

La Trucha Dorada Mexicana

**ARTURO RUIZ-LUNA
FRANCISCO JAVIER GARCÍA-DE LEÓN**

Editores



LA TRUCHA DORADA MEXICANA

ARTURO RUIZ-LUNA

FRANCISCO JAVIER GARCÍA-DE LEÓN

Editores





Primera edición: diciembre 2016

Derechos Reservados
© 2016, Arturo Ruiz Luna y
Francisco Javier García De León
(Editores)

ISBN: 978-607-7900-26-9

Impreso en México
Printed in Mexico

La presentación y disposición en conjunto de LA TRUCHA DORADA MEXICANA son propiedad del editor. Ninguna parte de esta obra puede ser reproducida o transmitida, mediante ningún sistema o método, electrónico o mecánico (incluyendo el fotocopiado, la grabación o cualquier sistema de recuperación y almacenamiento de información), sin consentimiento por escrito de los titulares correspondientes. Sin embargo, es posible copiar o descargar material para uso exclusivamente personal o educacional y no comercial. No se permite la remoción o alteración de la leyenda de Derechos de Autor o la que manifieste la autoría del material.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. (CIAD) y al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), las facilidades otorgadas para el desarrollo del proyecto “El paisaje genético, nuevo enfoque multiescala para el estudio de poblaciones de truchas nativas en situación de riesgo en la Sierra Madre Occidental” financiado por CONACYT Ciencia – Básica (CB-2010-01-152893). Este libro forma parte de los resultados de dicho proyecto.

La elaboración de esta obra colectiva es, además del esfuerzo de los autores y de las instituciones que representan, resultado del apoyo de diversas personas que tuvieron la disposición para ayudarnos en el trabajo de campo, ya sea por curiosidad, para transmitirnos un poco de su saber local o lo más importante, por que les interesa preservar su ambiente y recursos naturales.

De manera particular, se agradece la colaboración de los guías locales, Sixto Rodríguez Velázquez, Basilio Rodríguez Vizcarra, Vicente Rodríguez Vizcarra, Adan Leal “El Güero”, David Navar, Jorge Reyes, todos ellos del estado de Durango. De manera particular agradecemos a Ricardo Silva González “El Chalote” y también a Tomás Durán Moreno, Juan Apostol Espinoza Lazos y César E. Rascón Camuñez, del estado de Chihuahua. Asimismo, agradecemos el apoyo del Gobierno Municipal de Guanacevi, a través del Secretario del Ayuntamiento Luis Roberto Olivas Villaneva, así como a Javier Cruz Nieto de PRONATURA.

De igual manera extendemos nuestro reconocimiento al grupo binacional “Truchas Mexicanas”, impulsores de la investigación sobre truchas nativas mexicanas. Adicionalmente agradecemos a Brad Shepard, Carter Kruse, Jason Dunham y varios más, que hicieron posible la donación de un equipo de electropesca, básico para los muestreos más recientes.

Finalmente se agradece la valiosa colaboración de la M. en C. Nora Alicia Trelles Rios en la edición de textos, figuras y composición de formato de la presente obra.

LISTADO DE AUTORES

- Abadía-Cardoso, Alicia Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California. Carr. Tijuana - Ensenada 3917, Col. Fraccionamiento Playitas. Ensenada, Baja California. 22860. México. *aabadia@uabc.edu.mx*
- Aguilar Zárate, Gabriela Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Unidad Mazatlán, Av. Sábalo-Cerritos s/n. Mazatlán, Sinaloa, 82100. México. *gaguilar@ciad.mx*
- Arredondo-Figueroa, José Luis Centro de Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma de Aguascalientes. km 3, Carr. Jesús María-La Posta, Municipio de Jesús María. 20900. Aguascalientes, México. *arredondo60@hotmail.com*
- Barriga Sosa, Irene de los Ángeles Departamento de Hidrobiología. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa. Av. San Rafael Atlixco- 186. Col. Vicentina. Del. Iztapalapa, CDMX. 09340. México. *ibs@xanum.uam.mx*
- Betancourt Lozano, Miguel Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Unidad Mazatlán, Av. Sábalo-Cerritos s/n. Mazatlán, Sinaloa, 82100. México. *mbl@ciad.mx*
- Camarena Rosales, Faustino Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California. Carr. Tijuana - Ensenada 3917, Col. Fraccionamiento Playitas. Ensenada, Baja California. 22860. México. *camarena@uabc.edu.mx*
- Cassio Madrazo, Erika Instituto Politécnico Nacional - Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Durango. Sigma 119. Fracc. 20 de Noviembre II, Durango, Dgo. 34220. México. *erikassio@gmail.com*
- Damas Aguilar, José Luis Dirección General Adjunta de Investigación en Acuicultura, Instituto Nacional de Pesca. Pitágoras 1320. Col. Sta. Cruz Atoyac. Del. Benito Juárez. CDMX. 03310. México,
- De los Santos Camarillo, Laboratorio de Genética para la Conservación, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, Instituto

Anna Belia	Politécnico Nacional, 195, Col. Playa Palo de Santa Rita, La Paz, BCS. 23096 México.
Dillman, Casey B.	Virginia Institute of Marine Science, Gloucester Point, VA, USA.
Escalante, Marco Alejandro	CEFE UMR 5175, CNRS – Université de Montpellier – Université Paul-Valéry Montpellier –EPHE. Laboratoire Biogéographie et écologie des vertébrés, 1919 route de Mende, 34293 Montpellier Cedex 5, France. <i>marko.escalante@gmail.com</i>
Espinosa Pérez, Héctor	Colección Nacional de Peces. Instituto de Biología, UNAM. Ciudad Universitaria, 3er Circuito Exterior s/n. Coyoacán, CDMX. 04510. México. <i>hector@unam.mx</i>
Falcón Rodríguez, José Luis	Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, Instituto Politécnico Nacional 195. Col. Playa Palo de Santa Rita, La Paz, Baja California Sur. 23096. México
García-De León, Francisco Javier	Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, Instituto Politécnico Nacional 195. Col. Playa Palo de Santa Rita, La Paz, Baja California Sur. 23096. México. <i>fgarciadl@cibnor.mx</i> .
Garza, John Carlos	Fisheries Ecology Division, Southwest Fisheries Science Center. National Marine Fisheries Service. Santa Cruz, CA; Institute of Marine Sciences, University of California, Santa Cruz, California, EUA.
George, Ana	Tennessee Aquarium Conservation Institute, Chattanooga, TN, USA.
Getino Mamet, Leandro Nicolás	Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, Instituto Politécnico Nacional 195. Col. Playa Palo de Santa Rita, La Paz, BCS. 23096. México. Centro para el Estudio de Sistemas Marinos (CESIMAR – CONICET), Blvd. Brown 2915, U9120ACD, Puerto Madryn, Chubut, Argentina.
González Acosta, Adrián	Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas.

Felipe	Instituto Politécnico Nacional. El Conchalito. La Paz, BCS. 23096. México. <i>aacosta@ipn.mx</i>
Hernández Guzmán, Rafael	Catedrático CONACYT - Instituto de Investigaciones sobre los Recursos Naturales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. San Juanito Itzicuaró s/n. Col. Nueva Esperanza, Morelia, Michoacán. 58330. México. <i>rhernandez.g@gmail.com</i>
Hernández Ramírez, César Israel	Instituto Politécnico Nacional - Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Durango. Sigma 119. Fracc. 20 de Noviembre II, Durango, Dgo. 34220. México.
Ingle de la Mora, Genoveva	Dirección General Adjunta de Investigación en Acuicultura, Instituto Nacional de Pesca. Pitágoras 1320. Col. Sta. Cruz Atoyac. Del. Benito Juárez. CDMX. 03310. México. <i>genovevaingle@yahoo.com.mx</i>
Lambarri Martínez, Christian	Colección Nacional de Peces. Instituto de Biología, UNAM. Ciudad Universitaria, 3er Circuito Exterior s/n. Coyoacán, CDMX. 04510. México.
Márquez, Federico	Instituto de Biología de Organismos Marinos. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Boulevard Brown 2915 (U9120ACD), Puerto Madryn, Argentina. Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco (UNPSJB), Boulevard Brown 3100, Puerto Madryn, Argentina.
Martínez Castro, Armando	Colección Nacional de Peces. Instituto de Biología, UNAM. Ciudad Universitaria, 3er Circuito Exterior s/n. Coyoacán, CDMX. 04510. México.
Medina Herrera, Elizabeth	Instituto Politécnico Nacional - Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Durango. Sigma 119. Fracc. 20 de Noviembre II, Durango, Dgo. 34220. México.
Moreno Sánchez, Juan Francisco	Instituto Politécnico Nacional - Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo

- Integral Regional Unidad Durango. Sigma 119. Fracc. 20 de Noviembre II, Durango, Dgo. 34220. México.
- Penaluna, Brooke E. Pacific Northwest Research Station. US Forest Service. 3200 SW Jefferson Way, Corvallis, OR, 97331. USA. *bepenaluna@fs.fed.us*
- Ramírez Huerta, Alejandro Luis Programa de Posgrado. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Unidad Mazatlán, Av. Sábalo-Cerritos s/n. Mazatlán, Sinaloa, 82100. México.
- Reyes Valdez, Claudia Alejandra Bioforestal del Noroeste. Calle del Puerto 361. Col. Playa Ensenada, Ensenada, Baja California, 22880, México. *alechrysogaster@hotmail.com*
- Rodríguez Jaramillo, Carmen Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. Instituto Politécnico Nacional 195. Col. Playa Palo de Santa Rita. La Paz, Baja California Sur. 23096 México.
- Ruiz Campos, Gorgonio Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California. Carr. Tijuana - Ensenada 3917, Col. Fraccionamiento Playitas. Ensenada, Baja California. 22860. México. *gruiz@uabc.edu.mx*
- Ruiz Luna, Arturo Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Unidad Mazatlán, Av. Sábalo-Cerritos s/n. Mazatlán, Sinaloa, 82100. México. *arluna@ciad.mx*
- Sánchez González, Sergio Escuela de Biología. Universidad Autónoma de Sinaloa.
- Sánchez Ortiz, Eduardo Instituto Politécnico Nacional - Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Durango. Sigma 119. Fracc. 20 de Noviembre II, Durango, Dgo. 34220. México.

PROLOGO

Fue un gran placer recibir la invitación para escribir este prologo. Me dio no solo la oportunidad de leer los estudios más recientes sobre las truchas Mexicanas, sino también la oportunidad para reflexionar sobre las truchas, su conservación, la naturaleza y biodiversidad, amistades, ciencia, relaciones internacionales, y el futuro. En el proceso, me sorprendió algo darme cuenta de la gran importancia que las truchas han tenido a lo largo de toda mi vida y su importancia mundial. Lo que sigue es entonces, mi historia personal con las truchas en lugares visitados con amigos muy especiales con quienes he convivido durante muchos años. Compartimos no solo experiencias memorables, sino también carreras y metas muy parecidas y ahora, este libro escrito y publicado por un grupo muy dedicado a todo lo que a mí me importa, con intención de divulgar al mundo la importancia de una de las más bellas especies de truchas, hasta ahora muy poco conocida.

Nací en el desierto Sonorense en Arizona, donde como niño pasé los veranos pescando trucha arco iris en las sierras del estado. Dedicaba mucho tiempo a la pesca con mosca y aprendí por experiencia y curiosidad, mucho sobre los invertebrados acuáticos y de la ecología acuática. Así que al matricularme al programa de licenciatura en Arizona State University, fue obvio declararme un estudiante de biología. Pero me fue difícil al principio dedicar tanto tiempo a los cursos básicos y tareas del laboratorio y a menudo escapé de mis clases huyendo a las montañas a explorar y pescar. Era mi pasión y en un *spring break* esa pasión me llevó junto con un amigo, a lo que fue mi primera visita a México, no a sus playas, sino a cruzar en mi vieja camioneta a la Sierra San Pedro Mártir, en el norte de Baja California. Una noche cenamos trucha arcoiris, pescada con lombrices de un arroyito entre los pinos. Pasaron muchos años antes de darme cuenta de que no fue trucha arcoiris común, como la que se cultiva y siembra como especie introducida por todo el mundo, sino era una trucha muy especial, endémica de esa sierra. Eso aprendí luego en un curso de pesquerías o de ictiología, que me introdujo también a la increíble diversidad de los peces del mundo, al conocimiento de los peces nativos del desierto y la gran problemática de su conservación, y mi pasión y *hobby* entonces empezaron poco a poco a convertirse en mi profesión.

A raíz de haber tomado esas clases clave, me despertó la conciencia para reconocer la importancia de la parte académica formal en mi futuro. Ya más dedicado y con algo de suerte, conseguí un trabajo de verano con el Servicio Forestal de los EUA. Con mi nuevo jefe y mentor del Servicio Forestal y dos mulas para llevar equipo de acampar, un equipo de electropesca, y una hielera llena de hielo seco, fuimos a hacer ciencia de campo. La meta era tomar muestras de una especie de trucha nativa y endémica (*O. gilae*) para estudios genéticos de su hibridización con una especie invasora – la introducida trucha arcoiris. Un tema aún prevalente en casi todas las actividades sobre conservación de truchas nativas y mencionado en varios capítulos de este libro.

Luego, pasé un par de años en Colombia trabajando en el Instituto Nacional de Recursos Naturales (INDERENA), investigando las pesquerías del río Magdalena, radicado en un pueblito en una tierra súper caliente y húmeda. Para escapar del calor, a menudo visitaba a un amigo, experto en truchas, trabajando en una estación de cultivo de trucha arcoiris en Lago de Tota, a 3000 msnm en los Andes. Ahí vivía el pez graso (*Rhizosomichthys totae*), antes común, pero hoy seguramente extinto o casi extinto, debido en parte por lo menos, a la introducción de trucha arcoiris. Intentamos muchas veces atrapar

especímenes en las profundidades del lago, sin éxito. Esta historia me hace reflexionar sobre la magnitud del impacto adverso que tiene la trucha arcoiris, la cual se repite muchas veces en muchas partes de este planeta.

Luego, en mi curso de Maestría en Hidrobiología Aplicada en la Universidad de Londres, me impresionó la intensidad de manejo de recursos naturales en Gran Bretaña, allá conocí a una de las muchas estaciones de trucha arcoiris introducida en ese país. El curso destacó sus impactos, no tanto de la especie en sí misma, sino de los desechos que puedan afectar la calidad de agua para consumo humano, etc.

Regresando a casa, fui a visitar a mi profesor de licenciatura, el Dr. Minckley, quien inmediatamente me ofreció un trabajo. Implicó pasar mucho tiempo explorando toda la cuenca del río Yaquí colectando peces para un inventario de su estado de conservación. Ni pensé averiguar el salario antes de aceptar ese verdadero sueño de repente vuelto realidad. Entonces fue en el verano de 1978 que colecté mis primeros especímenes de ambas especies de truchas nativas de esa cuenca y un espécimen de trucha arcoiris introducida. Además, vi en la sierra de Chihuahua varias instalaciones de cultivos rústicos de trucha arcoiris, claramente con alta tasa de escape. Vi también los fuertes impactos de las prácticas forestales y de agricultura en las cuencas de tributarios del altiplano de Chihuahua y me enamoré de las grandes áreas remotas y las bellezas de la Sierra Madre Occidental (SMO), sus culturas y su gente tan amable y diversa.

Luego, con un trabajo en el Departamento de Caza y Pesca de Arizona y encargado de programas de peces nativos, desarrollé programas binacionales para la conservación de especies compartidas con el estado de Sonora. Aunque no estudiamos truchas en ese entonces, empezaron con este trabajo varias colaboraciones y amistades con biólogos mexicanos y de esas amistades eventualmente evolucionó el grupo binacional llamado Truchas mexicanas, citado en muchos capítulos de este libro, por la colección de muchas de las muestras iniciales usadas en algunos estudios expuestos en este libro.

La historia de cada quién dentro del grupo Truchas mexicanas es parecida a la mía. Conocemos toda la problemática de la conservación y la importancia de la biodiversidad. Ahora, por medio de nuestros esfuerzos, sabemos que México es dueño de gran parte de la diversidad global de este grupo económicamente importante, las truchas, y que esa diversidad importante para la economía global ahora se encuentra en grave peligro de extinción. Así aumenta nuestra pasión, que desde el principio ha sido siempre fuerte, tanto que la mayoría de nuestras salidas a la SMO fueron apoyadas, sobre todo, por nuestros propios bolsillos. Tomamos vacaciones de nuestros empleos para perseguir el *hobby* que compartimos –la exploración y descubrimiento científico. Desafortunadamente, siendo un grupo de científicos con una economía que depende de los trabajos profesionales y trabajando en sistemas diferentes en distintos países, en muy diferentes ambientes y perspectivas, la pasión mezclada con las diferencias a veces, generaron conflictos. Pero lo que siempre nos motivó y nos unió, fue la conservación de la diversidad biológica y sabemos que eso a fin de cuentas, depende de la humanidad. En este caso, específicamente de las poblaciones humanas de la SMO. Para ellos, aquí tenemos por primera vez en este libro, un resumen del conocimiento científico en español, escrito por la comunidad científica mexicana, que es, por fin mucho más accesible para la comunidad en general que lo que ha sido la literatura científica, ya casi todo en inglés y publicado en revistas inaccesibles. Este libro, entonces, servirá de fuente de la información básica que requieren no solo los que viven en las cuencas de los ríos con truchas nativas, sino también para los empleados de unidades de los gobiernos quienes requieren este conocimiento para asuntos

legales y logísticos que apoyan acciones locales. También es útil para los escritores de revistas populares, quienes ahora pueden difundir más efectivamente la ciencia a los que viven en la bella e importante SMO. Así, felicito a todos los autores de los capítulos de este libro y a los editores, por sus diversas contribuciones al conocimiento de la zona y una parte de la importante diversidad de truchas endémicas de México, así como por su pasión y dedicación a la conservación. Anticipo por medio de la publicación de este libro una acción acelerada para seguir avanzando en el conocimiento de esa riqueza biológica y más atención por parte de los diferentes niveles de gobiernos para su conservación en beneficio a largo plazo de la gente de la región y del país a quien pertenecen esas truchas únicas.

Dean A. Hendrickson
Curator of Ichthyology
University of Texas Austin
Department of Integrative Biology
Biodiversity Collections

CONTENIDO

Capítulo 1

1

La trucha dorada mexicana: estado actual, oportunidades de estudio y retos para el manejo y conservación de una especie endémica en riesgo

Arturo Ruiz-Luna, Francisco Javier García-De León

Capítulo 2

13

Caracterización paisajística e hidrológica de la Sierra Madre Occidental utilizando técnicas de Percepción Remota, Modelos Digitales de Elevación y Sistemas de Información Geográfica

Rafael Hernández-Guzmán, Arturo Ruiz-Luna

Capítulo 3

29

Historia evolutiva y biodiversidad genética de las truchas de la Sierra Madre Occidental

Alicia Abadía-Cardoso, Francisco Javier García-De León, John Carlos Garza

Capítulo 4

39

Análisis del contenido estomacal de la trucha dorada mexicana *Oncorhynchus chrysogaster* (Needham y Gard 1964) en los ríos Fuerte, Culiacán y Sinaloa, México

Arturo Ruiz Luna, Francisco Javier García de León

Capítulo 5

53

Dimorfismo sexual y periodo reproductivo de la trucha dorada mexicana, *Oncorhynchus chrysogaster* en los ríos Fuerte, Sinaloa y Culiacán

Francisco Javier García-De León, Leandro Nicolás Getino Mamet, María del Carmen Rodríguez Jaramillo, Sergio Sánchez González, Federico Márquez, Arturo Ruíz Luna

Capítulo 6

73

Relaciones biométricas y aspectos poblacionales de la trucha dorada mexicana *Oncorhynchus chrysogaster* en las cuencas de los ríos Fuerte, Sinaloa y Culiacán, México

Arturo Ruíz Luna

Capítulo 7

87

Relaciones biométricas comparativas de peso y longitud y longitud-longitud entre la trucha dorada mexicana (*Oncorhynchus chrysogaster*) y otras truchas nativas del noroeste de México

Gorgonio Ruiz-Campos, Claudia Alejandra Reyes-Valdez, Faustino Camarena-Rosales, Adrián Felipe González-Acosta

Capítulo 8

97

Predicción de la distribución geográfica de trucha dorada *Oncorhynchus chrysogaster* (Needham y Gard 1964) en los ríos Sinaloa y Culiacán, México

Arturo Ruíz-Luna, Rafael Hernández-Guzmán, Francisco Javier García-De León, Alejandro L. Ramírez-Huerta

Capítulo 9

115

Presencia de Compuestos Organoclorados Persistentes (COPs) en poblaciones de trucha dorada mexicana (*Oncorhynchus chrysogaster*), especie endémica de la Sierra Madre Occidental

Gabriela Aguilar Zárate, Arturo Ruiz-Luna, Miguel Betancourt Lozano

Capítulo 10

125

Introgresión genética de la trucha arcoíris exótica en poblaciones de trucha dorada mexicana

Marco Alejandro Escalante, Francisco Javier García-De León, Casey B. Dillman, Anna Belia De los Santos Camarillo, Ana George, Irene de los Angeles Barriga Sosa

Capítulo 11

137

Estrategias acuícolas para la conservación de trucha nativa: primeras experiencias

Irene de los Angeles Barriga Sosa, José Luis Arredondo-Figueroa, Genoveva Ingle de la Mora, Francisco Javier García-De León

Capítulo 12

153

Primeras gestiones para el cultivo de trucha nativa de la Sierra Madre Occidental: recolecta, determinación de identidad genética y reproducción

Alicia Abadía-Cardoso, José Luis Damas-Aguilar, José Luis Falcón-Rodríguez, Francisco Javier García-De León, John Carlos Garza, Genoveva Ingle de la Mora

Capítulo 13

173

La truticultura en México y sus implicaciones para las truchas nativas

Héctor Espinosa Pérez, Christian Lambarri Martínez, Armando Martínez Castro

Capítulo 14

183

Conservación de truchas del Pacífico

Brooke E. Penaluna

Capítulo 15

189

**Caracterización Socioeconómica de la Actividad Truchícola
en el estado de Durango: Un acercamiento para dimensionar
su importancia**

*Erika Cassio Madrazo, Elizabeth Medina Herrera, Eduardo Sánchez Ortiz, César
Israel Hernández Ramírez, Juan Francisco Moreno Sánchez*

Capítulo 16

203

La política pública mexicana de truchicultura

Eduardo Sánchez Ortiz, Erika Cassio Madrazo, Elizabeth Medina Herrera

10. Introgresión genética de la trucha arcoíris exótica en poblaciones de trucha dorada mexicana

Marco Alejandro Escalante, Francisco Javier García-De León, Casey B. Dillman, Anna Belia De los Santos Camarillo, Ana George, Irene de los Ángeles Barriga Sosa

INTRODUCCIÓN

Una especie introducida o exótica es aquella que ha sido trasladada fuera de su hábitat natural (Aguirre et al. 2009). Estas especies pueden ser originarias de países remotos, otras regiones o incluso de la misma región pero fuera de su distribución natural. Las especies exóticas en la mayoría de los casos han sido trasladadas a hábitats fuera de su área natural de distribución a causa del hombre, ya sea de forma voluntaria o involuntaria.

El Convenio sobre la Diversidad Biológica define como especies exóticas invasoras a aquellas que su introducción y dispersión ponen en riesgo la biodiversidad nativa del sitio invadido (Naciones Unidas 1992). Las invasiones de especies exóticas han sido consideradas, junto con la destrucción y fragmentación de los ecosistemas como los factores de riesgo más significativos para la conservación de la biodiversidad, los ecosistemas y sus servicios ambientales debido a depredación, competencia, entre otros factores (Goldburg y Triplett 1997). No obstante, el impacto de las especies exóticas invasoras sobrepasa el daño a la biodiversidad y los ecosistemas, ya que pueden desencadenar pérdidas económicas y problemas sanitarios severos pudiendo actuar como vector de patógenos o agente agresivo, volviéndose una amenaza directa para el bienestar humano (Aguirre et al. 2009). Tan sólo para Estados Unidos de América se ha estimado que los costos de los daños ambientales ocasionados por invasiones de especies exóticas de mamíferos, plantas, reptiles, anfibios, aves, artrópodos, peces, moluscos y microbios ascienden a más de 120,000 millones de dólares anuales (Pimentel et al. 2005).

Dado el alto grado de endemismo y la gran cantidad de especies no descritas en nuestro país, la introducción de especies exóticas podría tener consecuencias catastróficas (Samaniego-Herrera et al. 2009). Hasta finales de la década pasada, se ha registrado para México tan solo la desaparición de 22 especies de vertebrados (Aguirre et al. 2009). Sin embargo, es altamente probable que algunas otras especies ya se hayan extinguido sin ser documentadas, siendo la introducción de especies exóticas una de las principales causas (Álvarez-Romero et al. 2008).

Para el caso de los peces de agua dulce, la frecuente introducción de peces exóticos con fines recreativos o de cultivo ha tenido efectos negativos en las poblaciones nativas, cabe mencionar que estos organismos son más vulnerables en comparación con otros, ya que su hábitat generalmente se encuentra restringido a zonas más pequeñas con respecto a especies terrestres o marinas (Penaluna et al. 2016). En el Lago Banyoles en la Península Ibérica, la introducción de 12 especies exóticas derivó en la extinción de la tenca y el pez de tres espinas así como una reducción dramática del tamaño poblacional del bagre, la anguila y el barbo de montaña (García-Berthou y Moreno-Amich 2000). Por otra parte, en Italia, tan sólo la introducción del silurio desató la extinción de tres especies nativas del río Po (Castaldelli et al. 2013).

De igual forma, la introducción de salmónidos exóticos puede llegar a tener una influencia negativa fundamental en procesos ecosistémicos, entre los cuales destacan el

incremento en la producción de materia orgánica como efecto asociado a la depredación, la alteración los ciclos de los nutrientes y productividad, la degradación de hábitats y su conectividad, la introducción de parásitos y la reducción en la capacidad de restauración de los hábitats invadidos (Dunham et al. 2004). Entre las especies de salmónidos que han sido introducidas alrededor del planeta con fines acuícolas destaca el salmón del Atlántico, la trucha de lago, la trucha de arroyo, la trucha café y principalmente la trucha arcoíris (Penaluna et al. 2016). Esta última es una de las especies acuáticas más introducidas en el mundo, enlistada como una de las 100 especies exóticas más dañinas debido principalmente a la introgresión genética sobre las especies nativas (Lowe et al. 2000).

La introgresión genética es un fenómeno que ocurre cuando dos especies o poblaciones se entrecruzan y producen híbridos, este fenómeno puede llegar a ser extremadamente dañino ya que al modificarse el acervo genético de una población se afecta la capacidad para sobrevivir en ambientes fluctuantes. Cuando la especie invadida es poco frecuente, las tasas de inmigración son bajas y no existe ventaja a favor del genotipo exótico, es probable que el efecto sobre las poblaciones nativas sea nulo. Sin embargo, si el genotipo exótico es favorecido o existe una alta tasa de inmigración de individuos exóticos y la densidad poblacional de la especie nativa es baja, los efectos de esta introgresión pueden ser bastante nocivos (Álvarez-Romero et al. 2008; Milián-García et al. 2015). Existe evidencia de que la introgresión genética entre salmónidos puede generar efectos desastrosos tales como una reducción acumulada de la capacidad de supervivencia y transmisión de genes a generaciones subsecuentes para las poblaciones invadidas (McGinnity et al. 2003).

En México, la propagación de la trucha arcoíris exótica es documentada hasta finales del siglo XIX cuando Esteban Chazari publica un tratado de piscicultura donde se discuten métodos para el cultivo de la trucha arcoíris y café, los cuales fueron implementados por terratenientes en algunas haciendas del norte y centro del país antes del periodo revolucionario (Contreras-Balderas y Escalante-Cavazos 1984). Posteriormente, en la década de 1930, mediante decretos gubernamentales se pusieron en marcha programas de propagación de trucha arcoíris exótica en México, desde la Sierra Madre Occidental (SMO) en el estado de Chihuahua hasta las Lagunas de Montebello en Chiapas (Contreras-Balderas y Escalante-Cavazos 1984). Años más tarde en 1950 se crea la Comisión para el Fomento de la Piscicultura Rural en México (CPFR), la cual da prioridad al apoyo para la cría y distribución de especies adecuadas para la pesca deportiva tales como la trucha arcoíris. Cuatro años después, tras la desaparición de la CPFR surge el Departamento de Estudios Biológicos de la Dirección General de Pesca, que establece la Sección de Piscicultura, la cual tras realizar algunos estudios de régimen alimenticio amplió las actividades de cultivo de peces exóticos en México (<http://www.fao.org/docrep/005/AC868S/AC868S03.htm>).

Posteriormente, el Departamento de Estudios Biológicos modifica la política de introducción de especies exóticas con la intención de no ocupar nichos utilizados por especies nativas. Sin embargo, desde la década de 1980 con la finalidad de producir alimento de bajo costo y con apoyos gubernamentales promovidos por dependencias de la Secretaría de Industria y Comercio, la Secretaría de Recursos Hidráulicos y la Comisión Federal de Electricidad, ha crecido de manera exponencial el cultivo de trucha arcoíris, proveniente de Estados Unidos, en el hábitat de las truchas nativas mexicanas en la SMO (ITAM 2008). Sin embargo, sus efectos sobre las especies nativas han sido escasamente estudiados.

En particular, la trucha dorada mexicana (*Oncorhynchus chrysogaster*) es la única especie de salmónidos descrita con la distribución más austral en el mundo (Hendrickson et al. 2006). Estas truchas habitan las partes altas de las montañas de la SMO en las cuencas de los ríos Fuerte, Sinaloa y Culiacán, y se encuentran amenazadas por distintos factores naturales así como antropogénicos, de entre los cuales, se destaca la introducción de trucha arcoíris con fines de cultivo debido su bajo costo y a la falta de desarrollo biotecnológico para las truchas nativas mexicanas (Hendrickson et al. 2006).

Estudios morfológicos y genéticos realizados sobre el complejo de truchas mexicanas han demostrado que éstas representan linajes distintos y han evolucionado de forma independiente con respecto a los salmónidos provenientes de Estados Unidos (Nielsen y Sage 2001; Ruiz-Campos et al. 2003; Camarena Rosales et al. 2008; Escalante et al. 2014; Abadía-Cardoso et al. 2015). Dada su distribución y el tiempo de aislamiento en los ríos de alta montaña de la SMO, se cree que las truchas mexicanas poseen genes que les permiten tolerar temperaturas más cálidas en comparación con otros salmónidos de distribución más boreal (Needham 1955). Por ello la introducción de la trucha arcoíris puede representar un alto riesgo de extinción para las trucha dorada mexicana debido a la introgresión genética y con ello la consecuente pérdida irreversible de este valioso acervo genético.

Una de las herramientas que proporciona la genética de poblaciones para analizar la introgresión genética, es el uso de microsatélites, los cuales son marcadores especie-específicos y homólogos entre sí, que permiten llevar a cabo estudios comparativos al interior de las especies, entre especies y en ocasiones a nivel de géneros (Vendramin et al. 1996). Por esta razón, pueden ser utilizados como etiquetas genéticas para determinar la paternidad y poder evaluar con precisión los procesos de reproducción, delimitar número de reproductores y determinar el tamaño efectivo de una población, entre otros aspectos (Porta et al. 2006). También han sido ampliamente usados para determinar la diversidad genética en reproductores y su descendencia, para la identificación de especies y en la construcción de mapas genéticos (Overturf et al. 2003; Silverstein et al. 2004).

Los microsatélites definen regiones del ADN que se distinguen por contener elementos repetitivos de una o más pares de bases; cada una de estas regiones codificadas lleva el nombre de locus (plural loci). Estos loci pueden ser constituidos por uno o más alelos, distinguidos por diferencias de longitud, determinada por la ganancia o pérdida de los elementos repetitivos. Bajo este contexto el término heterocigoto se aplica cuando se tienen dos alelos distintos en un mismo locus y el término homocigoto cuando ambos alelos son iguales (Cajupé-Castells 2006). En este trabajo se utilizaron once microsatélites para definir la estructura y diversidad genética de nueve poblaciones de trucha dorada mexicana, una población nativa de trucha arcoíris en California y truchas provenientes de cuatro granjas acuícolas, con esta información se evaluaron los niveles de introgresión de trucha arcoíris exótica en la trucha dorada mexicana.

MATERIALES Y MÉTODOS

Trabajo de campo

Para este estudio se analizaron 307 truchas recolectadas entre los años 1997 y 2008, el arte de pesca que se utilizó fue principalmente la pesca eléctrica, con ayuda de pequeñas redes y redes de cuchara. Posteriormente se extrajeron muestras de aleta y músculo de dichos individuos las cuales fueron preservadas en alcohol. Ejemplares (206) de trucha dorada mexicana nativa fueron recolectados en nueve sitios a lo largo de las cuencas de los ríos Fuerte, Sinaloa y Culiacán. También se recolectaron muestras de 25 truchas arcoíris,

nativas del río Middle Fork Cosumnes en California, EUA. De igual forma, se analizaron 76 individuos de trucha arcoíris exótica que se cultivaron en cuatro granjas acuícolas, tres de ellas ubicadas en la SMO, en las cuencas de los ríos Fuerte, San Lorenzo y Presidio y una de ellas en el Estado de Puebla en el centro de México. Dichos sitios de recolecta se muestran en la Tabla 1 y Fig. 1.

Tabla 1. Sitios de recolecta de trucha dorada mexicana y arcoíris, se indica la ubicación geográfica (Longitud y latitud) así como el número de individuos recolectados (n).

Sitio de recolecta	Longitud	Latitud	n
1. Arroyo Aparique en la cuenca del río Fuerte	-107.815	28.016	27
2. Arroyo La Onza en la cuenca del río Fuerte	-106.681	25.949	22
3. Arroyo Las Truchas en la cuenca del río Fuerte	-107.003	26.087	29
4. Arroyo río Verde en la cuenca del río Fuerte	-106.486	26.280	30
5. Arroyo Agua Blanca en la cuenca del río Culiacán	-106.682	25.808	6
6. Arroyo Santa Rosa en la cuenca del río Culiacán	-106.682	25.808	10
7. Arroyo El Medio en la cuenca del río Sinaloa	-106.711	25.886	27
8. Arroyo El Soldado en la cuenca del río Sinaloa	-107.023	25.993	33
9. Arroyo El Potrero en la cuenca del río Sinaloa	-107.032	25.059	22
10. Arroyo Middle Fork Cosumnes	-120.507	38.632	25
11. Granja Acuícola en la cuenca del río Fuerte	-107.814	28.015	26
12. Granja Acuícola en la cuenca del río San Lorenzo	-105.791	24.470	28
13. Granja Acuícola en la cuenca del río Presidio	-105.466	23.733	11
14. Granja Acuícola en el Estado de Puebla	-	-	11

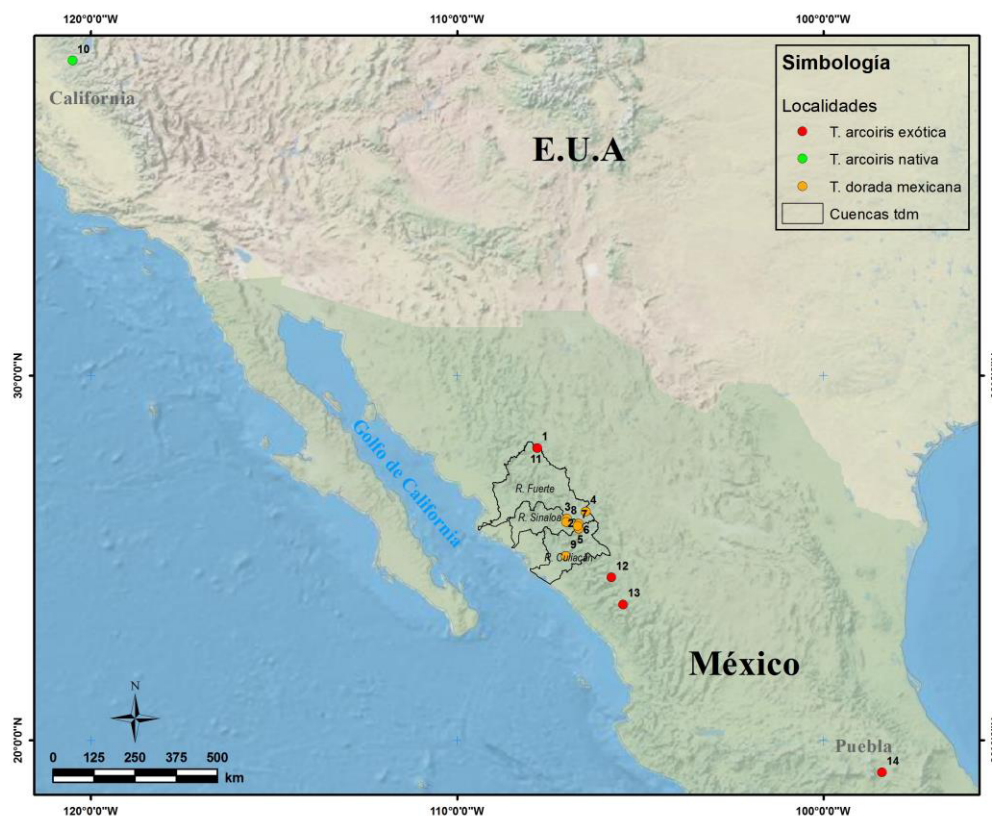


Figura 1. Localización geográfica de los sitios de recolecta de ejemplares de trucha dorada mexicana (TDM) utilizados en este estudio. Los números corresponden a los sitios descritos en Tabla 1. La localidad correspondiente al estado de Puebla es solo una aproximación,

Genotipificación de organismos con loci microsatélites.

La metodología para la caracterización genética se encuentra descrita en Escalante et al. (2014), de forma resumida consiste en dos etapas: la extracción de ADN total, y la genotipificación de los individuos mediante fluorescencia en un secuenciador automático. En este estudio se utilizaron 11 loci microsatélites.

Estructura genética poblacional

Con el fin de definir grupos genéticamente homogéneos y determinar la introgresión genética de la trucha arcoíris exótica en la trucha dorada mexicana se implementó un análisis de grupos y asignación de individuos (François et al. 2006). Bajo este análisis se aplica un algoritmo para la formación de grupos en estudios espaciales de genética poblacional. Mediante este procedimiento se buscan estructuras poblacionales por medio de genotipos multilocus recolectados en distintos sitios, sin asumir que existen poblaciones predefinidas, donde los individuos recolectados en sitios geográficamente cercanos tendrán más probabilidades de pertenecer a un grupo genéticamente homogéneo con respecto a los recolectados en lugares geográficamente alejados. Este método se incluye en el paquete bioinformático TESS 2.3.1 y se explica a detalle en François et al. (2006).

Diversidad genética.

La diversidad genética es el grado de variación genética dentro de una población, especie o entre un grupo de especies, siendo un indicador ampliamente utilizado para estudios de genética para la conservación, al poder reconocer grupos genéticamente homogéneos, estimar flujo genético y valorar el número efectivo (mínimo) de reproductores que entrecruzan su material genético generación tras generación, entre otras características poblacionales (Cajupé-Castells 2006).

Para hacer una descripción de la diversidad genética presente en un grupo de salmónidos del género *Oncorhynchus*, incluyendo especies nativas de México, se estimaron los siguiente parámetros: Heterocigosidad esperada H_E que representa la probabilidad de que un individuo escogido al azar de una población sea heterocigoto bajo la hipótesis de equilibrio de Hardy Weinberg; Heterocigosidad observada H_o que corresponde al número de heterocigotos observados en la muestra y, Número de alelos efectivos N_E que es el número de alelos que en igual frecuencia resultarían en la misma homocigosidad que el número de alelos observados (Cajupé-Castells 2006). Los análisis estadísticos se realizaron en los programas GenAlEx 6.5 (Peakall y Smouse 2012) y Genepop 4.2 (Rousset 2008).

Introgresión genética

La introgresión genética también se evaluó mediante el uso de un índice híbrido (IH) generado con el software INTROGRESS (Gompert y Buerkle 2009), para el cual se calculó la proporción de alelos provenientes de la especie exótica con respecto a las poblaciones determinadas por el método anterior de análisis de grupos y asignación de individuos. Para un mejor rendimiento del análisis, el IH se calculó por sitio de recolecta como lo recomiendan los autores del software.

RESULTADOS

Estructura genética poblacional

El análisis de grupos y asignación de individuos arrojó seis grupos o poblaciones genéticamente homogéneas, los cuales se describen a continuación: Población 1 o truchas del arroyo Aparique, en la cuenca del río Fuerte; Población 2 o truchas del Fuerte-Culiacán-Sinaloa constituidas de las truchas del arroyo La Onza en la cuenca del río Fuerte, en los arroyos Agua Blanca y Santa Rosa en la cuenca del río Culiacán y arroyo El Medio en la cuenca del río Sinaloa; Población 3 o truchas del Fuerte-Sinaloa formadas por truchas del arroyo Las Truchas en la cuenca del río Fuerte y arroyos El Potrero y El Soldado en la cuenca del río Sinaloa; Población 4 o truchas del río Verde formadas por las trucha recolectada en el río Verde en la cuenca del río Fuerte; Población 5 formada por trucha arcoíris silvestre del arroyo Middle Fork Cosumnes en California; y Población 6 constituida por las truchas arcoíris exóticas (Fig. 2).

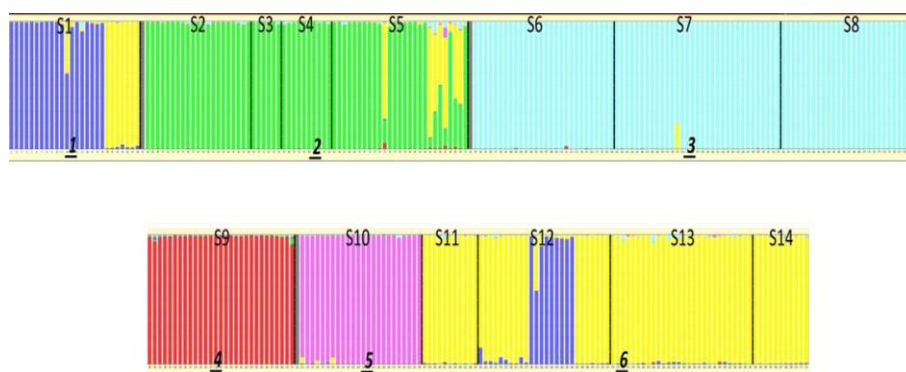


Figura 2. Poblaciones genéticamente homogéneas obtenidas mediante 11 loci microsatélites y el método de análisis de grupos y asignación de individuos en *Oncorhynchus chrysogaster*. Cada individuo es representado por una línea vertical y las distintas poblaciones se representada por un color distinto. Los números de la parte superior corresponden a los sitios de recolecta descritos en Tabla 1.

Diversidad genética

Los valores más altos de heterocigosidad H_O fueron de 0.65 y se registraron en la trucha exótica de acuicultura (Población 6) y la trucha arcoíris nativa de California (Población 5). Por otra parte los valores más altos de H_E y N_E se registraron en la Población 6 y fueron de 0.75 y 5.27 respectivamente. Mientras que los índices más bajos de diversidad genética se registraron en las truchas doradas mexicanas pertenecientes a la población 3 con valores de $H_E = 0.41$, $H_O = 0.25$ y $N_E = 4.43$ (Tabla 2).

Tabla 2. Valores de diversidad genética por población obtenidos con 11 loci microsatélites en *Oncorhynchus chrysogaster* y *O. mykiss*. Heterocigosidad esperada H_E , heterocigosidad observada H_O y número de alelos efectivos por locus N_E por población. Entre paréntesis se anota la desviación estándar. Los asteriscos representan niveles de significancia en el test de desequilibrio de Hardy-Weinberg, * >0.05 ; *** >0.001

Población	H_E	H_O	N_E
Población 1	0.50 (+0.06)	0.27 (+0.04)***	2.26 (+0.26)
Población 2	0.67 (+0.06)	0.51 (+0.05)***	4.43 (+0.87)
Población 3	0.41 (+0.08)	0.25 (+0.07)***	2.06 (+0.29)
Población 4	0.64 (+0.07)	0.61 (+0.07)*	3.44 (+0.48)
Población 5	0.68 (+0.03)	0.65 (+0.04)*	3.27 (+0.31)
Población 6	0.76 (+0.04)	0.65 (+0.04)***	5.27 (+0.76)

Introgresión genética

El análisis de asignación mostró mezcla genética entre las truchas doradas mexicanas de la Población 1 (arroyo Aparique en la cuenca del río Fuerte) y las truchas recolectadas en el arroyo El Medio de la cuenca del río Sinaloa de la Población 2 con las truchas exóticas de granjas (Población 6). Sin embargo, la trucha cultivada en la granja acuícola del río Fuerte perteneciente a la Población 6 también mostró mezcla genética con la trucha nativa de la Población 1. Otro resultado indica que las truchas arcoíris de la Población 6 (exótica de granja) no presentaron una composición genética similar a la de las truchas de la Población 5 (arcoíris nativa proveniente de California). Además, las truchas de cultivo en la SMO (Fuerte, San Lorenzo y Presidio) y fuera de la SMO (Puebla) muestran amplia similitud genética, apoyando la idea de que las truchas arcoíris de cultivo en México tienen un origen común entre si, pero distinto del de las de California (Fig. 2).

Finalmente, el índice híbrido IH reflejó evidencias de alelos de la trucha exótica de acuicultura en el genoma de la trucha dorada mexicana recolectada en el arroyo Aparique (Población 1) en la cuenca del río Fuerte (IH = 0.57), así como la recolectada en el arroyo El Medio (Población 2) en la Cuenca del Río Sinaloa (IH = 0.49). Por otra parte el IH entre la trucha arcoíris exótica proveniente de la granja acuícola ubicada en la cuenca del río Fuerte (Población 6) mostró un 49% (IH = 0.49) de alelos provenientes de trucha nativa mexicana proveniente de la Población 1, en la cuenca del río Fuerte (Tabla 3).

Tabla 3. Índice híbrido (IH) por sitio de recolecta para las truchas que mostraron rastros de introgresión en el análisis de grupos y asignación de individuos.

Sitio de recolecta	IH
Arroyo Aparique en la cuenca del río Fuerte	0.57
Arroyo La Onza en la cuenca del río Fuerte	0.49
Granja acuícola en la cuenca del río Fuerte	0.49

DISCUSIÓN

La introgresión genética de la trucha arcoíris exótica en todo el complejo de truchas mexicanas ya ha sido estudiada con anterioridad (Escalante et al. 2014; Abadía-Cardoso et al. 2015), no obstante, aquí se hace énfasis sólo en la trucha dorada mexicana, la única especie protegida bajo las leyes mexicanas (DOF 2013).

Estructura genética poblacional

El número de poblaciones determinadas por el análisis de grupos y asignación de individuos es igual al obtenido por Escalante et al. (2014); este resultado no debe extrañar, dado que en ambos estudios se utilizó el mismo juego de datos (sitios de recolecta y 11 loci microsatélites). Asimismo, con información genética distinta (18 microsatélites y 93 polimorfismos de simple nucleótido) Abadía-Cardoso et al. (2015) encuentran también los mismos resultados, confirmando que la trucha dorada mexicana en la SMO, no está conformada por una simple población panmíctica, sino más bien por un grupo de poblaciones heterogéneas y con escaso flujo genético entre ellas. Además, es evidente que las cuencas hidrológicas en donde esas truchas habitan (Fuerte, Sinaloa y Culiacán) no representan barreras geográficas para la dispersión, ya que dos poblaciones (poblaciones 2 y 3) están conformadas por individuos provenientes de las tres cuencas hidrológicas.

Diversidad genética

Los mayores valores de diversidad genética lo mostraron las truchas exóticas de cultivo en comparación con la trucha dorada mexicana. Sin embargo, las truchas arcoíris nativas de California presentaron valores similares a las truchas doradas mexicanas, lo que podría significar que las poblaciones nativas, ya sea en la SMO o en California, reflejan similares condiciones para la evolución de la diversidad genética. No obstante, todas las poblaciones determinadas por los métodos anteriores mostraron un número menor de heterocigotos que los esperados por el modelo de Hardy Weinberg. Son muchas las causas que provocan un déficit de heterocigotos en las poblaciones, una de ellas es la disminución de heterocigotos debido a cuellos de botella. En genética de poblaciones un cuello de botella se define como una disminución del tamaño efectivo de la población, el cual puede ser originado por un evento fundador, en donde el número de fundadores es pequeño, además si hay flujo genético escaso o nulo, la deriva o el azar hace perder alelos y por lo tanto los valores de diversidad genética (heterocigosidad) disminuyen (Nei et al. 1974).

Describir el origen de las truchas doradas mexicanas podría ayudar a entender estos aspectos genéticos. Se piensa que estas truchas mexicanas se originaron por un proceso de colonización. La hipótesis más aceptada es que hace aproximadamente 12 mil años durante la última glaciación, un grupo de truchas cabeza plateada provenientes de la costa oeste de California migró hacia el sur favorecido por las bajas temperaturas; posteriormente cuando las condiciones climáticas cambiaron y la temperatura del agua aumentó, las truchas se refugiaron en el golfo de California para después adentrarse a los ríos en las partes altas de la SMO, quedando aisladas en poblaciones fragmentadas (Needham 1955; Behnke 1992; Hendrickson et al. 2006). Esto pudo derivar en procesos de cuello de botella, lo cual explicaría los valores del déficit de heterocigotos.

Introgresión genética

En este estudio se mostraron evidencias de introgresión genética por parte de la trucha arcoíris exótica, en el genoma de algunas poblaciones nativas de trucha dorada mexicana, específicamente en las truchas del arroyo Aparique en la cuenca del río Fuerte (Población 1) y en la localidad del arroyo El Medio en la cuenca del río Sinaloa. Esta última forma parte de la población 2, la cual ocupa un área más extensa, lo que demuestra que los niveles de introgresión, al menos en esta población, son limitados. Los resultados de las pruebas de asignación de individuos a una población así como los índices híbridos también reflejaron una mezcla genética entre las truchas del arroyo Aparique y la usada para la acuicultura. Es importante resaltar que la granja acuícola donde se cultiva la trucha arcoíris se encuentra a unos cuantos metros del sitio donde la trucha nativa fue recolectada en el arroyo Aparique, es posible que esta cercanía haya ocasionado la similitud genética y por lo tanto los valores altos del índice híbrido facilitando el proceso de introgresión en ambos sentidos, es decir, de trucha cultivada en la nativa y viceversa. No obstante, otra posibilidad para explicar estos resultados es que las truchas que se cultivan en esos sitios sean nativas. El análisis genómico de muestras de esa localidad podría ayudar para discernir cuál de las dos posibilidades es la correcta.

La introgresión genética en poblaciones de salmónidos nativos con un tamaño poblacional reducido y expuestas a procesos de endogamia puede ser la mayor amenaza para la conservación de estos peces (Gunnell et al. 2008; Caudron et al. 2011; Marie et al. 2012). Aunado a esto, dada la ubicación geográfica de su hábitat, la trucha dorada mexicana posee un acervo genético único con genes que podrían estar adaptados a

temperaturas más altas en comparación con salmónidos del norte de Estados Unidos de América, Canadá y Eurasia. Esto podría representar un desarrollo en la biotecnología de cultivo para nuestro país, si estos genes son explotados de una manera apropiada y responsable respetando los nichos habitados por otras especies (Behnke 1992; Hendrickson et al. 2006). Considerando esto, es urgente que se establezcan estrategias de conservación que vayan dirigidas a la erradicación de la trucha arcoíris exótica pero también a resolver las necesidades económicas regionales. Una de estas estrategias puede ser el desarrollo de la biotecnología de cultivo que permita reemplazar a la trucha arcoíris exótica con la trucha dorada mexicana en las actividades acuícolas realizadas en las cuencas de los ríos Fuerte, Culiacán y Sinaloa con el fin de preservar el valioso legado genético de los salmónidos mexicanos. Afortunadamente ya se han estado haciendo los primeros intentos de su cultivo por parte de investigadores de Instituto Nacional de la Pesca y de la Universidad Autónoma Metropolitana (Barriga-Sosa et al. Capítulo 11, esta obra; Abadía-Cardoso et al. Capítulo 12, esta obra). Otra medida importante podría ser la pesca recreativa de la trucha dorada mexicana mediante el desarrollo del ecoturismo.

AGRADECIMIENTOS

Al grupo binacional ‘‘Truchas Mexicanas’’ por el trabajo de campo sin el cual este estudio no hubiera podido ser realizado. Al Dr. Arturo Ruiz Luna del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo por la facilitación de equipo técnico. Este estudio fue parcialmente financiado por SAGARPA-FIRCO 2012 (RGA-BCS-12-000003) FJGDL y por la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa (PDCBS-147.07.03) a IDLABS.

REFERENCIAS

- Abadía-Cardoso, A., J.C. Garza, R.L. Mayden and F.J. García-De León. 2015. Genetic structure of Pacific trout at the extreme southern end of their native range. *PLoS ONE* 10(10):e0141775.
- Abadía-Cardoso, A., F.J. García-De León y J.C. Garza. 2016. Historia evolutiva y biodiversidad genética de las truchas de la Sierra Madre Occidental. En: Ruiz-Luna A. y F.J. García-De León (eds.) *La trucha dorada mexicana*. Cap. 3.
- Aguirre M.A., R. Mendoza A., H. Arredondo P.B., L. Arriaga C., E. Campos G., S. Contreras-Balderas, M. Elías Gutiérrez, F.J. Espinosa G., I. Fernández Salas, L. Galaviz S., F.J. García-De León, D. Lazcano V., M. Martínez J., M.E. Meave del C., R.A. Medellín, E. Naranjo G., M.T. Olivera C., M. Pérez S., G. Rodríguez A., G. Salgado M., A. Samaniego H., E. Suárez M., H. Vibrans y J.A. Zertuche G. 2009. Especies exóticas invasoras: impactos sobre las poblaciones de flora y fauna, los procesos ecológicos y la economía. En: *Capital natural de México. II: Estado de conservación y tendencias de cambio*. CONABIO. México D.F. México. pp. 277-318.
- Álvarez-Romero, J.G., R.A. Medellín, A. Oliveras de Ita, H. Gómez de Silva y O. Sánchez. 2008. *Animales exóticos en México: una amenaza para la biodiversidad*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Instituto de Ecología, UNAM, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México D.F. 518 p.
- Barriga-Sosa, I.A., J.L. Arredondo-Figueroa, G. Ingle de la Mora y F. García-De León. 2006. Estrategias acuícolas para la conservación de truchas nativas: primeras experiencias. En: Ruiz-Luna A. y F.J. García-De León (eds.) *La trucha dorada mexicana*. Cap. 11.

- Behnke, R.J. 1992. Native trout of western North America. American Fisheries Society Monograph 6. USA.
- Cajupé–Castells, J. 2006. Brújula para botánicos desorientados en genética de poblaciones. Exegen Ediciones, Las Palmas, España.
- Camarena-Rosales, F., G. Ruiz-Campos, J. De La Rosa-Vélez, R.L. Mayden, D.A. Hendrickson, A. Varela-Romero and F.J. García-De León. 2008. Mitochondrial haplotype variation in wild trout populations (Teleostei: Salmonidae) from northwestern Mexico. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*. 18(1): 33–45.
- Castaldelli, G.A., A. Pluchinotta, M. Milardi, M. Lanzoni, L. Giari, R. Rossi and E.A. Fano. 2013. Introduction of exotic fish species and decline of native species in the lower Po basin, north eastern Italy. *Aquatic Conservation*. 23: 405–417.
- Caudron, A., A. Champigneulle, R. Guyomard, and C. Largiadér. 2011. Assessment of three strategies practiced by fishery managers for restoring native brown trout (*Salmo trutta*) populations in Northern French Alpine Streams. *Ecology of Freshwater Fish*. 20: 478–491.
- Contreras-Balderas, S. and M.A. Escalante-Cavazos. 1984. Distribution and known impacts of exotic fishes in Mexico. En: Courtenay, W.R. Jr. and J.R. Stauffer Jr. (eds) *Distribution, biology and management of exotic fishes*. John Hopkins University Press. Baltimore. USA. pp. 102–130.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). 2013. NORMA Oficial Mexicana NOM-059-SSA1-2013. Buenas prácticas de fabricación de medicamentos. http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5307536&fecha=22/07/2013.
- Dunham, J.B., Pilliod, D.S. and Young M.K. 2004. Assessing the consequences of nonnative trout in headwater ecosystems in western North America. *Fisheries*. 29(6): 18–26.
- Escalante, M.A., F.J. García-De León, C.B. Dillman, A. De los Santos C., A. George, I.A. Barriga-Sosa., A. Ruiz-Luna, R.L. Mayden and S. Manel. 2014. Genetic introgression of cultured rainbow trout in the Mexican native trout complex. *Conservation Genetics*. 15: 1063 – 1071.
- François, O., S. Ancelet and G. Guillot. 2006. Bayesian clustering using hidden Markov random fields in spatial population genetics. *Genetics*. 174: 805–816.
- García-Berthou, E. and R. Moreno-Amich. 2000. Introduction of exotic fish into a Mediterranean lake over a 90-year period. *Archives of Hydrobiology*. 149: 271–284.
- Goldburg, R. and T. Triplett. 1997. *Murky waters: Environmental effects of aquaculture in the United States*. The Environmental Defense Fund, Nueva York. 196 p.
- Gunnell, K., M.K. Tada, F.A. Hawthorne, E.R. Keeley and M.B. Ptacek. 2008. Geographic patterns of introgressive hybridization between native Yellowstone cutthroat trout (*Oncorhynchus clarki bouvieri*) and introduced rainbow trout (*O. mykiss*) in the South Fork of the Snake River watershed, Idaho. *Conservation Genetics*. 9:49–64.
- Gompert, Z. and C. Buerkle. 2009. A powerful regression-based method for admixture mapping of isolation across the genome of hybrids. *Molecular Ecology*. 18: 1207–1224
- Hendrickson, D.A., D.A. Neely, R.L. Mayden, K. Anderson, J.E. Brooks, F. Camarena-Rosales, R. Cutter, L. Cutter, A.B. De los Santos C., G.W. Ernsting, H. Espinoza-Pérez, L.T. Findley, F.J. García-De León, A.L. George, J. Hatch, B.R. Kuhajda, K.E. Mayden, K. Mcnysset, J.L. Nielsen, F.W. Pfeifer, D.L. Propst, G. Ruiz-Campos, E. St. Clair, J.R. Tomelleri and A. Varela-Romero. 2006. Conservation of Mexican native trout and the discovery, status, protection and rediscovery of the Conchos trout, the

- first native. En: M.L. Lozano-Vilano and A.J. Contreras-Balderas (eds.). Studies of North American Desert Fishes in Honor of E.P. (Phil) Pister, Conservationist. Faculty of Biological Sciences, UANL. Mexico. pp. 162-201.
- ITAM. 2008. Programa Maestro Nacional de Trucha. 3-8.
- Lowe, S., M. Browne, S. Boudjelas y M. De Poorter. 2004. 100 de las especies exóticas invasoras más dañinas del mundo. Una selección del Global Invasive Species Database. Grupo Especialista de Especies Invasoras (GEEI). UICN. 1-12.
- Marie, A.D., L. Bernatchez and D. Garant. 2012. Environmental factors correlate with hybridization in stocked brook charr (*Salvelinus fontinalis*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*. 69: 884–893.
- McGinnity, P., P. Prodohl, A. Ferguson, R. Hynes, N.O. Maoiléidigh, N. Baker, D. Cotter, B. O’Hea, D. Cooke, G. Rogan, J. Taggart and T. Cross. 2003. Fitness reduction and potential extinction of wild population of Atlantic salmon, *Salmo salar* as a result of interactions with escaped farm salmon. *Proceedings of the Biological Society*. 270(1532): 2443–2445.
- Milián-García, Y., R. Ramos-Targarona, E. Pérez-Fleitas, G. Sosa-Rodríguez, L. Guerra-Manchena, M. Alonso-Tabet, G. Espinosa-López and M. Russello. 2015. Genetic evidence of hybridization between the critically endangered Cuban crocodile and the American crocodile: implications for population history and in situ/ex situ conservation. *Heredity* 114: 272–280.
- Naciones Unidas (UN). 1992. Convenio sobre la Diversidad Biológica. Recuperado de <http://www.un.org/es/events/biodiversityday/convention.shtml> [Abril 25, 2016].
- Needham, P.R. 1955. Trail of the Mexican trout. *Pacific Discovery*. 8(4): 18–24.
- Nei, M., T. Maruyama and R. Chakraborty. 1974. The bottleneck effect and genetic variability in populations. *Evolution*. 29: 1–10.
- Nielsen, J.L. and G.K. Sage. 2001. Microsatellite analyses of the trout of northwest Mexico. *Genetica*. 111: 269–278.
- Overturf, K., M.T. Casten, S.L. Patra, I.C. Rexroad and R.W. Hardy. 2003. Comparison of growth performance, immunological response and genetic diversity of five strains of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture*. 217: 93–106.
- Peakall, R. and P.E. Smouse. 2012. GenAlEx 6.5: Genetic analysis in Excel. Population genetic software for teaching and research - an update. *Bioinformatics*. 28: 2537-2539.
- Penaluna, B.E., A. Abadía-Cardoso, J.B. Dunham, F.J. García-De León, R.E. Gresswell, A. Ruiz-Luna, E.B. Taylor, B.B. Shepard, R. Al-Chokhachy, C.C. Muhlfeld, K.R. Bestgen, K. Rogers, M.A. Escalante, E.R. Keeley, G. Temple, J.E. Williams, K. Matthews, R. Pierce, R.L. Mayden, R.P. Kovach, J.C. Garza and K.D. Fausch. 2016. Conservation of Native Pacific Trout Diversity in Western North America. *Fisheries*. 41(6): 286-300.
- Pimentel, D., R. Zuniga and D. Morrison. 2005. Update on the environmental and economic costs associated with alien-invasive species in the United States. *Ecological Economics*. 52:273-288.
- Porta, J., J. M. Porta, G. Martínez-Rodríguez and M. C. Álvarez. 2006. Development of a microsatellite multiplex PCR for Senegalese sole (*Solea senegalensis*) and its application to broodstock management. *Aquaculture*. 256: 159-166.
- Rousset, F. 2008. Genepop’007: A complete re-Implementation of the Genepop software for Windows and Linux. *Molecular Ecology Resources*. 8: 103-106.

- Ruiz-Campos, G., F. Camarena-Rosales, A. Varela-Romero, S. Sánchez-González and De la Rosa-Vélez, J. 2003. Morphometric variation of wild trout populations from northwestern Mexico (Pisces: Salmonidae). *Reviews in Fish Biology and Fisheries*. 13(1): 91-110.
- Samaniego-Herrera, A., A. Aguirre Muñoz, G.R Howald, M. Félix-Lizárraga, J. Valdez-Villavicencio, R. González-Gómez, F. Méndez-Sánchez, F. Torres-García, M. Rodríguez-Malagón and B.R. Tershy. 2009. Eradication of black rats from Farallón de San Ignacio and San Pedro Mártir islands, Gulf of California, Mexico. En: C.C. Damiani and D.K. Garcelon (eds.). *Proceedings of the 7th California Islands Symposium*. Institute for Wildlife Studies, Arcata, CA. pp. 337-347.
- Silverstein, J.T., C.E. Rexroad and T.L. King. 2004. Genetic variation measured by microsatellites among three strains of domesticated rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*, Walbaum). *Aquaculture*. 35: 40–48.
- Vendramin, G.G., L. Lelli, P. Rossi and M. Morgante. 1996. A set of primers for the amplication of 20 chloroplast microsatellites in Pinaceae. *Molecular Ecology*. 5: 585-598.