

AJOLOTES, ESPECIES ENDÉMICAS MEXICANAS EN PELIGRO DE EXTINCIÓN



Palabras clave: axolotl, especie endémica, peligro de extinción, conservación, México

Keywords: axolotl, endemic species, extinction, conservation, Mexico.

/// M.I.A. LETICIA ROMERO AMADOR
Facultad de Ciencias Biológicas, UANL
Facultad de Ciencias Biológicas | UANL

RESUMEN

De acuerdo con el reporte reciente de la Plataforma Intergubernamental sobre la Biodiversidad y los Servicios Ecosistémicos (IPBES), del millón de especies que se encuentran en peligro de extinción en el planeta, el 40% son anfibios, lo que hace a las salamandras y otras especies el principal grupo de riesgo a nivel mundial. En México casi todas las especies micro-endémicas de ajolotes se encuentran en alguna categoría de riesgo y una de las especies más amenazadas actualmente es *Ambystoma mexicanum* debido a que su hábitat ha sido altamente dañado por las actividades antropogénicas y su lugar de distribución es muy limitado. Mientras que en el norte de México se distribuyen dos especies de ajolotes (*A. velasci* y *A. rosaceum*), ambos considerados bajo protección especial según la NOM-059-SEMARNAT-2010. Gracias a la atención que han llamado sus características de regeneración, las especies de *Ambystoma spp.* son las más estudiadas a nivel mundial, sólo después del ratón, y la obligación de llevar a cabo su conservación es imprescindible tal como ha sido considerado por las autoridades ambientales nacionales e internacionales. El objetivo de este trabajo es presentar una revisión sobre el estado del conocimiento de las especies de ajolotes que habitan en México con énfasis en las del altiplano mexicano, así como las principales amenazas que enfrentan actualmente. Es preciso señalar que la pérdida de estas especies pudiera resultar en el desequilibrio de los ecosistemas repercutiendo en consecuencia en el ser humano.

ABSTRACT

According to a recent report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES), of a million species which are at risk of extinction on the planet, 40% are amphibians, which makes salamanders and other species the main risk group worldwide. In Mexico, most of the micro-endemic species of salamanders are under some risk category. The most threatened species at present is the axolotl, *Ambystoma mexicanum*, due to their habitat alteration by anthropogenic activities making their distribution range severely limited. In the north of Mexico, two *Ambystoma* species (*A. velasci* and *A. rosaceum*) are considered threatened and under important protection as stated by NOM-059-SEMARNAT-2010. Because of their remarkable regeneration characteristics, the species *Ambystoma spp.* are the most studied worldwide only after the murine. The strong need to reinforce conservation measures for these species has been deemed essential by international and national environmental authorities. The present work was aimed at presenting a review of the state of knowledge of the species of salamanders that inhabit Mexico, with a particular emphasis on Mexican highland species, as well as the principal threats that they are currently facing. It is important to note that the loss of these species could result in the imbalance of their ecosystems, leading to ecological cascade effects they may affect humans.

INTRODUCCIÓN

Actualmente existen 32 especies descritas del género *Ambystoma*, las cuales se encuentran distribuidas en todo Norteamérica (AmphibiaWeb, 2021). Dentro de este contexto, México, que siempre se ha caracterizado por su gran biodiversidad y endemismos, alberga 17 de las 32 especies, las cuales se encuentran distribuidas en todo el altiplano, siendo 16 de ellas micro-endémicas y 15 listadas en la NOM-059-SEMARNAT-2010 (SEMARNAT, 2018; SEMARNAT, 2010), representando así el 94% del total de las especies de *Ambystoma* distribuidas en México. Desafortunadamente, como consecuencia de las actividades antropogénicas, el cambio climático, la introducción de especies invasoras y la destrucción del hábitat, actualmente algunas de estas especies se encuentran en peligro de extinción y sujetas a protección especial por normas mexicanas y autoridades internacionales (IUCN, 2020; WWF, 2020; SEMARNAT, 2010; Wake y Vredenburg, 2008). Es preciso señalar que debido a la alta similitud que presentan estas especies, pueden llegar a existir confusiones

taxonómicas debido a las aproximaciones morfológicas, alozímicas o moleculares, una característica propia de la familia *Ambystomatidae* (Williams et al., 2013). En la Tabla 1 se incluye la lista de especies de ajolotes encontradas en México e incluidas en la NOM-059-SEMARNAT-2010, nombre común, su distribución y estado de riesgo para el altiplano mexicano.

De acuerdo con el reporte reciente de la Plataforma Intergubernamental sobre la Biodiversidad y los Servicios Ecosistémicos (IPBES), del millón de especies que se encuentran en peligro de extinción en el planeta, el 40% son anfibios, lo que hace a las salamandras y otras especies el principal grupo de riesgo a nivel mundial, inclusive superando a las aves y mamíferos (Tollefson, 2019; Stuart et al., 2004). En México, un país que ocupa el quinto lugar en riqueza de especies, pero que se sitúa solo en el segundo lugar en términos de número de especies amenazadas, más del 50% de los anfibios están en peligro de extinción (Chanson et al. 2008). Dentro de la familia *Ambystomatidae*

Tabla 1. Lista de especies de ajolotes encontradas en México e incluidas en la NOM-059-SEMARNAT-2010, su distribución y categoría de riesgo. Información modificada del Programa de Acción para la conservación de las especies: *Ambystoma* spp. SEMARNAT 2018.

| Especie | Nombre común | Distribución por estado | | | | | | | | | | | | | | | | | Categoría de riesgo NOM-059-SEMARNAT-2010 | Categoría de riesgo según la IUCN |
|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|-----------------------------------|
| | | CX | CH | CO | DG | EM | GR | JC | MI | MO | NA | PU | QT | SI | SO | TL | VE | ZA | | |
| <i>Ambystoma altamarani</i> | Ajolote de Zempola | ■ | | | | ■ | | | | ■ | | | | | | | | | A | En |
| <i>Ambystoma amblycephalum</i> | Ajolote de cabeza chata | | | | | ■ | | | | ■ | | | | | | | | | Pr | Cr |
| <i>Ambystoma andersoni</i> | Achoque de Zacapu | | | | | ■ | | | | ■ | | | | | | | | | Pr | Cr |
| <i>Ambystoma bombypellum</i> | Ajolote de piel fina | | | | | ■ | | | | ■ | | | | | | | | | Pr | Cr |
| <i>Ambystoma dumerilli</i> | Achoque de Pátzcuaro, Achójki | | | | | ■ | | | | ■ | | | | | | | | | Pr | Cr |
| <i>Ambystoma flavipiperatum</i> | Ajolote de Chapala | | | | | ■ | | | | ■ | | | | | | | | | Pr | En |
| <i>Ambystoma granulatum</i> | Ajolote de Toluca | | | | | ■ | | | | ■ | | | | | | | | | Pr | Cr |
| <i>Ambystoma leorae</i> | Ajolote de río frío | | | | | ■ | | | | | | ■ | | | | | | | A | Cr |
| <i>Ambystoma lermaense</i> | Ajolote de Lerma | | | | | ■ | | | | | | | | | | | | | Pr | En |
| <i>Ambystoma mexicanum</i> | Ajolote mexicano | ■ | | | | ■ | | | | | | | | | | | | | P | Cr |
| <i>Ambystoma ordinarium</i> | Achoque de Michoacán | | | | | ■ | | | | ■ | | | | | | | | | P | Cr |
| <i>Ambystoma rivulare</i> | Ajolote de arroyo de Michoacán | | | | | ■ | ■ | | | ■ | | | | | | | | | A | DD |
| <i>Ambystoma rosaceum</i> | Ajolote tarahumara | | ■ | | ■ | ■ | | ■ | | | ■ | | | ■ | ■ | | | ■ | Pr | LC |
| <i>Ambystoma taylori</i> | Ajolote de Alchichica | | | | | ■ | | | | ■ | | | | ■ | | | | | P | Cr |
| <i>Ambystoma velasci</i> | Ajolote del altiplano | | | ■ | | ■ | | | | ■ | | | ■ | | | ■ | ■ | | Pr | LC |

IUCN= Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza; Cr=Peligro Crítico, En=En peligro, LC=Menor preocupación, DD=Datos deficientes, P=Peligro de extinción, A=Amenazada, Pr=Protección Especial; CX=CD MX, CH=Chihuahua, CO=Coahuila, DG=Durango, EM=Edo. de México, GR=Guerrero, JC=Jalisco, MI=Michoacán, MO=Morelos, NA=Nayarit, PU=Puebla, QT=Querétaro, SI=Sinaloa, SO=Sonora, TL=Tlaxcala, VE=Veracruz, ZA=Zacatecas.



(perteneciente al orden de las salamandras) se encuentran las especies de *Ambystoma*, cuyo nombre significa “boca en forma de copa o boca achatada”, lo que refleja una de las características más distintivas de esta especie, cuya boca es muy ancha como si pareciera que todo el tiempo estuviera sonriendo (Ramírez-Celestino y Flores-Farfán, 2017).

En la cultura mexicana al ajolote *A. mexicanum* se le conoce como *axolotl* del Náhuatl “monstruo del agua”, palabra internacionalmente reconocida que hace referencia solamente a este tipo de organismo. Sin embargo, hay que señalar que el término “ajolote” se relaciona con todas las demás especies de *Ambystoma* que se conocen y no solo con la especie ubicada en el Valle de México (Ramírez-Celestino y Flores-Farfán, 2017). En nuestro país, los ajolotes están altamente relacionados con las civilizaciones tanto del pasado como del presente ya que, en la mitología azteca, el ajolote figuraba en la Leyenda del sol y la luna, considerado como un Dios, gemelo de Quetzalcóatl (Casas-Andreu *et al.*, 2004). Desde tiempos ancestrales los ajolotes han tenido una importancia religiosa y culinaria ya que por su gran sabor era utilizado en la preparación de tamales, sopas y guisados, aprovechando así sus propiedades nutritivas, mientras que en la medicina tradicional era utilizado para padecimientos respiratorios y elaboración de jarabes, pomadas o infusiones (SEMARNAT, 2018). No obstante, en la actualidad, debido a su estado crítico de extinción, la mayoría de las especies en México son difíciles de encontrar en su hábitat natural, por lo cual su uso ha disminuido considerablemente (Velarde-Mendoza, 2012).

FUNCIONES ECOLÓGICAS DE LOS AJIOLOTES

Cada especie de ajolote cumple con una función ecológica en el sitio donde habita, interactuando entre sí y con otras especies con las que convive. Las funciones que desempeñan los ajolotes son muy importantes ya que aportan equilibrio al medio ambiente de diferentes maneras, además de estar catalogados como especies clave, lo que implica que sin su influencia se podrían generar cambios drásticos en los ecosistemas (Chapin *et al.*, 1997). En primera instancia estos organismos se han identificado como reguladores potenciales

de la densidad de invertebrados asociados con la descomposición de materia orgánica que se encuentran en los ambientes acuáticos. Gracias al dinamismo que presentan los ajolotes al habitar en ecosistemas tanto acuáticos como terrestres, estos ayudan en el intercambio de materia y energía entre los dos hábitats y contribuyen en la dinámica del suelo (Davic y Welsh, 2004), además juegan un papel importante en los ciclos de carbono y nitrógeno de las plantas (Witzel *et al.*, 2019) y gracias a que son depredadores clave, estos contribuyen a la disminución de presas influyendo así en la diversidad en los niveles tróficos inferiores. Por último, son una fuente importante de alimentación para consumidores terciarios como aves o ratones (Davic y Welsh, 2004). La vinculación que se presenta con el ser humano es de igual manera de gran importancia ya que estos organismos pueden ser utilizados como centinelas biológicos para medir la calidad de los ecosistemas, otro beneficio que otorgan los anfibios a los seres humanos es que debido a que consumen larvas de mosquitos como *Aedes aegypti*, sirven como controles biológicos, ayudando a reducir así problemas de salud pública (Barriga-Vallejo *et al.*, 2017; Bowatte *et al.*, 2013).

FISIOLOGÍA DE LOS *AMBYSTOMA SPP.*

Una de las características que distingue a algunas especies de *Ambystoma*, como *A. mexicanum* y *A. dumerilii* es que son incapaces de pasar por el proceso de metamorfosis obligada y llegar así a la vida adulta (Bos y DeWoody, 2005), quedándose en la primera fase de vida, conocida como neotenia. Esto es debido a que los ajolotes del centro del país evolucionaron de diferente manera, quedando aislados en la antigüedad debido a fenómenos geológicos como erupción de volcanes y formación de sierras que sucedieron en ese tiempo, además la pedomorfosis (retención de los caracteres juveniles en un organismo adulto) obligatoria o facultativa han evolucionado varias veces en las poblaciones mexicanas del género *Ambystoma*, lo que ha llevado a una mayor divergencia genética entre poblaciones con historias de vida alternativas contribuyendo a la divergencia de la población en este complejo de especies (Percino-Daniel, *et al.*, 2016). Otra característica que hace únicos a estos organismos es su capacidad de regeneración, ya que pueden regenerar desde sus branquias, patas o cola hasta parte de sus órganos vitales como corazón y cerebro, además tienen el genoma más grande secuenciado hasta el momento (Hernández, 2017). Aunado a lo anterior, dichos organismos tienen la particularidad de presentar distintos tipos de respiración, lo que les da una ventaja adaptativa, sin embargo, también puede representar una desventaja ya que son más susceptibles a absorber contaminantes (Vitt y Caldwell, 2013; Llewelyn *et al.*, 2019; SEMARNAT, 2018). El primer tipo de respiración es pulmonar y lo realizan mediante el uso de sus orificios nasales, lo que les permite tomar aire de una manera tan rápida que resulta casi imperceptible. Una segunda manera de respirar es mediante el paso de oxígeno a través de la piel conocido como ósmosis (Ramírez-Celestino y Flores-Farfán, 2017). Y por último mediante el uso de sus branquias por donde se da el intercambio de gases en el agua (Ramírez-Celestino y Flores-Farfán, 2017).

Por otra parte, se encuentran los ajolotes que se transforman en adultos, es decir, aquellos que son capaces de pasar por el proceso de metamorfosis obligada y que debido a su fisiología se les clasifica como salamandras ya que carecen de escamas y uñas, tienen la piel lisa, glandular y húmeda, poseen pulmones y presentan 4 dedos en las patas anteriores y 5 en las patas posteriores (Mena-González y Servín-Zamora, 2014). Estas especies se pueden encontrar de diferentes colores siendo los más comunes el café y pardo, pero también se pueden encontrar en color negro, verde, amarillo y en menor proporción en colores rosado o albinos.

Al año de nacimiento los ajolotes pueden llegar a medir entre 10 y 20 cm de largo, a esta edad se considera que son adultos y están listos para reproducirse y su tiempo de vida abarca entre los 10 y 15 años (Argüello, 2012). Por otra parte, la forma en la que se sabe que están sexualmente maduros los ajolotes neoténicos, es porque sus gónadas aumentan de tamaño y la parte central de su cuerpo se torna de color rojizo; su reproducción es bastante singular ya que a pesar de ser un animal que se conserva en un estado larvario, tiene la capacidad de madurar sexualmente. La reproducción comienza cuando el macho libera los espermatozoides, acto seguido la hembra procede a posarse encima de cada uno de ellos abriendo su cloaca para que el espermatozoides entre y pueda ser fecundada. De ser fértiles y llegar a un desarrollo óptimo tardan de 2 a 3

semanas en salir del huevo. Por otra parte, los ajolotes transformados y los más comúnmente encontrados en el norte de México, siguen el mismo proceso de reproducción que los ajolotes neoténicos (Ramírez-Celestino y Flores-Farfán, 2017).

DISTRIBUCIÓN Y HÁBITAT

Tienen una amplia distribución, encontrándose desde el sur de Alaska hasta el altiplano mexicano. En la Fig. 1 se representa el área geográfica de las diferentes especies de *Ambystoma spp.* en México, donde se puede observar que la mayor extensión territorial es ocupada por las especies de *A. velasci* y *A. rosaceum*. Están caracterizados por habitar en una gran variedad de ambientes, sin embargo, sus zonas predilectas son los ríos y arroyos, que tienden a utilizar para su reproducción, refugio o búsqueda de alimento, aunque también se les encuentra en pastizales y bosques de Pino-Encino (SEMARNAT, 2018). Gran parte del hábitat de estas especies se encuentra en lugares áridos en donde la demanda de agua para actividades humanas es alta, provocando que sus hábitats se encuentren continuamente en un estado de desecación parcial o total. Cabe señalar que el ecotono presente entre los ecosistemas acuático y terrestre brinda a las salamandras hábitats únicos para su óptimo desarrollo (Davic y Welsh, 2004).

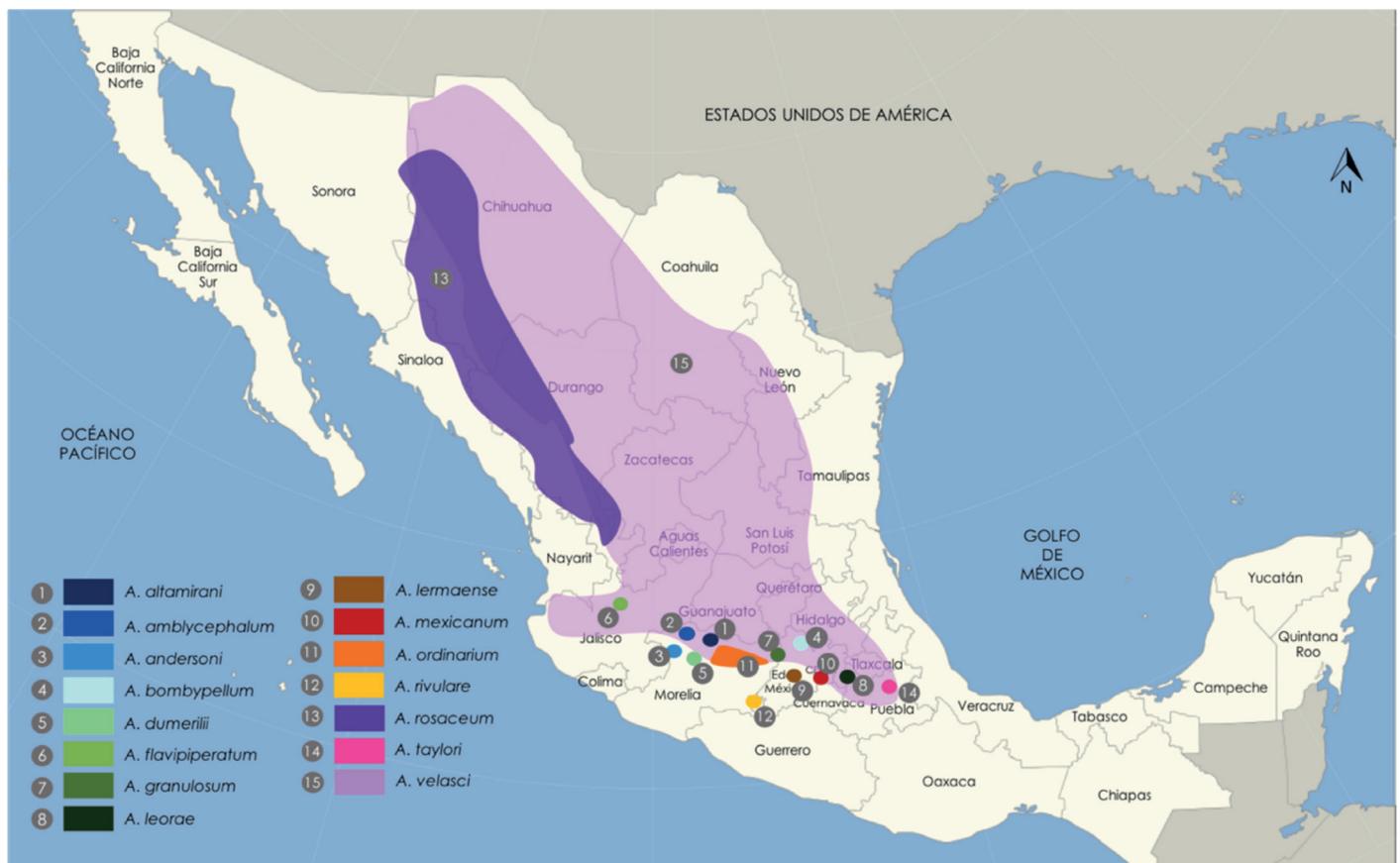


Figura 1. Mapa de distribución de las especies de *Ambystoma spp.* en México, situadas bajo alguna categoría de riesgo según la NOM-059-SEMARNAT-2010. Información modificada del Programa de Acción para la conservación de las especies: *Ambystoma spp.* SEMARNAT 2018. No se incluyeron *A. tigrinum* y *A. mavortium* ya que dichas especies a pesar de compartir territorio entre Estados Unidos y México, no se encuentran dentro de la norma mexicana, al igual que *A. silvense*.

Los ajolotes en estado neoténico (Fig. 2) suelen encontrarse en el fondo de los cuerpos de agua donde haya lodo, aprovechando este tipo de escenario para poder cazar (Ramírez-Celestino y Flores-Farfán, 2017). Todas las especies de ajolotes tanto neoténicos como transformados en su vida adulta son carnívoros y excelentes cazadores, mientras que en su estado larvario son herbívoros (AquaFundación, 2021). Debido a que los ajolotes neoténicos no cuentan con un sentido de la vista óptimo a causa del tipo de hábitat donde se encuentran, han desarrollado un gran sentido del olfato, el cual utilizan para poder cazar a sus presas. Su dieta principal en la vida adulta es a base de renacuajos, pequeños peces, lombrices, larvas de mosquitos, zooplancton o insectos acuáticos, los cuales devoran o tragan ya que los dientes que presentan no tienen la capacidad de poder triturar el alimento (Ramírez-Celestino y Flores-Farfán, 2017; Leff y Bachmann 1986).

PRINCIPALES AMENAZAS QUE ENFRENTAN ACTUALMENTE

De acuerdo con Frías-Alvares *et al.* (2010) las amenazas primordiales a las que hacen frente actualmente los ajolotes son la pérdida y fragmentación de su hábitat como consecuencia de la deforestación de los bosques; la explotación para su venta y consumo humano; el entubamiento de los arroyos que imposibilita su reproducción; la presencia de peces exóticos, principalmente carpa (*Cyprinus carpio*), tilapia azul (*Oreochromis aureus*), tilapia del Mozambique (*O. mossambicus*), tilapia del Nilo (*O. niloticus*) y trucha arcoíris (*Onchornyctus mykiss*); la contaminación de los cuerpos de agua donde habitan; distintos tipos de actividades antropogénicas; el cambio climático y enfermedades emergentes que presentan los anfibios ocasionadas por el *Ranavirus*, virus perteneciente a la familia de los iridovirus, *Batrachochytrium dendrobatidis* (*Bd*), hongo patógeno quitridio que ocasiona la enfermedad denominada quitridiomycosis (Mendoza-Almeralla *et al.*, 2015; Bosch, 2003) y *Candidatus Amphibiichlamydia salamandrae*, bacteria poco estudiada pero que se ha visto ocasiona alta mortalidad en anfibios (Martel *et al.*, 2012; De Boeck *et al.*, 2012). De igual manera es de suma importancia indicar que el daño ocasionado en el hábitat de estas especies puede limitar la conectividad entre ecosistemas, trayendo como consecuencia la disminución en la diversidad genética y consigo endogamia y cuellos de botella genéticos, los cuales limitarían su adaptación a nuevas circunstancias o entornos que los rodean (Sunny *et al.*, 2014). Por último cabe señalar que son extremadamente susceptibles a los daños ocasionados por la contaminación de cuerpos de agua, particularmente a los pesticidas ya que les provocan malformaciones y dificultades para reconocer a sus predadores (Polo-Cavia y Gómez-Mestre, 2016).

ACCIONES PARA SU CONSERVACIÓN

Los esfuerzos por restaurar las poblaciones de ajolotes, en especial *A. mexicanum*, especie más conocida y con



Figura 2. Especies de ajolotes en estado neoténico
 A Ajolote *Ambystoma taylori* / Fernando Constantino Martínez Belmar / CONABIO
 B Ajolote *Ambystoma mexicanum* / Miguel Ángel Sikilia Manzo / CONABIO
 C Ajolote *Ambystoma granulosum* / Rafael Alejandro Calzada Arciniega / CONABIO
 D Ajolote *Ambystoma velasci* / Carlos Barriga Vallejo / CONABIO

más estudios publicados (Velarde-Mendoza, 2012), son actualmente los realizados por algunos investigadores debido a la alarmante disminución de las poblaciones de estos ejemplares, los cuales pasaron de 6 mil por kilómetro cuadrado en 1998 a 36 en 2014, según el censo realizado por el Instituto de Biología de la UNAM. Considerando el drástico descenso de las poblaciones de esta especie, en el Informe Global de Riesgos 2020, el Foro Económico Mundial nombró al ajolote mexicano como la cuarta especie con mayor riesgo a nivel mundial. Los proyectos que actualmente se encuentran activos, engloban los cuatro vértices principales para la preservación de este organismo, siendo el sector político, social, económico y científico.

Entre los esfuerzos emprendidos para rescatar al ajolote destaca el *Plan de Rescate Ecológico de Xochimilco*, iniciado en 1989, del que es parte el proyecto "Conservación del ajolote (*A. mexicanum*) mediante su cultivo y siembra en el Parque Ecológico de Xochimilco", el cual es considerado Patrimonio de la Humanidad, auspiciado por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), y desarrollado por el Patronato del Parque Ecológico de Xochimilco, A.C., que busca preservar y hacer una explotación racional de la especie.

Otro proyecto es el realizado en *La reserva ecológica del Pedregal de la UNAM*, la cual cuenta con un albergue de ajolotes, donde su principal interés resulta en estudiar la caracterización del sistema en el que habitan, enfocándose entre otros aspectos en la calidad del agua donde habitan y la variabilidad genética de los ajolotes, para tener más claridad sobre el funcionamiento del sistema y poder restaurarlo sin que resulte contraproducente, ya que liberar ajolotes sin estudios previos no es la mejor de las soluciones (Mena-González y Servín-Zamora, 2014; Vidal, 2018). A la par existe el *Refugio Chinampa*, programa que forma parte de una estrategia integral, el cual fue iniciado en 2017 y auspiciado por la Secretaría de Cultura Federal en su primera etapa y por la Red de Soluciones de Desarrollo Sostenible (SDSN) de la ONU en etapas posteriores, dicho proyecto es desarrollado por diferentes organizaciones como la Alcaldía de Xochimilco, Chinamperos locales y la UNAM, donde buscan poner en marcha nuevos refugios para los ajolotes y restaurar la superficie agrícola de Xochimilco (Zambrano, 2019), es decir, retornar a la agricultura tradicional introduciendo nuevamente las chinampas, las cuales son islotes artificiales que flotan en el agua y que eran utilizadas para el cultivo de hortalizas, brotes de vegetales, tubérculos, flores comestibles, variedad de maíz y hierbas aromáticas en la época prehispánica.

El proyecto *Umbral Axochiatl*, conformado por campesinos chinamperos de Xochimilco, busca de igual manera restaurar el hábitat natural del *A. mexicanum*, y ha comenzado con proyectos de ecoturismo, limpieza de los cuerpos de agua y de igual manera la reintroducción agrícola, utilizando las técnicas tradicionales de chinampería (Angulo, 2020).

Es cierto que la mayoría de los esfuerzos por conservar

a los ajolotes se han dirigido hacia *A. mexicanum*, restándole importancia a las demás especies con las que cuenta México. Sin embargo existen proyectos que van encaminados hacia la conservación *ex situ* o áreas destinadas para asegurar la preservación de *A. granulatum*, *A. lermaense* y *A. velasci* (Aguilar *et al.*, 2009; Rivera, 2019; Jiménez *et al.*, 2017). Otro caso es el de *A. dumerilii*, el ajolote del Lago de Pátzcuaro, donde investigadores desde el 2000 han realizado diferentes proyectos financiados por diversas instituciones como el Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza (FMCN), SEMARNAT, Fundación Río Arronte, CONABIO y U.S. Fish and Wildlife Service, enfocándose en el manejo, conservación, fortalecimiento y capacitación para la protección de esta especie; además se realizaron acciones en el sector social para la educación ambiental elaborando libros para colorear acerca de "Salvador el Achoque", impactando de manera positiva en los niños y su conservación (Huacuz, 2002).

Aunado a lo anterior, para comenzar con las acciones de protección y conservación de otras especies de ajolotes mexicanos, se encuentran actualmente proyectos en desarrollo que consisten como primera etapa en la actualización de datos con respecto a la distribución, caracterización del hábitat y marcaje. Las 3 áreas naturales protegidas en estudio son: la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca en los estados de México y Michoacán con *A. rivulare*, el Área de Protección de Recursos Naturales Cuencas de los Ríos Valle de Bravo, Malacatepec, Tilostoc y Tensasaltepec en el estado de México con *A. rivulare* y *A. granulatum* y el Parque Nacional La Malinche en los estados de Puebla y Tlaxcala con *A. velasci* (CONANP, 2017; Garcia *et al.*, 2017; Díaz de la Vega-Pérez *et al.*, 2019).

Existen además Unidades de Manejo para la Conservación y Aprovechamiento Sustentable de la Vida Silvestre (UMAS) de vida libre o intensivas y Predios o Instalaciones que Manejan Vida Silvestre (PIMVS), las cuales cuentan con los permisos legales por parte de la SEMARNAT para reproducir, criar y vender especies como: *A. rivulare*, *A. tigrinum*, *A. mexicanum*, *A. granulatum*, *A. lermaense*, *A. dumerilii* y *A. velasci* (Fig. 3), con un enfoque en el interés de que el público pueda tener uno para ayudar en su conservación (Huacuz, 2002).

DISCUSIÓN

Con respecto al incremento de pérdida de biodiversidad que la tierra sufre y en particular, el elevado porcentaje de especies de anfibios, los investigadores se han visto en la necesidad de priorizar la realización de inventarios de diversidad biológica que ayuden a la descripción y conservación de las especies (Andrew, 2011). Desde esta perspectiva, la biología molecular se ha convertido en una herramienta innovadora y significativa que ayuda en la identificación, monitoreo de los organismos y su conservación (Goldberg *et al.*, 2016), ya que, debido a su sencilla manipulación y múltiples ventajas, solo se requieren mínimas cantidades de ADN. En este sentido



Figura 3. Diferentes especies de ajolotes y salamandras.

- A *Salamandra Ambystoma velasci* / Carlos Barriga Vallejo
- B Ajolote *Ambystoma dumerilii* / Iván Montes de Oca Cacheux / CONABIO
- C *Salamandra Ambystoma lermaense* / Leopoldo Vázquez / CONABIO
- D Ajolote *Ambystoma altaminari* / Juan Antonio Reynoso Morán / CONABIO

el uso de los “códigos de barras (COI) o códigos de la vida” (fragmentos de ADN) constituyen una alternativa sencilla y eficaz debido a que es una técnica precisa, no invasiva, rápida, convencional y fácil de estandarizar (Thomsen y Willerslev 2015).

El laboratorio de Ecofisiología en conjunto con el Laboratorio de Ciencias Genómicas de la Facultad de Ciencias Biológicas, UANL, actualmente trabajan en la utilización de los COI para la identificación y monitoreo de ajolotes, apoyado por los proyectos PAICYT CN1236-20 y 325-2020 “Validación *in situ* de la técnica de código de barras para el monitoreo de la salamandra endémica *Ambystoma velasci* en el estado de Nuevo León”, además de su difusión en congresos con trabajos de investigación titulados “Implementación de un protocolo de detección molecular de anfibios acuáticos” e “Implementación de las condiciones de reacción en cadena de la polimerasa (PCR) para la detección de *Ambystoma velasci* (ajolote del altiplano) a partir de eDNA”, presentados en la ciudad de Querétaro, en Octubre 2020; dichos proyectos buscan utilizar esta herramienta como método rápido basado en la estimación del ADN para inferir la presencia y abundancia de las poblaciones de ajolotes en el noreste del país y tener una idea del estado de salud de los ecosistemas donde habitan, contribuyendo así con elementos clave para la conservación de esta especie.

CONCLUSIÓN

Desde tiempos ancestrales los ajolotes han tenido además de una importancia religiosa, una importancia culinaria y medicinal que, aunque persiste, se ha ido

perdiendo debido a la escasez de algunas de sus poblaciones. La pérdida de los ajolotes podría generar grandes cambios en los ecosistemas debido a las importantes funciones biológicas que desempeñan, repercutiendo inequívocamente hasta en el ser humano. Iniciativas tanto nacionales como internacionales han dado pauta a la pronta necesidad de la conservación de dicho organismo, enfocándose principalmente en *A. mexicanum*, especie micro-endémica de México reconocida a nivel mundial.

Por lo tanto, se deben incrementar y continuar con los planes de conservación que se tienen actualmente para la preservación de estas especies, no se debe permitir que un organismo tan emblemático de México desaparezca o solo se reproduzca en cautiverio. Es necesario señalar que, aunque el gobierno mexicano haya otorgado plasmar al ajolote en los billetes de 50 pesos moneda Nacional, los cuales serán distribuidos a partir del 2022 (Fig. 4), resulta fundamental que las autoridades competentes y la sociedad incrementen su compromiso y esfuerzos por recuperar esta especie.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al proyecto PAICYT 325-2020 “Validación *in situ* de la técnica de código de barras para el monitoreo de la salamandra endémica *Ambystoma velasci* en el estado de Nuevo León” por el financiamiento otorgado para el proyecto de investigación que motivó la escritura del presente manuscrito. Agradezco igualmente a Carlos Barriga-Vallejo y al Banco de imágenes de CONABIO por proporcionar las imágenes que se presentan en el artículo.



LITERATURA CITADA

- Aguilar-Miguel, X., Legorreta, G. y Casas-Andreu, G. 2009. Reproducción ex situ en *Ambystoma granulosum* y *Ambystoma lermaense* (Amphibia: Ambystomatidae). *Acta zoológica mexicana*, 25(3), 443-454.
- AmphibiaWeb. 2021. Information on amphibian biology and conservation. Berkeley, California. Disponible en: <https://amphibiaweb.org/> (Consultado el 08/01/2021).
- Andrew, J. 2011. Códigos de Barras de la Vida: Introducción y Perspectiva. *Acta Biológica Colombiana* 16(3):161-175. (Consultado el 23 de septiembre de 2020). ISSN: 0120-548X. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=3190/319027888011>
- Angulo, Y. (14/04/2020). Umbral Axochiatl: Un monstruo de agua repoblará los canales de Xochimilco. *El Mundo*. <https://www.elmundo.cr/mundo/umbral-axochiatl-un-monstruo-de-agua-repoblar-los-canales-de-xochimilco/>. (Consultado el 22/09/2020).
- Aquae Fundación, 2021. El ciclo de vida de los anfibios. En: https://www.fundacionaquae.org/wiki-explora/45_anfibios/index.html#despiece_1 (Consultado el 09/01/2021)
- Argüello, M.Y. 2012. El ajolote de Xochimilco. Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO).
- Barriga-Vallejo, C., Aguilera, C., Cruz, J., Banda-Leal, J., Lazcano, D. y Mendoza, R. 2017. Ecotoxicological biomarkers in multiple tissues of the neotenic *Ambystoma* spp for a non-lethal monitoring of contaminant exposure in wildlife and captive populations. *Water, Air, & Soil Pollution*. 228: 415 (2017).
- Bos, D. y DeWoody, J. A. 2005. Molecular characterization of major histocompatibility complex class II alleles in wild tiger salamanders (*Ambystoma tigrinum*). *Immunogenetics* (2005) 57: 775–781.
- Bosch, J. 2003. Nuevas amenazas para los anfibios: enfermedades emergentes. *Museo Nacional de Ciencias Naturales, CSIC*, 16 (2003) 56-73.
- Bowatte, B., Perera, P., Senevirathne, G., Boyagoda, S. y Meegaskumbura, M. 2013. Tadpoles as Dengue Mosquito (*Aedes aegypti*) egg predators. *Biological Control*. 67. 469-474.
- Casas-Andreu, G., Cruz-Aviña, R. y Aguilar-Miguel, X. 2004. Un regalo poco conocido de México al mundo: El ajolote o axolotl (*Ambystoma*: Caudata: Amphibia). *Ciencia Ergo Sum*, Noviembre 2003-Febrero 2004, año/vol. 10, número 003 Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México, pp. 304-308.
- Chanson, J., Hoffman, M., Cox, N. y Stuart, S. M. 2008. The state of the world's amphibians. *Threatened amphibians of the world* 33-44.
- Chapin, F., Walker, B., Hobbs, R., Hooper, D., Lawton, J., Sala, O. y Tilman, D. 1997. Biotic Control Over the Functioning of Ecosystems. *Science* 277(5325), 500-504.
- CONANP, 2017. Plan de Acción para las Áreas Naturales Protegidas de la Región Centro y Eje Neovolcánico. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.
- Davic, R.D. y Welsh, H.H. Jr. 2004. On the Ecological Roles of Salamanders. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* 35:405-434.
- De Boeck, H., Miwanda, B., Lunguya-Metila, O., Muyembe-Tamfum, J.J., Stobberingh, E., Glupczynski, Y. y Jacobs J. 2012. Novel Chlamydiaceae Disease in Captive Salamanders. *Emerging Infectious Diseases*, Vol. 18, No. 6, June 2012.
- Díaz de la Vega-Pérez, AH., Jiménez-Arcos VH., Centenero-Alcalá, E., Méndez-de la Cruz, FR., Ngo A. 2019. Diversity and conservation of amphibians and reptiles of a protected and heavily disturbed forest of central Mexico. *ZooKeys* 830: 111-125.
- Frías-Alvarez, P., Zúñiga-Vega, J.J. y Flores-Villela, O. 2010. A general assessment of the conservation status and decline trends of Mexican amphibians. *Biodiversity and Conservation* 19(13): 3699–3742.
- García, H., Martínez-Meza, F., Domínguez-Vieyra, R., Mondragón-Contreras, G., Ramírez, K., Vera-Chávez, M. 2017. Monitoreo Sistemático de *Ambystoma rivulare* (AMBYSTOMATIDAE), en dos sitios de muestreo en la Sierra Chincua, Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca. CONANP 2017.
- Goldberg, C., Turner, C. R., Deiner, K., Klymus, K.E., Thomsen, P.F., Murphy, M.A., Spear S.F., McKee, A., Oyler-McCance, S.J., Cornman, R.S., Laramie, M.B., Mahon, A.R., Lance, R.F., Pilliod, D.S., Strickler, K.M., Waits, L.P., Fremier, A.K., Teruhiko, T., Herder, J.E. y Taberlet P. 2016. Critical considerations for the application of environmental DNA methods to detect aquatic species. *Methods in Ecology and Evolution* 2016 7:1299–1307.
- Hernández Mares, P. 2017. Ajolote: el símbolo mexicano que se resiste a la extinción. *Mongabay Latam*. Periodismo Ambiental independiente. <https://es.mongabay.com/2017/05/ajolote-lucha-contra-extincion/> (Consultado el 09/01/2021).
- Huacuz, DC. 2002. Programa de conservación y manejo de *Ambystoma dumerilii*. *El Achoque del Lago de Pátzcuaro*.



Figura 4. Billeto de 50 Pesos Moneda Nacional conmemorativo al axolote, Xochimilco y el maíz. Imagen no oficial. Adaptación realizada por Erick Michel para Plantalia.

- Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza, SEMARNAT 2002.
- IUCN, 2020. International Union for Conservation of Nature. The IUCN Red list of Threatened Species. Versión 2020-2. Disponible en: <https://www.iucnredlist.org/> (Consultado el 10/09/2020).
- Jiménez Jiménez, O., Cruz Aviña, JR., Arzate Ramirez, E., Figueroa Lucero, G., Casas Andreu, G. 2017. Conservación ex-situ de poblaciones en riesgo de ajolotes (*Ambystoma* spp.) del Estado de Puebla, México. *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias* 8(18): 1-10 2017.
- Leff, L. y Bachmann, M. 1986. Ontogenetic changes in predatory behavior of larval tiger salamanders (*Ambystoma tigrinum*). *Canadian Journal of Zoology* 64 (6) 1986.
- Llewelyn, V., Berger, L. y Glass, B. 2019. Permeability of frog skin to chemicals: effect of penetration enhancers, *Heliyon*, Volume 5, Issue 8, 2019.
- Martel, A., Adriaensen, C., Sharifian-Fard, M., Vandewoestyne, M., Deforce, D., Favoreel, H., Bergen, K., Spitzen-van der Sluijs, A., Devisscher, S., Adriaens, T., Louette, G., Baert, K., Hyatt, A., Cramer, S., Haesebrouck, F. y Pasmans, F. 2012. The novel 'Candidatus *Amphibiichlamydia ranarum*' is highly prevalent in invasive exotic bullfrogs (*Lithobates catesbeianus*). *Environmental Microbiology Reports* 5(1):105-8
- Mena-González, H. y Servín-Zamora, E. 2014. Manual básico para el cuidado en cautiverio del axolote de Xochimilco (*Ambystoma mexicanum*). Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Biología. Ciudad de México, 34 pp.
- Mendoza-Almeralla, C., Burrowes, P. y Parra-Olea, G. 2015. La quitridiomycosis en los anfibios de México: una revisión. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 86 (2015) 238-248.
- Percino, D. R., Recuero, E., Vázquez-Domínguez, K., Zamudio, R. y Parra-Olea, G. 2016. All grown-up and nowhere to go: paedomorphosis and local adaptation in *Ambystoma* salamanders in the Cuenca Oriental of Mexico. *Biological Journal of the Linnean Society* 118: 582-597.
- Polo-Cavia, N. y Gómez-Mestre, I. 2016. Pigmentation plasticity enhances crypsis in larval newts: associated metabolic cost and background choice behavior. *Scientific Reports*. Department of Biology, Universidad Autónoma de Madrid, Ciudad Universitaria, Madrid. Ecology, Evolution, and Development Group, Doñana Biological Station, Sevilla, España. 7:39739.
- Ramírez-Celestino, C. y Flores-Farfán, J.A. 2017. El ajolote. Comisión Nacional de los Derechos Humanos (CNDH). Ciudad de México, 125 pp.
- Rivera Rodríguez, A. 2019. Propuesta para establecer un área destinada voluntariamente a la conservación del ajolote (*Ambystoma granulosum*) en Jiquipilco, México. Tesis de Licenciatura, Facultad de Planeación Urbana Regional, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca de Lerdo, 139pp.
- SEMARNAT, 2010. NORMA Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres. Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio. Lista de especies en riesgo. Diario Oficial de la Federación (Consultado el 20/09/2020).
- SEMARNAT, 2018. Ajolote mexicano, criatura súper dotada. SEMARNAT. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/ajolote-mexicano-criatura-super-dotada> (Consultado el 09/01/2021).
- SEMARNAT, 2018. Programa de Acción para la Conservación de las Especies *Ambystoma* spp, SEMARNAT/CONANP, México (Año de edición 2018).
- Stuart, SN., Chanson, JS., Cox, NA., Young, BE., Rodrigues, AS., Fischman, DL. y Waller, RW. 2004. Status and trends of amphibian declines and extinctions worldwide. *Science* 306(5702): 1783-1786.
- Sunny, A., Monroy-Vilchis, O., Fajardo, V. y Aguilera-Reyes, U. 2014. Genetic diversity and structure of an endemic and critically endangered stream river salamander (Caudata: *Ambystoma leorae*) in Mexico. *Conservation Genetics* 1:49-59.
- Thomsen, PF. y Willerslev E. 2015. Environmental DNA-An emerging tool in conservation for monitoring past and present biodiversity. *Biological Conservation*, volume 183. March 2015, Pages 4-18.
- Tollefson, J. 2019. Humans are driving one million species to extinction. *Nature* 569: 171.
- Velarde-Mendoza, T. 2012. Importancia ecológica y cultural de una especie endémica de ajolote (*Ambystoma dumerilii*) del lago de Pátzcuaro, Michoacán. Facultad de Ciencias, UNAM. *Etnobiología* 10(2): 40-49
- Vidal, M. (08/02/2018). Genoma del ajolote ¿Y su conservación en Xochimilco? *Ciencia UNAM, DGDC*. <http://ciencia.unam.mx/leer/706/genoma-del-ajolote-y-su-conservacion> (Consultado el 22/09/2020).
- Vitt, L. y Caldwell, J. 2013. Water Balance and Gas Exchange. Pp 181-202. En: Vitt L., Caldwell J. (Eds.) *Herpetology (Fourth Edition), An Introductory Biology of Amphibians and Reptiles*. Academic Press, ISBN 9780123869197.
- Wake, DB. y Vredenburg, VT. 2008. Are we in the midst of the sixth mass extinction? A view from the world of amphibians. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105 (Supplement 1), 11466- 11473.
- Williams, J. S., J. H. Niedzwiecki, D. W. Weisrock. 2013. Species tree reconstruction of a poorly resolved clade of salamanders (*Ambystomatidae*) using multiple nuclear loci. *Molecular Phylogenetics and Evolution* 68(3): 671-682.
- Witzel, NA., Taheri, A., Miller, BT., Hardman, RH., Withers, DI., Spear, SF. y Sutton, WB. 2019. Validation of an environmental DNA protocol to detect a stream-breeding amphibian, the Streamside Salamander (*Ambystoma barbouri*). *Environmental DNA*. 2020; 00:1-11. Department of Agriculture; Department of Agricultural and Environmental Science at Tennessee State University.
- WWF, 2020. World Wildlife Fund. WildFinder: Online database of species distributions. Disponible en: <https://www.worldwildlife.org/ecoregions/nt0901> (Consultado el 10/09/2020).
- Zambrano González, L. 2019. Conservación y reactivación de la zona chinampera de Xochimilco (Segunda fase). *Restauración Ecológica*. <https://ireunam.wixsite.com/ireunam/proyectos-xochimilco> (Consultado el 09/01/2021).