

Sección: Taxonomía y sistemática

***Protozapotecia unamensis* sp. nov. (Annelida: Crasiclitellata: Acanthodrilidae), una nueva especie de lombriz de tierra de los bosques de oyamel de la Ciudad de México**

***Protozapotecia unamensis* sp. nov. (Annelida: Crasiclitellata: Acanthodrilidae), a new earthworm species from México City fir forests**

Carlos Frago ^{a, *}, Patricia Rojas ^a, Francisco Javier Álvarez-Sánchez ^b, Guadalupe Barajas ^b,
Mónica Martínez-Hurtado ^b y Felipe Martínez-Rodríguez ^b

^a Laboratorio de invertebrados del suelo, Red de Biodiversidad y Sistemática, Instituto de Ecología, A.C., Carretera Antigua a Coatepec Núm. 351, Col. El Haya, 91070 Xalapa, Veracruz, México

^b Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Apartado postal 70-399, 04510 Ciudad de México, México

*Autor para correspondencia: carlos.fragoso@inecol.mx (C. Frago)

Recibido: 8 noviembre 2018; Aceptado: 9 septiembre 2019

Resumen

Se describe a *Protozapotecia unamensis* sp. nov. Frago y Rojas de los bosques de oyamel de Los Dinamos, en el sur de la Ciudad de México. La nueva especie se diferencia de las especies del género por combinar los poros prostáticos en los segmentos **18** y **20** con las vesículas seminales en **9** y **12**. Se trata de una especie habitante del suelo, endogea, geófaga y con la mayor cantidad de individuos encontrados por debajo de los 10 cm de profundidad. Su semejanza con otras especies de bosques de oyamel de Puebla y Veracruz, sugiere un ancestro común que habitó estos bosques cuando tenían una distribución más extensa y continua. Los muestreos presentan una abundancia y biomasa muy bajas: 1.7 ind/m² y 0.22 g/m² equivalente a 0.61% y 0.53% de los valores de la comunidad de lombrices del bosque de oyamel, dominada por especies exóticas. Tomando en cuenta su distribución geográfica restringida, su escasa abundancia y un hábitat amenazado por el cambio climático, las actividades humanas y la presencia de lombrices invasoras, se considera una especie con alto riesgo de extinguirse en estos bosques.

Palabras clave: Los Dinamos; Cuenca río Magdalena; Acanthodrilinae; *Diplocardia*; Oligochaeta

Abstract

Protozapotecia unamensis sp. nov. Frago and Rojas is described from Los Dinamos fir forest of south México City. The new species is differentiated from the other species of the genus by combining the presence of prostatic pores in segments **18** and **20** with seminal vesicles in **9** and **12**. The new species is a soil dwelling endogeoic-geophagous earthworm, with the majority of individuals being found under 10 cm soil depth. Their high resemblance to other

species of the genus found in fir forests from Puebla and Veracruz states, suggests that a common ancestor inhabited common and continuous ancient fir forests. Sampling revealed very low abundance and biomass values: 1.7 ind/m² and 0.22 g/m², equivalent to 0.61% y 0.53% of the exotic dominated fir forest earthworm communities. Considering its restricted geographical distribution, low abundance, and a habitat threatened by climate change, human activities and presence of exotic worms, this species is considered in high risk of local extinction.

Keywords: Los Dinamos; Río Magdalena Basin; Acanthodrilinae; *Diplocardia*; Oligochaeta

Introducción

La Ciudad de México es una de las ciudades más grandes del mundo, con una población relativamente estabilizada de cerca de 8.9 millones de personas (datos del censo 2010; Porrás-Macías y Méndez, 2016). Establecida en una superficie de 1,485 km², aun presenta extensas zonas naturales en la región conocida como Bosques y cañadas del sur y suroeste (Reygadas, 2016). Esta ecoregión incluye la sierra de Las Cruces y las sierras y montañas del Ajusco y del Chichinautzin. Como parte de la sierra de Las Cruces, se encuentra la cuenca del río Magdalena que alberga algunos de los bosques mejor conservados de oyamel (*Abies religiosa* (Kunth.) Schltdl. et Cham.) de la ciudad. En estos bosques se han realizado estudios florísticos, ecológicos y ambientales con objeto de caracterizar y conservar este ecosistema (Almeida-Leñero et al., 2007; Ávila-Akerberg et al., 2008; Santibáñez-Andrade, 2009; Santibáñez-Andrade et al., 2015; Silva et al., 1999).

En esta zona también se ha estudiado la macrofauna del suelo en sitios a distinta altitud y con diferente grado de perturbación (Martínez, 2014, 2015). La revisión de las comunidades de lombrices de tierra de estos lugares reveló la presencia de una especie nativa del género *Protozapotecia* James 1993 poco abundante y con características morfológicas distintivas que la ubicaron como una nueva especie. Este género presenta 8 especies distribuidas en México (5 spp.; Cervantes y Fragoso, 2018; Eisen, 1900; James, 1993) y Cuba (3 spp.; Fragoso y Rodríguez, 2017). En México, las especies se distribuyen exclusivamente en la Faja Volcánica Transversal y en el norte de la Planicie Costera Oriental (Cervantes y Fragoso, 2018; Fragoso, 2001, 2007; James, 1993; Fragoso y Reynolds, 1997; Fragoso y Rojas, 2014; Fragoso et al., 1995).

En este trabajo se describe una nueva especie del género *Protozapotecia*, incluyendo información sobre su abundancia, distribución y relación con otras especies del género. Con este hallazgo, la fauna de lombrices nativas de la Ciudad de México se incrementa a 5 especies, un número aun bajo en comparación a las 21 especies de lombrices exóticas registradas en esta ciudad (Fragoso, 2001, 2007; Fragoso y Rojas, 2014).

Materiales y métodos

Las lombrices fueron encontradas en el muestreo de macrofauna del suelo llevado a cabo en 2009 (Martínez, 2014) en los bosques de oyamel del cuarto Dinamo (ubicado en los 19°15' N, 99°17' O), de la Ciudad de México. La revisión de las lombrices recolectadas reveló la presencia de pocos individuos morfológicamente diferentes de las lombrices exóticas predominantes. El estudio incluyó 3 sitios relativamente bien conservados, ubicados a altitudes separadas por intervalos de 60 metros (3,372, 3,432 y 3,491 m snm). En cada sitio se revisaron 5 monolitos de suelo de 25 × 25 cm de área (0.0625 m²) y una profundidad de 30 cm, estratificados a intervalos de 10 cm de profundidad. El muestreo se realizó en 2 épocas (secas: marzo; lluvias: agosto), con un total de 30 monolitos revisados. Adicionalmente, se revisó el material de lombrices recolectado durante otro estudio de macrofauna y mesofauna edáfica en estos bosques, pero ahora en sitios de bosque con distinto grado de conservación (Martínez, 2015). En este caso, el muestreo se hizo en 6 sitios con árboles de diferente área basal y en condiciones de perturbación variada, en donde se revisaron 3 monolitos de la misma superficie, profundidad y estratificación que en el estudio anterior; se incluyeron también 2 épocas, lluvias (agosto-octubre 2013) y secas (abril-mayo 2014), con un total de 36 monolitos revisados. Conjuntando los 2 muestreos, se encontraron lombrices en 47 de los 66 monolitos (71%), 24 del muestreo de 2009 (80%) y 23 del muestreo de 2013-2014 (64%).

Las lombrices fueron separadas del resto de la macrofauna y fijadas en una solución de formol al 10%; después de varios años fueron cambiadas a una solución de alcohol al 70% para su conservación. De este material, se separaron los individuos pertenecientes a la nueva especie que se describe en el presente trabajo.

Las fotografías de los caracteres internos y externos fueron obtenidas con una cámara Fuji FinePix Z110 adaptada a un estereomicroscopio Stemi SV6 Zeiss; los dibujos fueron realizados con ayuda de una cámara clara y a partir de fotografías. Las fotografías de las quetas peneales se obtuvieron con una cámara Leica ICC50 HD instalada en un microscopio Leica DM750 y con un microscopio de barrido (GEOL-JSM-5600LV).

En la terminología usada en la descripción, de acuerdo con Righi (1979) y modificada en algunos aspectos por Fragoso y Rojas (2007), los segmentos se presentan como números arábigos en negritas y los intersegmentos como números arábigos separados por una diagonal; las quetas se presentan en cursivas minúsculas y las hileras de quetas en cursivas mayúsculas.

Los ejemplares de la nueva especie se depositaron en la Colección de Lombrices de Tierra del Instituto de Ecología A.C. (IEOL), en Xalapa, Veracruz, México.

Descripción

Protozapotecia unamensis sp. nov. Fragoso y Rojas (figs. 1- 4)

Externa. Longitud: 56-83 mm (media = 69.5 mm, $n = 2$; holotipo 83 mm). Diámetro después del clitelo: 2.2-2.6 mm (media = 2.4 mm, $n = 4$; holotipo 2.66 mm) (fig. 1). Número de segmentos 95, 116 (holotipo). Pigmento ausente; coloración gris claro. Prostomio epilóbico cerrado, en 2 ejemplares ligeramente invaginado. Surcos secundarios: 1 o 2 surcos postquetales en los segmentos 4-6, después del clitelo 2 prequetales y 2 postquetales; últimos segmentos con 1 surco prequetal y 1 postquetal. Quetas cercanamente pareadas, 8 por segmento, poco visibles en los segmentos anteriores al clitelo. Fórmula setal: (*aa:ab:bc:cd:dd*) ($n = 2$) segmento 10: 4.8:1.0:3.2:1.2:18.3; segmento 30: 5.8:1.0:3.7:1.2:16.8; 10 segmentos antes del pigidio: 4.3:1.0:3.3:0.9:13.3. Quetas genitales (espermatecales) ausentes. Quetas *a* y *b* de los segmentos 18 y 20 modificadas como quetas peneales (fig. 2), dentro de folículos peneales (fig. 4d). Las quetas peneales *a* y *b* asociadas a cada próstata son de diferente tamaño, casi rectas o ligeramente curvadas (figs. 2 a, c), con un ápice bifurcado (figs. 2b, d) con escasa ornamentación superficial y muescada limitada a la región distal (figs. 2b, d). En ninguno de los individuos estudiados se observaron estas quetas externamente. Dimensiones: quetas pequeñas: 460, 686 μm de longitud por 20 μm de ancho en su parte más amplia; quetas grandes: 614, 804 μm de largo por 20 μm de ancho (fig. 2). Clitelo de color anaranjado oscuro, en forma de silla de montar y alcanzando las hileras BC; comienza en el segmento 13 (abarcando todo o parte del segmento) y termina en $\frac{1}{2}$ 19 (holotipo; figs. 1a, 3a, b), $\frac{1}{2}$ 20 (2 ind.; figs. 1b, 3c, d, e,f) ó 20 (1 ind.). Poros dorsales presentes a todo lo largo del cuerpo; el primero se reconoce en 9/10 (4 ind.). Poros espermatecales pareados en 8 y 9, prequetales, ubicados en AB o ligeramente hacia afuera de B (fig. 1). Poros femeninos pareados en 14, prequetales, pequeños y difíciles de ver; en el holotipo se observaron en AB, mientras que en 2 paratipos se ubicaron en B o ligeramente hacia afuera de B. Dos pares de poros

prostáticos en 18 y 20 en AB, unidos por surcos seminales tenues, rectos (figs. 1 y 3) o ligeramente curvados hacia la parte media (1 ind.). Poros masculinos en el ecuador de 19 dentro de los surcos seminales. Marcas genitales variables, todas extendiéndose de B a B. Holotipo (4839; figs. 1a, 3a,b): papilas ovoidales en 10/11 y 16/17 muy juntas casi pareadas a los lados de la línea medioventral (LMV), en 14 tumescencias pareadas más pequeñas y menos conspicuas, en 21/22 una sola papila ovoidal a la izquierda de la LMV, en 22/23 la papila ovoidal medioventral con una constricción en la parte media, casi formando 2 papilas; Paratipo 4842 (figs. 3e, f): 10/11 2 papilas ovoidales, medioventrales pegadas entre sí, en

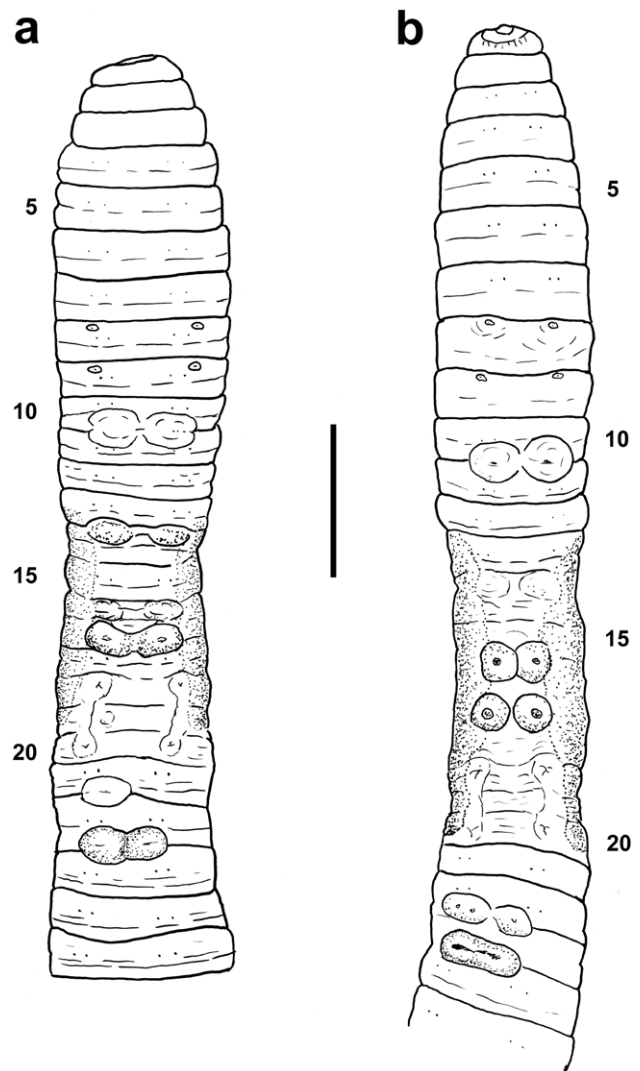


Figura 1. *Protozapotecia unamensis* sp. nov. Vista ventral de la región anterior (segmentos 1-25). a) Holotipo IEOL- 4839, b) paratipo IEOL- 4841 (escala 3 mm).

14/15 son 2 papilas circulares muy juntas a los lados de la LMV, en 15/16 iguales pero más separadas, en 16/17 una sola papila ovoidal a la izquierda de la LMV, en 17/18 una sola papila ovoidal ligeramente a la derecha de LMV, en 21/22 un par de papilas ovoidales cerca de la LMV, en 22/23 una papila elíptica medioventral; Paratipo 4841 (figs. 1b, 3c, d): en 10/11 una papila elíptica medioventral con una constricción en la parte media que la divide en 2, en 14 tumescencias pareadas, más pequeñas y menos conspicuas, en 15/16 son 2 papilas circulares medioventrales muy juntas y con una tumescencia circular pequeña en la parte central, en 16/17 muy parecidas a las papilas anteriores pero más separadas y ligeramente mayores, en 22/23 una papila elíptica medioventral con una constricción a la mitad que casi la divide en 2 y con tumescencias circulares internas a cada lado, en 23/24 una papila elíptica medioventral con un surco transversal en la parte media.

Interna. Septos en forma de embudo y claramente muscularizados en 5/6, 6/7, 7/8, 8/9; los de 9/10, 10/11, 11/12 y 12/13 no presentan ya la forma de embudo y están ligeramente muscularizados. A partir de 13/14 son delgados, membranosos y sin forma de embudo. Dos mollejas, una en 5 y otra en 6 (fig. 4c), separadas por un septo muscular; la anterior es ligeramente más grande (longitud y diámetro promedios de 1.16 mm y 1.62 mm, respectivamente; n = 4) que la posterior (longitud y diámetro promedios de 0.98

mm y 1.44 mm, respectivamente; n = 4). Sin glándulas esofágicas. En el segmento 9, y en algunos ejemplares también en los segmentos 8 y 10, se observó el esófago con vascularización externa. Esófago con crecimientos del epitelio interno como lamelas, en los segmentos 8-13, más gruesas y elongadas en 8-10 (tapando aproximadamente $\frac{1}{4}$ de la luz del esófago); la vascularización y la presencia de lamelas en 8-10 sugiere algún tipo de función de absorción. Intestino comenzando en 15/16 (holotipo y paratipo 4841) ó 16/17 (paratipo 4844). El tiflosol es laminar y comienza como una cinta delgada muy pequeña en el segmento 17; gradualmente se incrementa de tamaño hasta alcanzar su talla máxima en los segmentos 21-23 (aproximadamente $\frac{1}{2}$ de la luz intestinal), terminando en el segmento 45 (holotipo) ó 50 (Paratipo 4841); en este último individuo disminuye abruptamente de tamaño en el segmento 47. Tiflosoles laterales y cecas intestinales ausentes. Intestino con pliegues internos conspicuos en 16-33 (holotipo), 16-30 (paratipo 4844) o 16-50 (paratipo 4841). Corazones laterales en 7-9; corazones latero-esofágicos en 10-12. Vaso supra-esofágico en 10-12. Vaso dorsal simple presente a lo largo de todo el cuerpo. Holonefridios, sin vesículas; a partir del segmento 9 parietales en todo el cuerpo (fig. 4d), en los segmentos 9-12 situados más cerca de la LMV y ocultos por los septos; son exonéfricos con el nefroporo prequetal a la altura de la línea de quetas C y abiertos con el nefrostoma en B. Holándrico: testículos y embudos masculinos en 10

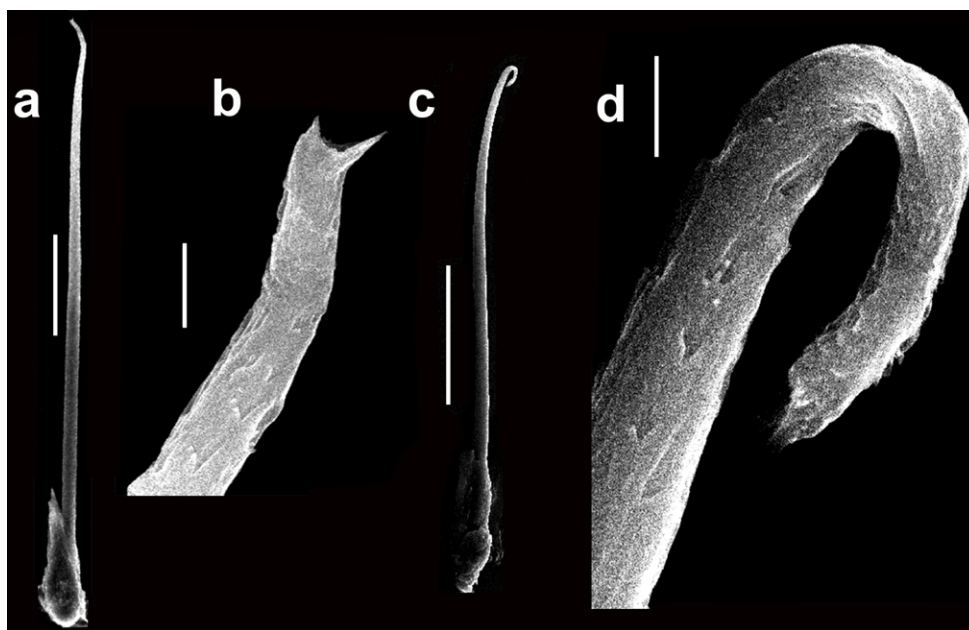


Figura 2. *Protozapotecia unamensis* sp. nov. Fotografías en microscopio de barrido de las quetas peneales (paratipo IEOL-4844). Queta grande, segmento 18: a) completa, (escala 100 micras); b) ápice, (escala 5 micras). Queta pequeña, segmento 18: c) completa (escala 100 micras); d) ápice (escala 5 micras).

y 11, éstos últimos de mayor tamaño; los embudos de color amarillo brillante, iridiscentes, ligeramente plisados y con los bordes gruesos; en cada lado de los segmentos 10 y 11, testículos y embudos recubiertos y conectados por abundante coágulo, a manera de sacos testiculares latero-esofágicos. Dos pares de vesículas seminales racimosas en 9 y 12 cubriendo total o parcialmente el esófago y proyectándose de 9/10 y 11/12, respectivamente; las vesículas de 12 son del doble de tamaño y más racimosas que las de 9 (fig. 4b). Un par de próstatas tubulares en 18 y otro en 20, limitadas a sus correspondientes segmentos y con un solo doblez (fig. 4d); el ducto muscular más angosto y 1/3 más corto que la parte glandular; el conducto central de la parte glandular pequeño pero claramente visible (fig. 4e). Músculos retractores en las paredes ventrolaterales de 17-21 (fig. 4d). Conducto deferente visible desde el segmento 13 sobre la pared corporal; se extiende casi recto a la altura o ligeramente por fuera de B hasta el segmento 17 o 17/18, en donde penetra la pared corporal; en un individuo se observó iridiscencia en los segmentos 13-16. Un par de ovarios en 13, con forma de arbusto o de abanico parcialmente plegado y con varias hileras de óvulos (fig. 4a); estos últimos con un diámetro de 71-89 micras; embudos femeninos claramente visibles en la parte ventral del segmento 13, casi pegados a 13/14, cuyo ducto

se abre al exterior en el segmento 14 (pero cerca de 13/14) y a la altura de AB o B. Un par de pequeñas estructuras ovoidales en 14, dorsolaterales al esófago y unidas al septo 13/14; probablemente corresponden a ovisacos (fig. 4a). Dos pares de espermatecas diverticuladas en los segmentos 8 y 9, con una longitud total variable entre individuos (1.1, 1.42 o 1.58 mm). El divertículo de cada espermateca es globular o ligeramente elipsoidal con una ligera constricción en su parte central, y con el eje mayor perpendicular al eje del ducto y el ámpula. La forma del ámpula variable (alargada recta, o curvándose inmediatamente después del divertículo; fig. 4f), con una longitud 1.4, 2.2 o 3.9 veces mayor que el divertículo y 5, 7 o 9 veces mayor que el ducto.

Resumen taxonómico

Localidad: todos los individuos se encontraron en la misma localidad y fecha: México, Ciudad de México, cuarto Dinamo del Parque Nacional Los Dinamos; parte alta de la cuenca del río Magdalena, Alcaldía Magdalena Contreras. Bosque de oyamel (*Abies religiosa*) sobre suelos volcánicos (Andosoles húmicos AH). 19°15'17.58" N, 99°17'37.12" O; 3,372 m de altitud; 6 individuos (5 adultos y 1 juvenil) 21/09/2009, M. Martínez Hurtado col.

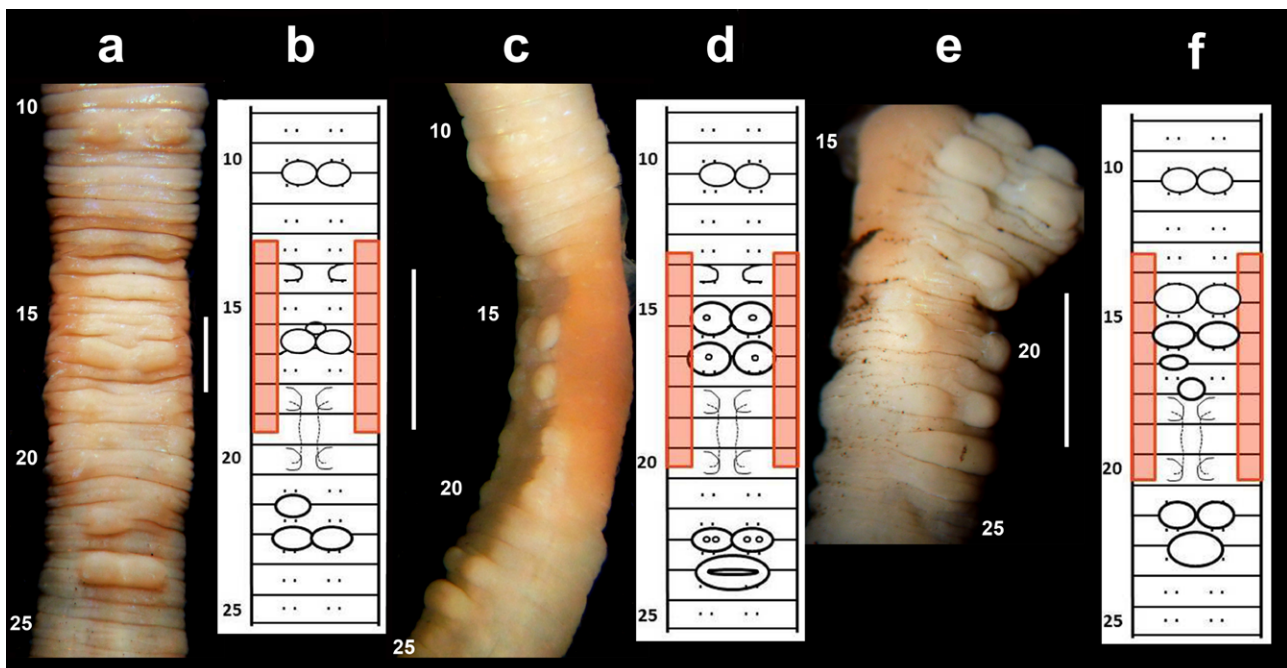


Figura 3. *Protozapotecia unamensis* sp. nov. Marcas genitales. a) Holotipo IEOL-4839, segmentos 10-25, vista ventral; b) representación esquemática de la fotografía anterior; c) paratipo IEOL -4841, segmentos 10-25, vista latero-ventral; d) representación esquemática de la fotografía anterior; e) paratipo IEOL -4842, segmentos 14-25, vista latero-ventral; f) representación esquemática de la fotografía anterior; en este caso se han añadido los segmentos 10-13 del fragmento anterior de este ejemplar (escala de todas las fotografías 2 mm)..

Material. Holotipo: adulto clitelado completo, roto en 2 partes a la altura del segmento **45**, dentro del suelo a una profundidad de 10-20 cm. IEOL-4839. Paratipos: *i*) fragmento anterior (1.6 cm de largo con 30 segmentos) de un adulto clitelado roto en 2 partes a la altura del segmento **13**, dentro del suelo a una profundidad de 10-20 cm. IEOL-4842; *ii*) fragmento anterior (3.5 cm de largo con 59 segmentos) de un adulto clitelado, dentro del suelo a una profundidad de 0-10 cm. IEOL- 4841; *iii*) fragmento anterior (1.4 cm de largo con 18 segmentos) de un adulto clitelado, dentro del suelo a una profundidad de 10-20 cm. IEOL-4840; *iv*) 2 fragmentos de un adulto clitelado (longitud total de 4.7 cm; con 80 segmentos), al primer fragmento le faltan los primeros 15 segmentos; dentro del suelo a una profundidad de 20-30 cm. IEOL 4844.

Etimología: la especie está dedicada a la Universidad Nacional Autónoma de México, por su papel en el estudio y protección de los bosques de Oyamel de la Ciudad de México.

Contenido intestinal: principalmente tierra de color negro con algunos fragmentos orgánicos.

Ecología. Distribución: esta especie se ha encontrado exclusivamente en los bosques de Oyamel del cuarto Dinamo del Parque Nacional Los Dinamos, en el sur de la Ciudad de México. Fue muy escasa pues solo se encontró en 4 de los 66 monolitos estudiados (6%), los cuales se limitaron a uno de los sitios más conservados (3,372 m snm). En el sitio en el que se encontró, *P. unamensis* sp. nov. tuvo una abundancia y biomasa promedio de 11.2 ind/m² y 1.43 g/m², respectivamente, lo que representa tan solo 4% y 4.5% de los valores de toda la comunidad de lombrices de este sitio. Al evaluar la abundancia en todo el bosque de oyamel de Los Dinamos (los 66 monolitos en los 9 sitios y las 2 épocas), los valores de abundancia y biomasa de esta especie disminuyen a 1.7 ind/m² y 0.22 g/m², lo que representa 0.61 y 0.53%, respectivamente, de los valores de la comunidad de lombrices del bosque de oyamel. Distribución vertical: todos los individuos se

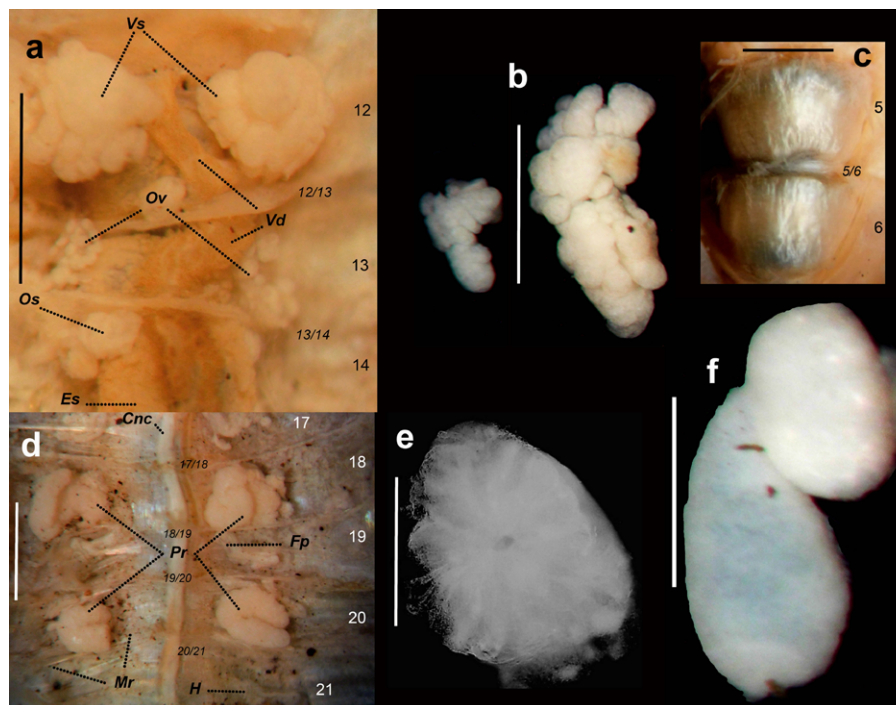


Figura 4. *Protozapotecia unamensis* sp. nov. a) Vista dorsal interna de los segmentos **12-14** mostrando las vesículas seminales posteriores (Vs), los ovarios (Ov), los ovisacos (Os), el vaso dorsal (Vd) y el esófago (Es); los segmentos se indican con números y los septos por números separados por una diagonal (Paratipo IEOL-4841); b) vesículas seminales extraídas en vista dorso-lateral de los segmentos **9** (a la izquierda) y **12** (a la derecha) (holotipo IEOL-4839); c) mollejas de los segmentos **5** y **6** en vista dorsal; el septo 5/6 ha sido eliminado para la observación (paratipo IEOL-4840); (escala de las 3 figuras 1 mm); d) vista dorsal interna de los segmentos **17-21** mostrando las próstatas (Pr), los folículos peneales (Fp), los músculos retractores (Mr), los holonefridios (h) y el cordón nervioso ventral (Cnc). Para la observación de las estructuras se removió el intestino (paratipo IEOL-4841; escala 1 mm); e) corte transversal de la próstata derecha del segmento **18** mostrando el conducto central (paratipo IEOL-4840, escala 200 micras); f) vista dorsal de la spermoteca del segmento **9**, extraída del lado derecho (holotipo IEOL-4839) (escala 500 micras).

recolectaron dentro del suelo, con el 71% concentrado por debajo de los 10 cm de profundidad. Debido al bajo número de ejemplares encontrados, no fue posible determinar diferencias entre jóvenes y adultos. La distribución vertical promedio fue de 13.6 cm de profundidad. Categoría ecológica: tomando en cuenta la falta de pigmento, el contenido intestinal y la distribución vertical promedio, se trata de un especie endogea, geófaga. Relación con variables edáficas y ambientales: de acuerdo con la información de Martínez (2014), los suelos en los que vive esta especie son ácidos (pH 4.9), con una capacidad de intercambio catiónica alta (43.42), muy ricos en materia orgánica (36.5 %), con valores elevados de nitrógeno total y con un cociente C:N de 20.18, lo que indica una buena descomposición (Martínez, 2014).

Comentarios taxonómicos

Por presentar holonefridios, próstatas tubulares, 2 mollejas esofágicas separadas por un septo muscularizado y carecer de glándulas esofágicas pedunculadas, la nueva especie pertenece al género *Protozapotecia* (James, 1993). Este género incluye especies presentes en Cuba y en las montañas centrales y la parte norte de la planicie costera de México. Entre las 8 especies del género (Cervantes y Fragoso, 2018; Eisen, 1900), se ubica en el grupo de especies con próstatas en los segmentos **18** y **20**, las cuales fueron recientemente descritas de los bosques de oyamel del cerro El Pinal en Puebla (*Protozapotecia acaxetlensis* Cervantes y Fragoso 2018) y del Cofre de Perote en Veracruz (*Protozapotecia oyametlensis* Cervantes y Fragoso 2018) (Cervantes y Fragoso, 2018). *Protozapotecia unamensis* sp. nov. Fragoso y Rojas se separa de estas 2 especies por las marcas genitales pareadas (presentes vs. ausentes), por la forma del ápice de las quetas peneales (bifurcado vs. forma de cuchara en *P. acaxetlensis* y delicadamente afilado en *P. oyametlensis*) y por la posición de las vesículas seminales (**9** y **12** en la nueva especie vs **9**, **11** y **12** en *P. acaxetlensis* y **11** y **12** en *P. oyametlensis*).

Discusión

Con esta nueva especie, el número de especies de lombrices de tierra para la Ciudad de México se incrementa a 26, de las cuales 5 se consideran nativas: *Dichogaster eiseni* (Csuzdi y Zicsi 1991), *Dichogaster ribaucourti* (Eisen 1900), *Phoenicodrilus taste* Eisen 1895, *Protozapotecia australis* James 1993 (Fragoso, 2007; Fragoso y Rojas, 2014) y *P. unamensis* sp. nov. Fragoso y Rojas.

En el caso de otras 5 especies nativas recolectadas en los bosques de estados aledaños a la Ciudad de México

(*Protozapotecia aquilonalis* James 1993, *Protozapotecia koebeli* (Eisen 1900), *Zapatadrilus toltecus* (Eisen 1900), *Zapotecia amecameca* Eisen 1900 y *Zapotecia nova* James 1993), es posible que en el pasado también se encontraran en los bosques del norte y sur de la ciudad. Sin embargo, el avance de la mancha urbana y el predominio de las exóticas en parques y jardines de la ciudad indican que esto es menos probable hoy en día (Fragoso, 2001; Gates, 1970). De las 10 lombrices nativas de la Ciudad de México y regiones adyacentes, 4 fueron colectadas hace más de un siglo por el entomólogo Albert Koebele, concretamente en el año de 1897, quien entregó el material a G. Eisen para su estudio. A partir de este material, Eisen (1900) identificó a *P. taste* (recolectada previamente en varias localidades de Baja California y Nayarit) y describió a *P. koebeli*, *Z. toltecus*, *Z. amecameca*, *D. ribaucourti* y *Dichogaster viridis* (Eisen, 1900); esta última especie, descrita a partir de material proveniente de Toluca y Ciudad de México, fue dividida en 2 especies por Csuzdi y Zicsi (1991), dejando en *D. viridis* el material de Toluca y nombrando el material de la Ciudad de México como *D. eiseni* (originalmente descrita dentro del género *Eutrigaster* y cambiada a *Dichogaster* por Fragoso y Reynolds [1997]).

Después de poco más de 60 años, se volvieron a recolectar lombrices nativas en el área metropolitana. En 1962, el norteamericano G. Murchie recolectó lombrices de tierra en localidades del Estado de México (al norte de la Ciudad de México) y de la Ciudad de México, material que fue descrito 31 años después por James (1993): *Z. nova* y 2 especies del género nuevo *Protozapotecia*, *P. aquilonalis* y *P. australis*.

El género *Protozapotecia* fue nombrado para separar del género neártico *Diplocardia* las 2 especies encontradas en la Ciudad de México y el Estado de México, con base en las siguientes características diagnósticas (James, 1993): *Protozapotecia*, presencia del septo 5/6 muscular, mollejas discretas en los segmentos **5** y **6**, comienzo del intestino en el segmento **15** y poros prostáticos en los segmentos **17** y **19**; *Diplocardia*, septo 5/6 membranoso, mollejas cuasi-fusionadas, comienzo del intestino después del segmento **17** y poros prostáticos en los segmentos **18** y **20**. Más tarde, Fragoso y Reynolds (1997) decidieron ubicar a la especie *koebeli* (descrita originalmente dentro de *Diplocardia*) en este género. En los últimos 2 años se han añadido a *Protozapotecia* 5 especies más, 3 de Cuba (*Protozapotecia angelesae* Rodríguez y Fragoso 2017, *Protozapotecia centralis* Rodríguez y Fragoso 2017 y *Protozapotecia cubensis* Rodríguez y Fragoso 2017; Fragoso y Rodríguez, 2017) y 2 de los bosques de oyamel del centro-este de México (*P. acaxetlensis* y *P. oyametlensis*; Cervantes y Fragoso, 2018). Estas 2 últimas especies, como es el caso de la nueva especie, se separan claramente del resto de las

especies del género por presentar los poros prostáticos en **18** y **20** (a semejanza de *Diplocardia*) pero conservando el septo 5/6 muscularizado y un esófago más corto (el intestino se inicia en 15/16), como el resto de las especies de *Protozapotecia*.

El hallazgo de 3 especies de *Protozapotecia* con poros prostáticos en **18** y **20**, hace necesario discutir las relaciones con los géneros de Norteamérica, México y el Caribe (la región NA-MX-CA de Fragoso y Rojas [2016]), que presentan múltiples mollejas esofágicas, sin glándulas calcíferas y que constituyen el grupo de los diplocardinos. La condición de 3 mollejas con meronefridios (aparentemente la más derivada; James, 1991) se restringe a las islas del Caribe (*Trigaster*, *Borgesia*, *Neotrigaster*; Fragoso y Rojas, 2016; James, 1991) mientras que las lombrices con 3 mollejas y holonefridios, solo se encuentran en el centro y este de México (género *Zapotecia*), linaje que se propone en realidad como parte de *Protozapotecia* (con base en las relaciones del gen COI; Cervantes et al., 2014). En el caso de lombrices con 2 mollejas, también se presentan 2 linajes distintos, uno con meronefridios que se distribuye exclusivamente en Cuba (género *Exxus*, antes *Cubadrilus*; Blakemore, 2007; Fragoso y Rojas, 2016; Rodríguez y Fragoso, 1995, 2002) y en el noreste de México (género *Zapatadrilus*; Cervantes et al., 2016; Fragoso y Rojas, 2016; James 1991) y otro linaje con holonefridios que incluye a *Diplocardia* (con muchas especies en EUA y algunas en México; Fragoso y Rojas, 2016; Gates, 1977) y a *Protozapotecia* (México y Cuba). De modo que el centro y oeste de la isla de Cuba y el centro y noreste de México son las regiones en donde se presentan los linajes más cercanos al ancestro de los diplocardinos, el cual sería muy parecido a las especies de *Protozapotecia* con próstatas tubulares en los segmentos **17** y **19**, intestino comenzando en el segmento **14** ó **15** y las 2 mollejas separadas por un septo muscular. Tomando en cuenta lo anterior, el desplazamiento de las próstatas a **18** y **20** en las especies mexicanas puede ser una convergencia con *Diplocardia*, o bien representar un carácter del origen común de ambos linajes.

La presencia de próstatas tubulares en los segmentos **18** y **20** en 3 especies de *Protozapotecia* que habitan los bosques de oyamel de las montañas del centro de México, sugiere un ancestro común que —y de acuerdo a Cervantes y Fragoso (2018)— existió cuando los bosques de *Abies* eran más comunes y extensos que en la actualidad.

Se tiene registro de los bosques de *Abies* en el norte de México desde el Cretácico (Rzedowski, 1978) y se plantea que posiblemente llegaron a las montañas del centro de México cuando comenzó una disminución de las temperaturas, a mediados del Mioceno, hace cerca de 13 millones de años (Graham, 1993) coincidiendo

con el levantamiento del altiplano del centro de México (Arroyo-Cabrales et al., 2008). De hecho, en el Mioceno los bosques de oyamel llegaron a presentarse en la planicie costera del golfo en las inmediaciones de Coatzacoalcos, Veracruz (Graham, 1976). La distribución de estos bosques seguramente ha oscilado en el pasado como consecuencia de los cambios de temperatura y la actividad volcánica, pasando por fases de expansión durante las glaciaciones a fases de contracción durante los periodos interglaciales. Por ejemplo, se ha propuesto que los bosques de *Pinus*, *Quercus* y *Abies* eran mucho más comunes en el valle de México, Michoacán y Puebla tan sólo hace 20 mil años, durante el último glacial tardío (Arroyo-Cabrales et al., 2008).

De modo que, y considerando que durante los periodos glaciales los bosques de *Abies* debieron ser continuos a lo largo de la Faja Volcánica Transversa, suponemos que el ancestro de las especies de *Protozapotecia* con poros prostáticos en **18** y **20** estuvo asociado a estos bosques, con poblaciones distribuidas a lo largo de casi 200 km y que pudo haber llegado a la Faja Volcánica Transversal hace 13 millones de años o inclusive más recientemente. La diferenciación morfológica desarrollada entre las 3 especies se explicaría por el aislamiento de poblaciones muy alejadas y por su separación total durante los periodos interglaciales (con el elemento volcánico jugando también un papel importante). Esta diferenciación también se observa a nivel molecular entre las especies *P. oyametlensis* y *P. acaxetlensis* que habitan, respectivamente, los bosques de oyamel en el Cofre de Perote de Veracruz y en el cerro El Pinal de Puebla, separados entre sí por cerca de 90 km. Cervantes y Fragoso (2018) observaron que las distancias genéticas del gen COI entre estas 2 especies alcanzan valores de 18.3 y 18.5%, niveles que en lombrices de tierra separan claramente a especies distintas (Chan y James, 2011). Desafortunadamente, no se logró obtener tejido nuevo de la especie nueva *P. unamensis* sp. nov. para evaluar su código de barras y comparar las distancias genéticas con las otras 2 especies; con una distancia entre los bosques de oyamel de Los Dinamos y los bosques de El Pinal y Perote de 148 y 228 km, respectivamente, predecimos que las distancias genéticas deberán presentar valores semejantes (c. 18%).

La nueva especie *P. unamensis* sp. nov. se encontró limitada a una zona específica del cuarto Dinamo, que corresponde a un bosque de oyamel puro y con un elevado grado de conservación (zona 7 de Santibáñez-Andrade [2009]) y estuvo ausente en los bosques más abiertos (zona 8) e inclusive en otros bosques de oyamel más cerrados y conservados (zona 11). Futuros estudios deberán evaluar si se presenta en otros bosques de oyamel bien conservados de los Dinamos (zonas 2 y 5 de Santibáñez-Andrade [2009]) o

de otras montañas cercanas (Ajusco, Chichinautzin, Monte Tlaloc, Telapón; Neyra, 2012a, b; Reygadas, 2016).

La conservación de las 3 especies de *Protozapotecia* con próstatas en los segmentos **18** y **20** pareciera depender solamente del mantenimiento de su hábitat, los bosques de oyamel. Sin embargo, además de la amenaza de que estos bosques se pierdan por la actividad humana o por el efecto del calentamiento global (Zepeda-Gómez et al., 2018), existe otra gran amenaza para estas especies nativas: las especies exóticas de lombrices de tierra. En los Dinamos, las exóticas se encontraron en todos los sitios muestreados, con valores de más de 90 y 99% de la abundancia y biomasa total, respectivamente. De seguir la tendencia actual (calentamiento global, avance de la frontera agrícola y urbana, tala de bosques e invasión de especies exóticas), es muy probable que *P. unamensis* sp. nov. y las otras 2 especies endémicas de los bosques de oyamel de la Faja Volcánica Transversa, se extingan en un futuro no muy lejano.

Agradecimientos

Mónica Martínez agradece al Macroproyecto “Manejo de Ecosistemas y Desarrollo Humano” (SEDEI-PTIP-02) en la cuenca del río Magdalena por el apoyo otorgado; Felipe Martínez al proyecto “La Cuenca del Río Magdalena, D.F. como sitio de referencia para el monitoreo de los efectos del cambio climático” del Programa de Investigación en Cambio Climático 2012 (PINCC). Carlos Fragoso y Patricia Rojas agradecen a Tiburcio Láziz por la toma de las fotografías del microscopio de barrido y a Antonio Ángeles por su ayuda en el procesamiento del material de lombrices y en la gestión de las fotografías del microscopio de barrido.

Referencias

- Almeida-Leñero, L., Nava, M., Ramos, A., Espinosa, M., Ordoñez, M. J. y Jujnovsky, J. (2007). Servicios ecosistémicos en la cuenca del río Magdalena, Distrito Federal, México. *Gaceta Ecológica Número Especial*, 84–85, 53–64.
- Arroyo-Cabrales, J., Carreño, A. L., Lozano-García, S., Montellano-Ballesteros, M., Cevallos-Ferriz, S., Corona, E. et al. (2008). La diversidad en el pasado. En Conabio (Ed.), *Capital natural de México, Vol. I. Conocimiento actual de la biodiversidad* (pp. 227–262). México D.F.: Conabio.
- Ávila-Akerberg, V., González-Hidalgo, B., Nava-López, M. y Almeida-Leñero, L. (2008). Refugio de fitodiversidad en la Ciudad de México, el caso de la Cuenca del Río Magdalena. *Journal of the Botanical Research Institute of Texas*, 2, 605–619.
- Blakemore, R. J. (2007). Checklist and phylogeny of Exxidae (Oligochaeta). *European Journal of Soil Biology*, 43, S9–S13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejsobi.2007.08.040>
- Cervantes, G. y Fragoso, C. (2018). *Protozapotecia acaxetlensis* and *Protozapotecia oyametlensis*, two new earthworm species (Crassiclitellata: Acanthodrilidae) from Mexican central mountains. *Zootaxa*, 4496, 431–439. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.4496.1.32>
- Cervantes, G., Fragoso, C., Espinosa-de Los Monteros, A., Sánchez-Ramos, G., Lara-Villalón, M., Yáñez-Pacheco, M. et al. (2016). New species of the earthworm genus *Zapatadrilus* (Clitellata, Acanthodrilidae) from northern Mexico. *Zootaxa*, 4189, 311–326. <http://dx.doi.org/10.11646/zootaxa.4189.2.7>
- Cervantes, G., Fragoso, C., James, S. W. y Espinosa-de los Monteros, A. (2014). Assessing the evolution of morphological characters in Mexican acanthodriline earthworms with multiple gizzards (Oligochaeta: Acanthodrilidae). En T. Pavlíček, P. Cardet, M. T. Almeida, C. Pascoal y F. Cássio (Eds.), *Advances in earthworm taxonomy VI (Annelida: Oligochaeta)* (pp. 17–25). Heidelberg: Kasperek Verlag.
- Chang, C. y James, S. W. (2011). A critique of earthworm molecular phylogenetics. *Pedobiologia*, 54, S3–S9. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2011.07.015>
- Csuzdi, C. y Zicsi, A. (1991). Über die verbreitung neuer und bekannter *Dichogaster* und *Entrigaster* arten aus mittel-und südamerika (Oligochaeta, Octochaetidae). *Regenwürmer aus Südamerika* 15. *Acta Zoologica Hungarica*, 37, 177–192.
- Eisen, G. (1900). Researches in the American Oligochaeta, with special reference to those of the Pacific coast and adjacent islands. *Proceedings of the California Academy of Sciences*, 2, 85–276.
- Fragoso, C. (2001). Las lombrices de tierra de México (Annelida, Oligochaeta): diversidad, ecología y manejo. *Acta Zoológica Mexicana (n.s.), número especial 1*, 131–171. <https://doi.org/10.21829/azm.2001.8401849>
- Fragoso, C. (2007). Diversidad y patrones biogeográficos de las lombrices de tierra de México (Oligochaeta, Annelida). En G. G. Brown y C. Fragoso (Eds.), *Minhocas na América Latina: biodiversidade e ecología* (pp. 107–124). Londrina, Paraná: EMBRAPA Soja.
- Fragoso, C., James, S. y Borges, S. (1995). Native earthworms of the North Neotropical region: current status and controversies. En P.F. Hendrix (Ed.), *Earthworm ecology and biogeography in North America* (pp. 67–115). Boca Ratón: Lewis Publishers.
- Fragoso, C. y Reynolds, J. W. (1997). On some earthworms from central and southeastern Mexican mountains, including two new species of the genus *Dichogaster* (Dichogastrini). *Megadrilologica*, 7, 9–19.
- Fragoso, C. y Rodríguez, C. (2017). New acanthodrilid earthworms of genera *Protozapotecia* and *Trigaster* from Cuba (Annelida, Crassiclitellata). *Acta Zoológica Mexicana (n. s.)*, 33, 67–75. <https://doi.org/10.21829/azm.2017.3311014>
- Fragoso, C. y Rojas, P. (2007). Two new species of the earthworm genus *Balanteodrilus* (Oligochaeta: Acanthodrilidae) from Eastern Mexico. *Megadrilologica*, 11, 107–114.
- Fragoso, C. y Rojas, P. (2014). Biodiversidad de lombrices de tierra (Annelida: Oligochaeta: Crassiclitellata) en México.

- Revista Mexicana de Biodiversidad (Suplem.)*, 85, S197–S207. <https://doi.org/10.7550/rmb.33581>
- Fragoso, C. y Rojas, P. (2016). *Lavellodrilus notosetosus* sp. nov. (Annelida, Crassichelillata): a new Mexican earthworm with uncommon characters, revealed by a preliminary revision of subfamily Acanthodrilinae. *Zootaxa*, 4154, 101–138. <http://doi.org/10.11646/zootaxa.4154.2.1>
- Gates, G. (1970). On some exotic earthworms from Mexico. *Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural*, 31, 281–287.
- Gates, G. (1977). More on the earthworm genus *Diplocardia*. *Megadrilologica*, 3, 1–48.
- Graham, A. (1976). Studies in Neotropical Paleobotany. II. The Miocene Communities of Veracruz, Mexico. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 63, 787–842. <https://doi.org/10.2307/2395250>
- Graham, A. (1993). Historical factors and biological diversity in Mexico. En T. P. Ramamoorthy, R. Bye, A. Lot y J. Fa (Eds.), *Biological diversity of Mexico: origins and distribution* (pp. 109–127). New York: Oxford University Press.
- James, S. W. (1991). New species of earthworms from Puerto Rico, with a redefinition of the earthworm genus *Trigaster* (Oligochaeta: Megascolecidae). *Transactions of the American Microscopical Society*, 110, 337–353. <http://dx.doi.org/10.2307/3226771>
- James, S. W. (1993). New acanthodriline earthworms from Mexico (Oligochaeta: Megascolecidae). *Acta Zoológica Mexicana*, (n.s.), 60, 1–21. <https://doi.org/10.21829/azm.1993.55601675>
- Martínez, M. H. (2014). *Distribución y composición de la macrofauna y mesofauna edáfica del bosque de oyamel en la cuenca del río Magdalena, D.F. México (Tesis)*. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F.
- Martínez, R. A. F. (2015). *Variación espacio-temporal de la macrofauna edáfica en el bosque de Abies religiosa en La Cuenca del Río Magdalena, D.F. México (Tesis)*. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F.
- Neyra, J. J. (2012a). *Guía de las altas montañas de México y una de Guatemala*. Ciudad de México: Conabio.
- Neyra J. J. (2012b). *Altas montañas mexiquenses: Historia natural, turismo y conservación*. Toluca, Estado de México: Gobierno del Estado de México.
- Porrás-Macías, J. A. y Méndez, S. A. (2016). Dinámica poblacional: un análisis por contornos y regiones. En A. Cruz, J. A. Rivera, E. G. Cabrera, E. D. Melgarejo, H. Perdomo y A. V. Contreras (Coords.), *La biodiversidad en la Ciudad de México, vol. I*. (pp.190–199). Ciudad de México: Conabio / SEDEMA.
- Righi, G. (1979). Introducción al estudio de las lombrices del suelo (Oligoquetos Megadrilos) de la provincia de Santa Fe (Argentina). *Revista de la Asociación de Ciencias Naturales del Litoral*, 10, 89–155. <https://doi.org/10.14409/natura.v1i10.3362>
- Rodríguez, C. y Fragoso, C. (1995). Especies nuevas de *Zapatadrilus* James, 1991 (Oligochaeta: Megascolecidae) registradas en Cuba. *Acta Zoológica Mexicana*, (n.s.), 64, 21–33. <https://doi.org/10.21829/azm.1995.64641941>
- Rodríguez, C. y Fragoso, C. (2002). Filogenia y biogeografía de *Cubadrilus* (Oligochaeta: Octochaetidae), un género nuevo de lombriz de tierra de Cuba. *Acta Zoológica Mexicana*, (n.s.), 87, 125–146. <https://doi.org/10.21829/azm.2002.87871805>
- Reygadas, P. D. (2016). Delimitación del área de estudio y regionalización. En A. Cruz, J. A. Rivera, E. G. Cabrera, E. D. Melgarejo, H. Perdomo y A. V. Contreras (Coords.), *La biodiversidad en la Ciudad de México, Vol. I*. (pp.30–35). Ciudad de México: Conabio/SEDEMA.
- Rzedowski, J. (1978). *Vegetación de México*. México D.F.: Editorial Limusa.
- Santibáñez-Andrade, G. (2009). *Composición y estructura de bosque de Abies religiosa en función de la heterogeneidad ambiental y determinación de su grado de conservación en la cuenca del río Magdalena, México, D.F. (Tesis de Maestría)*. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F.
- Santibáñez-Andrade, G., Castillo-Argüero, S. y Martínez-Orea Y. (2015). Evaluación del estado de conservación de la vegetación de los bosques de una cuenca heterogénea del Valle de México. *Bosque*, 36, 299–313. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002015000200015>
- Silva, L., Romero, F. J., Velázquez, A. y Almeida-Leñero, L. (1999). La vegetación de la región de la montaña del sur de la Cuenca de México. En A. Velázquez y F. J. Romero (Eds.), *Biodiversidad de la región de montaña del sur de la cuenca de México* (pp. 65–92). México D.F.: Universidad Autónoma Metropolitana/ Secretaría del Medio Ambiente.
- Zepeda-Gómez, C., Burrola-Aguilar, C., Estrada-Zúñiga, M. E. y White-Olascoaga, L. (2018). Riqueza y afinidades geográficas de la flora de un bosque de *Abies religiosa* de la Faja Volcánica Transmexicana. *Caldasia*, 40, 54–70. <https://dx.doi.org/10.15446/caldasia.v40n1.68658>