pp. 85-106.

Shukla, N., Thathachary, A. V., Agrawal, A., Paik, H., Aziz, A., Schlom, D. G., Gupta, S. K., Engel-Herbert, R. & Datta, S., 2015. A steep-slope transistor based on abrupt electronic phase transition. *Nature Communications,* pp. 1-6.

Yamin, T., Strelniker, Y. M. & Sharoni, A., 2016. High resolution Hall measurements across the VO2 transition reveal impact of spatial phase separation. *Nature, Scientific Reports,* pp. 1-7.

Zhou, Y., Chen, X., Ko, Ch., Yang, Z., Mouli, Ch. & Ramanathan, Sh., 2013. Voltage triggered Ultra fast Metal-insulator Transition in Vanadium Dioxide Switches. *IEEE Electron Device Letters,* pp. 1-7.

Recibido 21 de febrero de 2017, aceptado 13 de noviembre de 2017.