

Estado actual del conocimiento de la diversidad del zooplancton (invertebrados) de agua dulce de la Península de Yucatán, utilizando la taxonomía integrativa



Recibido:09/07/17 · Aceptado: 03/08/17

Manuel Elías Gutiérrez*

Lucía Montes Ortiz

El Colegio de la Frontera Sur

Resumen

Tradicionalmente se ha considerado que solo tres grupos se encuentran presentes en el zooplancton de agua dulce: rotíferos, cladóceros y copépodos. Sin embargo, existen muchos grupos más que potencialmente son parte de esta comunidad. En este documento se incluyen en el zooplancton a todos los invertebrados capaces de nadar e introducirse en una trampa de luz, lo que ampliará el universo de grupos estudiados. Por otro lado, la taxonomía integrativa involucra el uso de caracteres morfológicos, moleculares, geográficos, etc., para el reconocimiento de las especies. En este contexto, se incluirá a los zoopláncteres estudiados con métodos tradicionales y códigos de barras de la vida recolectados en la Península de Yucatán. Hasta el momento se han estudiado 1768 ejemplares de 69 localidades incluyendo rotíferos, moluscos, colémbolos, ácaros acuáticos, cladóceros, ostrácodos, copépodos, malacostracos y quironómidos, comprendidos en 52 familias, 70 géneros y 132 especies. El estado curatorial de los especímenes hasta el nivel de especie es incompleto, por lo que el número total se incrementa hasta 205 posibles especies representadas por los índices de códigos de barras (BIN). La labor ha sido compleja, pues hay especies que pudieran ser nuevas para la ciencia o ampliaciones de ámbito. Por otro lado, también se han detectado formas extremas de una misma especie, como ocurrió con *Bosmina tubicen*, dentro del área de estudio, pudiéndose confundir fácilmente con *B. huaronensis*. Sin embargo, los códigos de barras indican una sola especie. Del mismo modo, especies morfológicamente muy similares pueden ser diferentes, como sucede con algunos ostrácodos. En conclusión, a pesar del avance logrado, es necesario continuar este trabajo, pues la comunidad de zooplancton puede ser un fuerte indicador de alteraciones antropogénicas en lugares todavía considerados prístinos, como la Laguna de Bacalar y la gran cantidad de cenotes que actualmente son atracciones turísticas.

PALABRAS CLAVE: coi, códigos de barras de la vida, México, variabilidad, BOLD.

*Correos electrónicos: melias@ecosur.mx, lumontes@ecosur.edu.mx



Present day knowledge on diversity of fresh water zooplankton (invertebrates) of the Yucatan Peninsula, using integrated taxonomy

Received: 07/09/17 · Accepted: 08/03/17

Manuel Elías Gutiérrez*

Lucía Montes Ortiz

El Colegio de la Frontera Sur

Abstract

Traditionally it has been considered that only three groups are present in freshwater zooplankton: rotifers, cladocerans and copepods. However, there are many more groups that are potentially part of this community. In this document, all invertebrates capable of swimming and entering in a trap of light are included as zooplankton, which will expand the universe of groups studied. On the other hand, the integrative taxonomy involves the use of different characters morphological, molecular, geographical, etcetera for the recognition of the species. In this context, we will include zooplankters studied using traditional methods and DNA barcodes collected in the Yucatan Peninsula. So far, 1768 specimens of 69 localities have been studied, including rotifers, mollusks, collembola, aquatic mites, cladocerans, ostracods, copepods, malacostraca and chironomids included in 52 families, 70 genera and 132 species. The curatorial status of specimens up to the species level is incomplete, so the total number is increased to 205 possible species represented by barcode index numbers (BINs). The work has been complex, as there are species that might be new to science or geographical range expansions. On the other hand, extreme forms of the same species have also been detected within the study area, as *Bosmina tubicen*, being easily confused with *B. huaronensis*. However barcodes indicate a single species. In the same way, morphologically similar species may be different, as it happens with some ostracods. In conclusion, despite the progress made, it is necessary to continue this work, as the zooplankton community can be a strong indicator of anthropogenic alterations in places still considered pristine, such as Laguna de Bacalar and the large number of cenotes that are currently tourist attractions.

KEY WORDS: COI, DNA barcodes, Mexico, variability, BOLD.

*E-mails: melias@ecosur.mx, lumontes@ecosur.edu.mx

Introducción

Tradicionalmente se ha considerado que el zooplancton de agua dulce se encuentra constituido por tres grupos principales: rotíferos, cladóceros y copépodos. Sin embargo, existen otros grupos de organismos que también integran esta comunidad y que han sido escasamente contemplados como tales. A pesar de esto, algunos autores los han incluido en sus análisis como parte del zooplancton (Mwebaza-Ndawula, 1994, p. 261; Frost, Fisher, Klug, Arnott y Montz, 2006, p. 355), y es que varios de ellos exhiben claras adaptaciones a la vida planctónica, como los ácaros acuáticos (Modlin y Gannon, 1973, p. 223), los primeros estadios de quironómidos (Davies, 1976a, p. 42) y otros insectos (Janz, Weltje, Ebke y Dawo, 2016, p. 273), los ostrácodos (Deevey, Deevey y Brenner, 1980, p. 673), algunos decápodos e isópodos, entre otros. En este caso consideraremos como zooplancton todos aquellos organismos capaces de nadar en la columna de agua, aunque lo hagan por periodos cortos.

Por otro lado, algunos de los sistemas dulceacuícolas de la Península de Yucatán son calificados como ambientes extremos, debido a la presencia de aguas hipercarbonatadas, o de ciertos iones, como ocurre con la Laguna de Bacalar o el Cenote Azul (Perry, Velázquez-Oliman y Marín, 2002, p. 198). Por esta razón, y porque se trata de sistemas oligotróficos (Cervantes-Martínez, Mezeta-Barrera y Gutiérrez-Aguirre, 2009, p. 177; Smirnov y Elías-Gutiérrez, 2011, p. 215), se pensaba que su riqueza de especies era limitada. Recientemente se han efectuado capturas con otros instrumentos, como trampas de luz (Elías-Gutiérrez et al., 2018), donde la diversidad de grupos encontrados ha sido sorprendente. En este trabajo se incluirán algunas capturas realizadas con esta nueva metodología, pero enfocándose principalmente al conocimiento taxonómico que se tiene de estos grupos. Sin embargo, todavía se desconocen otros, como se verá más adelante. Esta metodología, en conjunto con marcadores moleculares estandarizados que se han adaptado ampliamente para la identificación de las especies, conocidos como códigos de barras de la vida (Hebert, Cywinska, Ball y DeWaard, 2003, p. 313), ha permitido obtener interesantes resultados por Elías-Gutiérrez, Martínez-Jerónimo, Ivanova y Valdez-Moreno (2008, p. 5), donde también se incluyen algunas especies comunes de la Península de Yucatán. En el caso de México, este tipo de análisis ha sido un ejemplo pionero en el estudio de los cladóceros (Bekker, Karabanov, Galimov y Kotov, 2016, p. 2) y los

restantes grupos del zooplancton (Elías-Gutiérrez, Martínez-Jerónimo, et al., 2008, pp. 8-14).

La mayor parte de la información referente a códigos de barras que se ha generado en este país se encuentra en línea en la base de datos BOLD (Barcode of Life Data System, www.boldsystems.org). Actualmente, México ocupa entre el primer y tercer lugar en el nivel global en cuanto a especies secuenciadas con códigos de barras de los tres grupos principales de zooplancton dulceacuícola (rotíferos, cladóceros y copépodos), así como las primeras especies descritas considerando la taxonomía integrativa (Dayrat, 2005, pp. 408-409), donde se hace uso de caracteres morfológicos, moleculares, biogeográficos, etcétera.

Entre las especies mexicanas descritas de esta forma destacan los cladóceros *Leberis chihuahensis* Elías-Gutiérrez & Valdez-Moreno, 2008 (Elías-Gutiérrez y Valdez-Moreno, 2008, pp. 63-74) y *Scapholeberis duranguensis* Quiroz-Vazquez & Elías-Gutiérrez, 2009 (Quiroz-Vazquez y Elías-Gutiérrez, 2009, pp. 50-64), ambos del norte del país. Entre los copépodos sobresalen *Leptodiptomus garciai* (Osorio-Tafall, 1942), endémica del lago Alchichica (Montiel-Martínez, Ciro-Pérez, Ortega-Mayagoitia y Elías-Gutiérrez, 2008, p. 1080), y *Mastigodiptomus patzcuarensis* (Kiefer, 1938), del lago de Pátzcuaro (Gutiérrez-Aguirre, Cervantes-Martínez y Elías-Gutiérrez, 2014, p. 1).

Respecto a la Península de Yucatán, las investigaciones en rotíferos son bastante limitadas y se ha trabajado solo de manera tradicional (García-Morales y Elías-Gutiérrez, 2007, p. 569; Sarma y Elías-Gutiérrez, 1999, pp. 187-196). El único trabajo donde se integran caracteres moleculares es el de García-Morales y Elías-Gutiérrez (2013, pp. 1097-1107), que abarca desde Yucatán hasta el altiplano de México, y donde se encuentra evidencia de la posible presencia de gran cantidad de especies crípticas, anteriormente consideradas formas, variedades o subespecies. Por otro lado, de los cladóceros hasta el momento se han descrito varias especies solo teniendo en cuenta aspectos morfológicos, como *Antalona pectinata* (Elías-Gutiérrez & Suárez-Morales, 1999), y varios copépodos. Ejemplo de estos últimos son los calanoideos, entre los que destacan *Mastigodiptomus reidae* Suárez-Morales & Elías Gutiérrez, 2000 y *M. maya* Suárez-Morales & Elías-Gutiérrez, 2000, descritos de una charca temporal en la zona arqueológica de Chichancanab (Suárez-Morales y Elías-Gutiérrez, 2000, pp. 693-708) y diversos ciclopoideos donde dos trabajos clave son el de

Fiers, Ghenne y Suárez-Morales (2000, pp. 209-251) y el de Rocha, Iliffe, Reid y Suárez-Morales (2000, pp. 119-140), en que se describen *Acanthocyclops rebecca* Fiers & Guenne, 2000, *Diacyclops pilosus* Fiers & Guenne, 2000, *D. ecabensis* Fiers & Guenne, 2000, *Microcyclops echinatus* Fiers, Ghenne & Suárez-Morales, 2000, y se eleva a rango de especie a *Mesocyclops aequatorialis pescei* Pesce, 1985. En el segundo se define un nuevo género y tres especies de Yucatán: *Prehendocyclops mochenkoi* Rocha, 2000, *P. boxshalli* Rocha 2000 y *P. abbreviatus* Rocha, 2000. Otro trabajo previo importante es el de Fiers, Reid, Iliffe y Suárez-Morales (1996, pp. 65-102), donde describen *Diacyclops chakan* Fiers & Reid, 1996, *Diacyclops puuc* Fiers, 1996, *Mesocyclops yutsil* Reid, 1996 y *Mesocyclops chaci* Fiers, 1996, todos ellos en cenotes asociados con cuevas. Otra especie es *Halicyclops cenoticola* Rocha, 1998, registrado en varios cenotes del noreste de la península (Rocha, Iliffe, Reid y Suárez-Morales, 1998, p. 388). También se pueden agregar especies descritas de cuevas salinas y esteros, como *Halicyclops caneki* Fiers, 1995 de Celestún (Fiers, 1995, p. 302), y recientemente un misófrido (Boxshall, Zylinski, Jaume, Iliffe y Suárez-Morales, 2014, p. 325).

En términos generales, una buena recopilación sobre la distribución y especies presentes está dada por Brandorff (2012, pp. 187-202), donde también registra una especie similar a *M. reidae*, la cual quizá sea la misma que actualmente está en proceso de descripción (Mercado-Salas et al., en prensa). Otra buena recopilación es la de Elías-Gutiérrez, Suárez-Morales, et al. (2008, pp. 1-322), aunque ya requiere una actualización. Como ya se apuntó, el único trabajo amplio que incluye material de la Península de Yucatán y códigos de barras es el de Elías-Gutiérrez, Martínez-Jerónimo, et al. (2008, p. 5), donde también incorporaron material del centro y noreste de México.

Con base en lo anterior, el presente artículo tiene por objetivo mostrar el estado del conocimiento de los diversos grupos de zooplancton de la Península de Yucatán en los que se han integrado análisis tradicionales y moleculares, ejemplificando la utilidad de los mismos con una posible variación extrema recientemente detectada en la morfología del cladóceros *Bosmina tubicen*.

Finalmente, otros grupos que en últimas fechas han aparecido en los muestreos, como los ácaros acuáticos, larvas y pupas de quironómidos, ostrácodos, isópodos y algunos decápodos, se mencionarán en el apartado de resultados.

Metodología

Para la recolecta se utilizaron métodos tradicionales, como el uso de arrastres horizontales y verticales de plancton, incluyendo zonas litorales, con redes de plancton con luz de malla de 200 y 50 micras. Además, se emplearon trampas de luz, de diseño propio (Elías-Gutiérrez, 2018). Una vez colectadas las muestras, con un tamiz de 50 micras se lavó todo el material con etanol al 96 %, a fin de reemplazar el agua por etanol y se almacenaron en frío, de acuerdo con las recomendaciones de Prosser, Martínez-Arce y Elías-Gutiérrez (2013, p. 1152). En la figura 1 se pueden observar los sitios trabajados hasta el momento (incluye material publicado por Elías-Gutiérrez, Martínez-Jerónimo, et al., 2008, apéndice 1).

En el laboratorio, las muestras se separaron en grandes grupos y se procedió a la toma de tejidos, según el método propuesto por Prosser et al. (2013, p. 1152), así como a la elaboración de preparaciones para la colección de referencia depositada en El Colegio de la Frontera Sur, Unidad Chetumal. Asimismo se tomaron fotografías, con base en la metodología planteada por Martínez-Caballero et al. (en prensa), y se llevó a cabo la amplificación del gen Citocromo Oxidasa I, mediante la reacción en cadena de la polimerasa (PCR, por sus siglas en inglés). Para realizar la PCR se siguió el protocolo y los cebadores para zooplancton propuestos por Prosser et al. (2013, pp. 1152-1153).

Los resultados obtenidos se simplificaron en tablas, y en el caso de especies putativas no identificadas hasta el momento se establecieron de acuerdo con el número índice de los códigos de barras (BIN number) provisto por el sistema BOLD (Ratnasingham y Hebert, 2013, pp. 1-16).

Respecto a *Bosmina*, se compararon las secuencias utilizando el modelo de distancias de Kimura de dos parámetros (Kimura, 1980, pp. 111-120) y se elaboró un árbol con el método del vecino más cercano (NJ, por sus siglas en inglés). También se prepararon ejemplares de estos organismos por medio del punto crítico y se cubrieron con oro para su posterior observación en el microscopio electrónico JEOL JSM-6010 PLUS/LA ubicado en El Colegio de la Frontera Sur, Unidad Chetumal.

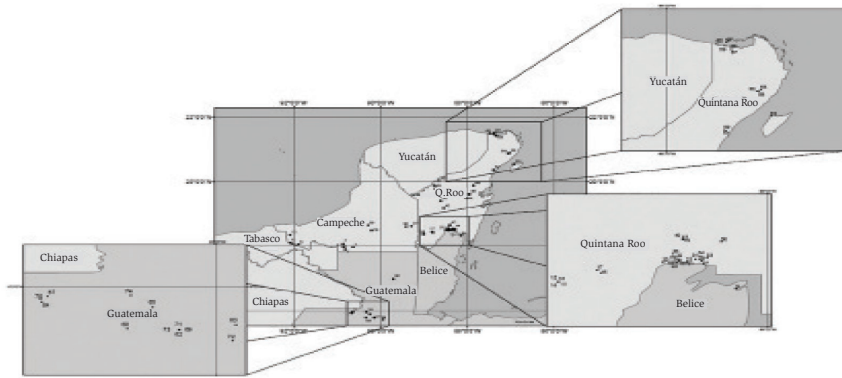


Figura 1. Sistemas mostrados con material de zooplancton secuenciado. Se considera una porción de Belice y Guatemala como parte de la Península, desde el punto de vista biogeográfico, de acuerdo con la propuesta de Vázquez-Domínguez y Arita (2010)

Resultados y discusión

En términos generales, se han registrado 132 especies actualmente secuenciadas (cuadro 1). Sin embargo, de acuerdo con el número de BIN, potencialmente se trataría de 205 especies (cuadro 1). Esta discordancia entre los BIN, que representan las posibles especies, y las que han sido identificadas hasta el momento se debe a que gran cantidad de ejemplares aún se encuentra en proceso de identificación taxonómica, y muchas especies podrían ser nuevas para la ciencia, como lo demuestran los trabajos citados en la introducción. A pesar del número de ejemplares secuenciados (1 768), podemos considerar que el estudio de estos organismos en la región todavía es incipiente, sobre todo porque los métodos de muestreo convencionales actúan como medios selectivos y por lo tanto nunca se muestrea en su totalidad (Suthers, Bowling, Kobayashi y Rissik, 2008, p. 91), además de efectos conocidos como evasión y extrusión de la red (Harris, Wiebe, Lenz, Skjoldal y Huntley, 2000, p. 39). En este sentido, otros dispositivos pueden permitir la continua acumulación de organismos planctónicos en un periodo, lo cual resulta particularmente importante para aquellos que presentan mucha menor abundancia en comparación con otros zoopláncteres y que los métodos convencionales no capturan, como lo demuestra Davies (1976b, p. 378) en un primer intento por innovar los métodos de colecta.

Debido a lo anterior, se diseñó un prototipo especial de trampas de luz para sistemas dulceacuícolas, que ha mostrado una mayor eficacia en la captura de riqueza específica en comparación con las redes de plancton. A manera de ejemplo, una comparación simple nos indicó en Bacalar la captura de 17 taxones con arrastres de plancton y de 62 con una trampa de luz en las mismas fechas de muestreo (Elías-Gutiérrez et al., 2018)

Los resultados nos indican la necesidad de continuar con la labor curatorial de los organismos secuenciados, con análisis detallados y descripción de estas especies desde el punto de vista de la taxonomía integrativa (Dayrat, 2005, pp. 408-409), tal como se realizó con el ostrácodo *Cypretta campechensis*, descrito de la laguna de Silvituc (Campeche) (Cohuo-Durán, Elías-Gutiérrez y Karanovic, 2013, pp. 507-508). Con relación a este punto, cabe señalar que en el zooplancton de agua dulce de la Península de Yucatán, los ostrácodos reemplazan a los cladóceros como elementos de importancia, en lo que respecta a la abundancia (Smirnov y Elías-Gutiérrez, 2011, pp. 211-217).

En el caso de los copépodos, al parecer, una de las especies más comunes, *Arctodiptomus dorsalis*, podría estar representando un complejo de al menos cuatro especies (Elías-Gutiérrez, Martínez-Jerónimo, et al., 2008, pp. 13-14), y a juzgar por la cantidad de BIN, es necesario clarificar el estatus taxonómico de más de la mitad de las especies secuenciadas. El escaso conocimiento de algunos calanoideos bastante comunes queda claramente demostrado por las especies descritas recientemente, según se mencionó en la introducción, pues una de las más típicas presentes en Bacalar, *Pseudodiptomus marshi*, no fue registrada hasta 1996 (Suárez-Morales y Reid, 1996, pp. 942-943).

Otros grupos de gran interés, escasamente considerados antes en el zooplancton, son los ácaros acuáticos (Acari: Hydrachnidia) y los quironómidos, en especial los primeros estadios de estos últimos, los cuales también aparecen ocasionalmente en las redes de plancton y han sido un componente constante en las trampas de luz, inmersas en la columna de agua e incluso alejadas de la zona litoral. Esto sugiere que algunas especies de estos organismos están adaptadas a la vida planctónica, como ocurre con individuos del género *Piona* y *Unionicola* (en el caso de ácaros), que muestran modificaciones morfológicas para nadar, así como en su ciclo de vida (suprimiendo el crítico estado larval y emergiendo directamente en el estadio de ninfa) (Modlin y Gannon, 1973). De la misma manera se ha demostrado que los primeros estadios de quironómidos

representan una fracción abundante del zooplancton y están adaptados para permanecer en la columna de agua (Davies, 1976a, p. 42), sin embargo, los métodos de colecta tradicionales no reflejan esta realidad (Davies, 1976b, p. 373).

CUADRO 1. Especies secuenciadas e identificadas de cada uno de los grupos principales de zooplancton. Entre paréntesis se muestra el número de especies putativas, dado por el número índice de códigos de barras (BIN number). Los números de las localidades son los que están representados en la figura 1.

Orden o clase	Núm. de familias	Núm. de géneros	Núm. de especies	Núm. de especímenes secuenciados	Localidades
Ploima (Rotifera)	8	13	49(30)	132	2, 4, 5, 7, 10, 11, 15, 19, 25, 27, 28, 29, 32, 34, 35, 36
Flosculariacea (Rotifera)	3	3	3(1)	5	7, 15, 34, 41
Bdelloidea	1	1	1	3	36
Veneroidea (Mollusca)	1	1	1	14	36, 37
Collembola	4	NA	NA(5)	24	5, 18, 19, 20, 24
Hidrachnidia (Ácaros acuáticos)	10	6	NA(26)	302	35, 36
Branchiopoda	10	28	49(59)	452	1, 3, 5, 6, 8, 11, 12, 17, 21, 24, 29, 33, 34, 35, 36, 38, 39, 40, 42, 48, 58, 60, 61, 63, 65, 67, 68, 69
Ostracoda	5	6	5(22)	125	5, 9, 11, 14, 24, 29, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 44, 45, 52, 54, 56
Maxillopoda (Hexanauplia)	6	15	32(67)	452	1, 5, 6, 8, 11, 13, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 23, 24, 25, 30, 33, 34, 35, 36, 39, 40, 41, 42, 43, 47, 49, 50, 51, 52, 55, 59, 61, 62, 67, 68
Malacostraca (solo en agua dulce)	5	NA	NA(20)	127	35, 36
Insecta	1	3	1(12)	132	35, 36
Total	52	70	132(205)	1 768	

NA = no se ha determinado.

En este estudio solo presentamos resultados de quironómidos (cuadro 1), pero debe tenerse en cuenta que los insectos tienen una gran cantidad de especies cuyas larvas o incluso su ciclo de vida completo se realizan en el agua.

A pesar de lo anterior, el conocimiento que se tiene aún es escaso, no solo en el trópico (Contreras-Ramos y Andersen, 1999), sino a escala global (Young, Behan-Pelletier y Hebert, 2012, p. 1). Cabe señalar que estos dos grupos se han analizado para este trabajo en dos sistemas únicamente: la Laguna de Bacalar y el Cenote Azul, ambos al sur de Quintana Roo, con la posible presencia de al menos 26 especies hasta el momento, representadas por 302 especímenes.

En algunas ocasiones, varias especies pueden estar representadas por un solo BIN, lo cual generalmente ocurre cuando se trata de especies jóvenes, como algunos carácidos (Valdez-Moreno, Ivanova, Elías-Gutiérrez, Contreras-Balderas y Hebert, 2009, pp. 382-384), y por ello el valor de este algoritmo se actualiza constantemente, pues conforme se acumulan más datos, este puede separarse. Sin embargo, en cuanto al zooplancton, donde en apariencia el proceso de diversificación ha sido relativamente más lento, debido a que su origen se remonta hasta 380 millones de años, al parecer no se ha presentado este problema. Por ejemplo, respecto a Diplostraca, algunos de los grupos más jóvenes están datados hace cuatro a seis millones de años. No obstante, algunos géneros como *Bosmina* sufrieron una espectacular radiación morfológica, al menos en especies europeas (Van Damme y Kotov, 2016, p. 176).

Para este último caso, tenemos a *Bosmina tubicen*, que de acuerdo con las secuencias del gen Citocromo Oxidasa I (código de barras), varias formas diferentes de esta serían una misma especie (figura 2). En la figura 3 se observa la forma de la Laguna de Silvituc (Campeche), donde las anténulas son sumamente cortas y el mucro (o espina del caparazón) largo (véase figura 3-a). De manera opuesta, en el Cenote Azul (Quintana Roo) las anténulas son largas y el mucro pequeño (figura 3-c). En términos generales, la forma del Cenote Azul puede confundirse fácilmente con *B. huaronensis* (figura 3-d), registrada en el altiplano mexicano, de sistemas a gran altitud (alrededor de 2 000 m sobre el nivel del mar). Además, existe una forma intermedia (figura 3-b), con las anténulas no tan largas, registrada en el lago Petén (Guatemala). Con los caracteres morfológicos considerados de valor taxonómico en las claves actuales (Elías-Gutiérrez, Suárez-Morales, et al., 2008, pp. 69-70), no es posible establecer con claridad la



FIGURA 2. Árbol de identificación (ID) de *Bosmina tubicen* similares a *B. huaronensis* registradas en la base de datos BOLD. Inmediatamente después del nombre se muestra el Specimen ID, que es el identificador de esa base de datos, el país y la localidad exacta. Todas las localidades de Estados Unidos se encuentran en Florida. La barra de escala equivale a un 2% de divergencia.

identidad específica de la forma encontrada en el Cenote Azul, pues se llegaría a determinar como *Bosmina huaronensis*. Sin embargo, *B. huaronensis* del altiplano mexicano se separa claramente por medio de los análisis genéticos de las formas sureñas (figura 3). En este caso, aunado al análisis morfológico detallado de las hembras partenogenéticas, tal vez sea necesaria la inducción de machos de manera artificial (Kotov, Ishida y Taylor, 2009, p. 2), ya que estos no se han visto en la naturaleza, al menos en los tres lagos tropicales señalados ni en el altiplano, y posiblemente sea preciso secuenciar un gen nuclear para descartar que se trate de fenómenos de hibridación con otra especie cercana. Por lo tanto, la conclusión de que se trata de una misma especie, al menos en la Península de Yucatán y Guatemala, es solamente preliminar. Asimismo, las secuencias existentes indican que *Bosmina tubicen* se extiende hasta la Florida en Estados Unidos (figura 2, ejemplares BCRUA159-10, BCRUA161-10, BCRUA087-10 y BCRUA088-10). Como se puede apreciar, este problema solo puede ser resuelto desde el punto de vista de la taxonomía integrativa.

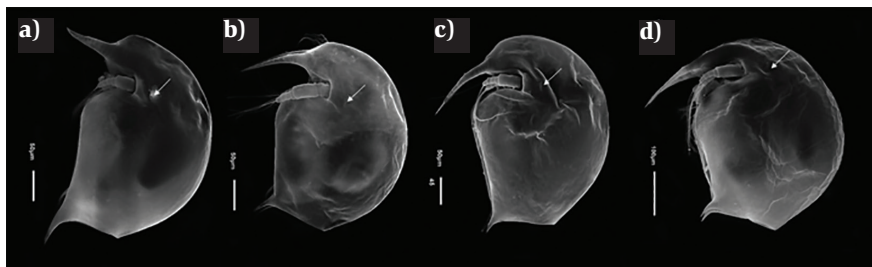


FIGURA 3. Morfotipos de *Bosmina tubicen*: a) Silvituc (Campeche, 6 de septiembre de 2005); b) lago Petén (Guatemala, 10 de marzo de 2006); c) Cenote Azul (Quintana Roo, 28 de enero de 2017) y d) *B. huaronensis* del altiplano mexicano (Presa la Goleta, Estado de México, 15 de julio de 2005). La flecha señala la posición del poro lateral, un carácter de importancia para este grupo.

Otro caso interesante ha sido la captura de especies que únicamente se han detectado en cenotes, por ejemplo misidáceos y sesármidos en la Laguna de Bacalar. Actualmente estamos en el proceso de identificación de estos especímenes.

Por último, cabe mencionar el caso de larvas de Veneroidea, que posiblemente correspondan a *Mytilopsis sallei* –la cual fue registrada en Bacalar en 1978

(Marelli y Berrend, 1978, p. 144)–, dado que presentan una divergencia de más de 6 % con otros especímenes aparentemente de la misma especie recolectados en Darwin, Australia, donde es considerada invasiva (Willan et al., 2000, p. 25). Es necesario comparar con material del lago Izabal (Guatemala), que es la localidad tipo, para establecer claramente la identidad de la especie.

Conclusión

A pesar del importante avance que se ha logrado en el conocimiento de la fauna zooplanctónica de la Península de Yucatán, es necesario incrementar el esfuerzo, tratando de establecer líneas base de las especies presentes, sobre todo en sistemas donde el desarrollo turístico ha sido notable en los últimos años, como el lago Petén en Guatemala y la Laguna de Bacalar en México, además de resolver los problemas taxonómicos. El uso de nuevas tecnologías, combinadas con métodos novedosos para muestrear, permitirá establecer en un tiempo razonable las líneas base, fundamentadas en toda la comunidad y no solamente en algunas especies consideradas indicadoras de la calidad del agua, que, en el caso de estos sistemas tropicales, apenas se están reconociendo, al igual que su potencial como indicadoras (Goldschmidt, 2010, p. 185).

Cabe hacer notar que conforme se desarrollen estas líneas base, será preciso continuar con el trabajo taxonómico. El uso de las secuencias puede dar una primera aproximación a la presencia de especies cuyos registros se desconocían, o incluso nuevas para la ciencia, por lo que se debe acelerar su estudio morfológico, de distribución, ecología, etc., a fin de realizar su descripción de acuerdo con los estándares actuales. Ejemplo de ello es *Leberis chihuahuensis* Elías-Gutiérrez & Valdez-Moreno, 2008, primer cladóceros descrito en el nivel mundial utilizando el nuevo concepto de taxonomía integrativa, combinando caracteres morfológicos, moleculares y geográficos (Elías-Gutiérrez y Valdez-Moreno, 2008, p. 72; Bekker et al., 2016, p. 2).

Una vez que se tenga la línea base, otro tipo de tecnologías, como la secuenciación de siguiente generación, hará posible obtener fragmentos de secuencias, empleando solo muestras crudas, sin separar, y contrastándolas con la línea base generada. Esto permitirá detectar cualquier situación derivada de contaminación o amenaza de bioseguridad, como la introducción accidental o deliberada

de especies exóticas, todo desde el inicio de la emergencia, siempre y cuando se desarrollen muestreos de rutina en los ecosistemas acuáticos, lo cual ayudará a tomar acciones inmediatas al respecto, y a lograr su conservación para las generaciones futuras.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Isaac A. Farraz-Montes por colaborar en la elaboración de los mapas de las localidades muestreadas. Esta es una contribución de la Red Mexicana de Códigos de Barras, apoyada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (apoyos 194045 y 194025).

Fuentes consultadas

- Bekker, E. I., Karabanov, D. P., Galimov, Y. R. y Kotov, A. A. (2016). DNA Barcoding reveals high cryptic diversity in the North Eurasian *Moina* Species (Crustacea: Cladocera). *Plos One*, 11(8), e0161737.
- Boxshall, G. A., Zylinski, S., Jaume, D., Iliffe, T. M. y Suárez-Morales, E. (2014). A new genus of speleophriid copepod (Copepoda: Misophrioida) from a cenote in the Yucatan, Mexico with a phylogenetic analysis at the species level. *Zootaxa*, 3821(3), 321-336.
- Brandorff, G. O. (2012). Distribution of some Calanoida (Crustacea: Copepoda) from the Yucatan Peninsula, Belize and Guatemala. *Revista de Biología Tropical*, 60(1), 187-202.
- Cervantes-Martínez, A., Mezeta-Barrera, M. y Gutiérrez-Aguirre, M. (2009). Basic limnology of the karstic tourist lake Cenote Azul in Quintana Roo, Mexico. *Hidrobiológica*, 19(2), 177-180.
- Cohuo-Durán, S., Elías-Gutiérrez, M. y Karanovic, I. (2013). On three new species of *Cypretta* Vávra, 1895 (Crustacea: Ostracoda) from the Yucatan Peninsula, Mexico. *Zootaxa*, 3636(4), 501-524.
- Contreras-Ramos, A. y Andersen, T. (1999). A survey of the Chironomidae (Diptera) of Calakmul Biosphere Reserve. Mexico. *Chironomus*, 12, 3-5.
- Davies, B. (1976a). The dispersal of Chironomidae larvae: A review. *Journal of the Entomological Society of South Africa*, 39(1), 39-62.

- Davies, B. (1976b). A trap for capturing planktonic chironomid larvae. *Freshwater Biology*, 6, 373-380.
- Dayrat, B. (2005). Towards integrative taxonomy. *Biological Journal of the Linnean Society*, 85(3), 407-415.
- Deevey, E. S., Deevey, G. B. y Brenner, M. (1980). Structure of zooplankton communities in the Peten Lake District Guatemala. En W. C. Kerfoot (ed.), *The Evolution and Ecology of Zooplankton Communities* (pp. 669-678). Hannover, New Hampshire: University Press of New England.
- Elías-Gutiérrez, M. y Valdez-Moreno, M. (2008). A new cryptic species of *Leberis* Smirnov, 1989 (Crustacea, Cladocera, Chydoridae) from the Mexican semi-desert region, highlighted by DNA barcoding. *Hidrobiológica*, 18(1), 63-74.
- Elías-Gutiérrez, M., Martínez-Jerónimo, F., Ivanova, N. V. y Valdez-Moreno, M. (2008). DNA barcodes for Cladocera and Copepoda from Mexico and Guatemala, highlights and new discoveries. *Zootaxa*, 1849, 1-42.
- Elías-Gutiérrez, M., Suárez-Morales, E., Gutiérrez-Aguirre, M., Silva-Briano, M., Granados-Ramirez, J. G. y Garfias-Espejo, T. (2008). *Guía ilustrada de los microcrustáceos (Cladocera y Copepoda) de las aguas continentales de México*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Elías-Gutiérrez, Valdez-Moreno, M., Topan, J. Young y Cohuo-Colli, J.A. (2018). Improved protocols to accelerate the assembly of DNA barcode reference libraries for freshwater zooplankton. *Ecology and Evolution*, 8, 3002-3018.
- Fiers, F. (1995). *Halicyclops caneki* n. sp. (Copepoda, Cyclopoida) from Celestun Lagoon (Yucatan, Mexico). *Belgian Journal of Zoology*, 125(2), 301-313.
- Fiers, F., Ghenne, V. y Suárez-Morales, E. (2000). New species of continental cyclopoid copepods (Crustacea, Cyclopoida) from the Yucatan Peninsula, Mexico. *Studies on Neotropical Fauna & Environment*, 35, 209-251.
- Fiers, F., Reid, J. W., Iliffe, T. M. y Suárez-Morales, E. (1996). New hypogean cyclopoid copepods (Crustacea) from the Yucatán Peninsula, México. *Contributions to Zoology*, 66(2), 65-102.
- Frost, T., Fisher, J. M., Klug, J. L., Arnott, S. E. y Montz, P. K. (2006). Trajectories of zooplankton recovery in the little rock whole-lake acidification experiment. *Ecological Applications*, 16(1), 353-367.

- García-Morales, A. E. y Elías-Gutiérrez, M. (2007). The Rotifer fauna of Guatemala and Belize: Survey and biogeographical affinities. *Revista de Biología Tropical*, 55(2), 569-584.
- García-Morales, A. E. y Elías-Gutiérrez, M. (2013). DNA barcoding of freshwater Rotifera in Mexico: Evidence of cryptic speciation in common rotifers. *Molecular Ecology Resources*, 13(6), 1097-1107.
- Goldschmidt, T. (2010). The water mite genus *Torrenticola* (Hydrachnidia: Torrenticolidae) in Costa Rica - ecology, diversity, and bioindicator potential. En M. W. Sabelis y J. Bruin (eds.), *Trends in Acarology: Proceedings of the 12th International Congress* (pp. 185-191). Amsterdam: Springer Science.
- Gutiérrez-Aguirre, M., Cervantes-Martínez, A. y Elías-Gutiérrez, M. (2014). An example of how barcodes can clarify cryptic species: The case of the calanoid copepod *Mastigodiptomus albuquerquensis* (Herrick). *Plos One*, 9(1), e85019.
- Harris, R., Wiebe, P., Lenz, J., Skjoldal, H. R. y Huntley, M. (2000). *ICES Zooplankton Methodology Manual*. Londres: Academic Press.
- Hebert, P. D. N., Cywinska, A., Ball, S. L. y DeWaard, J. R. (2003). Biological identifications through DNA barcodes. *Proceedings of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences*, 270(1512), 313-321.
- Janz, P., Weltje, L., Ebke, K. P. y Dawo, U. (2016). Temporal population dynamics of the phantom midge *Chaoborus crystallinus* and its influence on the zooplankton community. *Hydrobiologia*, 770(1), 273-287.
- Kimura, M. (1980). A simple method of estimating evolutionary rate of base substitutions through comparative studies. *Journal of Molecular Evolution*, 16, 111-120.
- Kotov, A. A., Ishida, S. y Taylor, D. J. (2009). Revision of the genus *Bosmina* Baird, 1845 (Cladocera: Bosminidae), based on evidence from male morphological characters and molecular phylogenies. *Zoological Journal of the Linnean Society*, 156, 1-51.
- Marelli, D. C. y Berrend, R. E. (1978). New species record for *Mytilopsis-sallei* (Recluz) in Central-America (Mollusca Pelecypoda). *Veliger*, 21(1), 144.
- Martínez-Caballero, A. L., Morales-Gutiérrez, S. y Elías-Gutiérrez, M. (2017). First record of the genus *Bunops* Birge, 1893 (Cladocera: Macrotrichi-

- dae) in the Neotropical highlands of Mexico with a detailed study of morphology and DNA barcodes. *Zootaxa*, 4300(4), 589-600.
- Mercado-Salas, N., Khodami, S., Martínez-Arbizu, P., Elías-Gutiérrez, M. (in press). Integrative taxonomy of *Mastygodiaptomus* genus uncovered a new cryptic species from Calakmul reserve in Yucatan Peninsula, Mexico. *Arthropod Systematics and Phylogeny*.
- Modlin, R. y Gannon, J. (1973). A contribution to the ecology and distribution of Aquatic Acari in the St. Lawrence Great Lakes. *Transactions of the American Microscopical Society*, 92(2), 217-224.
- Montiel-Martínez, A., Ciro-Pérez, J., Ortega-Mayagoitia, E. y Elías-Gutiérrez, M. (2008). Morphological, ecological, reproductive and molecular evidence for *Leptodiaptomus garciai* (Osorio-Tafall 1942) as a valid endemic species. *Journal of Plankton Research*, 30(10), 1079-1093.
- Mwebaza-Ndawula, L. (1994). Changes in relative abundance of zooplankton in northern Lake Victoria, East Africa. *Hydrobiologia*, 272, 259-264.
- Perry, E., Velázquez-Oliman, G. y Marín, L. (2002). The hydrogeochemistry of the karst aquifer system of the northern Yucatan Peninsula, Mexico. *International Geology Review*, 44(3), 191-221.
- Prosser, S., Martínez-Arce, A. y Elías-Gutiérrez, M. (2013). A new set of primers for *cox1* amplification from freshwater microcrustaceans. *Molecular Ecology Resources*, 13(6), 1151-1155.
- Quiroz-Vazquez, P. y Elías-Gutiérrez, M. (2009). A new species of the Freshwater Cladoceran Genus *Scapholeberis* Schoedler, 1858 (Cladocera: Anomopoda) from the Semidesert Northern Mexico, Highlighted by DNA Barcoding. *Zootaxa*, 2236, 50-64.
- Ratnasingham, S. y Hebert, P. D. (2013). A DNA-Based Registry for All Animal Species: The Barcode Index Number (BIN) System. *Plos One*, 8(7), e66213.
- Rocha, C. E. F., Iliffe, T. M., Reid, J. W. y Suárez-Morales, E. (1998). A new species of *Halicyclops* (Copepoda, Cyclopoida, Cyclopidae) from cenotes of the Yucatan Peninsula, Mexico, with an identification key for the species of the genus from the Caribbean region and adjacent areas. *Sarsia*, 83(5), 387-399.
- Rocha, C. E. F., Iliffe, T. M., Reid, J. W. y Suárez-Morales, E. (2000). *Prehendocyclops*, a new genus of the subfamily Halicyclopiniae (Copepoda, Cyclo-

- poida, Cyclopidae) from cenotes of the Yucatan Peninsula, Mexico. *Sarsia*, 85, 119-140.
- Sarma, S. S. S. y Elías-Gutiérrez, M. (1999). A survey on the rotifer (Rotifera) fauna of the Yucatan Peninsula (Mexico). *Revista de Biología Tropical*, 47, 187-196.
- Smirnov, N. N. y Elías-Gutiérrez, M. (2011). Biocenotic characteristics of some Yucatan lentic water bodies based on invertebrate remains in sediments. *Inland Water Biology*, 4(2), 211-217.
- Suárez-Morales, E. y Elías-Gutiérrez, M. (2000). Two new *Mastigodiatomus* (Copepoda, Diaptomidae) from Southeastern Mexico with a key for the identification of the known species of the genus. *Journal of Natural History*, 34(5), 693-708.
- Suárez-Morales, E. y Reid, J. W. (1996). Ampliación de ámbito de dos copépodos (Crustacea: Copepoda) de aguas continentales en la Península de Yucatán, México. *Revista de Biología Tropical*, 44(2), 942-944.
- Suthers, I., Bowling, L., Kobayashi, T. y Rissik, D. (2008). Sampling methods for plankton. En I. Suthers y D. Rissik (eds.), *Plankton* (pp. 73-114). Melbourne: Csiro Publishing.
- Valdez-Moreno, M., Ivanova, N. V., Elías-Gutiérrez, M., Contreras-Balderas, S. y Hebert, P. D. N. (2009). Probing diversity in freshwater fishes from Mexico and Guatemala with DNA barcodes. *Journal of Fish Biology*, 74(2), 377-402.
- Van Damme, K. y Kotov, A. A. (2016). The fossil record of the Cladocera (Crustacea: Branchiopoda): Evidence and hypotheses. *Earth-Science Reviews*, 163, 162-189.
- Vazquez-Dominguez, E. y Arita, H. T. (2010). The Yucatan peninsula: Biogeographical history 65 million years in the making. *Ecography*, 33(2), 212-219.
- Willan, R. C., Russell, B. C., Murfet, N. B., Moore, K. L., McEnulty, F. R., Horner, S. K., Bourke, S. T. (2000). Outbreak of *Mytilopsis sallei* (Recluz, 1849) (Bivalvia: Dreissenidae) in Australia. *Molluscan Research*, 20, 25-30.
- Young, M. R., Behan-Pelletier, V. M. y Hebert, P. D. (2012). Revealing the Hyperdiverse Mite Fauna of Subarctic Canada through DNA Barcoding. *Plos One*, 7(11).