

# La Trucha Dorada Mexicana

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

**Editores**



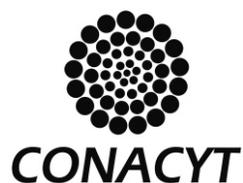
# **LA TRUCHA DORADA MEXICANA**

**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, allí 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 Ruiz 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 Ruiz-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*

# 1. Estado actual y perspectivas en la investigación de la Trucha Dorada Mexicana, un recurso poco conocido

---

*Arturo Ruiz-Luna, Francisco Javier García-De León*

Los niveles de impacto ambiental a los que se ha llegado como resultado de las actividades humanas, han obligado a considerar seriamente la conservación de la biodiversidad como una medida de supervivencia, volviéndose un imperativo a nivel mundial. Para ello se han emprendido diversas iniciativas internacionales, nacionales e individuales, donde se comprometen diversas acciones y acuerdos que involucran el conocimiento y la salvaguarda de la diversidad local, regional y mundial. Pese a estos esfuerzos, es evidente que la tendencia es hacia la homogeneización, es decir pérdida de diversidad de la biota terrestre y acuática, aun cuando se sabe que la biodiversidad sigue patrones heterogéneos de distribución espacial.

La homogeneización biótica aumenta conforme la población humana crece y se mueve, requiriendo de bienes y servicios, muchas veces introduciendo especies exóticas para satisfacer las amplias demandas de una sociedad en crecimiento. Esta homogeneización es mayor conforme las especies introducidas son más similares ecológicamente a las nativas, facilitando la expansión del rango de distribución de las primeras y reduciendo el de las segundas (Olden y Poff 2003; Olden et al. 2004).

En México, como en la mayor parte del planeta, los aspectos ambientales han sido relegados de las políticas públicas de desarrollo económico, favoreciendo prácticas no sustentables y que han atentado contra la diversidad biológica. Así, la deforestación, la agricultura y la ganadería extensiva, el represamiento de ríos y la pesca de arrastre, entre otras actividades, han sido prácticas que siempre han contado con el apoyo gubernamental, pues son fuente de empleo y de producción de bienes para autoconsumo y exportación. Esta tendencia tuvo cambios importantes a raíz de la Conferencia de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y el Desarrollo, realizada en Rio de Janeiro, Brasil, en 1992, en la que se estableció el Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB; <http://www.un.org/es/events/biodiversityday/convention.shtml>) con tres objetivos principales: la conservación de la diversidad biológica, la utilización sostenible de sus componentes y la participación justa y equitativa en los beneficios derivados de la utilización de los recursos genéticos. Su visión general es promover medidas que conduzcan a un futuro sostenible.

A raíz de esa cumbre política, se creó en México la Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP) y se expidieron diversas leyes relacionadas con vida silvestre, desarrollo sustentable y conservación de recursos, para finalmente favorecer prácticas de cultivo y ganadería orgánicas, así como prácticas de pesca y acuicultura responsables, que actualmente rigen en el país (Anta Fonseca et al. 2008). Aún con sus limitantes, estas regulaciones junto con las presiones internacionales impuestas por el CDB han tenido un efecto positivo al racionalizar de alguna manera el proceso productivo nacional, reduciendo con ello las tasas de pérdida del capital natural, un concepto que surge a partir de la evaluación de la diversidad biológica existente en el territorio nacional (CONABIO 2008; Sarukhán 2012).

El reto de mantener activos importantes en dicho capital natural y con ello respaldar el bienestar humano y la generación de riqueza, tiene como base ineludible, el conocimiento científico confiable y de calidad sobre la diversidad biológica (Sarukhán et al. 2012). Con relación a lo anterior, en México la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) tiene como uno de los cinco objetivos estratégicos, la creación del Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (SNIB). Sin embargo, a pesar de los avances en materia de información sobre la biodiversidad nacional, existen aún grandes vacíos derivados de la vasta extensión territorial y su gran diversidad biológica y ecológica (que hacen de México un país Megadiverso). Tal déficit en el conocimiento es seguramente el resultado de la escasa inversión en investigación y desarrollo tecnológico y en particular, de la investigación encaminada a la conservación y uso sustentable de esa megadiversidad.

No obstante, en la tarea de reducir este vacío de conocimiento, México ha privilegiado el estudio de especies o ecosistemas emblemáticos, muchos de ellos seleccionados con base en la opinión pública nacional e internacional, obviando en ocasiones importantes especies y ecosistemas de relevancia ecológica, evolutiva y hasta económica, que requieren de ser evaluados como parte de nuestros recursos soberanos y que además representan objetos de estudio de gran atractivo tanto académico como social.

En esa situación se ubican las especies de salmónidos que de manera natural se distribuyen en las partes elevadas de regiones montañosas de la sierra de San Pedro Mártir y la Sierra Madre Occidental (SMO) de México. Conocidos comúnmente como truchas, son peces de pequeño tamaño, que pocas veces superan los 15 cm y que actualmente se encuentran amenazados y en riesgo de extinción.

Siendo los salmónidos con distribución natural más austral y además con carácter endémico debido a su interesante origen evolutivo, estos peces representan un complejo de linajes genéticos únicos, que está en riesgo por diversas razones, teniendo como causa común las actividades humana que se desarrollan en la región que habitan.

Dado que como recurso pesquero su aporte a la economía es muy reducido, como resultado de su baja abundancia, tallas pequeñas y la escasa accesibilidad a los sitios que habita, el interés pesquero por esta especie es estrictamente local, de subsistencia y temporal (principalmente capturados para semana santa y durante la época de lluvias). Para los Rarámuris o Tarahumaras de Chihuahua, estas especies, conocidas en esta etnia como *apariques*, han sido fuente milenaria de proteína animal. Por razones semejantes, el conocimiento que se tiene sobre estas especies se ha concentrado en la documentación de su presencia en el noroeste de México y es prácticamente a finales del siglo pasado y principios del presente, cuando se ha puesto de manifiesto su importancia y se ha incrementado la información que sobre estos salmónidos existe, particularmente con la integración del grupo binacional México – EUA, Truchas Mexicanas (<http://truchasmexicanas.org/>).

Con base en los trabajos realizados por los integrantes de este grupo y otros especialistas interesados en el tema, se reconocen distintas formas del género *Oncorhynchus*, distribuidas en la región, con una subespecie de la trucha arcoíris de California (*O. mykiss nelsoni*) que habita en la sierra de San Pedro Mártir en Baja California, así como un complejo de especies ubicado en la SMO, donde destacan la trucha del río Conchos, que fue redescubierta recientemente por el grupo Truchas mexicanas y que estudios recientes indican un origen complejo. Asimismo es relevante la trucha dorada mexicana (*O. chrysogaster*, TDM), especie objeto de estudio de esta obra, que junto con *O.*

*mykiss nelsoni* son las únicas reconocidas para la ciencia y por tanto legalmente. Al norte y al sur de la distribución de la TDM, se ubica el resto de las especies que forman parte de este complejo de linajes, que requieren de su descripción científica formal, para posteriormente incluirse como especies amenazadas y ser sujetas de protección legal.

Considerando la importancia de estas especies y dadas las limitantes de información, se intenta abordar en esta obra el tema de la TDM en particular, al ser la única especie formalmente descrita dentro de las que habitan la Sierra Madre Occidental y para la que de manera específica se ha generado información a partir de proyectos financiados principalmente por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), la Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad (CONABIO) y la Comisión Nacional de Pesca (CONAPESCA), entre otros. Estos apoyos han dado total autonomía a grupos mexicanos de investigación, permitiendo el estudio de recursos naturales con una agenda propia, integrada con objetivos de interés nacional.

Enmarcados en ese contexto, se incorporan aspectos que van desde lo relativo a los ambientes que albergan a la especie, su evolución histórica y lo básico en materia de biología (alimentación, reproducción, morfometría, distribución y diversidad genética), a otros temas que involucran relaciones con otros componentes del ecosistema (introgresión por especies exóticas, contaminantes), biotecnología, así como aspectos sociales y legales, que en conjunto serán de utilidad para que esta especie sea mejor conocida y observada como un activo importante del capital natural nacional y como un recurso que puede ser manejado y utilizado para beneficio de la comunidad, además de protegido.

Con todo esto, se reconoce que si bien han fructificado los esfuerzos para generar nuevo conocimiento sobre la TDM, quedan más preguntas que respuestas atendidas, lo que genera mayor interés por seguir estudiando estas especies, con mayor detalle, cubriendo periodos y regiones más amplias, que no dudamos aportarán no solo información sobre las truchas sino sobre su entorno, sus relaciones y su potencial como recurso económico, aprendiendo de su capacidad para evolucionar y adaptarse a ambientes adversos.

Por lo antes expuesto, ésta obra inicia con una caracterización del paisaje y el diseño de un modelo de drenaje mediante métodos modernos de sistemas de información geográfica. Los autores, Hernández-Guzmán y Ruiz-Luna resaltan en el capítulo 2, la importancia de describir el medio donde habita la especie como una necesidad importante para entender las causas que modifican el hábitat y su efecto sobre el balance hidrológico y, en última instancia, la disponibilidad de agua para las truchas. La SMO es una cadena montañosa con topografía accidentada y una alta diversidad de componentes ambientales, representa una gran riqueza natural, y mantiene un elevado nivel de naturalidad, particularmente en la vertiente occidental, en las zonas más elevadas, con regímenes climáticos más extremos, donde habitan las truchas objeto de nuestro estudio. Los autores comentan que la SMO se caracteriza por una extensa cobertura vegetal que cubre más del 75% de su extensión, con pendientes que van de suaves a moderadas y cuya red hidrológica abarca cerca de 200,000 km, principalmente de arroyos de 1<sup>er</sup> y 2<sup>o</sup> orden y en altitudes superiores a los 2000 msnm, que son los que primordialmente albergan a la TDM. Pese a estos significantes avances en el conocimiento del medio, lo autores también reflexionan sobre la necesidad de intensificar el muestreo de parámetros fisicoquímicos, la descripción del paisaje *in situ* y la interpretación de las relaciones con otros componentes del ecosistema, apoyados precisamente en las descripciones paisajísticas derivadas del análisis de imágenes de satélite cada vez más accesibles y con mayor resolución espacial, así como en modelos de distribución de la especie.

La evolución y la biología general de la TDM son analizadas en detalle en los capítulos del 3 al 8. La historia evolutiva y la diversidad de truchas mexicanas en relación a otras truchas en Norteamérica, así como entre las poblaciones en cuencas y arroyos diferentes de México representa la primera síntesis bibliográfica sobre el origen y evolución de la biodiversidad de las truchas mexicanas. Este tema es estudiado por Abadía-Cardoso et al. en el capítulo 3 y sintetizan la información sobre la historia evolutiva con un enfoque en los estudios genéticos, resaltan los detalles que faltan por entender y proponen áreas potenciales de investigación genética evolutiva en las truchas del Noroeste de México; también destacan la importancia de describir la biodiversidad en este grupo de truchas nativas, tanto a nivel biológico como taxonómico, indispensables para llevar a cabo esfuerzos de conservación y además, para entender los efectos previstos para otras truchas que enfrentan cambios climáticos.

Aunque ya Reyes-Valdez et al. (2006) proporcionaron datos sobre la dieta de las especies nativas de trucha descritas y no descritas del noroeste, Ruiz-Luna y García-De León presentan en el capítulo 4, un primer reporte sobre la composición de la dieta de la TDM en las tres cuencas que habita (Fuerte, Culiacán y Sinaloa), con un tamaño de muestra y distribución geográfica de gran amplitud. Los autores concluyen que la TDM es una especie insectívora generalista, consumiendo presas de naturaleza acuática o terrestre que estén a su alcance, aun cuando en dicho trabajo se generan conclusiones interesantes en asociación con la dieta consumida por hembras y machos, donde aparentemente las hembras consumen presas de mayor tamaño, conducta que puede estar asociada con la época reproductiva. Dado que la mayoría de los muestreos se realizaron durante la temporada de máximo desove, es necesario continuar con estos análisis abarcando un ciclo anual y comparativo entre cuencas, para comprender la dinámica espacio-temporal de la dieta de la especie en su ambiente natural.

Posteriormente, García-De León et al., en el capítulo 5 analizan el dimorfismo sexual mediante morfometría geométrica encontrando diferencias entre ambos sexos. Entre otros resultados, no se observó la típica curvatura presente en la mandíbula de otros salmónidos en la época de madurez sexual, aunque en términos generales la cabeza de los machos resultó con una apariencia más robusta y alargada que la de las hembras. Además determinaron que la TDM es una especie iteropara, sin embargo proponen que el ciclo de muestreo deberá extenderse tanto en tiempo como en espacio para mejorar el conocimiento sobre la fenología reproductiva de la TDM y determinar si las diferencias encontradas a nivel de cuenca son significativas o hay sincronía reproductiva en la especie independientemente de su ubicación geográfica.

Algunas relaciones biométricas que determinan las características poblacionales de la TDM fueron establecidas en el capítulo 6 por Ruiz-Luna, determinando que la TDM no supera en promedio los 12 cm de longitud total, con peso promedio ligeramente mayor a 15 g, siendo mayor en el caso de las hembras con respecto a los machos, un fenómeno que puede ser explicado por la estrategia de muestreo, asociado en su mayoría con el periodo de reproducción, de donde también se determinó que existe maduración gonádica tanto en machos como en hembras con tallas relativamente pequeñas. Otras diferencias encontradas sugieren variación del peso total entre cuencas, siendo las truchas de mayor peso las de la cuenca del río Sinaloa, pese a que el tamaño de muestra es similar por lo menos entre las cuencas del Fuerte y Sinaloa. Con respecto a la proporción de sexos, el autor observa una relación entre el número de hembras y machos muy cercana a la unidad, sin embargo a nivel de cuenca esta relación varió, siendo más numerosos los machos en el río Fuerte y

más numerosas las hembras en el río Culiacán. El autor sugiere se profundice en el estudio de estas diferencias a nivel de cuenca, las cuales pueden contribuir al entendimiento de los posibles impactos por efecto de cambios en el hábitat, información necesaria para una correcta programación de actividades de repoblación y optimización del cultivo de estas especies.

En el mismo sentido que el autor anterior, en el capítulo 7 Ruiz-Campos et al. analizan las relaciones biométricas de la trucha arcoíris de Baja California, la TDM y otras especies de la SMO. Los autores encuentran que en todos los casos la relación entre el peso y la longitud es típicamente isométrica, salvo en *O. mykiss nelsoni* que es alométrica negativa, aunque hay variaciones atribuibles a diferencias morfométricas entre las especies y posiblemente a la alimentación, pues algunas experiencias de cultivo de esta última especie demuestran que en cautiverio, puede pasar a una situación inversa, con crecimiento alométrico positivo.

La dimensión espacial en este tipo de estudios es un aspecto que se ha resaltado al constatar algunas diferencias biológicas importantes entre cuencas. El estudio de Ruiz-Luna et al. en el capítulo 8, sobre la predicción de la distribución geográfica de trucha dorada *Oncorhynchus chrysogaster* en los ríos Sinaloa y Culiacán pretende acotar este faltante. Por ejemplo, algunas de estas diferencias se evidencian desde la extensión que ocupan las áreas con potencial para hábitat de la TDM, por arriba de los 2000 msnm, que es significativamente mayor en las cuencas de los ríos Fuerte y Culiacán (Ruiz-Luna et al. 2013), aunque la fracción correspondiente a la del río Sinaloa presenta en general aptitudes para albergar a la especie. De hecho las campañas de muestreo han sido particularmente exitosas en la confluencia de las tres cuencas, mientras que al norte de la cuenca del río Fuerte no se han obtenido resultados positivos en las últimas campañas realizadas en los años 2014-2015, aun en sitios con registros históricos, lo que hace temer por una posible extinción a nivel local, que debe ser confirmada.

Sumado a los aspectos ambientales, debe reconocerse que la permanencia de la TDM y las otras truchas nativas de la SMO también está determinada por otras variables, originadas principalmente por las distintas actividades antrópicas realizadas en la región y aún fuera de ella; los resultados que presentan Aguilar et al. en el capítulo 9, con relación a compuestos organoclorados persistentes hallados en tejidos de TDM, son un ejemplo de ello. En dicho estudio, se determinó que aunque los residuos encontrados en el análisis tienen su origen en distintas fuentes de contaminación, corresponden esencialmente a sustancias aplicadas en desarrollos agrícolas, principalmente localizados en la planicie costera y que con toda probabilidad son transportados a las zonas altas después de que dichos compuestos son volatilizados a la parte alta de la atmosfera, para luego ser precipitados con la lluvia u otros fenómenos de deposición química. Lamentablemente no se cuenta con registros históricos del uso de plaguicidas, por lo que los resultados no han podido asociarse con alguna zona agrícola o cultivo en particular, lo que seguramente sería de gran utilidad para propósitos de buenas prácticas en el uso de estas sustancias. Sin embargo, para poder llegar a conclusiones definitivas se requiere de una muestra más amplia, que además incluya otras fuentes de medición de contaminantes como pudieran ser los componentes de la dieta en truchas, así como sedimentos, con lo que habría mayores posibilidades de identificar el origen de la contaminación y la elaboración de modelos de dispersión que permitan generar medidas de prevención y evaluación de riesgos.

Además de la amenaza de un incremento en la contaminación de los ríos en la SMO, no solo por la acción de la deposición de plaguicidas y residuales derivados de la industria

agrícola, sino también por una creciente actividad minera, las truchas nativas se encuentran en riesgo ante la transformación de su entorno. La deforestación, tanto legal como ilegal, para propósitos maderables, es una de las principales amenazas, que junto con los posibles efectos del cambio climático global son un reto para la sobrevivencia de estas especies acuáticas. Ante ese tipo de situaciones, con nuestras experiencias de campo pudimos percibir un cambio de actitud en la población local hacia una toma de conciencia sobre el impacto que las actividades forestales acarrearán, suscribiendo acuerdos con las autoridades en materia ambiental, para ejecutar obras de restauración, conservación, captación de agua y protección de la biodiversidad a través del pago por servicios ambientales.

Adicionalmente, se ha buscado la diversificación de actividades, fomentando el turismo y la acuicultura, como principales actividades alternas. Sin embargo, esto se ha hecho sin regulación por los diferentes niveles de gobierno, por lo que se ha favorecido la introducción de especies exóticas, particularmente de la trucha arcoíris, nativa de California EUA, incrementando el riesgo de extinción de la TDM.

Sobre este riesgo advierten claramente los estudios realizados por Escalante et al. en el capítulo 10. Estos autores manifiestan la existencia de introgresión genética de la trucha exótica sobre la TDM, es decir, la hibridación entre ambas especies, con la consiguiente pérdida de información genética de la trucha nativa. Esto está documentado particularmente en las cuencas del río Sinaloa y específicamente en el arroyo Aparique en el río Fuerte. En este último caso resulta paradójico que siendo *aparique* el término con el que los Rarámuris denominan a la trucha nativa, ésta se encuentre en riesgo de ser reemplazada por una especie exótica, como consecuencia de malas prácticas acuaculturales.

Por considerar como un riesgo inminente la presencia de trucha arcoíris en la zona, se acentúa la necesidad de regular la introducción de esta especie con controles estrictos, aunque se entiende la necesidad del desarrollo regional, al diversificar los sistemas de producción para evitar el agotamiento de otros recursos. Con ese fundamento, algunas instituciones nacionales se han preocupado por evaluar la factibilidad del cultivo de las truchas nativas mexicanas, en particular de la TDM y la trucha de San Pedro Mártir. Particularmente en esta obra se cuenta con dos trabajos que permiten entrever el potencial que tiene la TDM para propósitos de cultivo. Tanto Barriga-Sosa et al. en el capítulo 11, como Abadía-Cardoso et al. en el capítulo 12, resaltan de sus experiencias de cultivo de esta especie, que es viable alcanzar tallas comerciales (> 250 g), en periodos de aproximadamente 6 meses, algo en lo que no se confiaba dado el reducido tamaño de los ejemplares silvestres muestreados hasta la fecha. Particularmente en el caso de Barriga-Sosa et al., se alcanzaron tasas específicas de crecimiento muy similares a las reportadas para trucha arcoíris, lo que permite visualizar posibilidades de desarrollo para la región. Por su parte Abadía-Cardoso et al. llegan a conclusiones semejantes, validando en primer término la identidad genética de la TDM capturada en el río Fuerte y promoviendo la fertilización artificial en dos tiempos, que condujo a la eclosión de más del 75% de los huevos fertilizados.

Aunque algunos aspectos relacionados con la reproducción y la alimentación en cautiverio han sido resueltos por los dos grupos de investigación, siguiendo prácticas estándar de cultivo de la trucha arcoíris, aún quedan asuntos sin resolver como es el caso de la relación adecuada entre el número de machos y hembras, mostrando diferencias entre los dos grupos de investigación. Independientemente de esa discrepancia, coinciden en cuestionarse sobre otros aspectos relacionados con el cultivo, como es el caso de la obtención y maduración correcta de progenitores, la existencia de posibles enfermedades,

densidades de siembra y cultivo en distintas etapas de desarrollo y sobre las adaptaciones a aguas con distinta calidad. Por otro lado y dada la dificultad de reconocer las diferentes especies y sobre todo híbridos en los sistemas de ríos de la SMO, únicamente por su aspecto morfológico, los autores de ambos capítulos proponen métodos moleculares, usando marcadores del ADN mitocondrial y marcadores del ADN nuclear. Ambos métodos tienen ventajas y desventajas, no obstante si se carece de una base de datos completa para la comparación, su utilidad se vuelve limitada; por lo que los autores sugieren seguir investigando para completar esas bases de datos y así tener una herramienta molecular de gran utilidad en el cultivo de las truchas nativas mexicanas. Todas estas complicaciones deberán irse analizando en el futuro próximo para generar un cultivo exitoso, por medio del cual se garantice la eliminación de especies exóticas, y favorezca a las especies nativas, tanto para cultivo como para repoblación y sobre todo, que ofrezca posibilidades de desarrollo local, que permitan que la actividad se mantenga en niveles sustentables y sin merma de la biodiversidad.

Finalmente, debe considerarse que el cultivo de trucha arcoíris se encuentra apenas en etapa de desarrollo en la región y su impacto actual sobre la economía local no se conoce en detalle. Una etapa crucial para entender el grado de tecnificación de la truticultura en el noroeste de México es la inventarización de las granjas de cultivo, siendo este parte de los temas que abordan Espinosa et al. en el capítulo 13. Adicionalmente mencionan que el establecimiento de centros para el cultivo de trucha, aunque económicamente útil, es otro factor de riesgo para la diversidad acuática, especialmente donde existen poblaciones nativas de especies similares; por lo que se dan a la tarea de ubicar geográficamente esos centros usando sistemas de información geográfica tanto en México en general, como en la región del noroeste, donde habitan truchas nativas, en particular. Esta información seguramente servirá como un valioso instrumento para la gestión racional y conservación de la TDM.

Por su parte, Penaluna en el capítulo 14 propone que las actividades de manejo sustentable y conservación de las truchas del Pacífico deben incluir el mantenimiento de conectividad entre hábitats heterogéneos y maximización de los mismos, con protección de los hábitats a una escala mayor y conservación de las aguas de ambientes fríos, lo cual representa un reto ante la inminencia del cambio climático.

Evidentemente, el proceso de conservación va ligado a aspectos económicos y sociales y en ese sentido, Cassio et al. en el capítulo 15, realizan una caracterización socioeconómica de la actividad trutícola en el estado de Durango, efectuando algunas comparaciones con la actividad desarrollada a nivel nacional. Los autores identifican que este estado junto con Chihuahua y Sinaloa, que hospedan las localidades donde se tienen registros de TDM, cuentan con condiciones ideales para el cultivo de trucha, sin embargo su impacto a nivel nacional es escasamente significativo, produciendo en conjunto menos del 3% del total nacional. Con ese escenario, se dan las condiciones necesarias para un manejo adecuado de la truticultura en la región dentro de un marco de conservación de las especies nativas. El reto obviamente, comentan los autores, no es exclusivo en la parte ambiental y tecnológica, sino también extenderse a los aspectos sociales, que deben ser atendidos para apoyar el despegue de esta actividad, fortaleciendo los mecanismos requeridos para evitar, o al menos disminuir, la dependencia en cuanto a la provisión de huevos o crías y de alimento balanceado, dos áreas que pudieran fortalecerse a nivel regional con el apoyo institucional, grupos académicos locales y de inversión privada.

Asimismo es necesario crear nuevos canales de distribución que permitan una mejor programación de cosechas y producción.

Todos los aspectos contemplados arriba, es decir, el ambiental, el tecnológico, el social, e inclusive el económico, deben ser estrictamente regulados para evitar la anarquía o prácticas de producción y comercialización desleales, por lo que el aporte que ofrecen Sánchez et al. en el capítulo 16, es un loable intento de recoger y organizar en un documento, la diversidad de leyes, normas y regulaciones relacionadas con el cultivo de especies acuícolas, con énfasis en la truiticultura. De todo ello se desprende algo que ya se había comentado inicialmente, que existe un evidente esfuerzo por mejorar las condiciones de desarrollo, pero que adolece de la adecuada articulación para lograr el equilibrio con los aspectos ambientales y carece de todo tipo de normatividad con respecto al manejo específico de la TDM, promoviendo solo instrumentos generales de protección a especies nativas, dentro de los que la NOM-059-SEMARNAT-2010, es la única referencia concreta para esta especie. Concluyen estos autores que es evidente una tendencia importante en políticas públicas la promoción de la acuicultura, pero con mínima regulación relacionada con la protección de las especies nativas así como de la introducción de especies exóticas. Por lo anterior consideramos imprescindible que deben crearse normas que regulen la actividad pesquera y el manejo acuícola y conservación de las truchas nativas mexicanas que habitan las diferentes cuencas en la SMO y en particular la TDM, como aquellas establecidas para otros cuerpos de agua de México (DOF 2014; 2015).

En conclusión y considerando lo mencionado por Penaluna (capítulo 14), no hay historias de éxito total en los diversos intentos realizados por recuperar a cualquiera de las especies de truchas del Pacífico, dentro de las que se incluyen nuestras especies nativas, sin embargo cada historia ha dejado lecciones que debemos aprender para no repetir errores y al menos retrasar la disminución de las poblaciones de peces, que de acuerdo a la experiencia de los autores, se encuentran en riesgo en algunas de las localidades con registro histórico.

Como país comprometido con el desarrollo sustentable y la conservación de la biodiversidad, México debe aprender de las diversas experiencias que en materia de manejo y uso de salmónidos se han generado en diversos países del hemisferio norte, para evitar en lo posible el error de seguir introduciendo especies exóticas que atentan la subsistencia de estos salmónidos.

Como se ha mencionado de manera reiterativa en los diversos capítulos que conforman esta obra, es pertinente continuar con este tipo de estudios relacionados con nuestra riqueza natural, misma que debe ser protegida y aprovechada equitativamente. Por ello autores que participamos de esta experiencia, así como otros que se integran en grupos interinstitucionales como el de Truchas Mexicanas o de instituciones como el CIAD, CIBNOR, CICESE, UABC, UAM, UNAM e inclusive los centros de investigación de dependencias de gobierno, como es el caso del INAPESCA, consideramos que deben redoblar los esfuerzos para proteger el capital natural del país, siendo un requisito necesario que las instituciones de gobierno en sus tres niveles, de las que dependen estos recursos y en particular las que tienen que ver directamente con la protección y manejo de especies como la trucha dorada mexicana, se sensibilicen y apoyen estas iniciativas de investigación a fin de que no se conviertan en intentos aislados y se ponga en riesgo la supervivencia de estos peces y otros grandiosos recursos escasamente conocidos en la Sierra Madre Occidental, México.

## REFERENCIAS

- 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.
- Abadía-Cardoso, A., J.L. Damas-Aguilar, J.L. Falcón-Rodríguez, F.J. García-De León, J.C. Garza y G. Ingle de la Mora. 2016. Primeras gestiones para el cultivo de trucha nativa de la Sierra Madre Occidental: colecta, determinación de identidad genética y reproducción. En: Ruiz-Luna A. y F.J. García-De León (eds.). *La trucha dorada mexicana*. Cap. 12.
- Aguilar, Z.G., A. Ruiz-Luna y M. Betancourt L. 2016. Presencia de Compuestos Organoclorados Persistentes (COPs) en poblaciones de trucha dorada mexicana (*Oncorhynchus chrysogaster*) especie endémica de la Sierra Madre Occidental. En: Ruiz-Luna A. y F.J. García-De León (eds.). *La trucha dorada mexicana*. Cap. 9.
- Anta Fonseca, S., J. Carabias, A. Díaz de León, C. Illsley, C. López, D. Robinson, E. Escamilla, F. Edouard, F. Ramírez, L. Merino, M. Chauvet, O. Ramírez, P. Álvarez, R. Obregón, S. Madrid, S. Purata y S. Ávila. 2008. Consecuencias de las políticas públicas en el uso de los ecosistemas y la biodiversidad. En: *Capital natural de México, vol. III: Políticas públicas y perspectivas de sustentabilidad*. CONABIO. México. pp. 87-153.
- Barriga-Sosa, I.A., J.L. Arredondo-Figueroa, G. Ingle de la Mora y F.J. García de León. 2016. 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.
- Cassio, M.E., E. Medina H., E. Sánchez O., C.I. Hernández R. y J.F. Moreno S. 2016. Caracterización socioeconómica de la actividad truchícola en el estado de Durango: Un acercamiento para dimensionar su importancia. En: Ruiz-Luna A. y F.J. García-De León (eds.). *La trucha dorada mexicana*. Cap. 15.
- CONABIO. 2008. *Capital natural de México, Conocimiento actual de la biodiversidad*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México. Vol. 1. 612 p.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). 2014. NORMA Oficial Mexicana NOM-012-SAG/PESC-2014, Para regular el aprovechamiento de los recursos pesqueros en el embalse de la presa El Cuchillo-Solidaridad, ubicada en el Municipio de China, N.L.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). 2015. NORMA Oficial Mexicana NOM-036-SAG/PESC-2015, Pesca responsable en el Lago de Pátzcuaro ubicado en el Estado de Michoacán. Especificaciones para el aprovechamiento de los recursos pesqueros.
- Escalante, M.A., F.J. García-De León, C.B. Dillman, A.B. De los Santos C., A. George, I.A. Barriga S. 2016. Introgresión genética de la trucha arcoíris exótica en la trucha dorada mexicana. En: Ruiz-Luna A. y F.J. García-De León (eds.). *La trucha dorada mexicana*. Cap. 10.
- Espinosa, P.H., C. Lambarri M. y A. Martínez Castro. 2016. La truticultura en México y sus implicaciones para las truchas nativas. En: Ruiz-Luna A. y F.J. García-De León (eds.). *La trucha dorada mexicana*. Cap. 13.
- García-De León, F.J., L.N. Getino M., M.C. Rodríguez J., S. Sánchez G., F. Márquez y A. Ruiz-Luna. 2016. Dimorfismo sexual y periodo reproductivo de la trucha dorada mexicana, *Oncorhynchus chrysogaster* en los ríos Fuerte, Sinaloa y Culiacán. En: Ruiz-Luna A. y F.J. García-De León (eds.). *La trucha dorada mexicana*. Cap. 5.

- 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. Mcnyset, 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.
- Hernández-Guzmán, R. y A. Ruiz-Luna. 2016. Caracterización paisajística e hidrológica de la Sierra Madre Occidental utilizando técnicas de Percepción Remota, Modelos Digitales de Elevación y Sistemas de Información Geográfica. En: Ruiz-Luna A. y F.J. García-De León (eds.). *La trucha dorada mexicana*. Cap. 2.
- Olden, J.D. and N.L. Poff. 2003. Toward a mechanistic understanding and prediction of biotic homogenization. *American Naturalist*. 162: 442–460.
- Olden, J.D., N.L. Poff, M.R. Douglas, M.E. Douglas and K.D. Fausch. 2004. Ecological and evolutionary consequences of biotic homogenization. *Trends in ecology & evolution*. 19(1): 18-24.
- Penaluna, B. 2016. Conservación de truchas del Pacífico. En: Ruiz-Luna A. y F.J. García-De León (eds.). *La trucha dorada mexicana*. Cap. 14.
- Reyes-Valdez, C.A., G. Ruiz-Campos, F. Camarena-Rosales and A. Varela-Romero. 2006. Diet composition of native trout (Salmonidae: *Oncorhynchus*) from the Sierra Madre Occidental, Mexico. En: Lozano-Vilano M.L. and A.J. Contreras-Balderas (eds.). *Studies of North American Desert Fishes in Honor of E.P. (Phil) Pister, Conservationist*. Mexico. Faculty of Biological Sciences. UANL. México. pp: 125-137.
- Ruiz-Campos, G., C.A. Reyes-Valdez, F. Camarena-Rosales y A.F. González-Acosta. 2016. 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. En: Ruiz-Luna A. y F.J. García-De León (eds.). *La trucha dorada mexicana*. Cap. 7.
- Ruiz-Luna, A. 2016. Relaciones biométricas y aspectos poblacionales de la trucha dorada mexicana *Oncorhynchus chrysogaster* en las cuencas de los ríos Fuerte, Sinaloa y Culiacán, México. En: Ruiz-Luna A. y F.J. García-De León (eds.). *La trucha dorada mexicana*. Cap. 6.
- Ruiz-Luna, A., C.A. Berlanga-Robles, R. Hernández-Guzmán y M.A. Escalante-Sánchez. 2013. Modelación de la distribución de truchas nativas de la Sierra Madre Occidental y su relación con la estructura del paisaje adyacente. *Informe técnico final*. Proyecto CONABIO JM058. 49 p.
- Ruiz-Luna, A. y F.J. García-De León. 2016. Análisis del contenido estomacal de la trucha dorada mexicana *Oncorhynchus chrysogaster* (Needham y Gard 1964) en los ríos Fuerte, Culiacán y Sinaloa, México. En: Ruiz-Luna A. y F.J. García-De León (eds.). *La trucha dorada mexicana*. Cap. 4.
- Ruiz-Luna, A., R. Hernández-Guzmán, F.J. García-De León y A.L. Ramírez-Huerta. 2016. Predicción de la distribución geográfica de trucha dorada *Oncorhynchus chrysogaster* (Needham y Gard 1964) en los ríos Sinaloa y Culiacán, México. En: Ruiz-Luna A. y F.J. García-De León (eds.). *La trucha dorada mexicana*. Cap. 8.

- Sánchez O.E., E. Cassio M. y E. Medina H. 2016. La política pública mexicana de truchicultura. En: Ruiz-Luna A. y F.J. García-De León (eds.). *La trucha dorada mexicana*. Cap. 16.
- Sarukhán, J., J. Carabias, P. Koleff y T. Urquiza-Haas (redactores). 2012. *Capital natural de México: Acciones estratégicas para su valoración, preservación y recuperación*. CONABIO. México. 91 p.
- Vásquez-Gallegos, P. 2014. Maduración sexual de la trucha de San Pedro Mártir *Oncorhynchus mykiss nelsoni* evaluada mediante un método no invasivo. *Tesis de Maestría en Ciencias (Acuicultura)*. Centro Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Ensenada, Baja California, México.



## **2. 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*

### **INTRODUCCIÓN**

**E**n zonas con una topografía compleja y donde confluyen enormes cuencas de captación, como es el caso de la Sierra Madre Occidental (SMO), el conocimiento de los componentes del paisaje y los sistemas de drenaje es necesario para interpretar con mayor exactitud los diversos procesos que modifican el hábitat y tienen efecto sobre el balance hidrológico y, en consecuencia, sobre la disponibilidad de agua y la biodiversidad. Este conocimiento permite estar en posición de resolver cuestionamientos sobre caudales y flujos de agua, infiltración, evapotranspiración y en general, el ciclo hidrológico y cómo se ve afectado, para posteriormente racionalizar o al menos mejorar su aprovechamiento (Descroix et al. 2004) y tener un impacto positivo en la conservación de la biodiversidad y las actividades productivas, entre otros aspectos.

Considerando entonces la extensión y complejidad de la zona, los sistemas de información geográfica (SIG), la percepción remota (PR) y la hidrología, son campos de la ciencia que comparten muchos intereses y que una vez integrados facilitan la gestión. Por esta razón, cada vez hay más investigaciones, en diversas escalas de tiempo y espacio, que se apoyan en estas herramientas para la caracterización del paisaje y la construcción de modelos hidrológicos, especialmente cuando es necesaria su representación en formatos accesibles y eficientes (Mantelli et al. 2011).

Por otra parte, actualmente las imágenes de satélite y los Modelos Digitales de Elevación (MDE) están disponibles al público, permitiendo generar información sobre los componentes del paisaje y permitiendo la creación de nuevos conjuntos de datos útiles para la delimitación de cuencas y la extracción de redes de drenaje, a un costo bajo. De esa manera, la combinación de los productos derivados por percepción remota y las aplicaciones de SIG se perfilan como una potente herramienta que puede ser utilizada para recomendar medidas de conservación (Biswas et al. 2002).

En México, este tipo de datos ha sido ampliamente utilizado, proporcionando información del paisaje donde la accesibilidad es limitada. En ese sentido, considerando la importancia que la composición del paisaje y la distribución del recurso hídrico tienen sobre la conservación y mantenimiento de las truchas nativas de la SMO, incluyendo la trucha dorada mexicana objeto de la presente obra, se elaboró una caracterización amplia del paisaje de la SMO, así como un modelo de drenaje. Estos elementos en conjunto pueden ser de utilidad para propósitos relacionados con la conservación y manejo de recursos, en el sentido amplio propuesto por Penaluna (Capítulo 14, esta obra).

## ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio fue definida por los límites de la Sierra Madre Occidental dentro del territorio nacional, excluyendo la región ubicada al sur de Arizona, EUA, desde Sonora y Chihuahua al norte, hasta Jalisco, en el sur, siendo el mayor sistema orográfico de México (Fig. 1).

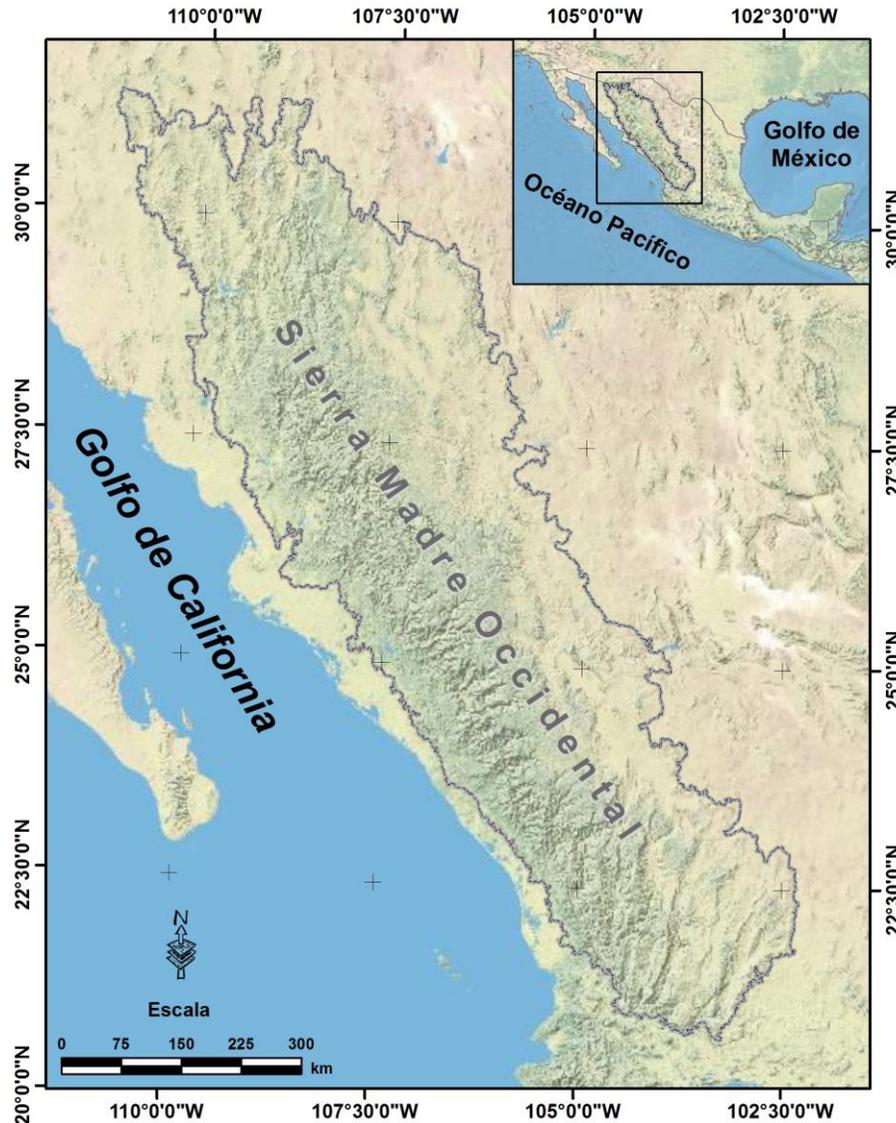


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio, dentro de los límites del territorio nacional.

Por su extensión, la variedad de ambientes y su complejidad biofísica, es considerada como una región altamente diversa, que incluye a 32 de las 152 Regiones Terrestres prioritarias de México, tal como las define la Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (González-Elizondo et al. 2012). Con elevaciones de hasta 3300 msnm, la SMO se caracteriza por la cantidad de especies distintivas que han evolucionado como resultado de su relieve, altitud, temperatura y niveles de precipitación, incluyendo diversas especies de pino (*Pinus* spp.), robles o encinos (*Quercus* spp.), pinabetes (*Abies* spp.) y

madroños (*Arbutus* spp.), en distintos grados de asociación, desde bosque monoespecífico hasta bosques mixtos. Asimismo alberga otros tipos de vegetación como bosque bajo, matorral perennifolio y xerófilo y pastizales conteniendo alrededor de dos tercios de superficie maderable en México, con diversos grados de explotación (Viramontes et al. 2004; Navar 2009; González-Elizondo et al. 2012).

## **METODOLOGÍA**

### *Caracterización del paisaje*

Se generó información sobre el estado reciente de la cobertura vegetal, cuerpos de agua y de otras coberturas y usos de suelo, a partir de la clasificación de imágenes del satélite Landsat 5 TM (*Landsat Thematic Mapper*), con resolución de 30 m, registradas en su mayoría durante el mes de febrero de 2010 y algunas durante los meses de marzo a mayo del mismo año, lo que en sentido estricto corresponde al periodo de secas. Todas fueron seleccionadas y descargadas del portal GLOVIS (*USGS Global Visualization Viewer*; <http://glovis.usgs.gov/>). El análisis incluyó un total de 33 imágenes que fueron total o parcialmente clasificadas por medio del algoritmo de clasificación no supervisado Isoclust, basado en la rutina de clasificación ISODATA descrita por Ball y Hall (1965).

En el proceso se integraron seis bandas espectrales del sensor TM (*Thematic Mapper*), tres bandas del espectro visible (banda 1 azul, 0.45 – 0.52  $\mu\text{m}$ ; banda 2 verde, 0.52 – 0.60  $\mu\text{m}$ , y banda 3 rojo 0.63 – 0.69  $\mu\text{m}$ ) y tres del infrarrojo (banda 4 Infrarrojo cercano 0.76 – 0.90  $\mu\text{m}$ ; banda 5 infrarrojo de onda corta\_1, 1.55 - 1.75  $\mu\text{m}$ , y banda 7 infrarrojo de onda corta\_2, 2.08 - 2.35  $\mu\text{m}$ ). El procesamiento se llevó a cabo con el programa ArcGIS 10.3.

El algoritmo Isoclust usa una técnica de auto-agregación iterativa (*Iterative Self Organizing*) en la que agrupa a todas las celdas en el número de categorías o *clusters* especificados por el usuario de acuerdo a grupos unimodales distintos utilizando una media arbitraria asignada por el software a cada categoría. Durante cada iteración, la media del centroide es re-calculada basada en atributos de distancia y entonces cada pixel es reasignado al centroide más cercano (Richards y Jia 1999). En este caso y considerando los objetivos del estudio, se definieron *a priori* cinco clases representativas del paisaje (Agrícola (cultivos), Superficie acuática, Poblados, Suelo expuesto y Vegetación natural). Una vez obtenidos los *clusters* y dependiendo de su afinidad espectral, fueron reclasificados en alguna de las clases mencionadas. Adicionalmente, cuando fue necesario, se incluyeron las clases nieve y sombras. En el caso particular de la cobertura denominada Poblados, que incluye zona rural y urbana, el resultado final fue actualizado mediante la digitalización en pantalla de imágenes de alta resolución a través de *Google Earth*.

Se procedió a la clasificación individual de las 33 imágenes, para posteriormente conjuntarlas con el módulo *Mosaic* de ArcGIS y su posterior recorte al área definida para el estudio. La exactitud de la clasificación fue validada contrastando el resultado final con la clasificación producida dentro del programa *North American Land Change Monitoring System* (NALCMS) para el año 2010, que es el antecedente más cercano (Recuperado de <http://www.cec.org/tools-and-resources/map-files/land-cover-2010>, 15/julio/2016). Este mapa se genera con resolución de 250 m, con base en imágenes del satélite MODIS y que resulta de la cooperación del *Natural Resources Canada/Canada Center for Remote Sensing* (NRCan/CCRS); la agencia norteamericana *United States Geological Survey* (USGS) y tres agencias mexicanas integradas por el Instituto Nacional de Estadística y

Geografía (INEGI); la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) y la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR).

La validación se realizó con una matriz de confusión que permite detectar diferencias entre los resultados de la clasificación de imágenes Landsat y puntos seleccionados al azar del mapa generado por el NALCMS. Se obtuvieron valores de los indicadores de exactitud general (%), exactitud del productor y del usuario, como medidas de similitud o diferencia entre las distintas clasificaciones (Congalton y Green 2009).

### Caracterización hidrológica

Los datos digitales más comunes de la forma de la superficie de la tierra son los modelos digitales de elevación (MDE) basados en celdas. Estos datos se utilizan como entrada para cuantificar las características de la superficie del suelo. Un MDE es una representación de ráster de una superficie continua, que en general hace referencia a la superficie de la tierra.

En el presente trabajo se efectuó una serie de procedimientos para delimitar y diferenciar la red de drenaje a partir de MDE, para lo que se empleó un grupo de herramientas incluidas en ArcGIS 10.3, en diversos módulos de *Spatial Analyst* (apartado Hydrology), *Network Analyst*, *3D Analyst* y ArcHydro. Este último conjunto de herramientas fue descargada de <http://downloads.esri.com/archydro/archydro/Setup/>, en su versión 10.3. El siguiente diagrama de flujo define el procedimiento aplicado en este caso de estudio (Fig. 2).

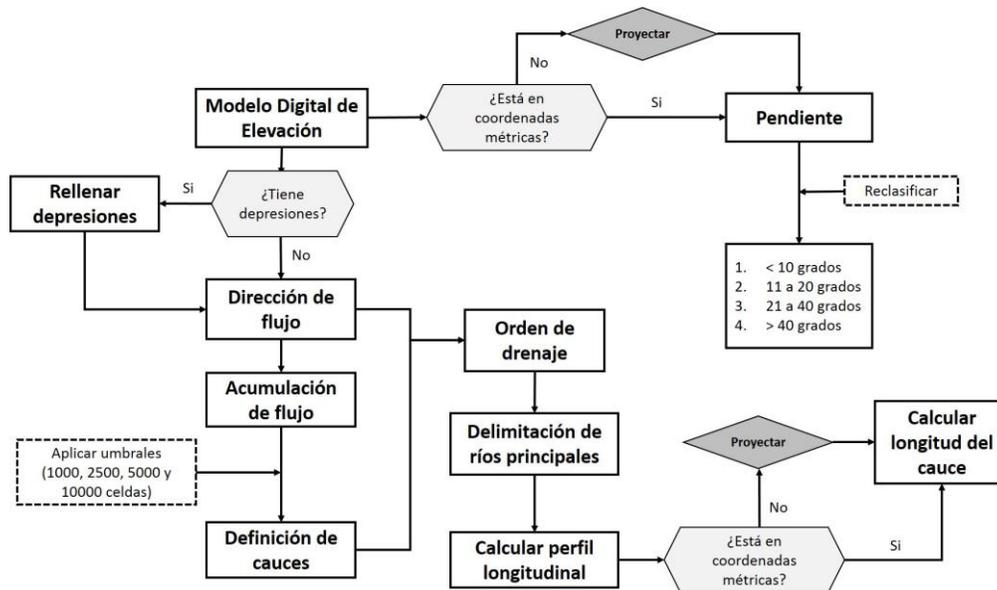


Figura 2. Diagrama de flujo de la modelización hidrológica.

### Preparación del modelo digital de elevación

En el proceso de preparación del MDE se suceden tres pasos principales que corresponden al relleno de depresiones, cálculo de la dirección de flujo y determinación de la acumulación de flujo. Para el primer paso es importante identificar y rellenar los errores contenidos en los MDE (clasificados como depresiones o picos). Una depresión es un área rodeada por valores de mayor elevación, consecuentemente no tienen ruta de flujo pendiente abajo a una celda adyacente (Hernández-Guzmán 2006). Si bien muchas

depresiones son imperfecciones de los MDE, algunas pueden ser naturales, en particular en áreas de glaciares. De la misma manera, un pico es un área rodeada por celdas de menor valor. Estas son entidades naturales más comunes y menos perjudiciales para el cálculo de la dirección de flujo. Los errores como estos, en especial las depresiones, se deben eliminar antes de intentar derivar cualquier información de superficie.

Una vez rellenadas las depresiones, se determina la dirección que tomaría un hipotético flujo de agua a su paso por cada celda, aplicando el algoritmo D8 (*Deterministic eight*), incorporado en varios modelos hidrológicos y de parametrización de cuencas (Jenson y Domingue 1988). Este método propone que cada celda en un MDE fluye a una de las ocho celdas vecinas de acuerdo a la dirección de la pendiente. La celda es codificada para corresponder a la orientación de una de las ocho celdas que rodean la celda (x). Cuando el procedimiento de dirección de flujo es aplicado a un MDE sin depresiones, todas las celdas tendrán un valor de dirección de flujo definible, condicionado a que cada celda tiene una ruta del flujo hacia el límite del conjunto de datos (Jenson y Domingue 1988).

A partir de que se establece la dirección de flujo, estos datos se utilizan para crear los datos de acumulación de flujo, donde a cada celda se asigna un valor igual al número de celdas que fluyen en ella. Las celdas que tienen un valor de acumulación de flujo de cero (ninguna otra celda fluye en ella) generalmente corresponden al modelo de cordilleras. Debido a que todas las celdas en un MDE sin depresiones tienen una ruta hacia el límite o borde de los datos, el modelo formado resalta las celdas con los más altos valores que algún umbral delimita una red de drenaje completamente conectado. Mientras el valor del umbral es incrementado, la densidad de la red de drenaje disminuye (Jenson y Domingue 1988).

#### *Red de drenaje (orden de drenaje, perfil longitudinal y pendiente)*

La red de drenaje es el sistema jerarquizado de cauces, desde los pequeños arroyos hasta los ríos, configurando un colector principal de toda una cuenca. La morfología de la red, la densidad de drenaje y los órdenes jerárquicos alcanzados son parámetros fundamentales de estudio que dependen de los caracteres geomorfológicos y bióticos del sistema. Este análisis se realizó con el método de “umbral constante”, en el que se define un valor único para calcular el número de celdas que contribuyen al flujo superficial. Mientras más pequeño es el valor umbral, más complicados son los canales obtenidos (Lin et al. 2006).

Se fijaron diferentes valores de umbral (1000, 2500, 5000 y 10,000 celdas) para que el flujo fuera canalizado. Bajo esta consideración, un límite de 1000 (alrededor de 90 ha) significa que para la generación de escurrimiento en una celda dada, necesita tener un atributo mínimo igual o mayor que 1000 en la capa de acumulación de flujo. Este valor fue seleccionado de tal forma que la red extraída coincide con los ríos principales reportados por INEGI y con trabajos de previos resultados realizados por los autores del presente trabajo (Hernández-Guzmán 2006; Ramírez Huerta 2015).

Una vez que los cauces han sido definidos, se calculó el orden de drenaje que permite identificar y clasificar los arroyos con base en la cantidad de afluentes, pudiendo inferirse algunas características de los arroyos. Por ejemplo, los arroyos de primer orden están dominados por un flujo de agua superficial, por los que son más susceptibles a problemas de contaminación sin origen puntual (Tarboton et al. 1991). Es a partir de este orden que se definen los ríos principales, tomando como referencia lo reportado por INEGI.

El perfil longitudinal se crea utilizando la función *Interpolate Shape* de la extensión *3D Analyst Tools* de ArcGIS, con la capa de ríos principales como insumo y con información de altitud tomando como base el MDE original. El río colector aumenta su

pendiente cuando recibe un afluente importante, que le aporta caudal y carga. Sin embargo, se reduce la pendiente si el afluente aporta aluviones más finos, o si está menos cargado.

Las cuencas de mayores pendientes tienen una escorrentía más veloz y sus hidrogramas, tienden a responder más rápidamente a la precipitación, incrementando los caudales pico (Strahler 1964). Las cuencas y corrientes más alargadas tienden a una respuesta más difusa, en comparación con las respuestas de tormentas de caudales altos en cuencas compactas. Así, la forma de la cuenca y el modelo de red de drenaje se combinan para influenciar en el tamaño y forma de los picos de crecida a la salida de la cuenca. Por ello es importante determinar el nivel de la pendiente para cada celda, calculada como la tasa máxima de cambio del valor de esa celda a sus vecinas. Básicamente, el cambio máximo en la elevación sobre la distancia entre la celda y sus ocho vecinas identifica el descenso cuesta abajo más empinado desde la celda. En el presente trabajo, la pendiente fue obtenida una vez que los MDE fueron proyectados a una proyección métrica Cónica Conforme de Lambert, conservando los mismos atributos de resolución que los modelos originales (30 m). Una vez derivada la pendiente fue ordenada en cuatro clases:

1. Pendientes entre 0 – 10°
2. Pendientes entre 11 – 20°
3. Pendientes entre 21 – 40°
4. Pendientes mayores de 41°

## RESULTADOS

La figura 3 muestra los resultados de la caracterización reciente del paisaje para toda la Sierra Madre Occidental. La suma de las siete coberturas consideradas en el presente estudio fue de 355,270 km<sup>2</sup> aproximadamente.

El área se caracterizó por la presencia de vegetación natural, que representó 77% (274,700 km<sup>2</sup>) del área total; este tipo de cobertura está principalmente compuesta por asociaciones denominadas como Bosque de Ayarín o pinabete, Bosque de Encino, Bosque de Encino-Pino, Bosque de Oyamel, Bosque de Pino, Bosque de Pino-Encino y Selva Baja Caducifolia, de acuerdo con la información provista en las cartas de Uso del suelo y vegetación desarrolladas por INEGI (Serie III).

La segunda cobertura con mayor extensión fue el suelo expuesto, con casi 17% (60,000 km<sup>2</sup>). En este tipo de cobertura se comparten el área las zonas de pastizales, así como de suelos destinados a la agricultura y suelos erosionados o expuestos. Esta cobertura fue más común en el lado este de la SMO, siendo característico de sotavento el mostrar una mayor aridez que en el caso de barlovento, donde se proyectan los vientos húmedos.

Contando con información de coberturas terrestres generada por el programa NALCMS para el año 2010 como referencia, se contrastaron los resultados, obteniéndose valores del índice de Exactitud Global próximos a 85%, lo que indica que los resultados de la clasificación reflejan de manera adecuada la estructura paisajística de la SMO.

Con respecto a la red de drenaje, de acuerdo con los métodos empleados se determinó que la Sierra Madre Occidental presenta un patrón de drenaje dendrítico, caracterizado por numerosos y pequeños tributarios que se unen en un ángulo agudo con uniones en Y a arroyos de mayor jerarquía, formando eventualmente los ríos más grandes. Una corriente de primer orden es un tributario sin ramificaciones; una corriente de segundo orden es un tributario formado por una o más corrientes de primer orden, y así sucesivamente. El orden

se incrementa sólo cuando corrientes del mismo orden se intersectan; por lo tanto predomina el orden de mayor jerarquía cuando confluyen dos corrientes de orden distinto (Khan et al. 2001).

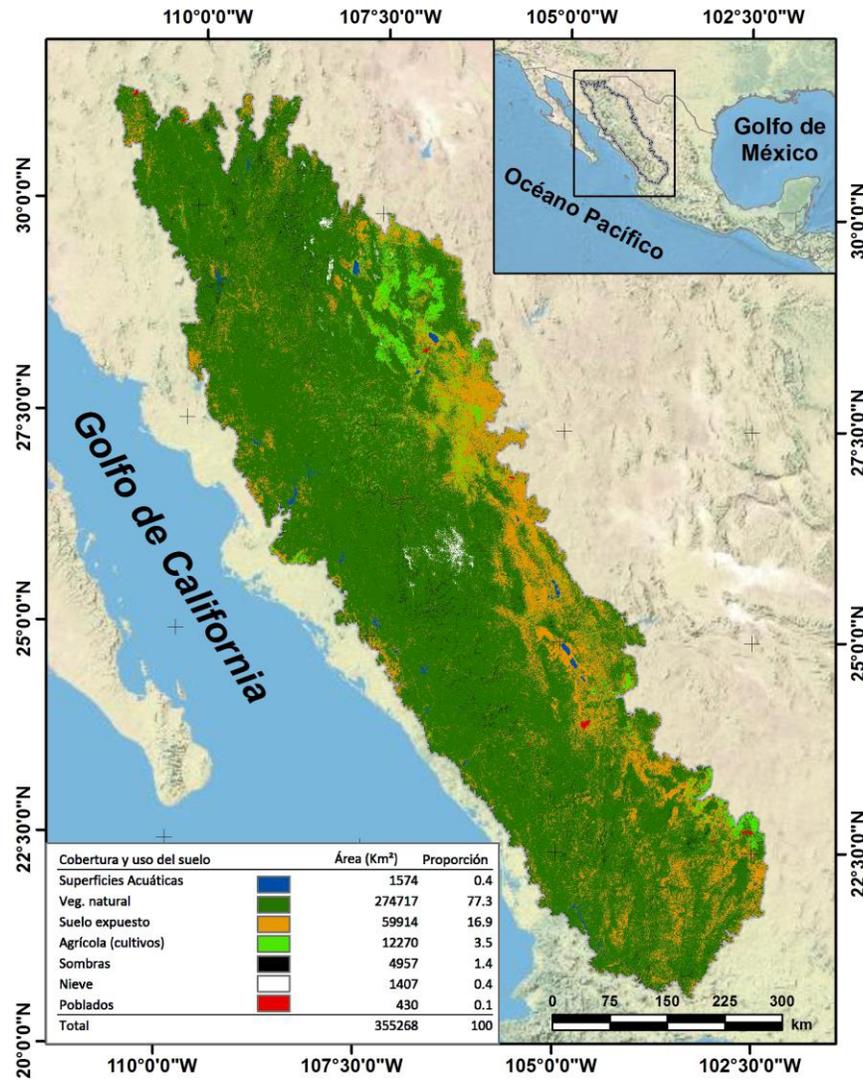


Figura 3. Clasificación de coberturas y usos del suelo de la Sierra Madre Occidental.

Si bien, la definición de órdenes de corriente, así como la red de drenaje se generó para toda la SMO, la figura 4 muestra como ejemplo, el patrón de drenaje en una de sus cuencas (río Culiacán).

Morfométricamente, las corrientes de menor orden son dimensionalmente más cortas, acarreado menor volumen de agua, mientras que las de mayor orden son comparativamente más largas y acarrearán más agua y sedimentos. Como se mencionó anteriormente, el proceso de modelación se acotó a los límites de la SMO y bajo esta premisa, los resultados sugieren que los mayores órdenes de drenaje son de Séptimo orden (Tabla 1), sin desestimar que podría incrementarse si se extiende la modelación hasta la desembocadura de las cuencas que componen la SMO.

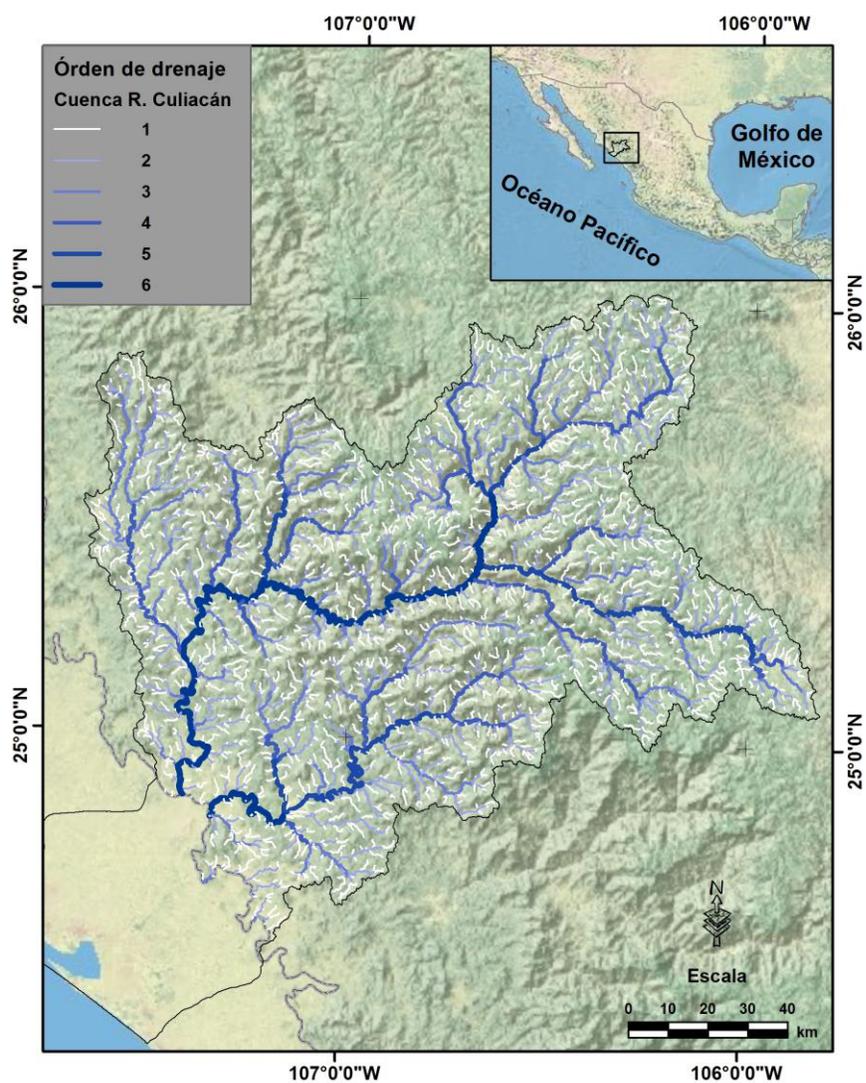


Figura 4. Orden de drenaje de la cuenca río Culiacán.

Tabla 1. Longitud de drenaje en kilómetros para diferentes valores de umbral.

Orden de cauce	Valor de umbral (celdas)			
	1000	2500	5000	10000
1	145426	99991	75656	55921
2	78825	53700	37857	25643
3	39932	23543	15528	10737
4	16323	10582	8229	6317
5	8167	6405	5170	3969
6	5222	3345	2073	1711
7	2088	1487	1055	323
8	1066	0	0	0
Longitud total (km)	297049	199053	145568	104621

En la misma Tabla 1 se muestran las diferentes longitudes de cauce para cada orden de drenaje dependiendo del valor de umbral utilizado. Las longitudes oscilaron desde los 104 600 kilómetros cuando se utilizó el valor de umbral de 10,000 celdas; hasta aproximadamente 300,000 kilómetros cuando se redujo el umbral a 1000 celdas. Considerando estudios previos reportados por Hernández-Guzmán (2006) y Ramírez-Huerta (2014), el orden que mejor se asemeja a lo estimado por INEGI corresponde al determinado por el valor de umbral 2500.

Con respecto a los ríos principales identificados, en la figura 5 se representan los perfiles longitudinales de los ocho ríos más importantes en función de su longitud (> 250 km). Estos perfiles longitudinales se representan gráficamente como una curva cuya forma ideal es la de una exponencial cóncava; hacia arriba en la cabecera y a la altura del nivel de base en la desembocadura.

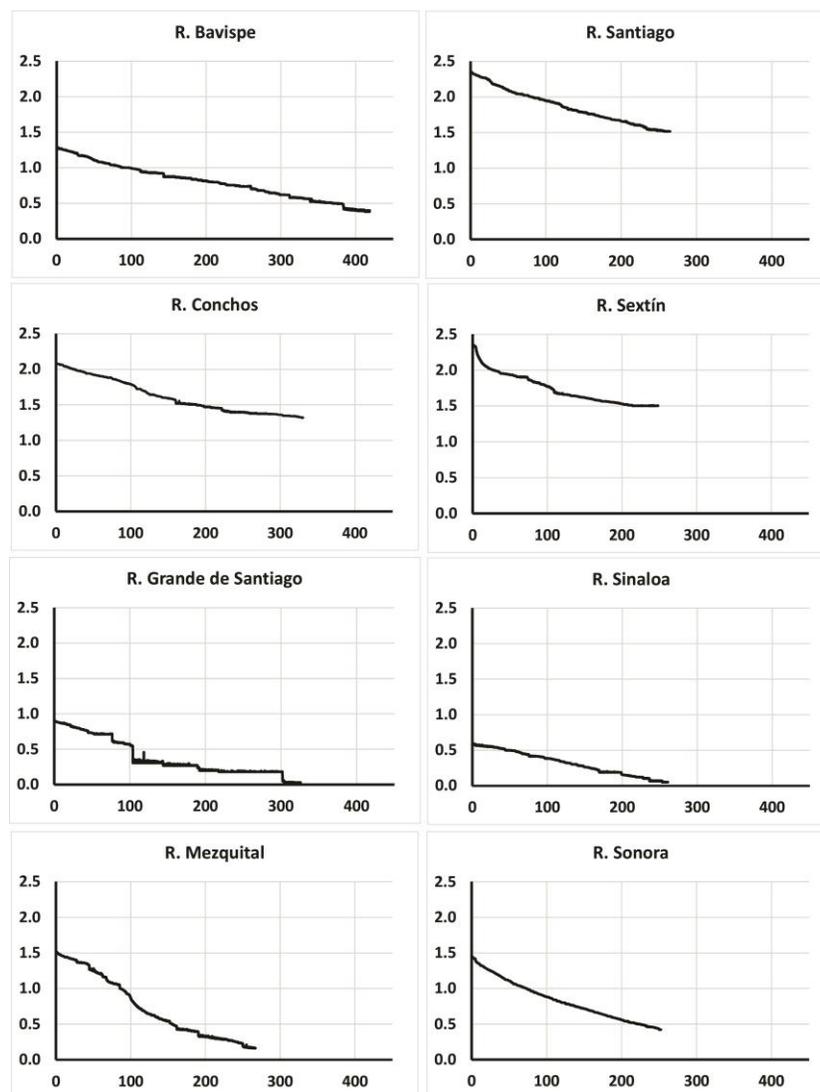


Figura 5. Ríos de mayor longitud en la sierra Madre Occidental. Eje de las X (distancia en km), eje de las Y (altitud en km).

La profundidad y la anchura del lecho aumentan aguas abajo mientras disminuye la pendiente, debido a que aumenta el caudal, y por tanto la velocidad, por lo que es posible transportar la carga material del río con una pendiente menor. Con los resultados de la modelación aquí presentada, el río Bavispe es el que presenta una mayor longitud, con casi 420 km, seguido por el río Conchos y el Grande de Santiago con 320 y 326 km de longitud respectivamente. El río Sinaloa, uno de los ríos importantes objeto de estudio en otros capítulos de la presente obra, tiene una longitud de apenas 260 km, mientras que los ríos Fuerte y Culiacán, con menos de 200 km cada uno, no figuran en esta categoría de los ocho ríos principales. Particularmente este último río, se forma por la confluencia de dos corrientes (río Tamazula y río Humaya) en proximidades de la ciudad de Culiacán, quedando fuera de los límites de la zona de estudio.

Finalmente, la figura 6 representa los distintos niveles de pendiente, determinándose que los ríos con mayor inclinación son cuatro, afluentes de ríos principales. Estos ríos son Guadalupe de Urrea, San Juan de Camarones, Santiago y Agua caliente. En los tres primeros casos la mayor pendiente se observó entre los 5 y 10 km a partir del origen (manantial) y para el último (Agua caliente), la pendiente mayor se observó a los 30 km.

Mientras mayor es la pendiente, mayor es su potencial para producir escurrimiento y por lo tanto, mayor transporte de material. En términos generales, la mayor área (155,000 km<sup>2</sup>) corresponde a zonas con pendientes suaves (0 – 10°), que ocupan cerca de 44% del total del área de estudio, donde predominan las coberturas de suelos expuestos (pastizal) y suelos agrícolas. En ese orden siguieron pendientes más pronunciadas de 11 – 20° y 21 – 40°, con 25 y 29% respectivamente donde predominan principalmente las coberturas naturales. Finalmente, cerca del 3% corresponde a pendientes muy elevadas, con ángulos superiores a 40°.

## **DISCUSIÓN**

Las dimensiones de la SMO, con un intervalo de aproximadamente 10° de latitud entre sus extremos norte y sur, sumadas con un complejo y accidentado relieve con elevaciones desde 300 a 3340 m, pendientes que van desde suaves hasta fuertemente escarpadas y finalmente, su ubicación con el extremo norte alejado del mar, corriendo paralela a la costa del Pacífico a partir de su parte central, dan como resultado una enorme complejidad climática y de ecosistemas (González-Elizondo et al. 2012), por lo tanto generando un amplio abanico biogeográfico.

Sin embargo, esta complejidad no queda del todo manifiesta en los resultados de la clasificación digital de imágenes de satélite, que para propósitos del presente estudio permitió una caracterización general del paisaje de la SMO, coincidiendo en gran medida con los resultados reportados por Ruiz-Luna et al. (2013) para la misma región, pero en altitudes iguales o superiores a los 1500 m. En dicho trabajo, el 95.5% de la región se encuentra representada por coberturas naturales, mientras que solo el 4.5% corresponde a suelos agrícolas, poblados y otras categorías sin clasificar. En el presente estudio los valores encontrados son similares, aunque existe una estimación ligeramente superior para lo correspondiente a vegetación natural. Adicionalmente, los resultados coinciden con cartografía temática SERIE V producida por INEGI y la clasificación producida por el programa *North American Land Change Monitoring System* (NALCMS) para el año 2010, con la que tuvo un elevado nivel de similitud.

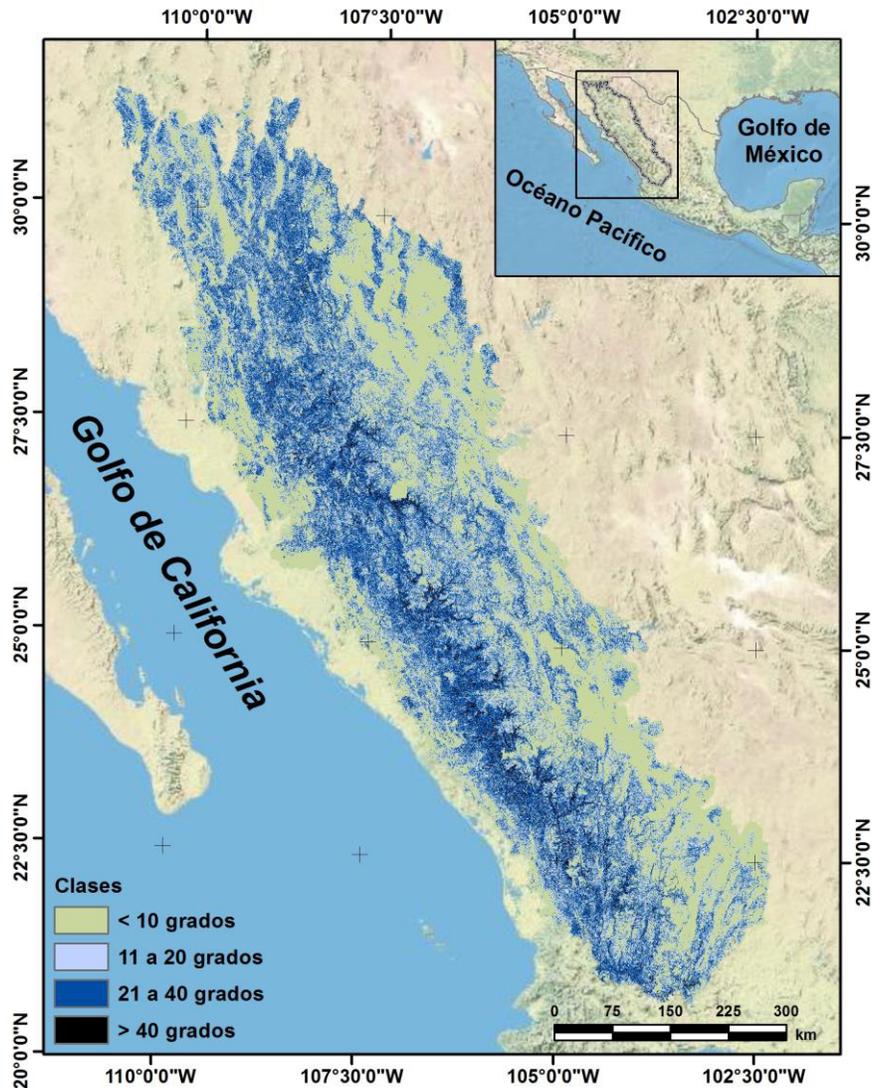


Figura 6. Clases de pendientes de la Sierra Madre Occidental.

Sin embargo, esta complejidad no queda del todo manifiesta en los resultados de la clasificación digital de imágenes de satélite, que para propósitos del presente estudio permitió una caracterización general del paisaje de la SMO, coincidiendo en gran medida con los resultados reportados por Ruiz-Luna et al. (2013) para la misma región, pero en altitudes iguales o superiores a los 1500 m. En dicho trabajo, el 95.5% de la región se encuentra representada por coberturas naturales, mientras que solo el 4.5% corresponde a suelos agrícolas, poblados y otras categorías sin clasificar. En el presente estudio los valores encontrados son similares, aunque existe una estimación ligeramente superior para lo correspondiente a vegetación natural. Adicionalmente, los resultados coinciden con cartografía temática SERIE V producida por INEGI y la clasificación producida por el programa *North American Land Change Monitoring System* (NALCMS) para el año 2010, con la que tuvo un elevado nivel de similitud.

De lo anterior se desprende que la SMO se caracteriza paisajísticamente por un alto nivel de naturalidad y que si bien se percibe en general un patrón más o menos homogéneo

en la cobertura vegetal, también es notable una importante infiltración de la cobertura correspondiente a suelos desnudos (pastizales, suelo erosionado o rocoso), un patrón que definitivamente se corresponde con lo observado durante la realización del trabajo de campo. Durante el trabajo de campo se ha observado una reducida presencia de asentamientos humanos y cuando estos existen son de baja densidad poblacional.

Adicionalmente, las condiciones ambientales en dichas localidades no favorecen particularmente el desarrollo de actividades económicas tales como la agricultura intensiva, por lo que son escasos los terrenos destinados a actividades agrícolas, la mayoría con cultivos de subsistencia. En contraparte, las actividades que se presentan con mayor frecuencia son las relacionadas con usos forestales y minería de baja escala, ambas con riesgos inherentes, tanto por la destrucción de hábitat como por la posible contaminación.

Al respecto, Ruiz-Luna et al. (2013) señalan en sus observaciones que se percibe un incremento en la conciencia ambiental local, enfrentando el riesgo de la explotación intensiva de bosques, uno de los principales problemas sociales y ambientales, con prácticas sustentables de aprovechamiento forestal y la reducción de la explotación forestal a través de programas de empleo temporal y pago por servicios ambientales. Otra vertiente es redirigir los esfuerzos hacia actividades menos invasivas del recurso forestal, siendo el caso del desarrollo de sistemas acuícolas, particularmente el cultivo de trucha arcoiris *Oncorhynchus mykiss.*, lo que reduce la explotación de los recursos forestales, pero implica el riesgo de pérdida de diversidad genética con la introducción de esta especie exótica

Considerando lo anterior, González-Elizondo et al. (2012) señalan que existen diversas contribuciones al conocimiento de la flora y la vegetación de la SMO, aunque dada su extensión y complejidad, los trabajos mencionados rara vez incluyen la totalidad del SMO y en general la información disponible sigue siendo insuficiente.

Esta limitación es mayor aún en términos de la caracterización hidrológica de la SMO, ya que normalmente se procede a hacer este tipo de estudios a nivel de cuenca y con este sistema montañoso se asocian aproximadamente 50 cuencas y subcuencas, con aproximadamente el 80% de ellas de tipo exorreico (Ruiz-Luna et al. 2013). Por lo anterior se requiere de más trabajos con una visión integrativa como el presente, a fin de que la caracterización sea más completa y eficiente y permita con ello el mejoramiento en el manejo del recurso hídrico.

Con relación a la red de drenaje, en México se han hecho múltiples esfuerzos para elaborar divisiones hidrográficas. Como consecuencia, hoy en día el país cuenta con distintas divisiones establecidas bajo criterios disímiles, lo que da como resultado la existencia de unidades hidrográficas cuyos límites difieren en función de la institución gubernamental generadora. Con el fin de llenar este vacío de información, el ahora Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), INEGI y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) han elaborado un mapa de cuencas hidrográficas a nivel nacional a escala 1:250,000 utilizando criterios naturales, topográficos e hidrográficos, para la demarcación de los límites (Cotler et al. 2007).

De manera más reciente, el INEGI ha incursionado en la generación de datos espaciales enriquecidos con topologías de redes geométricas generando la Red Hidrográfica escala 1: 50 000 que modela los escurrimientos de flujos de agua en cuencas hidrográficas (SIATL versión 3.1). Esta red, aun con las fallas inherentes en el modelado de la red de drenaje (análisis restringidos a los límites de cartas topográficas), representa un buen modelo de red de drenaje a nivel nacional. Sin embargo aún se requiere avanzar en otros temas como es el modelado de temperatura y calidad de agua en general, en asociación con

la red de drenaje y las características del paisaje, que permitiría mejores aproximaciones para el aprovechamiento del recurso y optimizar la capacidad predictiva de cambios que pudieran tener efecto en la distribución de especies como la trucha dorada mexicana, otras especies del género *Oncorhynchus* y de peces en general (Martin y Petty 2009; Barton et al. 2012).

Considerando las diferencias en los insumos de entrada para el proceso de modelación, destaca la similitud de la red de drenaje resultado del presente trabajo, con respecto a la red producida por INEGI. Por otra parte, se ha demostrado que en algunos casos pueden darse diferencias sustanciales entre los vectores de drenaje extraídos automáticamente y los límites oficiales (Andrades-Filho et al. 2009). Debido a que los análisis se efectuaron a nivel de pixel, esta inconformidad generalmente está asociada con la escala de trabajo (Higy y Musy 2000; Wechsler 2007; Zwenzner y Voigt 2009).

Con respecto al modelo de pendientes, este resultó con una gran complejidad como era de esperarse, con las pendientes más pronunciadas en el costado occidental de la SMO y las más suaves, en términos generales, del lado este de la cordillera, donde también se encuentran las zonas con mayor perturbación. El modelo coincide con la descripción de González-Elizondo et al. (2012), quienes mencionan que el flanco occidental de la SMO es sumamente escarpado, con numerosas y profundas hondonadas (llamadas “barrancas” en Sonora y Chihuahua, “quebradas” en Durango y Sinaloa y “cañones” o “barrancas” en Zacatecas y norte de Jalisco), en algunos sitios de más de 1800 m de profundidad. Mientras que las laderas de su vertiente oriental son mucho menos abruptas por la gradual diferencia de niveles en su transición hacia el Altiplano. Conocer estos factores físicos que controlan el tiempo de flujo sobre el terreno, y la influencia directa en la magnitud de las avenidas y crecidas, es de vital importancia para la toma de decisiones en procesos de planeación, considerando que estos factores tienen una influencia directa con la infiltración, el escurrimiento superficial, la humedad del suelo y aporte de los cauces en la recarga del agua subterránea.

Finalmente, cabe mencionar que a pesar de la complejidad y extensión de la zona de estudio, las actuales técnicas de Geomática permiten contar con aproximaciones representativas del paisaje y de los rasgos hidrológicos más característicos de la SMO y regiones similares. En particular se hace referencia a la caracterización paisajística, comparable con los resultados del programa *North American Land Change Monitoring System* (NALCMS) y del modelo de drenaje en comparación con la Red Hidrográfica escala 1: 50 000 de INEGI.

Considerando que los insumos requeridos para este tipo de análisis se encuentran disponibles a muy bajo costo, e inclusive de forma gratuita, y considerando además la simplicidad de los métodos, se garantiza su repetitividad y reproducibilidad, lo que a la larga puede generar un eficiente sistema de monitoreo.

Con esas consideraciones, concluimos que es precisamente la ubicación geográfica y la complejidad topográfica, lo que ha permitido la conservación de la cobertura vegetal natural en condiciones adecuadas para la permanencia de la trucha dorada mexicana (objeto de la presente obra), a lo largo de su área de distribución en la SMO y es con estudios como el presente, como será posible identificar cambios en las condiciones ambientales de su hábitat, sitios con potencial para la distribución de la trucha dorada mexicana y otras especies del género, así como sitios con potencial para la reintroducción e inclusive cultivo de estas especies en la región, sin poner en riesgo su diversidad genética, que hace de este

grupo de especies ícticas, endémicas de la región, un importante recurso natural que debe preservarse.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen los apoyos otorgados por la CONABIO (Ref. JM058) y el CONACYT (Ref. CB-2010-01-152893) para la realización del presente trabajo.

## REFERENCIAS

- Andrades Filho, C.O., E.H. Hayakawa e B.R. Prado. 2009. Avaliação comparativa da qualidade da extração automática de drenagens a partir de dados SRTM provenientes de diferentes fontes. *Proceedings of the 13th Brazilian Symposium of Applied Physics Geography*, Viçosa, Brazil. pp. 1–15.
- Ball, G.H. and D. J. Hall. 1965. Isodata, a novel method of data analysis and pattern classification. *Technical Report*. Menlo Park, CA: Stanford Research Institute.
- Barton, D.R., W.D. Taylor and R.M. Biette. 1985. Dimensions of riparian buffer strips required to maintain trout habitat in southern Ontario streams. *North American Journal of Fisheries Management*. 5(3A): 364–378.
- Biswas, S., S. Sudhakar and V.R. Desai. 2002. Remote sensing and geographic information system based approach for watershed conservation. *Journal of Surveying Engineering*. 128: 108–124.
- Congalton, R.G. and K. Green. 2009. *Assessing the accuracy of remotely sensed data. Principles and practices*. CRC Press. 2a ed. EUA. 172 p.
- Cotler, A.H., A. Garrido-Pérez, R. Mondragón-Bonilla y A. Díaz-Ponce. 2007. Delimitación de cuencas hidrográficas de México, a escala 1:250,000, INEGI-INE-CONAGUA. *Documento técnico*. México. 35 p.
- Descroix L., J.L. González Barrios y J. Estrada Avalos (Eds.). 2004. *La Sierra Madre Occidental, una fuente de agua amenazada*. Ediciones INIFAP- IRO. Gómez Palacio, Durango, México. 300 p.
- González-Elizondo, M.S., M. González-Elizondo, J.A. Tena-Flores, L. Ruacho-González e I.L. López-Enríquez. 2012. Vegetación de la Sierra Madre Occidental, México: una síntesis. *Acta botánica mexicana*. 100: 351-403.
- Hernández-Guzmán, R. 2006. Caracterización física de la sub-cuenca Río San Pedro, Nayarit, México a través de sistemas de información geográfica y modelos digitales de elevación. *Tesis de Maestría*. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo. 112 p.
- Higy, C. and A. Musy. 2000. Digital terrain analysis of the Haute-Mentue catchment and scale effect for hydrological modelling with TOPMODEL. *Hydrology and Earth System Sciences*. 4: 225–237.
- Jenson, S. and J. Domingue. 1988. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 54(11): 1593-1600.
- Khan, M.A., V.P. Gupta and P.C. Moharana. 2001. Watershed prioritization using remote sensing and geographic information system: a case study from Guhiya, India. *Journal of Arid Environments*. 49: 465-475
- Lin, W.T., W.C. Chou, D.Y. Lin, P.H. Huang and J.S. Tsai. 2006. Automated suitable drainage network extraction from digital elevation models in Taiwan's upstream watersheds. *Hydrological processes*. 20: 289-306

- Mantelli, L.R., B.J. Magalhaes and M.B. Dantas. 2011. Assessing ecological risk through automated drainage extraction and watershed delineation. *Ecological Informatics*. 6(5): 325-331
- Martin, R.W. and J.T. Petty. 2009. Local stream temperature and drainage network topology interact to influence the distribution of smallmouth bass and brook trout in a Central Appalachian watershed. *Journal of Freshwater Ecology*. 24(3): 497-508
- Navar, J. 2009. Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico. *Forest Ecology and Management*. 257: 427-434
- Penaluna, B. 2016. Conservación de truchas del Pacífico. En: Ruiz-Luna A. y F.J. García-De León (eds.). *La trucha dorada mexicana*. Cap. 14.
- Ramírez Huerta, A.L. 2015. Modelación y caracterización ambiental del área de distribución potencial de *Oncorhynchus chrysogaster* (Needham y Gard, 1964) en las cuencas de los ríos Sinaloa y Culiacán. *Maestría en Ciencias*. CIAD-Mazatlán. 74 p.
- Richards, J.A. and X. Jia. 1999. *Remote sensing digital image analysis*. Springer, New York. 363 p.
- Ruiz-Luna, A., C.A. Berlanga-Robles, R. Hernández-Guzmán y M.A. Escalante-Sánchez. 2013. Modelación de la distribución de truchas nativas de la Sierra Madre Occidental y su relación con la estructura del paisaje adyacente. *Informe técnico final*. Proyecto CONABIO JM058. 49 p.
- Strahler, A.N. 1964. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. En: Chow, V.T. (ed.). *Handbook of Applied Hydrology: a compendium of water resources technology*. McGraw-Hill, New York. Sección 4. pp. 39 - 75.
- Tarboton, D.G., R.L. Bras and I. Rodríguez-Iturbe. 1991. On the extraction of channel networks from digital elevation data. *Hydrological Processes*. 5: 81–100.
- Viramontes D., E. Anaya, C. García, J. Poulénard, H. Barral, L. Macias y M.G. Rodríguez-Camarillo. 2014. Demasiado ganado y demasiados leñadores: Una economía minera. En: Descroix L., J.L. González Barrios y J. Estrada Avalos (Eds.). *La Sierra Madre Occidental, una fuente de agua amenazada*. Ediciones INIFAP- IRO. Gómez Palacio, Durango, México. pp. 183 – 193.
- Wechsler, S.P. 2007. Uncertainties associated with digital elevation models for hydrologic applications: a review. *Hydrology Earth System Science*. 11: 1481–1500.
- Zwenzner, H. and S. Voigt. 2009. Improved estimation of flood parameters by combining space based SAR data with very high resolution digital elevation data. *Hydrology Earth System Science*. 13: 567–576.



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

---

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

Los peces de la familia Salmonidae son especies de agua fría que se encuentran naturalmente en las regiones subártica y templada del hemisferio norte, tanto en el océano Pacífico como en el Atlántico. Las truchas de la Sierra Madre Occidental (SMO) en México son las poblaciones nativas más sureñas en el rango mundial de esta familia. Por tanto, muestran los límites fisiológicos de este importante grupo de peces y nos previenen sobre las condiciones que va a enfrentar un alto porcentaje de poblaciones de truchas y salmones en Norteamérica (género *Oncorhynchus*). Pero, en las últimas décadas, los métodos moleculares han dejado en claro que no hay solamente una especie de trucha en la SMO, sino que existen varias con historias evolutivas distintas.

En 2002, el ilustre ictiólogo Robert J. Behnke escribió “El grupo de truchas nativas de la SMO es el más diverso y el menos conocido de Norteamérica”. La principal inquietud de Behnke era la imposibilidad de conservar a estos grupos sin un entendimiento profundo de la diversidad existente (Behnke 2002). En ese mismo año, el grupo binacional “Truchas Mexicanas” comenzó la ardua tarea de explorar la SMO en búsqueda de una mayor comprensión sobre estos increíbles peces. Desafortunadamente, más de 10 años después, la afirmación de Behnke continua siendo, en parte, verdadera, ya que sólo una especie de trucha nativa de la SMO ha sido formalmente descrita: *O. chrysogaster*, la trucha dorada mexicana. Sin embargo, gracias al esfuerzo del grupo “Truchas Mexicanas” en los últimos años, mucha información ha sido generada para entender la historia evolutiva y las relaciones genéticas entre y dentro de estos grupos. En este capítulo presentamos un compendio de lo que hemos aprendido y damos perspectivas futuras sobre la biodiversidad molecular de esta herencia natural de importancia mundial.

#### *El género Oncorhynchus*

Los patrones evolutivos de la diversidad de peces de agua dulce son el resultado de una gran actividad geológica, cambios climáticos y de factores como el aislamiento geográfico, las oportunidades ecológicas de dispersión y la estabilidad de las poblaciones a largo plazo. Las especies del género *Oncorhynchus*, las cuales han evolucionado en ambientes extremadamente dinámicos (Montgomery 2000), provienen de un ancestro común (Stearley y Smith 1993), es decir, un grupo monofilético que incluye 11 especies descritas aproximadamente y cerca de 28 subespecies (Behnke 2002). En América Noroccidental, el género está dividido en dos subgrupos: los salmones del Pacífico que incluye a los salmones coho (*O. kisutch*), real (*O. tshawytscha*), rojo (*O. nerka*), chúm (*O. keta*) y rosado (*O. gorbuscha*); y las truchas del Pacífico que incluye a las truchas arcoíris (*O. mykiss*), degollada (*O. clarki*), gila (*O. gilae*), apache (*O. apache*) y dorada mexicana (*O. chrysogaster*), así como a un diverso complejo de truchas no descritas que habita en la Sierra Madre Occidental en México (Behnke 2002).

### *Truchas del Pacífico*

La taxonomía y clasificación de las especies que constituyen al grupo de las truchas del Pacífico ha estado en constante debate debido a la complejidad de sus historias evolutivas y plasticidad fenotípica, las cuales han estado influenciadas por factores geológicos y climáticos como la actividad volcánica, los movimientos de las capas tectónicas, glaciaciones, ciclos de sequías e inundaciones, entre otros (Cavender 1986; Minckley et al. 1986). Las características morfológicas y caracteres de su historia de vida (como la iteroparidad o capacidad de los organismos de reproducirse más de una vez a lo largo de la vida) fueron el fundamento inicial para clasificar al complejo de truchas del Pacífico junto con el grupo de los salmones del Atlántico dentro del género *Salmo* (Behnke 1972; Miller y Brannon 1982; Wilson 1997). Hacia finales del siglo pasado, nuevos rasgos morfológicos y datos moleculares se utilizaron para reclasificar al grupo dentro del género *Oncorhynchus* con los salmones del Pacífico (Smith y Stearley 1989). La hipótesis más difundida plantea que los géneros *Oncorhynchus* y *Salmo* divergieron a partir de un ancestro común durante el Mioceno Medio, hace alrededor de 15 a 20 millones de años atrás (Behnke 1992; Devlin 1993), sin embargo, otros autores han propuesto al género *Salvelinus* y no *Salmo*, como taxón hermano de *Oncorhynchus* (Oakley y Phillips 1999; Wilson y Turner 2009). Evidencias moleculares, apoyadas por el registro fósil, indican que hacia finales del Mioceno, seis millones de años atrás, el género *Oncorhynchus* se había dividido en dos distintos linajes: los salmones del Pacífico y las truchas del Pacífico y que durante el Plioceno Medio tuvo lugar la radiación de especies dentro de ambos grupos (Cavender y Miller 1972; Behnke 1992; Shedlock et al. 1992; Stearley y Smith 1993; Wilson y Turner 2009). La divergencia del complejo de truchas del Pacífico en dos linajes filogenéticamente distintos (el complejo arcoíris (*O. mykiss*) y el complejo degollada (*O. clarki*)) se dio durante el Pleistoceno Tardío (Behnke 1992; Crespi y Fulton 2004). El registro fósil indica que, durante los máximos climáticos fríos del Pleistoceno, la distribución de algunas formas de salmónidos anádromos se extendía hasta la Mesa Central Mexicana, cerca de los 20° de latitud Norte (Cavender y Miller 1982; Miller y Smith 1986).

### *Truchas mexicanas de la Sierra Madre Occidental*

La Sierra Madre Occidental es muy compleja geológicamente, por lo tanto, su topología y condiciones climáticas son muy diversas, resultando en una gran biodiversidad y endemismos en ambientes tanto terrestres como acuáticos (Brown 1994). Desafortunadamente, la complejidad del terreno y las actividades ilegales en la Sierra han limitado el avance del conocimiento sobre su biodiversidad, especialmente en zonas altas (arriba de 1500 msnm) donde habitan las truchas nativas (De los Santos-Camarillo 2008). Aunado a esto, el registro fósil de salmónidos en la SMO es escaso, por lo que es difícil hacer una reconstrucción precisa de la expansión y colonización de los salmónidos en este territorio sureño. La hipótesis más aceptada para explicar su dispersión sugiere que una forma de trucha anádroma ancestral migró desde el Pacífico Norte, en la costa occidental de Estados Unidos, hacia el Golfo de California, donde se refugió de las temperaturas bajas extremas durante las glaciaciones del Pleistoceno y se adentró a las cuencas hidrográficas que desembocan al Golfo. Al término de la última glaciación y con el aumento en la temperatura del océano y las partes bajas de los ríos, las truchas quedaron aisladas en las zonas altas de las cuencas el tiempo suficiente para dar origen a las truchas gila (*O. gilae*), apache (*O. apache*), dorada mexicana (*O. chrysogaster*) y probablemente, a las otras truchas nativas de la SMO (Behnke 1992).

La primera publicación que hace referencia a truchas en territorio Mexicano data del final del siglo XIX (Cope 1886), donde se hace una breve descripción de dos especímenes que presentan dientes en el hueso basihial, característica comúnmente encontrada en las truchas degolladas (*O. clarki*). Sin embargo, las descripciones de los especímenes así como las localidades de colecta son ambiguas y nunca se pudo corroborar, ya que los especímenes se perdieron y no fueron analizados por otros expertos (Hendrickson et al. 2002). A finales de los 1800 y principios de los 1900, varios científicos y naturalistas como C. Lumholtz, S. E. Meek y A. Leopold, visitaron la SMO en busca de truchas nativas con exitosos resultados (Hendrickson et al. 2002), sin embargo, ninguno hizo una descripción formal de los organismos encontrados. Es hasta mediados del siglo pasado que P. R. Needham y R. Gard analizan 243 especímenes de truchas nativas de la SMO y hacen una recopilación completa y detallada de la información existente (Needham 1955, Needham y Gard 1959). Además, son los primeros en describir y nombrar formalmente a la única especie reconocida actualmente, *Oncorhynchus chrysogaster*, la trucha dorada mexicana (Needham y Gard 1964), con especímenes recolectados en un tributario del río Fuerte en el estado de Durango.

A partir del análisis de especímenes recolectados en 1997 y 2001 se determinó que la distribución de la trucha dorada mexicana corresponde a tres cuencas de la SMO: el río Fuerte, el río Sinaloa y el río Culiacán en los estados de Durango y Chihuahua (Nielsen y Sage 2001; Hendrickson et al. 2002, Fig. 1). Las múltiples expediciones realizadas en la SMO durante décadas reportan grupos de truchas nativas no descritas distribuidos en cuencas tanto al norte como al sur de la distribución de *O. chrysogaster*, en cuatro cuencas hacia el norte: los ríos Mayo, Yaqui, Casas Grandes y Conchos; y en cinco cuencas hacia el sur: los ríos San Lorenzo, Piaxtla, Presidio, Baluarte y Acaponeta (Behnke 2002; Hendrickson et al. 2002, 2006; Ruiz-Campos et al. 2003, Fig. 1) y posiblemente hasta el río San Pedro Mezquital (Espinosa-Pérez, comunicación personal<sup>1</sup>).

#### *Estudios Genéticos*

A pesar de la falta de descripciones formales de estos grupos, existe un gran número de estudios que han investigado las relaciones evolutivas dentro del complejo de truchas nativas de la SMO usando diversos métodos. Uno de los trabajos más completos consiste en un análisis de variación morfológica utilizando distancias de Mahalanobis, que incluye múltiples grupos de truchas nativas del Noroeste de México abarcando casi toda su distribución (Ruiz-Campos et al. 2003). En este estudio se observó que las truchas que habitan la SMO están presumiblemente divididas en cuatro grupos. Encontraron al grupo de *O. chrysogaster* dividido en dos subgrupos: por un lado, las truchas del río Sinaloa y por otro, los ríos Fuerte y Culiacán junto con truchas del río Piaxtla. El tercer grupo conformado por truchas de los ríos San Lorenzo, Baluarte y Acaponeta y por último, las truchas de los ríos Yaqui y Mayo.

---

<sup>1</sup> Héctor Espinosa Pérez. Colección Nacional de Biología. Instituto de Biología. Universidad Nacional Autónoma de México. (CNPE – IBUNAM).

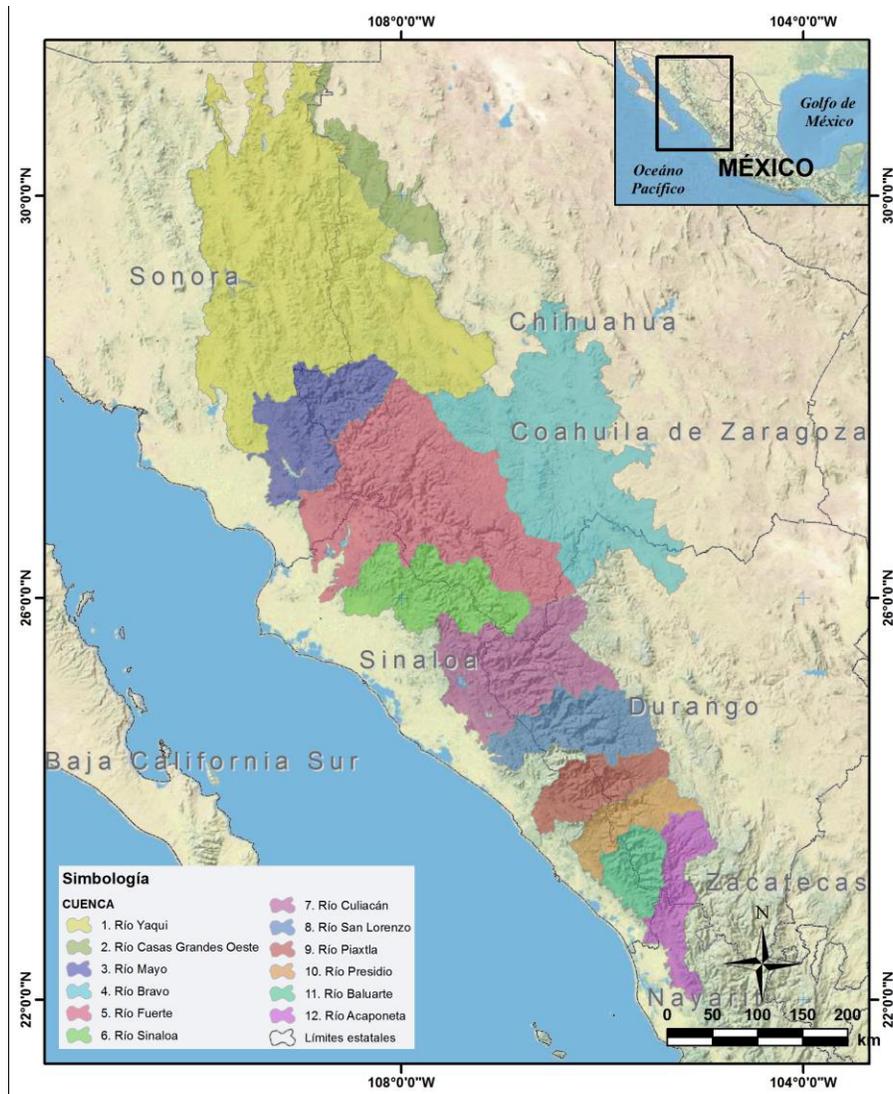


Figura 1. Localización geográfica de las cuencas hidrológicas, delimitadas por la provincia fisiográfica Sierra Madre Occidental, donde se han reportado truchas nativas.

El primer estudio del género *Oncorhynchus* que incluyó una población de truchas del noroeste mexicano en un análisis filogenético utilizando herramientas moleculares, fue realizado por Loudenslager y colaboradores (1986). El objetivo de ese trabajo era analizar la relación entre las truchas gila, apache y las del río Mayo e identificar las diferencias entre éstas y las truchas arcoíris y degollada, a partir del análisis de 36 alozimas polimórficas. Los resultados mostraron que las truchas gila, apache y las del río Mayo están más relacionadas con la trucha arcoíris que con la degollada. Además, encontraron que gila y apache son grupos hermanos y que las truchas del río Mayo están más emparentadas con las arcoíris que con cualquier otro grupo analizado (Loudenslager et al. 1986), lo que apoya la hipótesis de Miller (1950) y Needham y Gard (1959), la cual sugiere que el grupo de truchas arcoíris (también llamado serie arcoíris que incluye a las truchas arcoíris, gila, apache y del río Mayo) y el grupo de truchas degolladas (serie degolladas) representan dos linajes evolutivos bien definidos dentro del género *Oncorhynchus* (Loudenslager et al. 1986).

Diez años después, Nielsen et al. (1997) utilizaron la región control del ADN mitocondrial y tres marcadores microsatelitales nucleares en un análisis biogeográfico que incluyó 15 poblaciones de California (*O. mykiss*), una población de la Sierra de San Pedro Mártir, Baja California (*O. mykiss nelsoni*) y una población del río Yaqui en la SMO. La conclusión de este análisis fue que las truchas del río Yaqui son considerablemente diferentes a cualquiera de los otros grupos analizados. Al año siguiente, la misma autora y otros realizaron un análisis filogenético utilizando la región control del ADN mitocondrial incluyendo dos especies de salmones del Pacífico (real y coho), cuatro subespecies de trucha degollada, gila, apache, nueve subespecies de trucha arcoíris y la misma población del río Yaqui (Nielsen et al. 1998). Los resultados que obtuvieron muestran una robusta diferenciación entre especies y son consistentes con los resultados de estudios previos. Además, las truchas del río Yaqui se agruparon con las otras especies consideradas dentro de la serie arcoíris y no con las degolladas ni con los salmones del Pacífico. Curiosamente, Nielsen et al. (1998) encontraron una delección en la secuencia de nucleótidos de la región control en cuatro individuos de truchas del río Yaqui. Este tipo de delecciones, sólo se ha reportado previamente en humanos y se relaciona con enfermedades mitocondriales, pero en ese trabajo no se observaron síntomas de este tipo de enfermedad en las truchas analizadas.

Nielsen y Sage (2001) en un análisis de 11 marcadores microsatelitales, incluyeron peces de los ríos Yaqui, Mayo y Casas Grandes y los compararon con poblaciones de la trucha dorada mexicana de los ríos Sinaloa y Culiacán. Los resultados de este estudio apoyaron la idea de los grupos de truchas de la SMO como filogenéticamente independientes y no como subespecies de trucha arcoíris como se había sugerido anteriormente (Behnke 1992).

El primer estudio genético molecular que incluyó muestras de la mayoría de las cuencas de la Sierra Madre Occidental donde se han reportado truchas nativas fue realizado por Camarena-Rosales et al. (2007). En este estudio, se analizaron polimorfismos en fragmentos de restricción (RFLP) en la región entre el gen del citocromo b y la región control del ADN mitocondrial. Los resultados obtenidos en este trabajo fueron parcialmente consistentes con lo reportado en el análisis morfológico de Ruiz-Campos y colaboradores (2003). Camarena-Rosales et al. (2007) también proponen cuatro grupos de las truchas de la SMO. Ambos estudios reconocen como dos grupos independientes a las truchas de los ríos Yaqui y Mayo y a la trucha dorada mexicana (subdividida en dos: las truchas del río Sinaloa y las de los ríos Fuerte y Culiacán). Sin embargo, los datos moleculares separan a las truchas del río Piaxtla en un grupo independiente.

Por otra parte, De Los Santos-Camarillo (2008) expandió el rango de muestreo para abarcar más poblaciones, incluyendo a todas las cuencas donde se han reportado truchas nativas en el Noroeste de México y analizó la diversidad genética utilizando marcadores microsatelitales y dendogramas mediante el método del vecino más cercano. De los Santos-Camarillo (2008) encontró una gran diversidad y propuso siete grupos genéticamente homogéneos: Casas Grandes/Yaqui-Bavispe, Yaqui-Sirupa/Mayo, Conchos, San Lorenzo/Piaxtla, Acaponeta/Baluartes/Presidio, un grupo en el arroyo La Sidra de la cuenca del San Lorenzo y un grupo en el arroyo Aparique de la cuenca del Fuerte (estos dos últimos y las truchas del río Acaponeta fueron posteriormente identificados como posibles híbridos con la trucha arcoíris introducida (Abadía-Cardoso et al. 2015).

Recientemente, Abadía-Cardoso et al. (2015) realizaron el estudio más exhaustivo existente sobre las relaciones filogenéticas de las truchas que habitan en la SMO. En este

trabajo, se utilizaron dos clases de marcadores moleculares: 93 polimorfismos nucleotídicos simples (SNPs) y 18 loci microsatelitales; y una vez más se incluyeron muestras de todas las cuencas. Los objetivos de ese trabajo fueron documentar la biodiversidad genética y entender las relaciones filogenéticas de las truchas nativas del noroeste mexicano, pero además, analizar estos grupos en un contexto geográfico más amplio, comparándolas con otras especies y subespecies como las truchas arcoíris, degollada, gila y apache. En ese estudio se confirmó la gran diversidad genética observada en trabajos previos en el complejo de truchas de la SMO (Camarena-Rosales et al. 2007; De los Santos-Camarillo 2008) y se definieron cuatro linajes genéticos a nivel de especie correspondientes a, 1) la trucha dorada mexicana (*O. chrysogaster*), 2) las truchas de los ríos Yaqui, Casas Grandes y Mayo, 3) las truchas de los ríos Piaxtla y San Lorenzo y 4) las truchas de los ríos Presidio y Baluarte (Fig. 2). Además, se identificó un origen mixto entre *O. chrysogaster* y el complejo Yaqui-Casas Grandes-Mayo de las truchas de los tributarios del río Conchos (el único río con truchas del género *Oncorhynchus* que desemboca al Golfo de México).

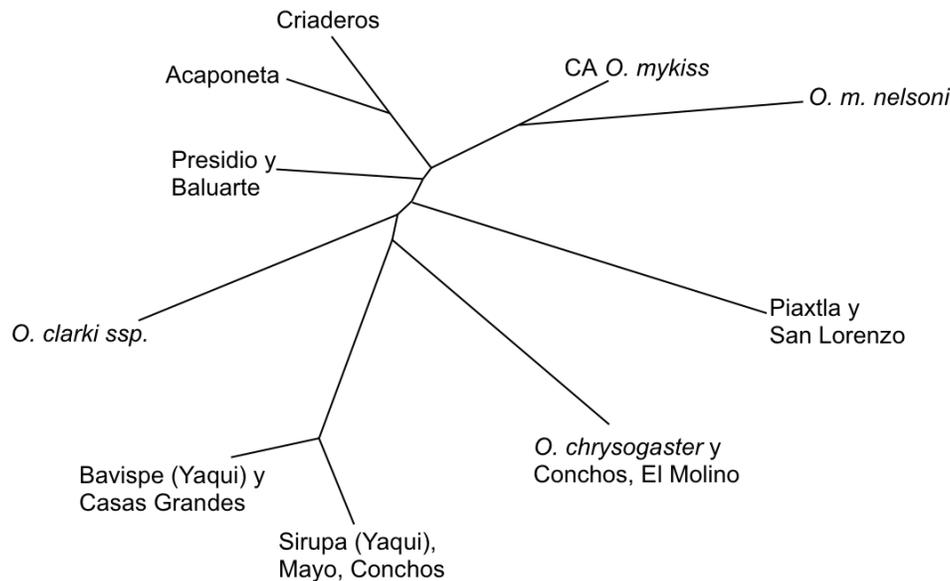


Figura 2. Dendrograma de las relaciones evolutivas entre las poblaciones de truchas de las distintas cuencas del Noroeste de México, la trucha arcoíris costera, diversas subespecies de trucha degollada y truchas de criaderos establecidos en México y California (CA).

Finalmente, García-De León et al. (en preparación) hacen un estudio con el objetivo de identificar Unidades Evolutivas Significativas (UES) como un instrumento indispensable para iniciar prácticas de conservación. En este trabajo, resaltan la carencia de nombres científicos y las amenazas de extinción del complejo de truchas nativas mexicanas debido a la fragmentación del hábitat e introducción de truchas exóticas, que obligan a tomar medidas precautorias urgentes para evitar la extinción de este valioso recurso íctico. Para ello, utilizaron 11 loci microsatelitales y estimaron parámetros poblacionales tales como flujo genético, tamaño efectivo de poblaciones y cuello de botellas entre las diferentes poblaciones del complejo de truchas mexicanas en el noroeste de México. Con estos análisis se identificaron siete Unidades Evolutivas Significativas en la SMO (una para las truchas norteñas de las cuencas Casas Grandes, Mayo y Yaqui; una para el norte del río

Conchos; otra para *O. chrysogaster*; dos para las truchas de los ríos San Lorenzo y Piaxtla y dos entre los ríos Presidio, Baluarte y Acaponeta) y una en la Península de Baja California.

### *El Futuro*

El desarrollo y la disponibilidad cada vez mayor de tecnología de secuenciación masiva de ADN, está revolucionando el campo de la biología, tanto por la cantidad de datos que se pueden generar en un corto tiempo, como por la posibilidad de diseccionar rasgos complejos sobre la fisiología y el comportamiento en sus fundamentos genéticos y ambientales (e.g., Barson et al. 2015; Prince et al. 2016). Con el poder de instrumentos que pueden generar millones de secuencias en pocos días, ahora es posible caracterizar miles de genes en un grupo de animales y explorar el genoma entero para evaluar correlaciones entre variables ambientales con variación en genes específicos y regiones cromosómicas. Es decir, ahora es posible entender de forma precisa los fundamentos biológicos de las adaptaciones a condiciones ecológicas y ambientales locales.

La trucha dorada mexicana y los otros grupos de truchas nativas de México habitan de forma exitosa en regiones con las condiciones ambientales más extremas posibles para peces salmónidos, un grupo de importancia mundial por su papel en pesquerías y acuicultura en todos los continentes. Por lo tanto, es de importancia mundial entender las adaptaciones que les permiten prosperar en condiciones sub-tropicales, ya que son un valioso recurso económico a nivel global. Así como sucedió con el teosinte y su primo el maíz (Fedoroff 2003), el conocer y entender los genes involucrados en las adaptaciones de las truchas mexicanas a estos ambientes extremos, puede ayudar a mejorar el cultivo de su prima la trucha arcoíris. Actualmente, con el uso de estas nuevas tecnologías, se está trabajando para evaluar la relación entre la diversidad y estructura genética neutral y adaptativa de la trucha dorada mexicana con la estructura del paisaje, lo que ayudará a entender las causas que han permitido el aislamiento y evolución independiente de las poblaciones de trucha dorada mexicana en los ríos Fuerte, Culiacán y Sinaloa y eventualmente, se podrá extender a otras cuencas.

Para conservar el complejo de truchas en el extremo sur de su distribución global, es crítico continuar revelando la biodiversidad molecular que guardan, para entender mejor los patrones de divergencia histórica representados por marcadores genéticos neutrales y adaptativos y dilucidar los fundamentos biológicos que resultan en el éxito en ambientes subtropicales. Una visión sintética de la diversidad de truchas mexicanas permitirá el manejo eficaz de esfuerzos de conservación, por ejemplo, sugiriendo grupos prioritarios de conservación (Abadía-Cardoso et al. 2015), donde se considere un balance entre las edades de los linajes evolutivos con las adaptaciones únicas. En casos de reintroducción a ecosistemas restaurados, estas consideraciones son esenciales en la selección de poblaciones donantes para asegurar su éxito. Además, se deben proponer biotecnologías para el cultivo de formas locales, reduciendo el riesgo de la introducción de especies exóticas (ver Barriga-Sosa et al. Capítulo 11, esta obra).

Mientras tanto, los esfuerzos para delinear y describir formalmente nuevas especies, subespecies y Unidades Evolutivas Significativas, con la ayuda de los robustos datos de los marcadores genéticos, deberían continuar. La tendencia humana de nombrar cosas es un reflejo de su valor. El reconocer y nombrar formalmente estos grupos de truchas tan diversos podría aumentar el valor social de estos importantes peces.

## 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.
- Barson, N.J., T. Aykanat, K. Hindar, M. Baranski, G.H. Bolstad, P. Fiske, C. Jacq, A.J. Jensen, S.E. Johnston, S. Karlsson, M. Kent, T. Moen, E. Niemelä, T. Nome, T.F. Næsje, P. Orell, A. Romakkaniemi, H. Sægrov, K. Urdal, J. Erkinaro, S. Lien and C.R. Primmer. 2015. Sex-dependent dominance at a single locus maintains variation in age at maturity in salmon. *Nature*. 528: 405–408.
- Barriga-Sosa, I.A., J.L. Arredondo-Figueroa, G. Ingle de la Mora y F.J. 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. 1972. The systematics of salmonid fishes of recently glaciated lakes. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*. 29: 639-671.
- Behnke, R.J. 1992. *Native trout of western North America*. American Fisheries Society Monograph 6. USA.
- Behnke, R.J. 2002. *Trout and salmon of North America*. Chanticleer press, inc., New York.
- Brown, D.E. (ed.). 1994. *Biotic communities: Southwestern United States and Northwestern Mexico*. The University of Utah Press, Salt Lake City.
- 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. 2007. Mitochondrial haplotype variation in wild trout populations (Teleostei: Salmonidae) from northwestern Mexico. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*. 18(1): 33–45.
- Cavender, T.M. and R.R. Miller. 1982. *Smilodonichthys rastrosus: a new Pliocene salmonid fish from western United States*. Museum of Natural History, University of Oregon.
- Cavender, T.M. 1986. Review of the fossil history of North American freshwater fishes. En: Hocutt, C.H. and E.O. Wiley (eds.). *The zoogeography of North American Freshwater Fishes*. John Wiley and Sons, New York. pp. 699–724.
- Crespi, B.J. and M.J. Fulton. 2004. Molecular systematics of Salmonidae: combined nuclear data yields a robust phylogeny. *Molecular Phylogenetics and Evolution*. 31(2): 658–679.
- Cope, E.D. 1886. The most southern salmon. *American Naturalist*. 20: 735.
- De los Santos-Camarillo, A.B. 2008. Definición de unidades taxonómicas en el complejo de truchas del noroeste de México, mediante el análisis de marcadores microsatélites. *Tesis de Maestría*. Centro de Investigaciones Biológicas del Noreste, La Paz, Baja California Sur.
- Devlin, R.H. 1993. Sequence of sockeye-salmon type-1 and type-2 growth-hormone genes and the relationship of rainbow-trout with Atlantic and Pacific salmon. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 50(8):1738–1748.
- Fedoroff, N.V. 2003. Prehistoric GM corn. *Science*. 302(5648): 1158-1159.
- García-De León, F.J., C.B. Dillman, A.B. De los Santos-Camarillo, A.L. George, F. Camarena-Rosales, I. de los A. Barriga-Sosa and R.L. Mayden. (en preparación). First steps towards the identification of Evolutionarily Significant Units in Mexican native trout: an assessment of microsatellite variation. En preparación.

- Hendrickson, D.A., H. Espinosa Pérez., L.T. Findley, W. Forbes, J.R. Tomelleri, R.L. Mayden, J.L. Nielsen, B. Jensen, G. Ruiz Campos, A. Varela Romero, A. van der Heiden, F. Camarena and F.J. García-De León. 2002. Mexican native trouts: a review of their history and current systematic and conservation status. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*. 12: 273-316.
- 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. Mcnyset, 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.
- Loudenslager, E.J., J.N. Rinne, G.A. E. Gall and R.E. David. 1986. Biochemical genetic-studies of native arizona and new-mexico trout. *Southwestern Naturalist*. 31(2): 221–234.
- Miller, R.R. 1950. Notes on the cutthroat and rainbow trouts with the description of a new species from the Gila River, New Mexico. *Occasional Papers of the Museum of Zoology*. 529:1–42.
- Miller, R.J. and E.L. Brannon. 1982. The origin and development of life history patterns in Pacific salmonids. En: Brannon E.L. and E.O. Salo (eds.). *Proceedings of the salmon and trout migratory behavior symposium*. School of Fisheries, University of Washington. pp. 296–309.
- Miller, R.R., and M.L. Smith. 1986. Origin and geography of the fishes of central Mexico. En: Hocutt, C.H. and E.O. Wiley (eds.). *The zoogeography of North American Freshwater Fishes*. John Wiley and Sons, New York. pp. 487 - 517.
- Minckley, W.L., D.A. Hendrickson and C.E. Bond. 1986. Geography of western North American freshwater fishes: description and relations to intracontinental tectonism. En: Hocutt, C.H. and E.O. Wiley (eds.). *The zoogeography of North American Freshwater Fishes*. John Wiley and Sons, New York. pp. 519 - 613.
- Montgomery, D.R. 2000. Coevolution of the Pacific salmon and Pacific Rim topography. *Geology*. 28(12): 1107–1110.
- Needham, P.R. 1955. Trail of the Mexican trout. *Pacific Discovery*. 8(4): 18–24.
- Needham, P.R. and R. Gard. 1959. Rainbow trout in Mexico and California, with notes on the Cutthroat Series. University of California Publications in *Zoology*. 67:1-149.
- Needham, P.R. and R. Gard. 1964. A new trout from central Mexico: *Salmo chrysogaster*, the Mexican golden trout. *Copeia*. 1964(1):169–173.
- Nielsen, J.L., M.C. Fountain, J.C. Favela, K. Cobble and B.L. Jensen. 1998. *Oncorhynchus* at the southern extent of their range: a study of mtDNA control-region sequence with special reference to an undescribed subspecies of *O. mykiss* from Mexico. *Environmental Biology of Fishes*. 51(1): 7–23.
- Nielsen, J.L., M.C. Fountain and J.M. Wright. 1997. Biogeographic analysis of Pacific trout (*Oncorhynchus mykiss*) in California and Mexico based on mitochondrial DNA and nuclear microsatellites. En: Kocher, T.D. and C.A. Stepien (eds.). *Molecular systematics of fishes*. Academic Press, San Diego. pp. 53–73.
- Nielsen, J.L. and G.K. Sage. 2001. Microsatellite analyses of the trout of northwest

- Mexico. *Genetica*. 111(1-3):269–278.
- Oakley, T.H. and R.B. Phillips. 1999. Phylogeny of salmonine fishes based on growth hormone introns: Atlantic (*Salmo*) and Pacific (*Oncorhynchus*) salmon are not sister taxa. *Molecular phylogenetics and evolution*. 11(3): 381–93.
- Prince, D.J., S.M. O'Rourke, T.Q. Thompson, O.A. Ali, M. Arciniega, H.S. Lyman, I.K. Saglam, A.J. Clemento, T.J. Hotaling, A.P. Kinziger, A.P. Spidle, J.C. Garza, D.E. Pearse and M.R. Miller. 2016. The evolutionary basis of premature migration in Pacific salmon highlights the utility of genomics for informing conservation. *bioRxiv*.
- Ruiz-Campos, G., F. Camarena-Rosales, A. Varela-Romero, S. Sánchez-Gonzales and J. de la Rosa-Velez. 2003. Morphometric variation of wild trout populations from northwestern Mexico (Pisces: Salmonidae). *Reviews in Fish Biology and Fisheries*. 13(1): 91–110.
- Shedlock, A.M., J.D. Parker, D.A. Crispin, T.W. Pietsch and G.C. Burmer. 1992. Evolution of the salmonid mitochondrial control region. *Molecular Phylogenetics and Evolution*. 1(3): 179–192.
- Smith, G.R. and R.F. Stearley. 1989. The classification and scientific names of rainbow and cutthroat trouts. *Fisheries*. 14(1): 4–10.
- Stearley, R.F. and G.R. Smith. 1993. Phylogeny of the Pacific trout and salmon (*Oncorhynchus*) and genera of the family Salmonidae. *Transactions of the American Fisheries Society*. 122(1): 1–33.
- Wilson, M.F. 1997. Variation in salmonid life histories: patterns and perspectives. *Research Papers PNW-RP-498*. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. 50 p.
- Wilson, W.D. and T.F. Turner. 2009. Phylogenetic analysis of the Pacific cutthroat trout (*Oncorhynchus clarki* ssp.: Salmonidae) based on partial mtDNA ND4 sequences: A closer look at the highly fragmented inland species. *Molecular Phylogenetics and Evolution*. 52(2): 406–415.

## **4. 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*

### **INTRODUCCIÓN**

El conocimiento de la biología y ecología de cualquier especie requiere de la integración de diversos aspectos básicos relativos a su reproducción, alimentación y crecimiento, además de los requerimientos ambientales que permiten su distribución y su interacción con otras especies. En ese sentido, estudiar los hábitos alimentarios a través del tiempo y el espacio es de suma importancia considerando que permite comprender el papel ecológico de la especie, algunas de sus relaciones con el ambiente que habita, sus requerimientos energéticos (Alava 2013) y además genera información necesaria para propósitos de conservación o para su manejo a través de biotecnologías, como es el caso de algunas especies que son susceptibles de cultivarse.

Particularmente para el caso de peces, el estudio del contenido estomacal es el método más común para determinar las preferencias alimentarias de una especie. En el caso de las truchas del género *Oncorhynchus*, los estudios sobre dieta y hábitos alimentarios son numerosos y con una larga trayectoria (Ricker 1930; Hess y Rainwater 1939; Leonard 1942; Ray et al. 2007, entre otros). Sin embargo, la mayoría de las publicaciones recientes están orientadas al mejoramiento de alimento artificial y su aprovechamiento por organismos confinados en sistemas de cultivo, sobre todo para la trucha arcoíris (*O. mykiss*) cuyo cultivo es uno de los más extendidos a nivel mundial, por lo que el aspecto nutricional se ha estudiado desde diversos enfoques y de manera exhaustiva (ver Número Especial 100, *Aquaculture* 1992; Yamamoto et al. 2002; Guzel y Arvas 2011, entre otros).

A nivel de contenido estomacal, los estudios para especies primordialmente dulceacuícolas del género *Oncorhynchus* son más limitados, aunque es importante señalar que algunos de ellos son muy completos no solo por detallar los contenidos estomacales y su variación, sino por describir la evolución de las ingestas a lo largo del día, permitiendo evaluar la actividad diurna relacionada con la alimentación. También, el tipo de dieta se ha relacionado con la presencia de presas, obtenidas por medio de arrastres bentónicos en forma simultánea a la captura de los ejemplares de trucha. Este tipo de estudios es hasta cierto punto común para las diferentes especies de trucha silvestre que de manera natural habitan en los EUA y Canadá (Angradi y Griffith 1990; Romero et al. 2005).

Para las especies de trucha nativa de México, el número de estudios es muy limitado, y en lo tocante a alimentación, reduciéndose a los trabajos publicados por Ruiz-Campos (1989) y Ruiz-Campos y Cota-Serrano (1992) sobre la trucha nativa de San Pedro Mártir (*O. mykiss nelsoni*), mientras que para las truchas nativas de la Sierra Madre Occidental (SMO), complejo íctico en el que se incluye *O. chrysogaster*, solo se ha identificado el trabajo realizado por Reyes-Valdez et al. (2006), que incluye a 14 poblaciones de trucha de distintas cuencas dentro de la SMO, desde la cuenca del río Yaqui al norte, hasta la del río Acaponeta en el sur. En su investigación encontraron hasta 96 taxa distintos en poco menos de 200 estómagos, lo que indica de cierta manera la diversidad de la dieta y la amplitud del

espectro alimentario en una región geográficamente compleja, pero de ambientes acuáticos con baja productividad primaria.

Esta variedad en la dieta también puede explicarse en función de la capacidad de la mayoría de peces para alimentarse de muchos grupos de plantas y animales que habitan tanto por arriba como por debajo de la superficie acuática, lo que les confiere cierto nivel de omnivoría o de hábitos alimentarios oportunistas, particularmente cuando la productividad local no es elevada y también en función de la densidad poblacional (Diehl 1992).

En el caso de los salmónidos, si bien caracterizados como carnívoros y más específicamente insectívoros (Lagler 1978), se ha observado una tendencia a la generalización relacionada con artrópodos, con una rápida adaptación al consumo de ítems análogos, aún fuera de su área de distribución natural, como se ha podido determinar para salmónidos que han sido introducidos al hemisferio sur cuando su distribución natural es exclusiva del hemisferio norte (Orellana 2010; Fierro et al. 2016).

En particular para las truchas mexicanas, se ha observado que grupos de insectos de los órdenes Diptera, Ephemeroptera y Hemiptera, son algunos de los más comúnmente identificados en la dieta. Algunos de estos insectos terrestres presentan etapas larvianas acuáticas, variando en proporción y tamaño dentro de los contenidos estomacales, muy posiblemente en función de su disponibilidad en el ambiente, pero también con relación al tamaño del pez (Reyes-Valdéz et al. 2006).

Pese a los avances en la investigación sobre truchas nativas mexicanas, los estudios relativos a su alimentación son aún insuficientes para determinar de manera definitiva sus preferencias y posible evolución ontológica, a consecuencia de limitaciones en cuanto al tamaño de muestra, distribución geográfica de los muestreos y temporalidad de los mismos. En ese sentido, el presente estudio contribuye a incrementar la información existente sobre los hábitos alimentarios de la trucha dorada mexicana en específico.

Así, el presente estudio relativo a la alimentación de *O. chrysogaster*, junto con otros que se incluyen en esta obra, busca generar una línea base que en el corto y mediano plazo permita contar con la información suficiente para garantizar que las especies de trucha nativa mexicana aseguren su permanencia, eliminando o al menos reduciendo significativamente el riesgo de extinción local y regional, ya que desde 1996 la especie está en situación Vulnerable según la REDLIST (Contreras y Almada 1996), situándose también como especie Amenazada de acuerdo a la norma oficial mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, sobre 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.

Adicionalmente, se quiere contribuir con información que promueva la producción e inclusive la propagación controlada de la especie, posibilitando su aprovechamiento no solo como una pesquería de subsistencia, sino a través de técnicas de cultivo basadas en un mejor conocimiento de la especie, por lo que es necesario ganar en experiencia sobre hábitos alimentarios y dieta de esta especie.

## MÉTODOS

Los ejemplares incluidos en el presente estudio proceden de 11 sitios localizados dentro de las cuencas de los ríos Fuerte, Sinaloa y Culiacán, en la Sierra Madre Occidental, en altitudes por arriba de los 2000 msnm (Fig. 1).

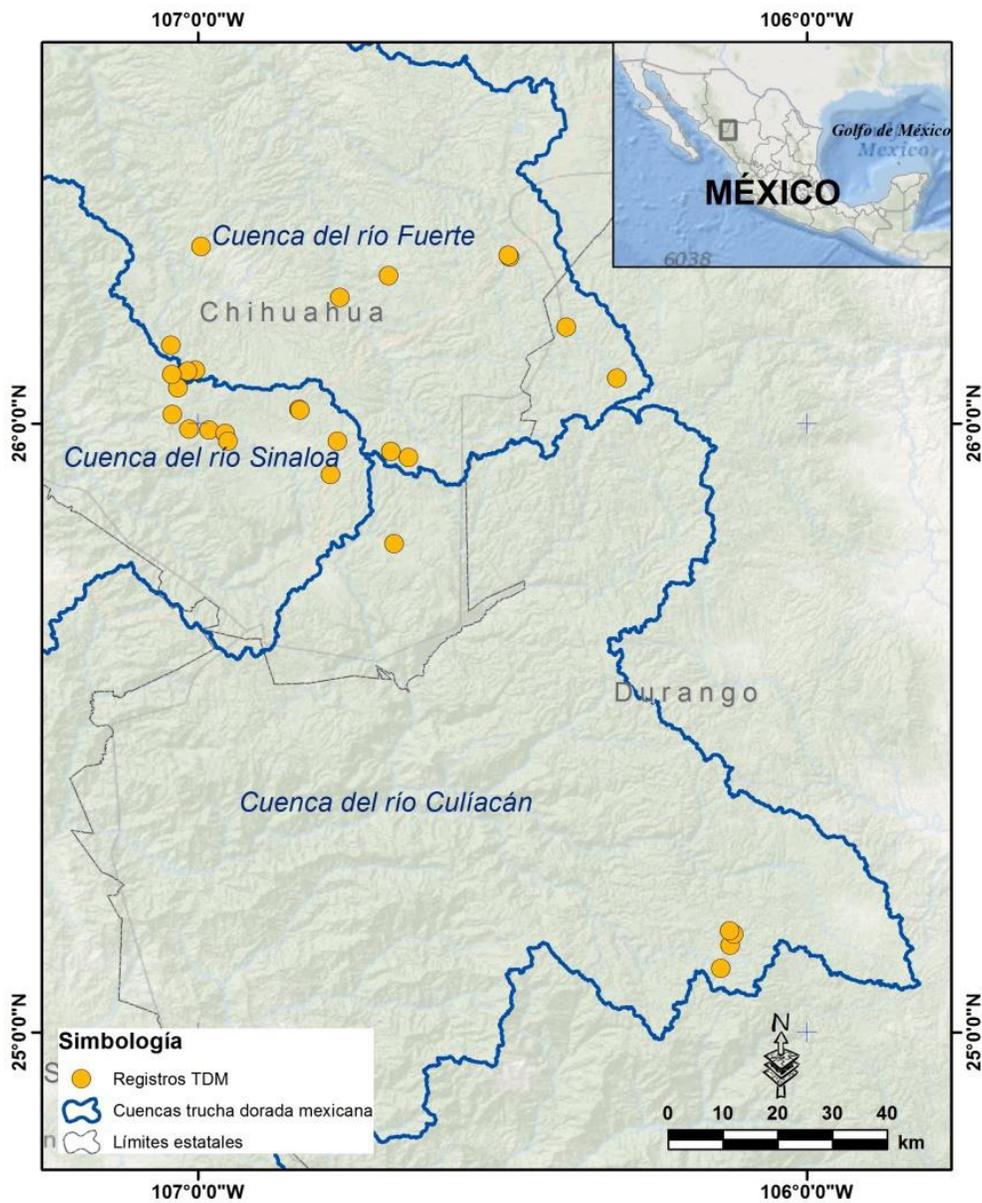


Figura. 1. Localización de los sitios de muestreo. Trucha dorada mexicana (TDM), *Oncorhynchus chrysogaster*.

El tamaño de muestra fue distinto en cada uno de los sitios explorados, como resultado de la vulnerabilidad de las truchas al arte de pesca, por lo cual puede ser un indicador de la densidad poblacional local. Todos los individuos se obtuvieron con el mismo método de captura, por medio de un equipo de electro-pesca (SMITH-ROOT, modelo 15-D POW), con generador operado con motor de gasolina, de hasta 350 W de potencia (Fig. 2).



Figura. 2. Equipo de electropesca SMITH-ROOT y operación de captura de trucha dorada mexicana en arroyos de la Sierra Madre Occidental.

La operación de pesca con este equipo consiste básicamente en recorridos a contraflujo de la corriente, con duración aproximada de una hora, aunque dependiendo de los resultados de la captura el periodo pudo ampliarse o reducirse. Tanto al inicio del recorrido como al finalizar se registraron los datos de ubicación geográfica del sitio (latitud, longitud, altitud), utilizando equipo GPS modelo Garmin Rino 655t.

Los ejemplares capturados fueron procesados individualmente para obtener las medidas biométricas correspondientes a longitud total (cm), longitud patrón (cm), altura (cm) y peso (g). Asimismo se registraron otros datos biológicos no discutidos en el presente trabajo, excepto en algunos casos particulares.

Con respecto a las vísceras, se separaron las gónadas del tracto digestivo, el cual está integrado por la faringe, el estómago, los ciegos pilóricos y el intestino. En seguida, se separó el estómago para su posterior análisis, pesándolo en su totalidad y posteriormente diferenciando el peso del contenido, usando una balanza analítica OHAUS Explore Pro, con sensibilidad de  $0.1 \pm 0.05$  mg (Fig. 3).

Los estómagos fueron diseccionados, realizándose un lavado con alcohol y vertiendo el contenido en una caja de Petri. Para la posterior separación y clasificación de los componentes o ítems incluidos en el contenido estomacal, se siguieron criterios de afinidad morfológica. Dicha labor se realizó con el apoyo de un microscopio estereoscópico.

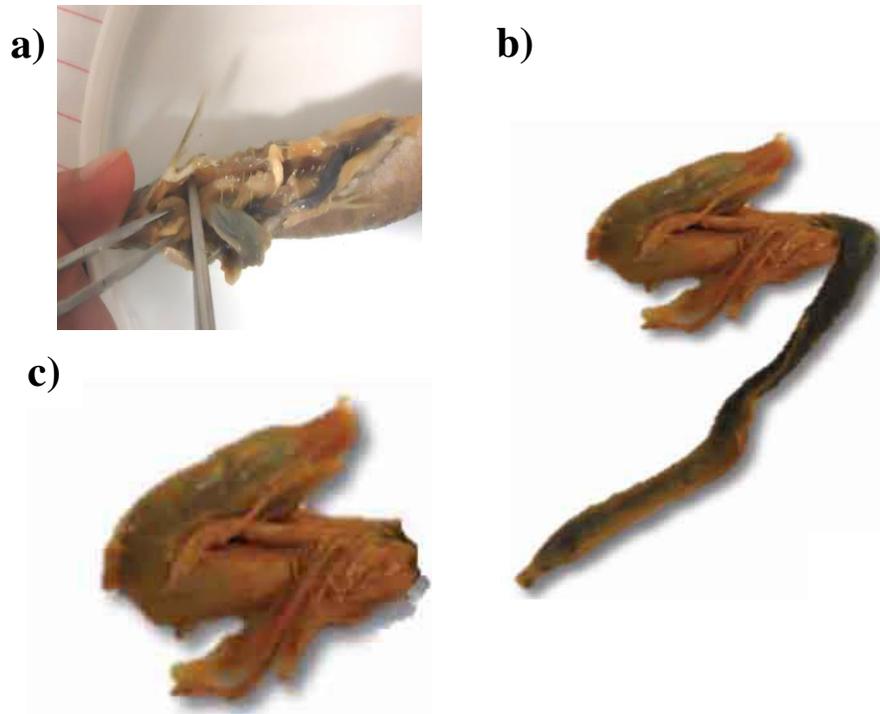


Figura. 3. **a)** Disección; **b)** separación de tracto digestivo; **c)** separación de estómago y extracción de contenido.

Para la identificación y catalogación de los ítems alimenticios se utilizaron diversas claves taxonómicas, principalmente las correspondientes a Merritt y Cummins (1978), Pennak (1978), Bouchard (2004) y Brusca (2003). Los restos fueron identificados hasta el mayor nivel taxonómico posible. Para aquellos casos donde no fue viable la identificación a un mayor nivel que permitiera una adecuada separación de categorías, se utilizaron los mismos identificadores con números consecutivos (e.g. Hemiptera1, Hemiptera2).

Una vez separados los contenidos, se determinó su peso (P), abundancia (N) y frecuencia de ocurrencia o aparición (FA), con los que posteriormente se determinó el índice de importancia relativa o IIR, descrito por Pinkas et al. (1971). Este índice incorpora a los indicadores anteriores como la proporción (expresada como porcentaje) del número (%N), peso (%P) y frecuencia de ocurrencia o aparición (%FA).

La proporción numérica (%N) corresponde al registro del número de presas encontradas en cada estómago, por lo que se obtiene el total de presas de cada categoría con respecto al total de todos los estómagos. El de peso (%P) o gravimétrico consiste en la estimación del peso en estado húmedo de los ítem por separado, expresándose el valor como una proporción del total del contenido. Finalmente, el método de frecuencia (%FA) considera el registro del número de estómagos en los que aparece una categoría determinada, con respecto al total de estómagos analizados (Cailliet 1986; Hyslo 1980). Para la determinación del IIR se utilizó la ecuación, propuesta originalmente por Pinkas et al. (1971), sustituyendo el volumen por el peso por el volumen

$$\text{IIR} = (\%N + \%P) * \%FA$$

Finalmente se generó una base de datos que incluye un total de 21 campos que permiten identificar tanto al ejemplar analizado, como aspectos relativos a la localidad, biometrías, características generales del contenido estomacal, así como de los ítems identificados y su respectiva clasificación sistemática. Un resumen de esta base de datos se incluye a continuación (Tabla 1).

Tabla 1. Descripción de los campos de la base de datos.

<b>Campo</b>	<b>Descripción</b>
Clave	Identificador de cada ejemplar
Sitio	Localidad de muestreo
Cuenca	Sinaloa, Fuerte, Culiacán
Fecha	Fecha de captura
Sexo	Macho, hembra, indeterminado.
LT	Longitud total (cm), registrada desde la punta del hocico hasta el lóbulo de mayor longitud de la aleta caudal
LP	Longitud patrón o estándar (cm), registrada de la punta del hocico a la base posterior de la columna vertebral.
PT	Peso total del individuo (g)
PLI	Peso del estómago lleno (g)
PV	Peso del estómago vacío (g)
%LI	Porcentaje de llenado
Ítems	Catalogación <i>a priori</i> de las presas encontradas en el estómago.
Phylum	
Subphylum/Clase/Subclase	
Orden	Desglose de la clasificación de los ítems después de haber sido corregida con las claves y otras fuentes informativas.
Superfamilia	
Familia	
Estado de desarrollo	Fase del ciclo de vida de la presa
N	Número de presas de cada categoría
Peso (mg)	Peso de cada categoría en miligramos
Observaciones	Notas pertinentes acerca del contenido estomacal

## RESULTADOS

Se obtuvo un total de 429 individuos en 19 localidades muestreadas, con un tamaño de muestra variable entre 4 y 67 individuos y promedio de 22. Sin embargo, para propósitos del presente estudio solo fue posible analizar 148 ejemplares capturados en once localidades, distribuidas en las tres cuencas habitadas por la especie; seis sitios localizados dentro de la cuenca del río Sinaloa (80 individuos), tres en el río Culiacán (46 individuos) y dos en la cuenca del río Fuerte (22 individuos). Las localidades y el número de individuos correspondiente a cada uno de ellas se presentan en el Tabla 2.

Los ejemplares capturados presentaron tallas entre 6.5 y 19.4 cm de longitud total (LT), correspondientes a un intervalo de 5.7 - 15.8 cm de longitud patrón (LP), ambas dimensiones altamente correlacionadas entre sí ( $r = 0.99$ ). Por lo que toca al peso total, éste varió entre 2.32 y 46.07 g, obteniéndose estos valores a partir de los ejemplares preservados en alcohol, por lo que se asumen diferencias con los ejemplares en fresco. No es posible

determinar la magnitud de dichas diferencias, considerando que el peso en fresco se obtuvo con una balanza con registro mínimo de 2 g. Pese a ello, se ha podido determinar que en general se sigue una relación isométrica entre la longitud total y el peso total con una alta correlación ( $r > 0.9$ ).

Tabla 2. Relación de sitios de colecta y cuenca hidrológica a la que pertenecen, fecha de colecta, número total de individuos capturados y cantidad de organismos analizados para propósitos de determinación de contenido estomacal.

ID	Sitio	Cuenca	Fecha	Número de individuos	Individuos analizados
1	Río Verde	Fuerte	21/02/2013	19	
2	Arroyo del Agua	Fuerte	21/02/2014	67	
3	Arroyo La Quebrada	Fuerte	21/02/2014	41	
4	Arroyo San José	Fuerte	26/03/2014	25	16
5	Arroyo Las Cuevas	Fuerte	28/03/2014	23	
6	Arroyo Las Truchas	Fuerte	28/03/2014	15	
7	Arroyo El Manzano	Fuerte	29/03/2014	16	
8	Arroyo Momorita	Fuerte	28/05/2014	6	6
9	Arroyo Macheras	Sinaloa	27/03/2014	19	
10	Arroyo El Soldado	Sinaloa	28/03/2014	10	10
11	Arroyo La Osera	Sinaloa	28/03/2014	18	18
12	Arroyo Hondo	Sinaloa	29/05/2014	31	25
13	Arroyo Baluarte	Sinaloa	29/05/2014	22	3
14	Arroyo El Potrero	Sinaloa	30/05/2014	28	20
15	Arroyo San Miguel	Sinaloa	30/05/2014	4	4
16	A. Cueva de San Juan del Negro	Culiacán	18/02/2014	22	
17	Arroyo El Desecho	Culiacán	19/02/2014	24	18
18	Arroyo el Río 1	Culiacán	23/02/2014	22	16
19	Arroyo el Río 2	Culiacán	23/02/2014	17	12
TOTAL				429	148

Del total de ejemplares de la muestra analizada, el 49% correspondió a machos, con tallas (LT) que oscilaron entre 6.9 y 19.4 cm, con peso máximo de 41.4 g y para los cuales se registró un número máximo de 9 ítems por estómago y un promedio aproximado de 4 artículos por estómago. En el caso de las hembras, éstas representaron cerca del 30% del total de la muestra, con ejemplares cuya talla (LT) varió entre 7.9 y 18 cm y un peso máximo de 46.1 g. En promedio se registró un máximo de 12 y promedio de 5.4 componentes alimentarios por estómago. Finalmente, en los individuos para los que no fue posible establecer el sexo y que representaron el 21% de la muestra, se observaron tallas de 6.5 a 13.3 cm de LT y un peso máximo de 26.3 g. Como en el caso de los machos, el número promedio por estómago se acercó a 4 artículos.

#### *Espectro alimenticio*

Una vez que los estómagos fueron vaciados y su contenido registrado en peso, se obtuvo una variación de 0.06 a 1.97 g por estómago, en tanto que el peso del contenido de los mismos fue de 1.346 g como máximo y de 0.002 g como mínimo, representando desde < 1.0% hasta el 87.4% del peso total del estómago.

Con excepción de la materia particulada que, en función de su textura y contenido, fue clasificada como materia orgánica e inorgánica, además de otro contenido clasificado como restos vegetales y parásitos, todos los organismos contenidos dentro de los estómagos

analizados correspondieron a artrópodos, ya sea como organismos en diverso nivel de digestión o como partes de los mismos, que en algunos casos permitieron la identificación. La mayor parte de los organismos identificados como parte de la dieta de la trucha dorada mexicana, pertenecen a la clase Insecta, si bien se registraron algunos arácnidos (Tabla 3).

Tabla 3. Componentes de la dieta de trucha dorada mexicana *O. chrysogaster*.

Clase	Orden	Familia	
Arachnida	Araneae		
	Trombidiformes1		
	Trombidiformes2		
	Coleoptera		Dytiscidae
			Curculionidae
			Staphylinidae
			Simuliidae
			Ceratopogonidae
			Chironomidae
	Insecta	Diptera	Dixidae
Heptageniidae			
Ephemeroptera		Corixidae	
		Hebridrae	
		Notonectidae	
Hemiptera		Formicidae	
Hymenoptera			
Insecta (No ident.)			
Insecta (Restos)			
Lepidoptera		Geometridae	
	Orthoptera		
	Plecoptera		
Trichoptera		Helicopsychidae	
Materia inorgánica			
Materia orgánica			
Parásitos			
Restos vegetales			

### Contenido estomacal

Para el total de estómagos se encontraron diversos ítems, que en su mayoría fueron determinados hasta el nivel de orden y ocasionalmente hasta familia. Por lo anterior, los análisis que se presentan en este apartado tienen como unidad el nivel taxonómico Orden, excluyéndose algunos apartados como materia orgánica, restos vegetales o parásitos, que fueron determinados como parte de los contenidos estomacales.

Con la consideración anterior, se tiene un total de 12 categorías (incluyendo restos de insectos), destacando numéricamente la presencia de especímenes del orden Diptera 30.8% del total de 568 artículos alimentarios identificados, de los que 175 individuos correspondieron a este Orden. Los grupos que siguieron en orden de importancia son los insectos del Orden Ephemeroptera con el 28.7% (163 individuos), restos de insecto con el 14.7% y las demás categorías con menos del 10% cada una (Fig. 4).

Como ocurre frecuentemente, existen diferencias en cuanto a la importancia de un grupo de artículos alimentarios cuando se determina por peso, número de presas o frecuencia de aparición. Así, considerando la variable peso, el ítem con más frecuencia nuevamente corresponde a insectos, si bien en este caso más del 50% correspondió a restos

de este grupo animal, con limitadas posibilidades de identificarse a un mayor nivel taxonómico (Fig. 4).

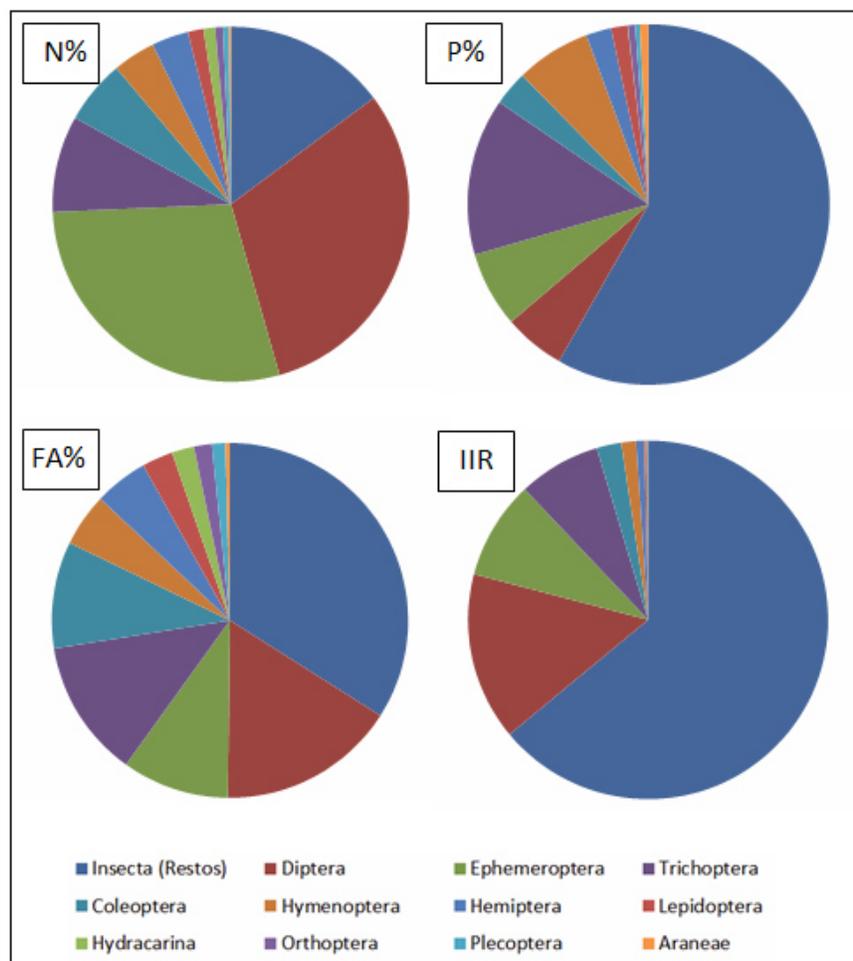


Figura. 4. Proporción Numérica (N%), por Peso (P%), Frecuencia de presencia (FA%) e Índice de importancia relativa (IIR), correspondientes al contenido estomacal del *O. chrysogaster* en la Sierra Madre Occidental.

Solo en el caso del orden Trichoptera se obtuvieron valores superiores al 10%, en tanto que para Ephemeroptera, Hymenoptera y Diptera, que fueron los grupos que siguieron en importancia por peso, solo alcanzaron valores entre 6 y 7%.

Con el método de frecuencia de aparición (FA%), también los restos de insecto representan la mayor parte de la ingesta con representación del 34.0% del total de presencias (247), mientras que Diptera representó el 16.2% (40), Trichoptera el 12.6% (31) y el resto de las categorías con menos del 10% del total de presencias (Fig. 4).

Finalmente, la integración de los valores anteriores en el índice de importancia IIR, también indica que para la temporada de estudio, correspondiente a invierno-primavera, la parte más importante de la dieta de estas truchas está representada por insectos cuyos restos difícilmente pueden ser asociados con algún grupo en particular, seguido por otros grupos de insectos plenamente identificados hasta el nivel de Orden, con individuos del Orden Diptera como el de mayor relevancia (Fig. 4).

Un resumen de los grupos más representativos para los hábitos alimenticios de la trucha dorada mexicana se presenta en el Tabla 4, indicándose la proporción que adquiere cada grupo por separado, de acuerdo al método de evaluación y conforme al IIR.

Tabla 4. Relación de sitios de colecta y cuenca hidrológica a la que pertenecen, fecha de colecta, número total de individuos capturados y cantidad de organismos analizados para propósitos de determinación de contenido estomacal.

<b>Categoría</b>	<b>N</b>	<b>N%</b>	<b>P</b>	<b>P%</b>	<b>FA</b>	<b>FA%</b>	<b>IIR</b>	<b>IIR%</b>
Insecta (Restos)	84	14.8	4337.5	58.3	84	97.7	7134.1	64.0
Diptera	175	30.8	407.3	5.5	40	46.5	1687.4	15.1
Ephemeroptera	163	28.7	505.2	6.8	24	27.9	990.2	8.9
Trichoptera	50	8.8	1048.9	14.1	31	36.1	825.1	7.4
Coleoptera	33	5.8	231.4	3.1	24	27.9	248.9	2.2
Hymenoptera	22	3.9	499.1	6.7	12	14.0	147.6	1.3
Hemiptera	19	3.4	168.3	2.3	12	14.0	78.2	0.7
Lepidoptera	8	1.4	109.2	1.5	7	8.1	23.4	0.2
Hydracarina	6	1.1	3.1	<0.1	5	5.8	6.4	0.1
Orthoptera	4	0.7	47.0	0.6	4	4.7	6.2	0.1
Plecoptera	3	0.5	31.8	0.4	3	3.5	3.3	<0.1
Araneae	1	0.2	57.5	0.8	1	1.2	1.1	<0.1
<b>Total</b>	<b>568</b>	<b>100.0</b>	<b>7446.3</b>	<b>100.0</b>	<b>247</b>	<b>287.2</b>	<b>11151.8</b>	<b>100.0</b>

## DISCUSIÓN

Del análisis general de los datos se confirma que la trucha dorada mexicana es una especie esencialmente insectívora, característica común de los salmónidos, tal como lo señala Lagler (1978). Sin embargo, el análisis del contenido estomacal de peces no solo es indicador de la diversidad de la dieta, sino que al mismo tiempo representa una mirada al ecosistema que habita esta especie, para un tiempo determinado; en este caso, durante el periodo comprendido entre finales de invierno e inicio de primavera.

Posiblemente por ser ésta una temporada del año con baja productividad, asociada a bajas temperaturas y un menor nivel de insolación, la diversidad de la dieta pueda ser menor que en otros periodos del año, aunque no hay antecedentes que lo confirmen para este grupo de especies nativas. Previo a los presentes resultados, solo el trabajo de Reyes-Valdez et al. (2006) ha documentado la presencia de cerca de 100 artículos alimentarios distintos, si bien la época del año es similar a la que aquí se reporta (abril a junio del 2001), incluyendo de manera integral al complejo de truchas de la Sierra Madre Occidental.

Con respecto a la trucha dorada mexicana y a partir del análisis de 60 estómagos, los mismos autores encuentran que los órdenes Hymenoptera (familia Formicidae y Vespoidea); Ephemeroptera (familia Leptophebiidae) y Hemiptera (familia Anthocoridae), son los más representativos de la dieta de esta especie, concluyendo que más del 50% de la misma la constituyen insectos acuáticos y cerca del 42% insectos terrestres, con solo cerca del 4% para insectos acuático – terrestres. También determinaron que la dieta observada para *O. chrysogaster* tiene cierta similitud con la dieta de truchas distribuidas al sur de la cuenca del río Culiacán, pero no con los grupos distribuidos más al norte, lo que indica cierto nivel de oportunismo alimentario, posiblemente asociado con la variabilidad ambiental asociada.

Este tipo de conducta alimentaria ha sido documentado por Cada et al. (1987) para dos especies de trucha, residentes de los montes Apalaches EUA, para la temporada

verano-otoño, concluyendo que son especies oportunistas y que su dieta llega a consistir de hasta un 50% de organismos de origen terrestre, en respuesta a la baja productividad de los arroyos y beneficiándose de la producción de origen terrestre.

En este estudio se determinó que los grupos que resultan presa natural preferente para la trucha dorada mexicana, pertenecen a los órdenes de insectos Diptera, Ephemeroptera y Trichoptera, independientemente de que la relevancia del artículo alimentario haya sido evaluada por número, frecuencia o peso y aún por la integración de estos indicadores en uno solo como es el caso del IIR. Vale la pena recordar que los principales grupos consumidos incluyen especies con fases acuáticas y estructuras blandas en etapas tempranas de su ciclo de vida. Por otro lado, también es importante resaltar que dos de los grupos presa reportados como preferentes en este estudio, no son de los más representativos en la dieta de la trucha dorada mexicana reportados por Reyes-Valdez et al. (2006), indicando una composición de insectos distinta debido posiblemente a los meses del análisis, en el presente estudio se analizan los meses de febrero, marzo y mayo, mientras que en el trabajo referido se estudió el periodo comprendido de abril a junio.

No es posible probar que exista preferencia por algún componente en particular y se consideran insectívoros generalistas, consumiendo lo que se encuentra a su alcance, ya sea acuático o terrestre, sin que se haya demostrado para otras especies una relación entre el tamaño de los peces y el de las presas (Reyes-Valdez et al. 2006). Aunque siempre existe la incertidumbre que una preferencia alimenticia puede darse a nivel de especie, inclusive variando con relación a su ciclo de vida, no obstante este nivel de identificación no fue alcanzado en el presente estudio.

La diferencia en cuanto al número de ítems encontrados en estómagos, fue mayor para hembras con relación a los machos y en función de la época del año, próxima a la temporada de desove. Esta diferencia pudiera asociarse con los requerimientos energéticos de las hembras para la producción de huevos.

Reconocemos que el presente estudio es limitado tanto en tiempo como sobre las características poblacionales de la especie (sexo, talla), ya que no hay un acceso regular y periódico a la zona de estudio. Sin embargo, este tipo de estudios intenta reducir esta restricción proporcionando información sobre sitios representativos de la presencia de esta especie y sobre su biología, permitiendo el diseño de un monitoreo más intenso que nos permita conocer más acerca de la especie y coadyuve a su conservación y manejo.

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores agradecen la colaboración de M. Trujillo G. y Noemi Bocanegra Castillo del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste en la preparación del material e identificación de los contenidos estomacales. El trabajo fue financiado por el proyecto de CONACYT Ciencia – Básica (CB-2010-01-152893). Para los muestreos en campo se contó con los permisos de pesca (SGPA/DGVS/02485/13, SGPA/DGVS/02968/14 y SGPA/DGVS/05052/15), expedidos por la Dirección General de Vida Silvestre de la SEMARNAT.

## **REFERENCIAS**

Alava, P.I. 2013. Contenido estomacal del pez espada *Xiphias gladius* desembarcado en el Puerto de Santa Rosa, Provincia de Santa Elena, Ecuador. *Tesis de licenciatura*. Universidad de Guayaquil, Ecuador.

- Angradi, T.R. and J.S. Griffith. 1990. Diel feeding chronology and diet selection of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in the Henry's Fork of the Snake River, Idaho. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 47: 199-209.
- Bouchard, R.W. 2004. *Guide to aquatic macroinvertebrates of the Upper Midwest*. Water Research Center. University of Minnesota, St. Paul. USA.
- Brusca, R.C. and G.J. Brusca. 2003. *Invertebrates*. Sinauer Associates. USA.
- Cada, G.F., J.M. Loar and D.K. Cox. 1987. Food and feeding preferences of Rainbow and Brown trout in southern Appalachian Streams. *The American Midland Naturalist*. 117: 374-385.
- Cailliet, G.M., M.S. Love and A.W. Ebeling. 1986. *Fishes: A field and laboratory manual on their structure, identification and natural history*. Waveland Press. EUA. 194 p.
- Contreras-Balderas, S. and P. Almada-Villela. 1996. *Oncorhynchus chrysogaster*. The IUCN Red List of Threatened Species 1996: e.T15317A4513112. <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.1996.RLTS.T15317A4513112.en>. Recuperado el 21 July 2016.
- Diehl, S. 1992. Fish predation and benthic community structure: the role of omnivory and habitat complexity. *Ecology*. 73: 1646-1661.
- Fierro, P., L. Quilodrán, C. Bertrán, I. Arismendi, J. Tapia, F. Peña-Cortés, E. Hauenstein, R. Arriagada, E. Fernández and L. Vargas-Chacoff. 2016. Rainbow trout diets and macroinvertebrates assemblages responses from watersheds dominated by native and exotic plantations. *Ecological Indicators*. 60: 655–667.
- Guzel, S. and A. Arvas. 2011. Effects of different feeding strategies on the growth of young rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *African Journal of Biotechnology*. 10: 5048-5052.
- Hess, A.D. and J.H. Rainwater 1939. A method for measuring the food preference of trout *Copeia*. 3: 154-157.
- Hyslop, E.J. 1980. Stomach contents analysis—a review of methods and their application. *Journal of Fish Biology*. 17: 411–429.
- Lagler, K.F. 1978. *Freshwater fishery biology*. Estados Unidos de América: W.M.C. Brown Company Publishers. Dubuque. Iowa. USA.
- Leonard, J.W. 1942. Some observations on the winter feeding habits of brook trout fingerlings in relation to natural food organisms present. *Transactions of the American Fisheries Society*. 71: 219-227.
- Merritt, R.W. and R.W. Cummins. 1978. *An introduction to the aquatic insects of North America*. Kendall/Hunt Publishing Company. Dubuque, Iowa. USA.
- Orellana, M.G.T. 2010. Evaluación de hábitos alimenticios de salmónidos escapados y asilvestrados de vida libre en ríos y lagos del sur de Chile. *Tesis Profesional*. Univ. Austral de Chile. 62 p.
- Pennak, R.W. 1978. *Fresh-water invertebrates of the United States*. USA. John Wiley & Sons, Inc. USA.
- Pinkas, L., S.M. Oliphant and L.K. Iverson. 1971. Food habits of albacore, bluefin tuna, and bonito in California waters. *Fish Bulletin*. 152: 1-105.
- Ray, B.A., T.R. Hrabik, M.P. Ebener, O.T. Gorman, D.R. Schreiner, S.T. Schram, S.P. Sitar, W.P. Mattes and C.R. Bronte. 2007. Diet and prey selection by Lake Superior lake trout during spring, 1986–2001. *Journal of Great Lakes Research*. 33: 104–113
- Reyes-Valdéz, C.A., G. Ruiz-Campos, F. Camarena-Rosales and A. Varela-Romero. 2006. Diet composition of native trout (Salmonidae: *Oncorhynchus*) from the Sierra Madre

- Occidental, Mexico. En: Lozano-Vilano M.L. and A.J. Contreras-Balderas (eds.). *Studies of North American Desert Fishes in Honor of E.P. (Phil) Pister, Conservationist*. Mexico. Faculty of Biological Sciences. UANL. 125-137.
- Ricker, W.E. 1930. Feeding habits of speckled trout in Ontario waters. *Transactions of the American Fisheries Society*. 60: 64 – 72.
- Romero, N., R.E. Gresswell and J.L. Li. 2005. Changing patterns in coastal cutthroat trout (*Oncorhynchus clarki clarki*) diet and prey in a gradient of deciduous canopies. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 62(8): 1797-1807.
- Ruiz-Campos, G. 1989. Repoblación natural por trucha arcoiris (*Salmo gairdneri nelsoni*) en un transecto del arroyo San Rafael, noroeste de la Sierra San Pedro Mártir, Baja California, México. *The Southwestern Naturalist*. 34(4): 552–556.
- Ruiz-Campos, G. y P. Cota-Serrano. 1992. Ecología alimenticia de la trucha arcoiris (*Oncorhynchus mykiss nelsoni*) del arroyo San Rafael, Sierra San Pedro Mártir, Baja California, México. *The Southwestern Naturalist*. 37: 166-177.
- Yamamoto, T., T. Shima, H. Furuita and N. Suzuki. 2002. Influence of feeding diets with and without fish meal by hand and by self-feeders on feed intake, growth and nutrient utilization of juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture*. 214: 289–305.



## 5. 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, Carmen Rodríguez Jaramillo, Sergio Sánchez González, Federico Márquez, Arturo Ruiz-Luna

### INTRODUCCIÓN

Pocos grupos de peces han tenido gran impacto en las sociedades humanas como el producido por los salmónidos del Pacífico (Scott y Crossman 1973; Penaluna et al. 2016). Por ejemplo, los patrones de asentamiento de los indios del oeste de Norteamérica, especialmente desde hace 3000 años, estuvieron estrechamente determinados por la abundancia estacional de salmónidos (Maxwell 1995) y la economía basada en estos organismos sigue siendo crítica para muchas comunidades costeras del Pacífico (Wilson 1997). Por ello no resulta extraño que exista una enorme cantidad de información tanto en Norteamérica como en Europa, sobre la biología, ecología y la genética de este grupo de peces de gran plasticidad morfológica. En México, pese a encontrarse una gran diversidad de especies de trucha, particularmente en la Sierra Madre Occidental (SMO), solo dos especies de salmónidos han sido descritas taxonómicamente, la trucha de Baja California (*Oncorhynchus mykiss nelsoni*) que habita en la Sierra de San Pedro Mártir en Baja California y la trucha dorada mexicana (*O. chrysogaster*) en la SMO, en las cuencas de los ríos Fuerte, Sinaloa y Culiacán y probablemente en el río Conchos (Abadía-Cardoso et al. 2015). El resto de las especies no descritas, en número aún no definido, viven al norte y al sur de la distribución de la trucha dorada mexicana. En todos los casos, existe el riesgo de extinción de estas especies, aún a nivel local, por cambios en el paisaje, cambios climáticos y la introducción de especies exóticas.

Además de su distribución restringida, la trucha dorada posee características únicas entre los salmónidos de Norteamérica, como es el número más pequeño de vertebras (56-58) y ciegos pilóricos, que van de 17 a 25 (Needham y Gard 1964). La especie habita en arroyos y corrientes de alta montaña, de 1<sup>er</sup> y 2<sup>o</sup> orden, en condiciones de productividad natural y temperaturas que limitan su crecimiento, por lo que adultos rara vez llegan a medir más de 25 cm. En general, la forma del cuerpo y la colocación de las aletas son parecidos a las de la trucha arco iris (*O. mykiss*) de distribución más nortea, aunque el vientre posee coloración dorada, de ahí su nombre científico. Las marcas *parr*, una característica de los juveniles de menos de un año de los salmónidos del Pacífico, permanecen a lo largo de la vida en las truchas doradas mexicanas (Wilson 1997; Behnke 1992).

La biología de los salmónidos en lo referente a presencia y grado de anadromía, edad a la primera madurez sexual, frecuencia de desove a largo de la vida, tamaño del cuerpo, cuidado parental y dimorfismo sexual entre otras, es remarcablemente variable a todos los niveles taxonómicos (Taylor 1991). El conocimiento de esta variación y los procesos evolutivos relacionados son esenciales para la conservación de la diversidad biológica del taxón y de su futuro evolutivo (Frank y Leggett 1994). En la mayoría de los salmónidos, el

rasgo sexual secundario más extendido está relacionado con cambios en el tamaño y forma de las mandíbulas de los machos en periodo de reproducción, aunque la variación de este carácter es amplia, siendo generalmente mayor en formas anadromas que en las formas que desovan en lagos o que son estrictamente de agua dulce (Morton 1965) o incluso estar ausente (Wilson 1997). También se han reportado otros rasgos sexuales secundarios tales como una joroba anterior a la aleta dorsal, el patrón de manchas laterales, el tamaño de la aleta adiposa, el patrón de coloración, el desarrollo de tubérculos, la longitud de aletas pélvicas y pectorales y diferencias de tamaños (Wilson 1997).

En relación a las diferencias de tamaños entre machos y hembras, en general no son tan marcadas y algunos autores consideran que la dirección y magnitud de este rasgo son altamente variables, indicando diferencias poblacionales debido a selección (Sandercock 1991). Existen muchos mecanismos que conducen a la evolución del dimorfismo sexual, uno de ellos es la selección sexual (Hedrick y Temeles 1989; Andersson 1994). Otro mecanismo es la competencia por recursos (Eberhard 1985). En el caso de la trucha dorada mexicana, aunque se menciona en la literatura la ausencia de cambios de tamaño y forma de las mandíbulas en periodos reproductivos (Wilson 1997), en realidad no hay datos publicados que describan que tipo de dimorfismo sexual está presente en la especie.

La morfometría geométrica (MG) es un método que se utiliza para evaluar el dimorfismo sexual. De acuerdo a esta metodología, la forma se define como "cualquier información geométrica que queda cuando los efectos de la translación, la escala y la rotación se quitan de un objeto" (Kendal 1977). La MG usa puntos de referencia (landmark) homólogos y es la técnica más utilizada en los estudios de dimorfismo sexual (Benítez 2013). Esta herramienta permite el estudio de la forma y tamaño del organismo, proporcionando un análisis gráfico para cuantificar y visualizar la variación morfométrica dentro y entre las muestras de organismos.

Por otra parte, durante la reproducción de los peces, existen cambios fisiológicos complejos que se ven reflejados en las gónadas, e implican cambios celulares, bioquímicos, moleculares y endocrinológicas conspicuos (Nagahama 1983). A medida que se desarrollan las gónadas, el crecimiento somático disminuye y finalmente se detiene. En esta etapa, las proteínas y los lípidos se movilizan a partir de los tejidos somáticos y se transfieren a las gónadas (Aksnes et al. 1986). El análisis histológico es un método que permite evaluar la temporada de desove y el periodo de maduración de los peces (West 1992). Existen varios sistemas de clasificación para evaluar la madurez de las gónadas; algunos destacan criterios macroscópicos (aparición externa de la gónada), otros los microscópicos (presencia de células espermatogénicas o nucléolos en oocisto, etc.), o las características fisiológicas de las gónadas (proteína de suero, nivel de hormonas sexuales), mientras que otras emplean varios criterios para distinguir etapas particulares (Dziewulska y Domagała 2003).

El objetivo de este estudio es determinar si la trucha dorada mexicana presenta un dimorfismo sexual relacionado con la forma y tamaño del cuerpo y describir por primera vez el periodo reproductivo de los machos y las hembras mediante técnicas histológicas e histoquímicas.

## **MÉTODOS**

El material biológico para este estudio proviene de recolectas de peces realizadas en los ríos Fuerte, Sinaloa y Culiacán, en la Sierra Madre Occidental y por arriba de los 2200 metros sobre el nivel del mar (Tabla 1, Fig. 1). Todos los individuos se capturaron por medio de un sistema de electro-pesca, usando un equipo marca SMITH-ROOT, INC., modelo 15-D

POW, Serie No. 87747 (Vancouver, WA, USA), con generador operado con motor de gasolina, de hasta 350 W de potencia. Los ejemplares capturados fueron procesados individualmente.

*Estudio morfométrico del dimorfismo sexual*

Para el estudio de dimorfismo sexual se utilizaron 339 ejemplares provenientes de 17 sitios (Tabla 1). Cada ejemplar fue fotografiado sobre su flanco izquierdo utilizando una cámara Nikon D7000, y próximo a una escala graduada (cm) para otorgar un valor de escala a cada imagen. Durante el registro fotográfico se evitó la rotación a lo largo del eje longitudinal de los mismos.

Se registró la longitud total (cm) y el sexo mediante observación directa de las gónadas, asignando la categoría de indeterminado para aquellos en los que el sexo no pudo definirse por falta de madurez sexual (Fig. 2). Posteriormente fueron fijados en alcohol al 96%.

Tabla 1. Sitios de recolecta, cuenca hidrológica a la que pertenecen, fecha de recolecta, número total de individuos capturados (N) y cantidad de organismos analizados mediante morfometría geométrica y ciclo gonadal. A = Arroyo, R = Río.

ID	Sitio	Cuenca	Fecha	N	Morfometría	Gónadas
1	R. Verde	Fuerte	21/02/2013	19	19	
	R. Verde	Fuerte	07/03/2016	11		14
2	A. La Onza	Fuerte	12/05/2015	11	11	3
3	A. del Agua	Fuerte	21/02/2014	67	15	
4	A. La Quebrada	Fuerte	21/02/2014	41	14	
5	A. San José	Fuerte	26/03/2014	25	22	
6	A. El Manzano	Fuerte	29/03/2014	16	13	
7	A. Macheras	Sinaloa	27/03/2014	19	19	
	A. Macheras	Sinaloa	08/03/2016	16		20
8	A. La Osera	Sinaloa	28/03/2014	18	16	
	A. La Osera	Sinaloa	08/03/2016	14		17
9	A. Hondo	Sinaloa	29/05/2014	31	25	
10	A. Baluarte	Sinaloa	29/05/2014	22	18	
11	A. El Potrero	Sinaloa	30/05/2014	28	28	
12	A. Pericos	Sinaloa	13/05/2015	18	18	8
13	Cerro Solo	Sinaloa	13/05/2015	15	13	10
14	Cebollin	Sinaloa	13/05/2015	6		4
15	A. Agua Blanca	Culiacán	12/05/2015	33	32	12
16	A. Cueva S. Juan del Negro	Culiacán	18/02/2014	22	16	
17	A. El Desecho	Culiacán	19/02/2014	24	23	
18	A. El Río	Culiacán	23/02/2014	39	37	
	TOTAL			495	339	88

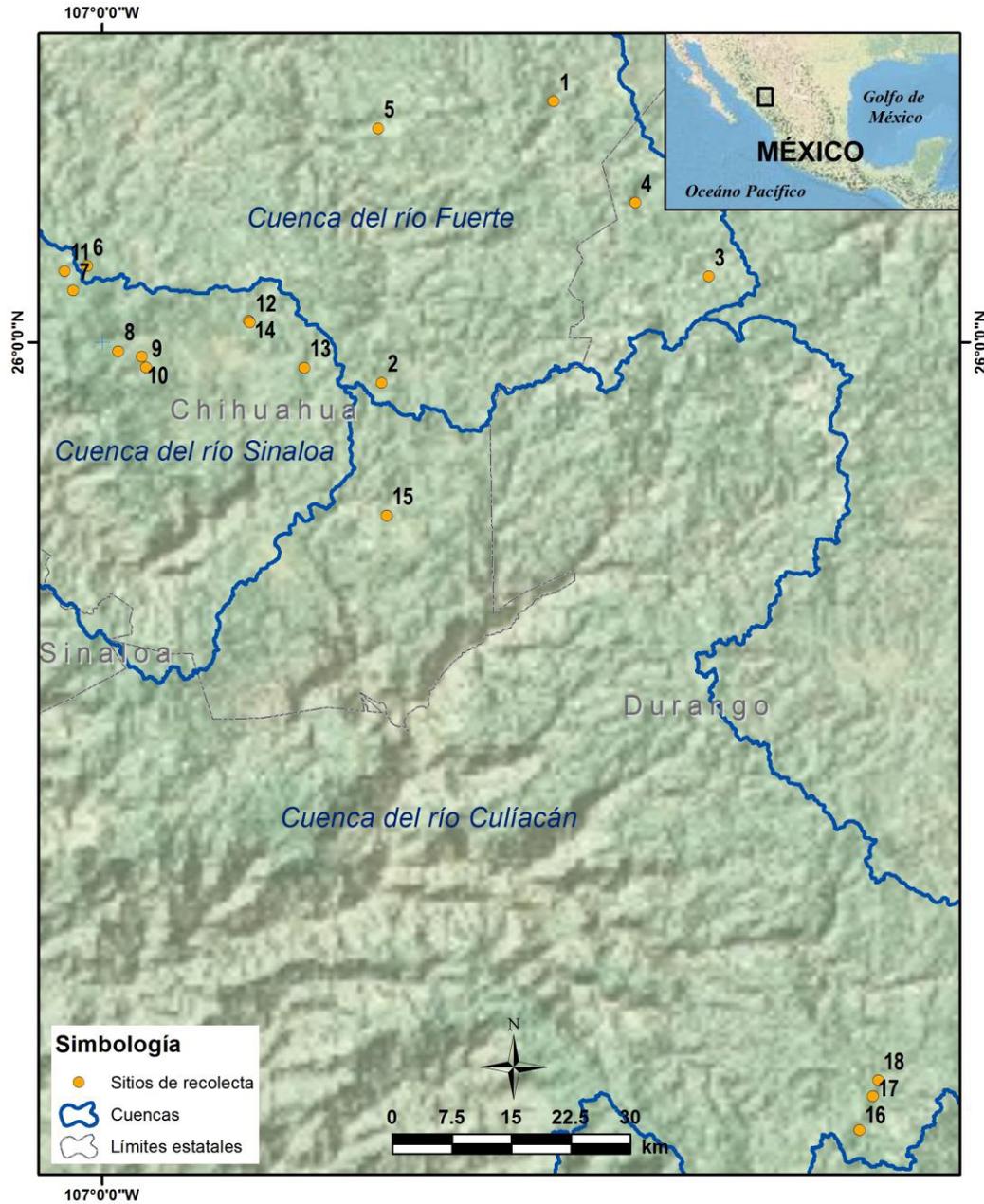


Figura 1. Sitios de recolecta de trucha dorada mexicana, *Oncorhynchus chrysogaster*, en las cuencas hidrológicas de los ríos Fuerte, Sinaloa y Culiacán. Los números en negritas corresponden a los sitios de recolecta de la Tabla 1.



Figura 2. Gónadas de trucha dorada mexicana, *Oncorhynchus chrysogaster*. Arriba una hembra madura en etapa de desove, abajo un macho maduro.

La captura de la forma del cuerpo de las truchas se realizó mediante la digitalización 2D de coordenadas cartesianas de puntos morfométricos sobre estructuras homólogas identificables o construidas (landmarks y semilandmarks), utilizando la serie de programas TPS (Rohlf 2005, 2004, 2003). Para los diferentes análisis se definieron diez landmarks y dos semilandmarks (Fig. 3). La obtención de las variables de forma, se realizó mediante la aplicación de un análisis generalizado de Procrustes, que preserva toda la información geométrica, removiendo aquella que no posee relación directa con la forma bajo estudio, como la diferentes escalas, posiciones y orientaciones de los individuos (Zelditch et al. 2012).

Para corregir la presencia de un arqueado dorsoventral del cuerpo, detectado en análisis preliminares, se realizó la corrección *Unbend specimens*, implementada en el software TPSutil (Rohlf 2004). Esta herramienta matemática ajusta una curva cuadrática a una línea formada por al menos tres landmarks alineados, transformándola en una recta y modificando por lo tanto, la configuración total de landmarks (Valentin et al. 2008). Para ello, se utilizaron cuatro landmarks dispuestos sobre el eje medio del cuerpo, los cuales fueron descartados posteriormente al momento de realizar el análisis estadístico.

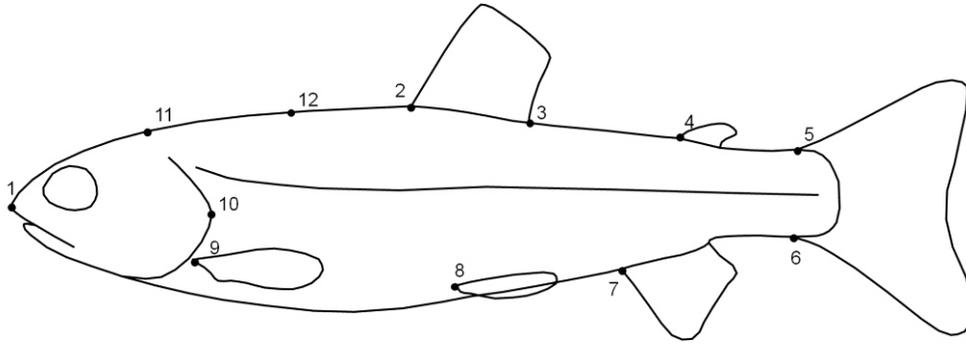


Figura 3. Landmarks utilizados para capturar la forma de la trucha dorada mexicana *Oncorhynchus chrysogaster*. 1, límite anterior; 2 y 3, inserción anterior y posterior de la aleta dorsal; 4, inserción anterior de la aleta globosa; 5 y 6, inserción dorsal y ventral de la aleta caudal; 7 inserción anterior de la aleta anal; 8 Inserción de la aleta pélvica; 9, inserción de la aleta pectoral; 10, máxima curvatura del opérculo; 11 y 12, semi-landmarks sobre la curvatura de la región frontal ubicados equidistantemente entre los landmarks 1 y 2.

#### *Análisis estadístico de datos morfométricos*

Las variables de forma, fueron analizadas mediante pruebas estadísticas multivariadas, utilizando el programa MorphoJ, versión 1.05b (Klingenberg 2011). Se realizaron análisis mediante dos aproximaciones, por un lado se llevó a cabo un Análisis de Componentes Principales (ACP), a fin de describir las generalidades de la variación morfológica, independientemente del sitio de procedencia de las truchas. Posteriormente se realizó un Análisis de Función Discriminante (AFD) para determinar las variaciones en la forma del cuerpo de la trucha, que maximizan la separación entre machos y hembras. Se efectuó una prueba de permutaciones con 1000 repeticiones, a fin de otorgar un valor de significancia estadística a la comparación entre la forma media de machos y hembras (Zelditch et al. 2012). Para este análisis fueron excluidos los individuos indeterminados, por lo que para el análisis de dimorfismo sexual, se trabajó con una muestra de 256 ejemplares (132 hembras y 124 machos).

#### *Estudio histológico de las gónadas*

Para el estudio histológico se usó un total de 90 individuos de ambos sexos capturados en ocho sitios de muestreo (Tabla 1). A cada ejemplar se le extrajeron las gónadas y fueron fijadas en solución Davidson (Howard y Smith 1983), realizándose el análisis histológico, tanto cualitativo como cuantitativo, en el laboratorio de Histología del CIBNOR (Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C). Se analizaron gónadas de 38 machos, 46 hembras y cuatro organismos indeterminados, seccionándolas en la parte anterior, media y posterior de los ovarios y testículos; cada sección transversal se colocó individualmente en histocasetes. El procesamiento histológico que comprende la deshidratación de los tejidos en una serie progresiva de alcoholes (70%, 80%, 90%, 96%, 100%, aclarado en xileno 100%) y posterior infiltración en parafina Paraplast X-Tra, con punto de fusión de 54-56 °C, se llevó a cabo en un procesador de tejidos ASP200S Leica®. Las inclusiones de tejido gonádico en parafina se elaboraron en un centro de inclusión Histoembbeder Leica®. Los moldes con tejido se dejaron enfriar en una placa fría a una temperatura de -5 °C y posteriormente se obtuvieron cortes de cada gónada, con grosor de 4 µm, con un micrótopo de rotación RM 2155 Leica®. Para extenderlos, se colocaron en un baño de flotación con agua y grenetina al 1%, a 43°C, recogiendo los cortes con portaobjetos y se dejaron secar

a temperatura ambiente. Los tejidos fueron teñidos en un equipo automático Auto-Stainer Leica ST5020® con las técnicas de tinción hematoxilina de Harris y contrastados con eosina-floxina (H&E, Sheehan y Hrapchak 1980), Azul Alciano PAS (Ácido Peryódico Schiff) (AAPAS, Bancroft y Stevens 1990) y Sudán Negro (SN, Rodríguez-Moscozo y Arnaiz 1998). Después de la tinción los cortes se montaron con cubreobjetos en resina sintética para su observación al microscopio. Los cortes teñidos con estas técnicas se emplearon para llevar a cabo la clasificación de estadios de desarrollo de las gónadas de *O. chrysogaster*. Las imágenes de los cortes teñidos de las gónadas se capturaron en un sistema de captura y análisis de Imágenes Image Pro Plus (versión 9.0), integrado por un microscopio óptico compuesto de marca Olympus BX50 y una cámara digital Nikon DS-Ri1 conectada a una computadora.

Para la medición de los gametos se digitalizaron imágenes de las laminillas histológicas con diferentes objetivos (4x, 10x, 20x, 40x, 60x y 100x). Para calcular el diámetro de los ovocitos en cada muestra, se obtuvo el área de los ovocitos utilizando el software Image Pro-Plus (versión 9.0), a partir de imágenes digitalizadas. Se midieron 50 ovocitos por laminilla de cada hembra, diferenciándolos por sub-estadio de desarrollo de la ovogénesis y midiendo gametos cuyo núcleo fuera visible. En el programa, una vez asignada la escala de las imágenes se trazó manualmente el perímetro de los ovocitos para el cálculo automático del área.

Para estandarizar el tamaño de los ovocitos, se estimó el diámetro teórico (Dt) a partir del área total de cada ovocito. El diámetro se calculó mediante la fórmula:

$$Dt = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$

Dónde: Dt = diámetro teórico, A = área y  $\pi = 3.1416$  (Saout et al. 1999).

#### *Descripción de estadios de desarrollo gonádico*

A partir de las preparaciones histológicas con las técnicas de tinción H&E, AAPAS y SN, se realizó la descripción de los estadios de desarrollo de las gónadas tomando como referencia la clasificación propuesta por Zúñiga-Flores et al. (2011). Estos métodos están basados principalmente en las descripciones de las categorías ovocitarias generales del desarrollo ovárico en peces teleósteos (Yamamoto 1956; Wallace y Selman 1981, 1990; De Vlaming 1983; West 1992; Nakamura 2013).

#### *Estado reproductivo*

Con el fin de determinar el estado reproductivo de *O. chrysogaster* se obtuvo la frecuencia relativa de los diferentes estadios de desarrollo gonádico de hembras y las clases reproductivas de los machos para los meses de marzo y por sitio de muestreo, esas frecuencias se graficaron en el programa Excel.

#### *Diámetro de los oocitos en desarrollo*

Se evaluó la normalidad de los datos mediante una prueba *a priori* Kolmogorov-Smirnoff y de homocedasticidad de Levene. Para determinar la existencia de diferencias significativas entre los valores obtenidos de la talla de los ovocitos por sub-estadio de desarrollo se usó un análisis de variancia unifactorial (Zar 1999), con el paquete estadístico STATISTICA ®

(versión 8.0 StatSoft Inc.), con un nivel de significancia estadística de  $\alpha=0.05$ , seguido por una prueba a posteriori de comparación de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).

## RESULTADOS

### *Estudio morfométrico del dimorfismo sexual*

El análisis de la variabilidad morfológica reveló que el primer componente principal (CP1), explicó un 24.15 % del total de la variación (Fig. 4a, b). El extremo positivo de dicho eje se asoció con un cuerpo más robusto, de mayor altura y un pedúnculo caudal más corto en relación al consenso, así como también con el opérculo retraído hacia el extremo caudal (Fig. 4 c). El CP 2 explicó un 15.67 % de la variación, siendo los valores positivos del eje asociados con truchas que tuvieron un pedúnculo caudal más alto, robusto y alargado; el opérculo con su curvatura máxima en una posición más elevada; una menor distancia entre aletas pélvica y anal y la aleta dorsal más larga. Por último, el CP 3 (11.77 %) mostró ejemplares con la región frontal con una morfología más convexa y la aleta pélvica desplazada hacia la región anterior.

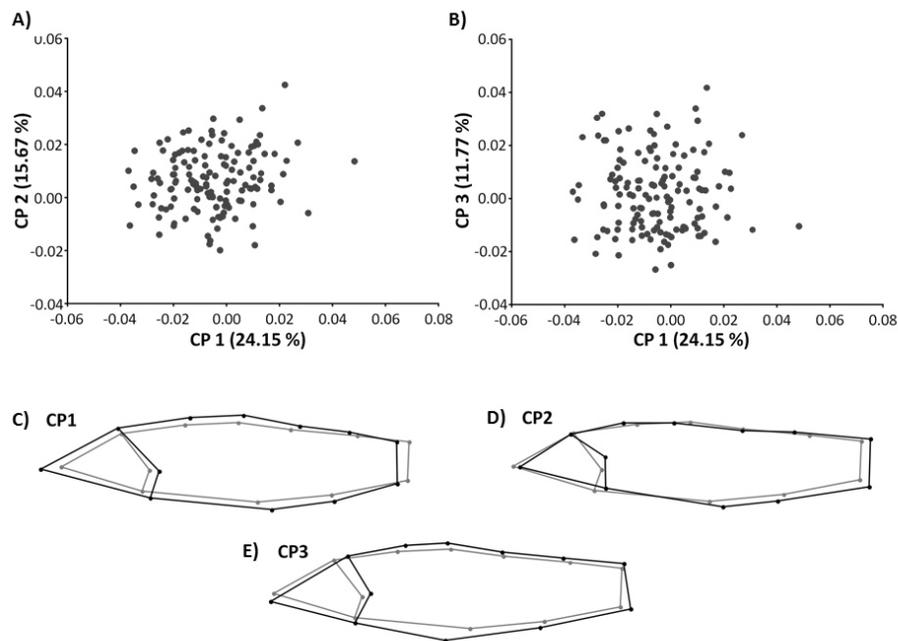


Figura 4. Análisis de componentes principales para la variación de forma en *Oncorhynchus chrysogaster*. Los gráficos de dispersión muestran los scores de cada componente principal A) CP 1 vs. CP 2 y B) CP 1 vs CP 3. Los valores entre paréntesis indican el porcentaje de variación explicado en cada caso. Los gráficos de deformación muestran la forma consenso en gris y la deformación asociada a los componentes principales 1, 2 y 3 (Fig. C, D y E respectivamente). El factor de escala de 0.1.

Se determinó el dimorfismo sexual ( $P<0.0001$ ) mediante un procedimiento de asignación. Los porcentajes de asignación de la AFD fueron menores en machos que en hembras (67% vs 77% respectivamente). Las máximas diferencias en la forma del cuerpo entre machos y hembras se localizaron principalmente en la región de la cabeza de los ejemplares, en

donde los machos tuvieron una cabeza más robusta y alargada, mientras que las hembras presentaron una mayor curvatura y el opérculo desplazado hacia la región oral (Fig. 5).

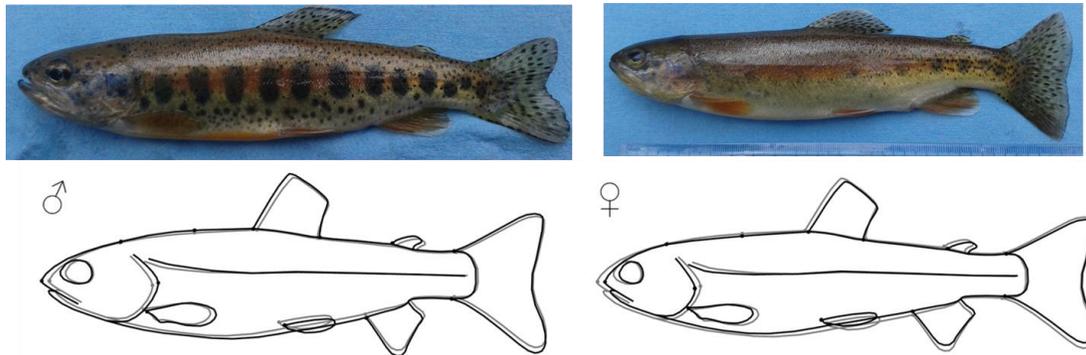


Figura 5. Morfología consenso para machos y hembras de *Oncorhynchus chrysogaster* en negro, respecto al consenso general en gris. En ambos casos la variación respecto al consenso se encuentra maximizada en un factor de 5 para mejorar la visualización de las diferencias.

### *Estudio histológico de las gónadas*

#### Descripción de estadios de desarrollo gonádico

Las hembras mostraron cinco estadios de desarrollo ovárico.

Previtelogénesis (estadio I) la cual consiste en el crecimiento primario de los ovocitos e incluye tres sub-estadios; nucléolo cromatina, perinucleolo temprano y perinucleolo tardío; estos ovocitos están presentes en los ovarios de las hembras juveniles.

Vitelogénesis (estadio II) consiste en el crecimiento secundario de los ovocitos y se caracteriza por la aparición de vesículas o alvéolos corticales en el ovoplasma que se tiñen con el colorante Azul Alciano, los alvéolos aparecen inicialmente en la periferia del ovoplasma, pero conforme aumentan de tamaño y número, se distribuyen en todo el ovoplasma. La presencia de estas estructuras significa que el ovocito ha comenzado el proceso de vitelogénesis endógena. En este estadio continúa el crecimiento terciario del ovocito caracterizado por la presencia de inclusiones lipídicas en el ovoplasma, en otros ovocitos del mismo estadio se observa la incorporación de los primeros glóbulos de vitelo dando inicio al proceso de vitelogénesis exógena.

Posvitelogénesis (estadio III) el ovocito maduro ha completado la acumulación de vitelo en el ovoplasma y se observa la coalescencia de los glóbulos de vitelo concluyendo el proceso de vitelogénesis.

En el desove (ovulación) se produce el fenómeno conocido como hidratación, que consiste en la incorporación de agua, dando lugar a un crecimiento considerable del ovocito (estadio IV). Posterior al desove, el ovario contiene folículos postovulatorios constituidos por capas foliculares que inician un proceso degenerativo y de reabsorción.

En los ovarios desovados parcialmente continúan presentes ovocitos inmaduros en varias etapas de desarrollo que no fueron desovados (estadio V o post-desove). Los estadios y sub-estadios son descritos con detalle en la Tabla 2 y Figura 6.

Tabla 2. Estadios de desarrollo ovárico y categorías de ovocitos en *Oncorhynchus chrysogaster*. El diámetro de los ovocitos fue analizado usando el sub-estadio como variable independiente en un ANOVA unifactorial ( $P < 0.05$ ). Los datos se reportan como la media  $\pm$  error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas, después del análisis *post hoc* (Tukey).

Estadios de desarrollo ovárico	Sub-estadios de ovocitos	Descripción	Diámetro (Media $\pm$ DS) $\mu\text{m}$
I Previtelogénesis	Nucléolo cromatina	Inicia el crecimiento primario del ovocito: se observa solo un gran núcleo central rodeado de una delgada capa de ovoplasma basófilo. El núcleo contiene un único nucléolo grande.	26.82 $\pm$ 34.15 <sup>g</sup>
	Perinucleolo temprano y tardío	Se observan múltiples nucléolos organizados en la periferia del núcleo, con ovoplasma menos basófilo. No hay inclusiones en el ovoplasma y las células foliculares rodean al ovocito formando una delgada capa. En los ovocitos perinucleolo temprano se pueden observar grandes vacuolas debajo de la membrana celular, estas vacuolas no se observan en el ovocito perinucleolo tardío. Termina el crecimiento primario.	75.60 $\pm$ 9.56 <sup>g</sup> 141.00 $\pm$ 9.38 <sup>f</sup>
II Vitelogénesis	Alvéolos Corticales	Inicia el crecimiento secundario de los ovocitos con la presencia de los alvéolos corticales que empiezan aparecer en la periferia del ovoplasma y se incrementan conforme el ovocito crece. Hay dos tipos de ovocitos con alveolos corticales, unos con alvéolos acumulados en la periferia de la membrana del ovocito y otros con abundantes alveolos dispersos por todo el ovoplasma. En este estadio se da inicio a la vitelogénesis endógena.	215.20 $\pm$ 13.15 <sup>c</sup> 277.43 $\pm$ 13.39 <sup>d</sup>
	Inclusiones lipídicas	Inicia el crecimiento terciario: se observan pequeños glóbulos lipídicos en abundancia y alvéolos corticales dispersos en el ovoplasma.	324.34 $\pm$ 13.40 <sup>d</sup>
III Posvitelogénesis	Gránulo de vitelo temprano	Pequeños glóbulos aparecen en el ovoplasma. En esta fase se puede observar una delgada zona radiata. El folículo consiste en una capa de células foliculares aplanadas. En este estadio se da inicio a la vitelogénesis exógena.	437.67 $\pm$ 8.05 <sup>c</sup>
	Gránulo de vitelo avanzado	La característica más conspicua es el aumento de tamaño del ovocito debido a la acumulación de gránulos de vitelo que incrementan su tamaño llenando el ovoplasma. Las gotas lipídicas comienzan a coalescer. En este estadio concluye el crecimiento terciario y el proceso de vitelogénesis. La hidratación comienza al final de la maduración antes de la ovulación. La lipoproteína de las vesículas de vitelo se fusiona completamente formando una masa continua de fluido, no se observa gota lipídica. Este proceso concede transparencia al huevo, así como un aumento considerable de tamaño debido a la incorporación de agua. El ovocito hidratado es homogéneo y finalmente granular.	548.52 $\pm$ 16.56 <sup>b</sup>
IV Desove	Ovocito hidratado	Se observa la presencia de folículos postovulatorios con desorganización de las capas de las células foliculares y ovocitos inmaduros no desovados.	2753.26 $\pm$ 14.90 <sup>a</sup>
V Post-desove			

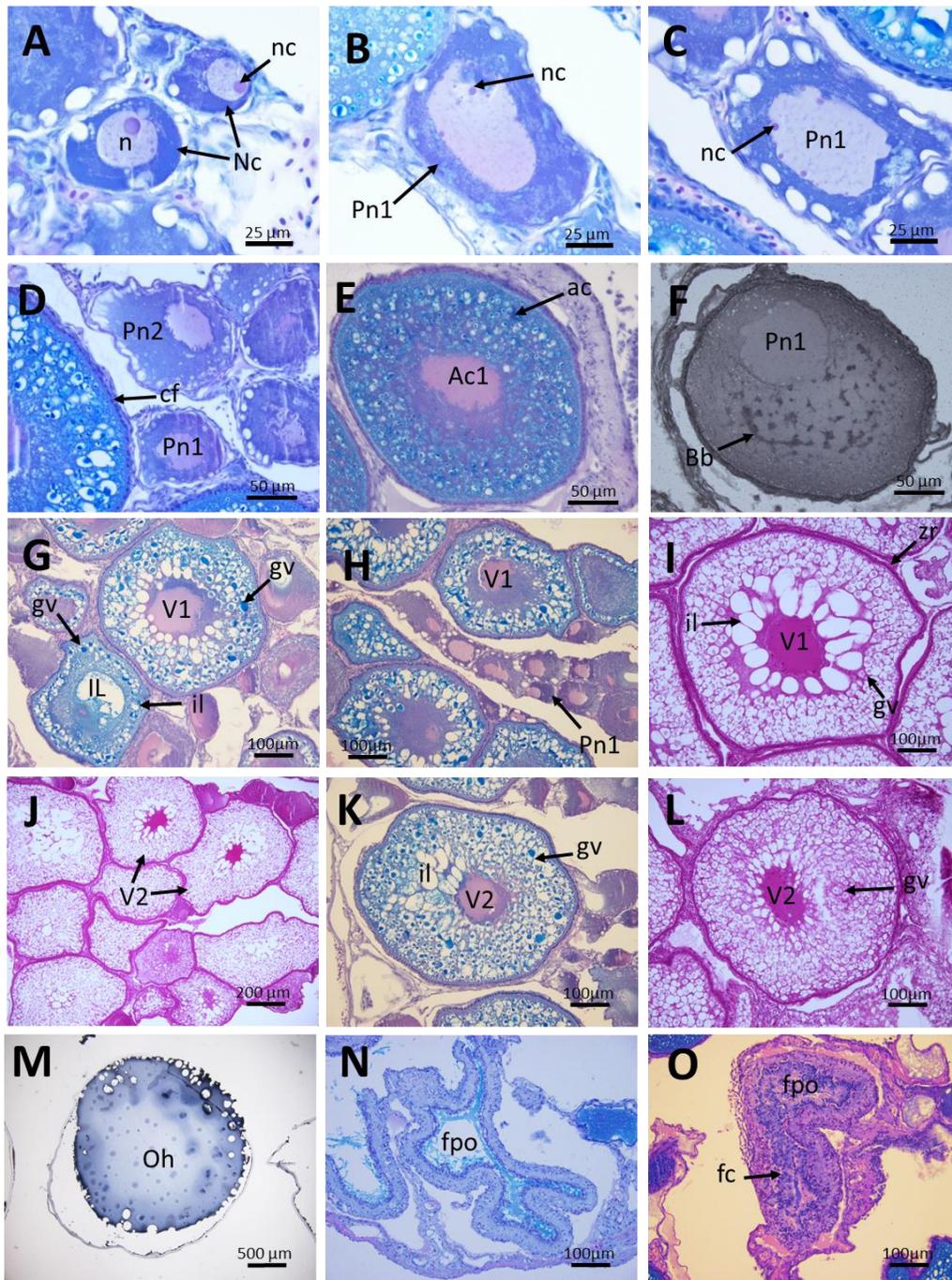


Figura 6. Estadios del desarrollo ovárico de *Oncorhynchus chrysogaster*. A) Previtelogénesis; Cn, ovocito nucléolo cromatina. B) y C) Pn1, ovocito perinucleolo temprano. D) Pn2 ovocito perinucleolo tardío. E) Vitelogénesis; Ac, ovocito alveolo cortical; IL, ovocito inclusión lipídica. F) Bb, cuerpo de Balbiani. G), H), I) V1, ovocito vitelogénico temprano. J), K), L) Posvitelogénesis; V2 ovocito vitelogénico avanzado. M) Desove (hidratación y la ovulación); Oh, ovocito hidratado. N) y O) Postdesove; fpo, folículo postovulatorio; n, núcleo; nc, nucléolo; ac, alvéolos corticales; fc, células foliculares; il, inclusiones lipídicas; zr, zona radiata; gv, gránulos de vitelo. Tinciones Hematoxilina-eosina, AAPAS y SN.

Para los machos la primera clase I o quiescencia contiene espermatogonias y abundante tejido conjuntivo; durante la maduración temprana o clase II la gónada muestra una estructura tubular que contiene espermatogonias, espermatocitos primarios y secundarios; en la maduración intermedia o clase III detectan espermatozoides dentro del lumen del conducto testicular; la maduración avanzada o clase IV presenta los túbulos anastomosados llenos de espermatozoides y la última clase V o regresión corresponde a la degeneración de espermatozoides residuales. Estas etapas del desarrollo se describen en detalle en el Tabla 3 y Fig. 7.

Tabla 3. Estadios de desarrollo testicular de *Oncorhynchus chrysogaster*.

<b>Desarrollo Testicular</b>	<b>Descripción</b>
Clase I Quiescencia	Estadio caracterizado por la presencia de células germinales primordiales, espermatogonias y abundante tejido conjuntivo.
Clase II Maduración Temprana	La estructura tubular es bien definida, conteniendo espermatogonias, espermatocitos primarios y secundarios, con pocas espermátidas. Se observa el lumen está parcialmente cerrado.
Clase III Maduración Intermedia	Presencia de epitelio germinal continuo en la región tubular, epitelio germinal discontinuo en la región del conducto testicular. Los espermatozoides han sido liberados dentro del lumen.
Clase IV Maduración Avanzada	Los túbulos se anastomosan llenos de espermatozoides. Abundante epitelio germinal discontinuo en el extremo distal de los conductos testiculares y epitelio germinal continuo en su extremo proximal.
Clase V Regresión	Degeneración de espermatozoides residuales

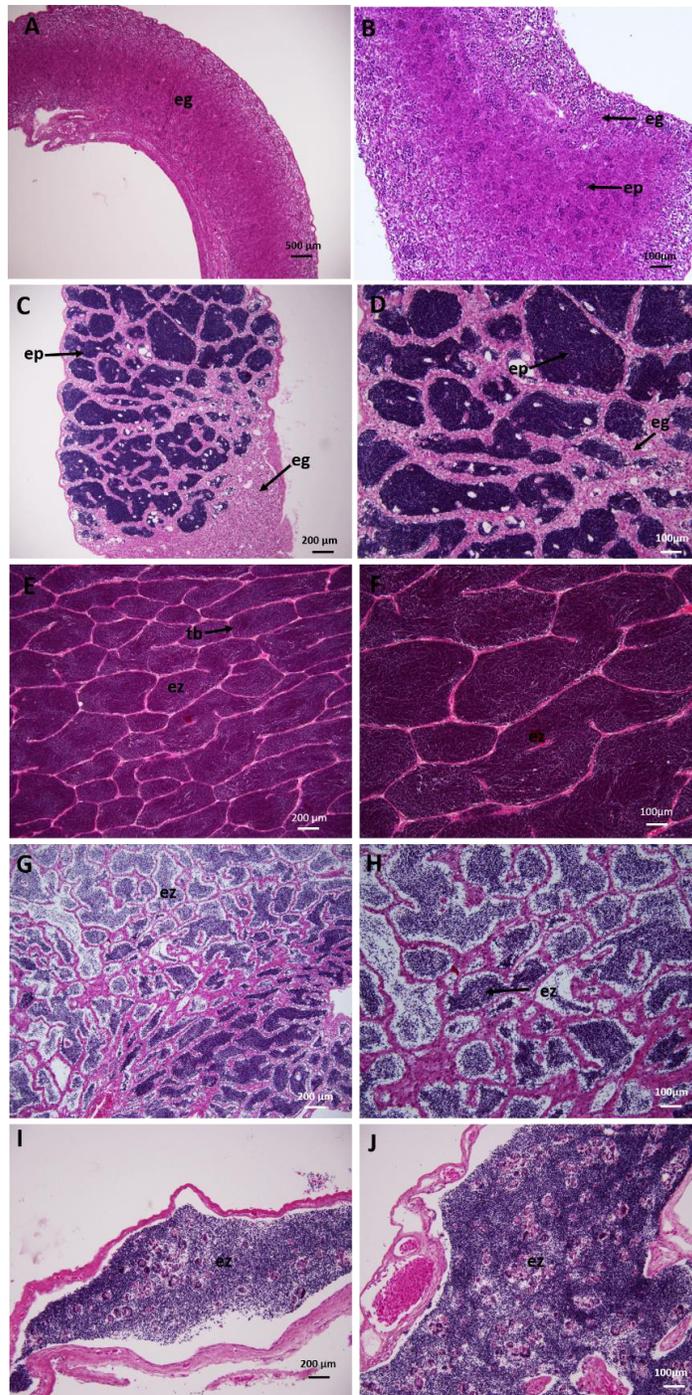


Figura 7. Desarrollo gonádico en machos de *Oncorhynchus chrysogaster* A) y B) Clase I; C) y D) Clase II; E) y F) Clase III; G) y H) Clase IV; I) y J) Clase V; eg, espermatogonias; ep, espermatocitos; ez, espermatozoides; tb; túbulos seminíferos. Tinción Hematoxilina-eosina.

#### *Estado reproductivo*

En el mes de marzo en la localidad río Verde (cuenca del río Fuerte), las frecuencias de estadios de desarrollo gonádico en hembras fueron las siguientes; para el estadio I fue 11.11%, estadio II de 55.55% y estadio V de 33.3%. En el arroyo Macheras (cuenca del río

Sinaloa) las hembras en estadio III presentaron una frecuencia del 18.2%, estadio IV con un 18% y estadio V 63.6%. En el arroyo La Osera (cuenca del río Sinaloa) las hembras en estadio II presentaron una frecuencia del 25%, en estadio III de 50% y en estadio V de 25% (Tabla 2, Fig. 8A). Estos resultados indican que en el arroyo Macheras, la población de hembras estaba en periodo de desove próximo a terminar y en el río Verde y arroyo Oseras, el desove había concluido y se iniciaba un nuevo desarrollo gonádico, sugiriendo que podría haber un nuevo desove en el próximo mes.

Para el mes de mayo, en la cuenca del río Sinaloa las frecuencias de estadios de desarrollo gonádico en hembras fueron las siguientes; en los arroyos Pericos, Cerro Solo y Cebollín, la frecuencia de hembras en estadio III fue del 100%. En el arroyo Agua Blanca (cuenca del río Culiacán), el 83% de las hembras se encontraron en estadio II y 16.66% en estadio III (Tabla 2, Fig. 8B). Durante el mes de mayo la población de hembras en las cuencas de los ríos Sinaloa y Culiacán parece iniciar un nuevo desarrollo gonádico.

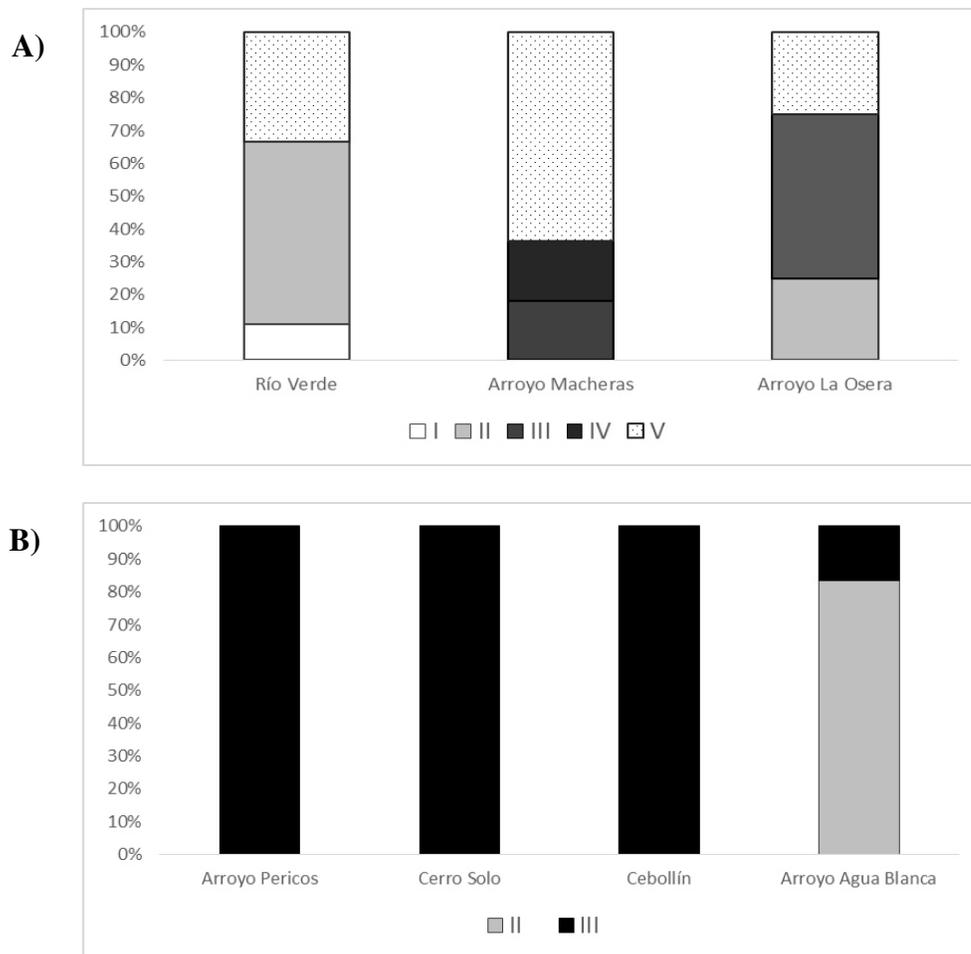


Figura 8. Frecuencia (%) de los estadios de desarrollo gonádico de hembras de *Oncorhynchus chrysogaster* en un período reproductivo. A) Para el mes de marzo en las cuencas del río Fuerte (río Verde) y del Sinaloa (arroyos Macheras y La Osera). B) Para el mes de mayo en las cuencas de los ríos Sinaloa (arroyos Perico, Cerro Solo y Cebollín) y Culiacán (arroyo Agua Blanca).

Respecto al periodo reproductivo de los machos para el mes de marzo en río Verde (cuenca del río Fuerte) la frecuencia de machos en Clase I, II y III fue del 20% en cada una de ellas, y un 40% en Clase IV (maduración avanzada). Para los sitios de la cuenca del río Sinaloa fue como sigue; arroyo Macheras las frecuencias de machos maduros (Clase IV) fue del 55.5% y machos en regresión (Clase V) fue de 44.4%. En el arroyo La Osera la frecuencia de machos en Clase I fue del 11.1%, en Clase III el 44.4% y machos maduros (Clase IV) con un 44.4% (Fig. 9A).

Para el mes de mayo en la cuenca del río Sinaloa las frecuencias fueron; en el arroyo Pericos la frecuencia de machos en Clase I fue del 25%, Clase II 25% y machos en regresión (Clase V) presentó una frecuencia del 50%. En el sitio Cerro Solo se presentó un 80% de machos en Clase I y un 20% en Clase V. En el arroyo Agua Blanca (cuenca Culiacán) el 16.6 % de los machos se encontraron en Clase I y la mayor frecuencia la presentaron los machos en Clase II con un 83.3% (Fig. 9B). La presencia de machos espermeantes durante el mes de marzo estuvo coordinada con la presencia de hembras con óvulos hidratados, mientras que en mayo inician un nuevo periodo reproductivo.

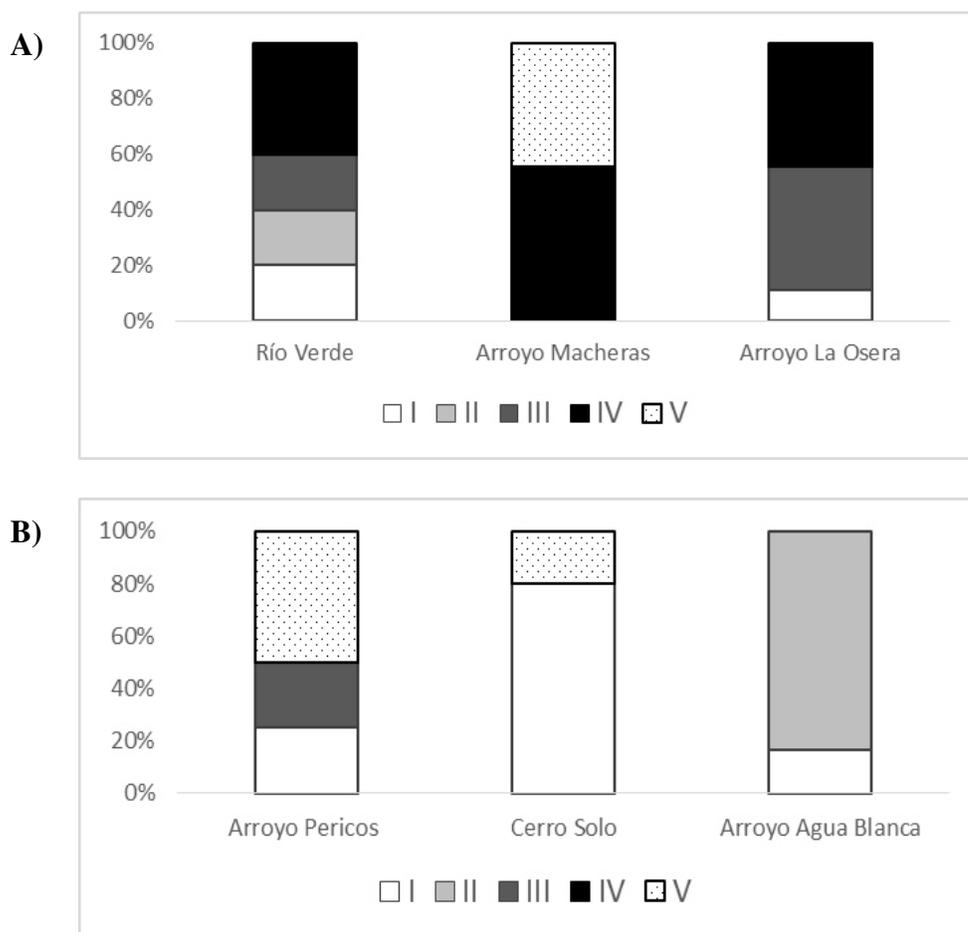


Figura 9. Frecuencia (%) de los estadios de desarrollo gonádico de machos de *Oncorhynchus chrysogaster* en un período reproductivo. A) Para el mes de marzo en las cuencas del río Fuerte (río Verde) y del Sinaloa (arroyos Macheras y La Osera). B) Para el mes de mayo en las cuencas de los ríos Sinaloa (arroyos Perico, Cerro Solo y Cebollín) y Culiacán (arroyo Agua Blanca).

### Diámetro de los ovocitos en desarrollo

En general, las tallas máximas de los ovocitos reflejan el avance de la ovogénesis, permitiendo establecer la temporada de mayor frecuencia de hembras con ovocitos más grandes y maduros. En el Tabla 2 y Fig. 10 se muestran siete grupos de ovocitos con diferencias estadísticamente significativas en sus diámetros ( $p < 0.05$ ), los ovocitos hidratados presentaron un diámetro de  $2,753.26 \mu\text{m}$  (a). A este estado siguieron los ovocitos vitelogénicos avanzados (maduros) con un diámetro promedio de  $548.5 \mu\text{m}$  (b), ovocitos con gránulo de vitelo temprano ( $437.67 \mu\text{m}$ ; c). En el mismo grupo homogéneo se presentan los ovocitos con inclusiones lipídicas ( $324.34 \mu\text{m}$ , d) y alvéolos corticales avanzados ( $277.42 \mu\text{m}$ , d), seguidos por los ovocitos con alvéolos corticales tempranos ( $215.2 \mu\text{m}$ , e), ovocitos perinucleolo tardío ( $141 \mu\text{m}$ , f) y los ovocitos perinucleolo temprano ( $75.6 \mu\text{m}$ , g) y nucléolo cromatina ( $26.8 \mu\text{m}$ , g).

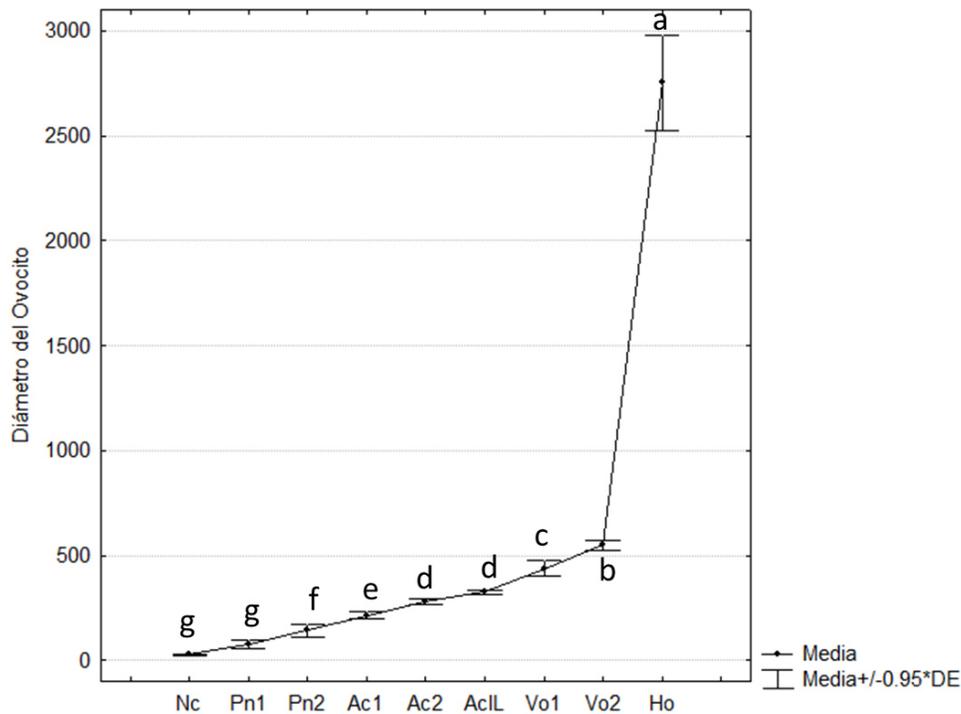


Figura 10. Diámetro promedio ( $\mu\text{m}$ ) de los ovocitos de *Oncorhynchus chrysogaster* utilizando un ANOVA unifactorial ( $P < 0.05$ ). Las letras indican test de Tukey, ver Tabla 2.

## DISCUSIÓN

El rasgo sexual secundario más común en muchas especies de los géneros *Salmo* y *Salvelinus* así como en la mayoría de las especies del género *Oncorhynchus*, es la modificación de la mandíbula de los machos maduros en forma de gancho y con dientes agrandados, aunque las hembras maduras también pueden presentarlo pero en menor grado (Morton 1965). Needham y Gard (1964) reportan que la trucha dorada mexicana no muestra modificación de la mandíbula. Nuestras observaciones durante el periodo de desove, confirman estas observaciones. Es importante resaltar que no había información sobre los rasgos sexuales secundarios en las truchas doradas mexicanas. El análisis de morfometría geométrica reveló diferencias en tamaño y forma de la cabeza, los machos

tuvieron una cabeza más robusta y alargada, mientras que las hembras mostraron una mayor curvatura cefálica y el opérculo desplazado hacia la región oral.

Es difícil determinar qué factores generan el dimorfismo sexual en salmónidos, la alta plasticidad fenotípica en este grupo de peces complica tales evaluaciones. La selección sexual es probablemente un factor crucial (Hedrick y Temeles 1989; Andersson 1994), no obstante, se han reportado otras explicaciones, como por ejemplo un dimorfismo sexual más desarrollado en las especies semélparas (que se reproducen una sola vez y luego mueren), que en las iteróparas (que se reproducen más de una vez a lo largo de su vida), debido a un esfuerzo reproductivo mayor en las primeras (Andersson 1994). Del mismo modo, las especies de salmónidos que han perdido la condición anadrómica y de cuerpo pequeño no muestran un dimorfismo sexual relacionado con las mandíbulas (Taylor 1990; Wilson 1997).

La frecuencia de la reproducción es un rasgo muy variable en los salmoniformes, encontrándose especies completamente iteróparas hasta semélparas, y toda la gama de variación entre estos dos estados (Behnke 1992). La frecuencia de iteroparidad en las especies es menos común en los machos que en las hembras (Wilson 1997). Una característica interesante en la trucha dorada mexicana es que el desarrollo del ovario es tipo asíncrono y consiste en al menos siete poblaciones de ovocitos (sub-estadios) en diferentes etapas de desarrollo en el momento de la madurez previa al desove. Estas diferencias son suficientes evidencias para sugerir que la trucha dorada mexicana es una especie que puede reproducirse más de una vez y por lo tanto es una especie iterópara (Fig. 6, Tabla 2). Además estas truchas han perdido la capacidad de anadromía (Hendrickson et al. 2002) y son de cuerpo pequeño, lo que podría explicar, el nulo desarrollo de las mandíbulas en forma de gancho. En nuestro estudio no se pudo establecer si la especie presenta algún tipo de cortejo sexual y si hay preferencias de las hembras hacia machos con cabeza más robusta y alargada, por lo que es interesante realizar estudios de comportamiento para determinar patrones de cortejo y verificar si la selección sexual es el factor que determina el dimorfismo sexual observado.

La coloración es otro carácter que ha sido reportado como un rasgo sexualmente dimórfico (Behnke 1992). Durante el periodo de desove, el vientre de los machos cambia a tonalidades naranja, la presencia de esta coloración llevo a los autores acuñar el nombre científico de la trucha dorada mexicana (Needham y Gard 1964); nuestras observaciones de campo confirman este cambio de coloración en los machos.

El estado morfológico de los folículos y el diámetro de los ovocitos se analizaron en diferentes etapas del desarrollo ovárico, los cambios observados fueron similares al crecimiento gonádico en la trucha arcoíris *O. mykiss* (Sharma y Bhat 2014) y en otros teleósteos (Grau et al. 2009; Lubzens et al. 2010; Mahomed 2010). El crecimiento de los ovocitos se clasificó en cinco estadios de desarrollo ovárico que incluye siete sub-estadios o categorías ovocitarias, donde el ovocito más avanzado en términos de vitelogénesis es el rasgo que caracteriza al estadio. Los machos también mostraron cambios en el desarrollo de las gónadas, similares a los de otros salmónidos (Dziewulska y Domagała 2003). Lamentablemente, la microscopía de luz tiene limitaciones para apreciar cambios morfológicos en células pequeñas como los espermatozoides, por lo que la descripción de las clases fue más limitada.

Las gónadas obtenidas para este estudio se obtuvieron durante los meses de marzo y mayo y solo se observaron hembras en desove y machos espermiantes durante el mes de marzo en el arroyo Macheras (cuenca del río Sinaloa). La ocurrencia de hembras y machos

con elementos gonádicos en desarrollo sugieren que durante el mes de mayo se inicia un nuevo periodo reproductivo en las tres cuencas estudiadas. Un muestreo de un ciclo anual en el área de distribución global de la especie, es necesario para determinar de mejor manera la fenología del desove en la trucha dorada mexicana y sus posibles diferencias a nivel de cuenca.

## CONCLUSIONES

En este estudio se pudo demostrar que el dimorfismo sexual en la trucha dorada mexicana se manifiesta principalmente en la amplitud y robustez de la cabeza y la posición del opérculo. Esta especie muestra todos los estadios de desarrollo gonadal durante el período reproductivo, demostrando que se reproduce más de una vez al año, por lo que es una especie iteropara. Tanto machos y hembras mostraron gónadas con cinco etapas de desarrollo de sus células sexuales. Los estadios de óvulos hidratados, señal del desove y machos espermiantes se presentaron de manera simultánea durante el mes de marzo, mientras que los machos y hembras con gónadas en diferentes etapas iniciales, sugieren que un nuevo periodo de desarrollo gonádico se presenta en mayo.

## AGRADECIMIENTOS

El trabajo fue financiado por el proyecto CONACYT (CB-2010-1:152893). Se contó con los permisos de pesca (SGPA/DGVS/02485/13, SGPA/DGVS/02968/14 y SGPA/DGVS/05052/15), expedidos por la Dirección General de Vida Silvestre de la SEMARNAT. Se agradece a Eulalia Meza Chávez y Noemi Bocanegra Castillo del CIBNOR por su apoyo en los análisis de laboratorio.

## 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.
- Aksnes, A., B. Gjerde and S.O. Roald. 1986. Biological, chemical and organoleptic changes during maturation of farmed Atlantic salmon, *Salmo salar*. *Aquaculture*. 53: 7-20.
- Andersson, M. 1994. *Sexual selection*. Princeton University Press P, NJ, editor: Princeton University Press, Princeton, NJ.
- Bancroft, J.D. and A. Stevens. 1990. *Theory and practice of histological techniques*. Churchill Livingstone. New York.
- Behnke, R.J. 1992. Native trout of western North America. American Fisheries Society Monograph. 6: 1-275.
- Benítez, H.A. 2013. Sexual dimorphism using geometric morphometric approach. In H Moriyama. *Sexual Dimorphism*. ISBN 978-953-51-1075-0, 150 pages, Publisher: InTech, Chapters published March 27, 2013 under CC BY 3.0 license.
- Dziewulska, K. and J. Domagała. 2003. Histology of salmonid testes during maturation. *Reproductive Biology*. 3(1): 47-61.
- Eberhard, W.G. 1985. *Sexual selection and animal genitalia*. Cambridge, MA: Harvard University Press. 244 p.
- Frank, K.T. and W.C. Leggett. 1994. Fisheries ecology in the context of ecological and evolutionary theory. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 25: 401-422.

- Grau, A., M. Linde and A.M. Grau. 2009. Reproductive biology of the vulnerable species *Sciaena umbra* Linnaeus, 1758 (Pisces: Sciaenidae). *Scientia Marina*. 73: 67-81.
- Hedrick, A.V and E.J. Temeles. 1989. The evolution of sexual dimorphism in animals: hypotheses and tests. *Trends in Ecology & Evolution*. 4(5): 136 p.
- Hendrickson, D.A., H. Espinosa-Pérez, L.T. Findley, W. Forbes, J.R. Tomelleri, R.L. Mayden, J.L. Nielsen, B. Jensen, G. Ruiz Campos, A. Varela Romero, A. van der Heiden, F. Camarena and F.J. García-De León. 2002. Mexican native trout: a review of their history and current systematic and conservation status. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*. 12: 273–316.
- Howard, D.W. and C.S. Smith. 1983. Histological Techniques for Marine Bivalve Mollusks. NOAA Technical Memorandum NMFS-F/NEC-25. Massachusetts. 102 p.
- Kendall, D.G. 1977. The diffusion of shape. *Advances in Applied Probability*. 9: 428-430.
- Klingenberg, C.P. 2011. MorphoJ: an integrated software package for geometric morphometrics. *Molecular Ecology Resources*. 11:353–357.
- Lubzens, E., G. Young, J. Bobe and J. Cerda. 2010. Oogenesis in teleosts: How fish eggs are formed. *General and Comparative Endocrinology*. 165: 367-389.
- Maxwell, J. 1995. Swimming with salmon. *Natural History*. 104(9): 29-36.
- Mohamed, A.A. 2010. The reproductive biology and the histological and ultrastructural characteristics in ovaries of the female Gadidae fish *Merluccius merluccius* from the Egyptian Mediterranean water. *African Journal of Biotechnology*. 9: 2544-2559.
- Morton, W.M. 1965. The taxonomic significance of the Kype in American salmonids. *Copeia*. 1: 14-19.
- Nagahama, Y. 1983. The functional morphology of teleost gonads. In: Hoar W.S., Randall D.J., Donaldson E.M. (eds), *Fish Physiology*, Academic Press, New York, 233-275.
- Nakamura, M. 2013. Morphological and physiological studies on gonadal sex differentiation in Teleost fish. *Aqua-BioScience Monographs* 6: 1–47.
- Needham, P.R. and R. Gard. 1964. A new trout from Central Mexico: *Salmo chrysogaster*, the Mexican Golden trout. *Copeia* 1: 169-173.
- 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.
- Rodríguez-Moscozo, E. and R. Arnaiz. 1998. Gametogenesis and energy storage in a population of grooved carpet-shell clam, *Tapes decusatus* (Linné, 1787), in northwest Spain. *Aquaculture*. 162: 125-139.
- Rohlf, F.J. 2004. tpsUtil, file utility program. Version 1.58. Department of ecology and evolution, State University of New York at Stony Brook.
- Rohlf, F.J. 2005. tpsDig, digitize landmarks and outlines, version 2.17. Department of Ecology and Evolution, State University of New York at Stony Brook.
- Sandercock, F.K. 1991. Life history of coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*). In: Groot, C.; Margolis, L., eds. *Pacific salmon life histories*. Vancouver, BC: University of British Columbia Press: 395-445.
- Saout. C., C. Quéré, A. Donval, M. Paulet and F. Samain. 1999. An experimental study of the combined effect of temperature and photoperiod on reproductive physiology of *Pecten maximus* from the Bay of Brest (France). *Aquaculture*. 172: 301-314.

- Scott, W.B. and E.J. Crossman. 1973. Freshwater fishes of Canada. *Fisheries Research Board of Canada Bulletin*. 184: 1-966.
- Sharma, R.K. and R.A. Bhat. 2014. Histoarchitectural variations during oocyte growth in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*. 2(2): 177-183.
- Sheehan, D. and B.B. Hrapchak. 1980. Theory and practice of histotechnology. 2nd ed. Ohio: Battele Press. 481 pp Tyler C.R. & Sumpter J.P. (1996) Oocyte growth and development in teleosts. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 6: 287-318.
- Taylor, E.B. 1990. Phenotypic correlates of life-history variation in juvenile chinook salmon, *Oncorhynchus tshawytscha*. *Journal of Animal Ecology*. 59: 455-468.
- Taylor, E.B. 1991. A review of local adaptation in Salmonidae, with particular reference to Pacific and Atlantic salmon. *Aquaculture*. 98: 185-207.
- Valentin, A.E., X. Penin, J.P. Chanut, J.M. Sévigny and F.J. Rohlf. 2008. Arching effect on fish body shape in geometric morphometric studies. *Journal of Fish Biology*. 73: 623–638.
- Wallace, R.A. and K. Selman. 1981. Cellular and dynamic aspects of oocyte growth in teleosts. *American Zoologist*. 21: 325-43.
- Wallace, R.A. and K. Selman. 1990. Ultrastructural aspects of oogenesis and oocyte growth in fish and amphibians. *Journal of Electron Microscopy Technique*. 16: 175- 201.
- West, G. 1992. Methods of assessing ovarian development in fishes: a review. *Australian Journal of Marine and Fresh water Research*. 41: 199-222.
- Willson, M.F. 1997. Variation in salmonid life histories: Patterns and perspectives. Res. Pap. PNW-RP-498. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. 50 p.
- Yamamoto, K.I. 1956. Annual cycle in the development of ovarian eggs in the flounder, *Liopsetta obscura*. *Journal of the Faculty of Science of Hokkaido University Series VI Zoology*. 12: 362-373.
- Zar, J.H. 1999. Biostatistical analysis. 4 th Ed. Prentice Hall, Upper Saddle River. 1046 p.
- Zelditch, M.L., D.L. Swiderski H.D. Sheets and W. Fink. 2012. *Geometric morphometrics for biologists*. Elsevier, London.
- Zúñiga-Flores, M., S. Ortega-García, C. Rodríguez-Jaramillo and J. López-Martínez. 2011. Reproductive dynamics of the common dolphinfish *Coryphaena hippurus* in the southern Gulf of California. *Marine Biology Research*. 7(7): 677-689.

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

Arturo Ruiz-Luna

### INTRODUCCIÓN

El análisis de datos poblacionales de peces, inferidos a través de muestras de la población, es una práctica común para propósitos de investigación pesquera, cuyos resultados conducen a determinar medidas de manejo de las especies estudiadas, basándose en las conclusiones derivadas de distintos indicadores de la población.

Para especies que no necesariamente están sujetas a una captura comercial y aún para aquellas que carecen de todo interés pesquero, este tipo de análisis es el único medio para determinar el estado actual de la población, si se asume que ésta tiene un nivel de organización, una estructura propia y una conducta reproductiva que no tiene un efecto directo sobre otras poblaciones (Csirke 1989).

En una hipotética situación de estabilidad, las poblaciones tienden a mantenerse constantes en cuanto a número y estructura, con ritmos relativamente estables de crecimiento, equilibrando la pérdida de sus miembros por distintas causas de mortalidad con procesos reproductivos. De esta manera se prevé que el análisis de una muestra representativa de una población proporcionará una instantánea de la estructura poblacional, de su variación en el tiempo y posiblemente de la longevidad de sus miembros, al asociarse el tamaño de las cohortes o representantes de un grupo de edad, con la proporción que representan con respecto al total, a lo largo del tiempo (Fig. 1).

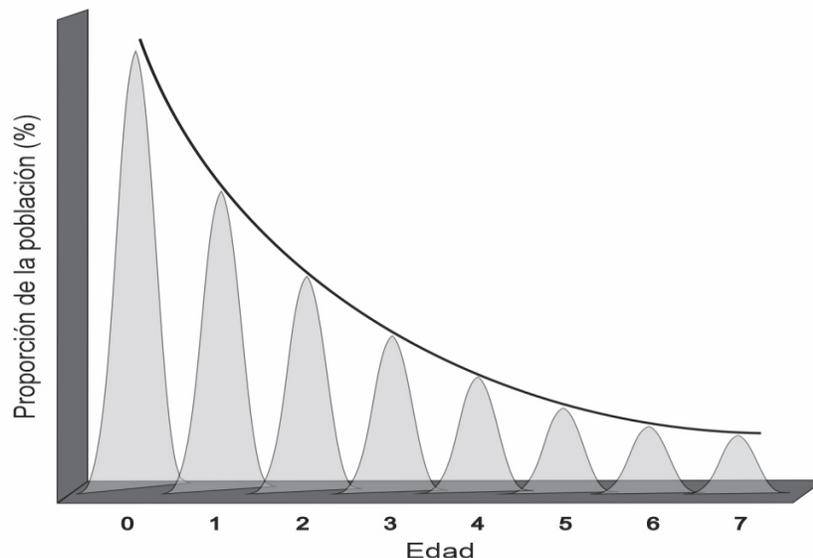


Figura 1. Corrimiento modal describiendo la proporción de individuos de distintas cohortes (grupos de edad) de una población a lo largo del tiempo.

La obtención de muestras de la población, además de generar información relacionada con la edad, permite coleccionar otros datos sobre la población; siendo las relaciones de peso y longitud, datos genéticos y morfométricos, de contenido estomacal y sobre la proporción de sexos y condición sexual, los más comúnmente obtenidos (Hilborn y Walters 1992).

Para especies que son objeto de la pesca comercial, es posible obtener muestras con cierta regularidad y con esto dar seguimiento a la dinámica de las cohortes generando aproximaciones a los patrones de crecimiento individual, así como de las posibles variaciones en los otros aspectos biológicos analizados. Sin embargo en especies como la trucha dorada mexicana *Oncorhynchus chrysogaster*, cuya importancia pesquera se reduce a la pesca de subsistencia, formando parte ocasional de la dieta de los pobladores de la Sierra Madre Occidental (SMO), los registros de su abundancia y en general de otros aspectos biológicos relacionados a la especie son escasos.

Con relación a los temas anteriores, se tiene información diversa para el complejo de especies de trucha que coexisten en la SMO (Hendrickson 2002, 2006; Mayden 2005), siendo más limitada para la trucha dorada mexicana. Hasta la fecha solo se conoce el estudio realizado por Reyes-Valdez et al. (2006), sobre la dieta de truchas de la SMO y donde se hace mención específica de *O. chrysogaster*. En dicho trabajo se relacionan los aspectos alimentarios con la talla de los individuos, sin más análisis sobre la estructura poblacional que el intervalo de tallas presente en la muestra analizada. De manera similar, Ruiz-Campos et al. (Capítulo 7, esta obra) realizan un análisis comparativo de relaciones biométricas entre los distintos grupos de especies de trucha nativa que se distribuyen en el país, incluyendo a la dorada mexicana.

Con esas consideraciones, el presente estudio contribuye a mejorar el conocimiento que actualmente se tiene sobre la biología de la trucha dorada mexicana, integrando algunos aspectos de su estructura poblacional (tallas y proporción sexual) y particularmente sobre sus relaciones biométricas, a partir de muestreos originados en los ríos Fuerte, Sinaloa y Culiacán, durante los años 2013-2016.

## MÉTODOS

Las muestras se obtuvieron durante el periodo comprendido entre febrero de 2013 y marzo de 2016, principalmente durante los meses fríos y de menor precipitación, entre noviembre y mayo. Se visitaron diversos tributarios de los ríos Fuerte, Sinaloa y Culiacán, a altitudes superiores a los 1500 msnm, pero en el presente estudio solo se incluyen las localidades donde se obtuvieron registros positivos. Para todos los casos se determinó la posición geográfica del sitio de muestreo (Latitud-Longitud en grados decimales) con el auxilio de un sistema GPS Rino (Garmin), con exactitud de aproximadamente 15 m, así como el nombre de la localidad y cuenca hidrográfica a la que pertenece.

Todos los ejemplares fueron capturados por medio de un sistema de electropesca (SMITH-ROOT, INC., modelo 15-D POW), con generador operado con motor de gasolina, de hasta 350 W de potencia. Este equipo permitió paralizar temporalmente a los individuos, mismos que posteriormente se capturaban con una red de cuchara. Para la captura se realizó un recorrido a contraflujo dentro del río, con duración aproximada de media hora, obteniéndose distinto tamaño de muestra por localidad, lo que podría reflejar distintos niveles de densidad poblacional. No fue posible estandarizar el esfuerzo de pesca, por lo que no se generaron estimaciones del tamaño poblacional con base en estos resultados.

Los individuos capturados fueron pesados y medidos individualmente, registrándose la longitud total ( $Lt$ ), la longitud estándar o patrón ( $Lp$ ), la longitud cefálica ( $Lc$ ) y la altura ( $A$ ), todas en cm. Las dimensiones anteriores se representan en la figura 2. En el caso del peso, se registró con una balanza digital con resolución mínima de 2 g. Una parte de la muestra fue remitida a la colección de Referencia de Peces de la Unidad-Mazatlán del CIAD, para su registro, preservación y consulta.

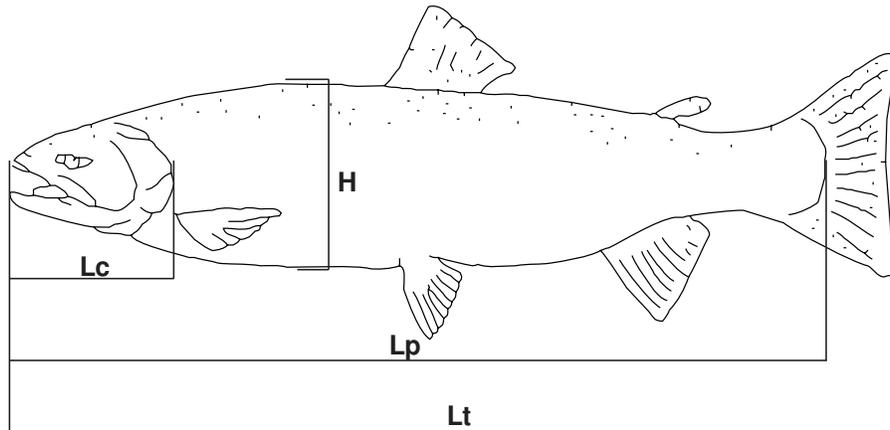


Figura 2. Medidas biométricas básicas.  $Lt$  = Longitud total;  $Lp$  = Longitud patrón;  $Lc$  = Longitud cefálica;  $A$  = altura.

Finalmente se determinó el sexo por medio de una ligera presión en el abdomen, que permitió determinar si el producto expulsado correspondía a huevos o líquido seminal. Adicionalmente, cuando algunos de los ejemplares fueron disecados se corroboró si las gónadas correspondían a hembras, machos o juveniles indiferenciados (Fig. 3). Cuando la captura fue abundante, solo se registró la longitud total y peso de algunos ejemplares que posteriormente fueron liberados.



Figura 3. Disección de hembra de trucha dorada *Oncorhynchus chrysogaster*, con aproximadamente 13 cm de longitud total, con huevos desarrollados.

Los datos generados fueron incorporados en una base de datos de Excel y analizados de manera conjunta, por sexo y por cuenca, obteniéndose el intervalo de valores (mínimo – máximo), promedio, desviación estándar y su coeficiente de variabilidad (*CV*). En cada caso se obtuvo la relación entre los registros de longitud total (*Lt*) con los de la longitud patrón (*LP*), la longitud cefálica (*LC*), la altura (*A*) y el peso total (*Pt*), determinándose el crecimiento relativo con la aplicación de modelos exponenciales que permiten determinar el grado de alometría entre las variables (Pauly 1984). A partir de los resultados anteriores se estimaron las posibles diferencias asociadas con el sexo o ubicación geográfica.

Finalmente se generó la distribución de tallas, utilizando histogramas con clases de talla de 1 cm, agrupando los resultados por mes de muestreo, independientemente del sexo y de su localidad de origen. Los resultados fueron utilizados para determinar posibles grupos de edad, a partir de la identificación de las modas aparentes en la distribución de frecuencias de talla (Gulland y Rosenberg 1992).

## RESULTADOS

Durante el periodo de estudio se visitaron cerca de 50 localidades ubicadas en las tres cuencas habitadas por la trucha dorada, sin embargo solo hubo resultados positivos en 27 de estas localidades, obteniéndose un total de 664 ejemplares. No en todos los casos fue posible registrar las medidas descritas anteriormente, contándose con un máximo de 619 ejemplares para los que además del registro de *Lt*, también se contó con registro de al menos otra variable, siendo el caso de *Pt*. Para el resto de las variables se obtuvieron 549 (*Lp*), 473 (*Lc*) y 570 (*A*), a partir de las cuales se estimaron las tendencias y parámetros de las relaciones biométricas.

Las tres cuencas se encuentran representadas con un mínimo de cuatro localidades (Culiacán) y un máximo de 11 (Sinaloa), repitiéndose localidad en tres ocasiones (Tabla 1). La altitud de dichas localidades varió entre 1953 y 2741 msnm, con un promedio de 2378 msnm. El número mínimo de individuos capturados fue de tres, en una localidad de la cuenca del río Sinaloa con altitud de 2343 msnm y un máximo de 70 ejemplares para una localidad cuya altitud es la mayor de las reportadas para este estudio (2741 msnm).

### *Relaciones biométricas por sexo.*

Del total de ejemplares capturados, para el 57% de ellos fue posible la determinación efectiva del sexo y en algunos casos de su estado de madurez sexual, si bien para este último caso la información se considera insuficiente para ser incluida en este reporte, aunque un análisis detallado se presenta en García-De León et al. (Capítulo 5, esta obra). Del registro total, 202 ejemplares fueron identificados como machos y 178 como hembras, en distintas fases de madurez sexual. De lo anterior se desprende una relación machos:hembras cercana a la unidad, con una ligera predominancia de machos (1:0.88), que resultó significativa ( $\chi^2_{0.05(22)} = 33.9, p < 0.05$ ).

En la mayoría de los casos, los ejemplares exhibieron tallas pequeñas, con un promedio de *Lt* = 11.3 cm, una *Lt* mínima de 4.5 cm y una *Lt* máxima de 21.2 cm. En cuanto al peso, se registró un valor mínimo de 1.5 g, un máximo de 88 g y *Pt* promedio de 13.7 g. La variabilidad registrada para cada una de las dimensiones evaluadas fue relativamente alta (*CV* > 20%), particularmente para el peso, que mostró un *CV* > 80%.

Tabla 1. Número total de ejemplares obtenidos de *Oncorhynchus chrysogaster* por cuenca y arroyo. Altitud, fecha de captura y número de ejemplares por sexo. Machos (♂); hembras (♀) e indefinidos (juveniles, sexo indeterminado)

Cuenca	Sitio	Altitud	Fecha	♂	♀	Indef.	total
Fuerte	Arroyo del agua	2741	21/02/2014	34	1	35	70
Fuerte	Calera	2399	12/05/2015		2	30	32
Fuerte	El Manzano	2550	29/03/2014	4	4	8	16
Fuerte	La Onza	2487	12/05/2015	2	8	5	15
Fuerte	La Quebrada	2583	21/02/2014	11	8	22	41
Fuerte	Las Cuevas	2399	28/03/2014	15	8		23
Fuerte	Las Truchas	2225	28/03/2014	6	8	1	15
Fuerte	Mormorita	1953	28/05/2014	4		2	6
Fuerte	Rio verde	2276	21/02/2013	6	6	7	19
Fuerte	Rio verde	2276	08/03/2016			24	24
Fuerte	San José	2479	26/03/2014	11	12	2	25
Sinaloa	Baluarte	2274	29/05/2014	7		15	22
Sinaloa	Cebollín	2389	13/05/2015	2	4	2	8
Sinaloa	Cerro Solo	2430	13/05/2015	5	8	5	18
Sinaloa	Cerro Solo (puente)	2343	13/05/2015	1	1	1	3
Sinaloa	El Soldado	2428	28/03/2014	7	2	1	10
Sinaloa	Hondo	2229	29/05/2014	8	4	19	31
Sinaloa	La Osera	2340	28/03/2014	10	8		18
Sinaloa	La Osera	2340	09/03/2016			29	29
Sinaloa	Macheras	2619	27/03/2014	5	10	4	19
Sinaloa	Macheras	2619	09/03/2016			44	44
Sinaloa	Pericos	2385	13/05/2015	4	14	2	20
Sinaloa	Potrero	2471	30/05/2014	14	8	6	28
Sinaloa	San Miguel	2654	30/05/2014	1	3		4
Culiacán	Agua Blanca	2340	12/05/2015	14	14	5	33
Culiacán	Cueva San Juan el Negro	2418	18/02/2014	7	12	3	22
Culiacán	El Desecho	2301	19/02/2014	10	10	4	24
Culiacán	El Río 1	2253	23/02/2014	10	17	4	31
Culiacán	El Río 2	2243	23/02/2014	4	6	7	17

Los datos obtenidos para cada sexo por separado mostraron ligeras variantes con respecto a los valores anteriores. Para el caso de las hembras ( $n = 178$ ), el número de registros obtenidos por cuenca fue muy parecido (Fuerte = 57; Sinaloa = 62; Culiacán = 59), con  $Lt$  mínima de 7.0 cm, máxima de 21.2 cm y un valor medio de 12 cm. Asociado con esto, se obtuvieron los valores mínimo (1.7 g), máximo (88 g) y promedio (18.2 g) del peso total.

A diferencia de las hembras, en el caso de los machos la distribución entre cuencas se concentró en el río Fuerte ( $n = 93$ ), siendo la del Culiacán la cuenca con menor representación en la muestra ( $n = 45$ ). El promedio de tallas ( $Lt$ ) alcanzó 11.8 cm, mientras que los valores extremos se situaron entre 6.7 y 19.9 cm. En cuanto a peso, los valores

promedio, mínimo y máximo se ubicaron en 17.2, 2.0, 70.0 g, respectivamente. Un resumen de los principales estadísticos obtenidos para el conjunto de individuos de *O. chrysogaster* muestreados a lo largo del periodo de estudio, así como de los valores obtenidos por sexo, se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Resumen de valores de longitud total (*Lt*) y peso total (*Pt*) de *Oncorhynchus chrysogaster* por sexo y combinados. Los valores de longitud (cm) y peso (g) se refieren al valor mínimo (min), máximo (max), promedio (media), desviación estándar (d.e.) y coeficiente de variabilidad (CV). La variable n se refiere al mayor número de ejemplares con registro de una o más biometrías.

	n	<i>Lt</i> <sub>min</sub>	<i>Lt</i> <sub>max</sub>	<i>Lt</i> <sub>media</sub>	d.e.	CV	<i>Pt</i> <sub>min</sub>	<i>Pt</i> <sub>max</sub>	<i>Pt</i> <sub>media</sub>	d.e.	CV
<b>Total</b>	619	4.5	21.0	11.2	3.0	26.7	1.5	88.0	15.6	13.1	84.2
<b>Hembras</b>	178	7.0	21.2	12.0	2.9	24.4	1.7	88.0	18.2	15.2	83.5
<b>Machos</b>	202	6.7	19.9	11.8	2.6	22.2	2.0	70.0	17.2	12.2	70.7

Por otra parte, los modelos de regresión que determinan las relaciones entre el peso total *Lt* y otras variables biométricas, mostraron diversos niveles de alometría, aunque las tendencias fueron similares al considerar la totalidad de la población muestreada con respecto a los individuos separados por sexo (Fig. 4).

#### *Relaciones biométricas por cuenca*

El análisis de las biometrías desde el enfoque de la distribución geográfica por cuenca hidrográfica permite otro tipo de aproximación a las características del total de individuos de trucha dorada mexicana, muestreados en la SMO. En primer término, se identifica a las cuencas de los ríos Fuerte y Sinaloa con el mayor número de individuos representados en el total, con 283 y 251 ejemplares respectivamente, mientras que para la cuenca del río Culiacán solo se reportaron 127. Cabe mencionarse que para las cuencas del río Sinaloa y Fuerte se realizaron respectivamente 5 y 6 muestreos con resultados positivos, durante el periodo de 2013 a 2016, en los meses de febrero (en 2013 solo el Fuerte, 2014), marzo (2014, 2016) y mayo (2014, 2015). Para la cuenca del Culiacán se obtuvieron muestras en febrero 2014 y mayo 2015.

Para ninguna de las cuencas fue posible la determinación de sexo en la totalidad de las muestras, obteniéndose cerca del 50% de este registro para los ejemplares de las cuencas Fuerte y Sinaloa, en tanto que para Culiacán se obtuvo una proporción ligeramente superior al 80%. Considerando el sesgo asociado con la ausencia de información sobre el sexo de algunos ejemplares y tomando como la unidad al número de machos con respecto a las hembras, se obtuvieron proporciones sexuales de 1:0.61, 1:0.97 y de 1:1.31, para las cuencas Fuerte, Sinaloa y Culiacán, respectivamente.

Los sitios con mayor captura por cuenca fueron el arroyo del Agua en el río Fuerte (70 individuos), con altitud de 2740 msnm, arroyo Macheras en el río Sinaloa (44 individuos; 2600 msnm) y arroyo Agua Blanca en el río Culiacán (33; 2340 msnm).

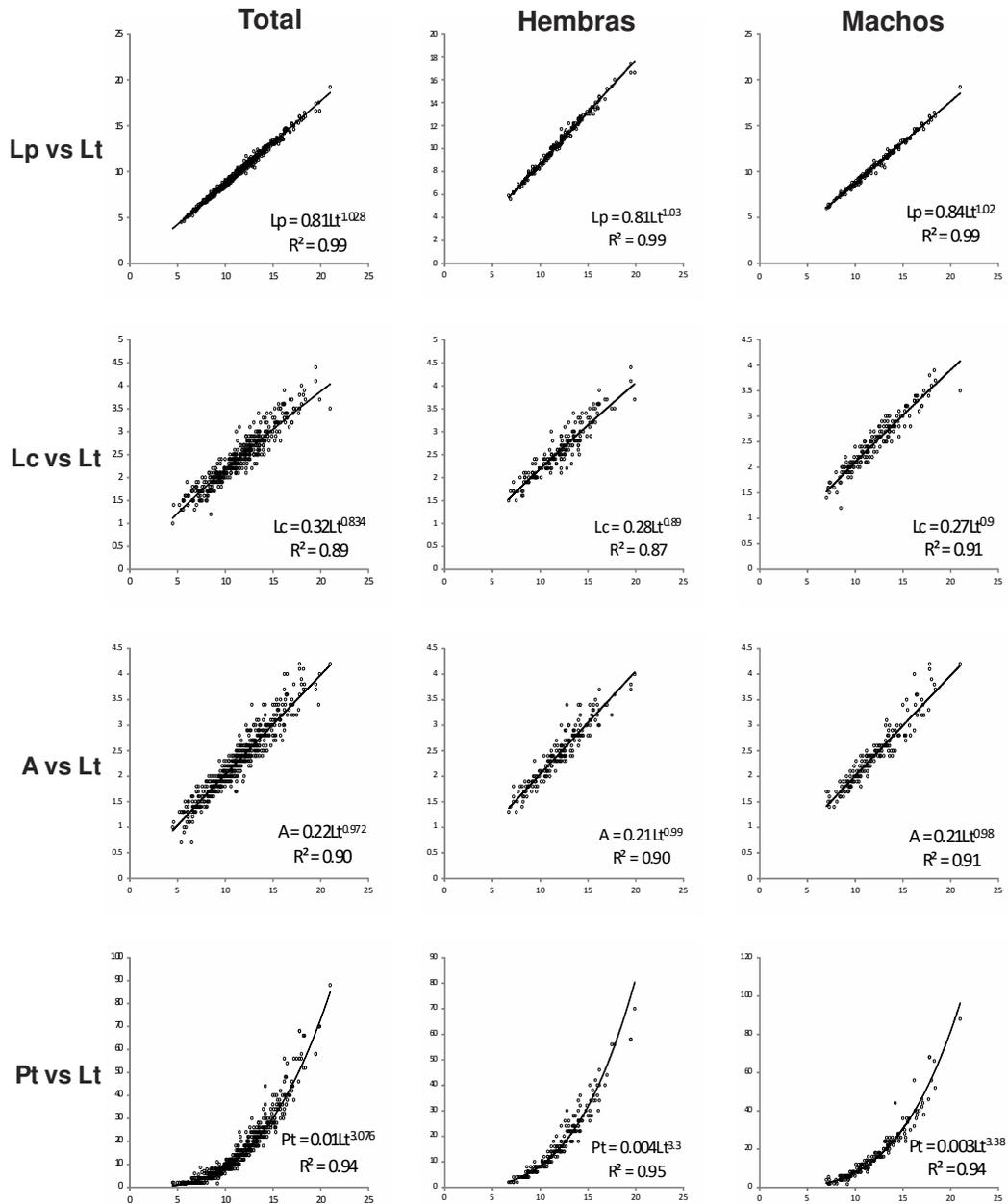


Figura 4. Modelos de relación entre la longitud total ( $L_t$ ) y otras variables biométricas de individuos de *Oncorhynchus crysogaster* obtenidos en las cuencas de los ríos Fuerte, Sinaloa y Culiacán, total y por sexo; Longitud patrón ( $L_p$ ), Longitud cefálica ( $L_c$ ), Altura ( $A$ ) y peso total ( $P_t$ ). Se indica el valor del coeficiente de determinación ( $R^2$ ).

Las variaciones observadas con relación a los datos de longitud y peso total de los individuos registrados por cuenca, se presentan a continuación (Tabla 4), ordenándose la información de norte a sur.

De los resultados anteriores destaca la similitud entre los valores de longitud promedio encontrados en cada cuenca, aunque esto no coincidió con los respectivos pesos, con la cuenca de Sinaloa como la que alberga a los individuos de mayor peso promedio. Considerando que el tamaño de muestra es similar al de la obtenida en el río Fuerte, pudiera

ser una condición asociada con las características de la cuenca, aunque esto deberá corroborarse.

Tabla 4. Resumen de valores de longitud total ( $Lt$ ) y peso total ( $Pt$ ) de *Oncorhynchus. chrysogaster* por cuenca hidrográfica. Los valores de longitud (cm) y peso (g) se refieren al valor mínimo (min), máximo (max), promedio (media), desviación estándar (d.e.) y coeficiente de variabilidad (CV). La variable n se refiere al mayor número de ejemplares con registro de una o más biometrías.

	n	$Lt_{\min}$	$Lt_{\max}$	$Lt_{\text{media}}$	d.e.	CV	$Pt_{\min}$	$Pt_{\max}$	$Pt_{\text{media}}$	d.e.	CV
<b>Fuerte</b>	250	4.5	21.0	10.1	2.8	27.8	1.7	88.0	11.3	10.9	96.1
<b>Sinaloa</b>	241	5.4	19.9	11.9	2.8	23.3	1.5	70.0	19.1	14.3	74.8
<b>Culiacán</b>	127	6.0	19.5	12.0	2.7	22.2	2.0	58.0	16.6	11.4	68.5

Con respecto a las relaciones entre las distintas variables biométricas se observó una elevada correlación entre variables en las tres cuencas. El ajuste entre variables fue elevado en todos los modelos generados ( $R^2 > 0.83$ ) y con algunas excepciones, tienden a la isometría.

Entre las excepciones, resalta para los ríos Fuerte y Culiacán la relación  $Lc$  vs  $Lt$  que representan un ligera alometría negativa, situación que también se observa en la relación  $Lp$  vs  $Lt$  del río Culiacán, (Fig. 5). Solo en el caso del río Sinaloa los valores de los coeficientes indican isometría o bien, como ocurre con la relación  $Pt$  vs  $Lt$ , una ligera alometría positiva, que concuerda con el mayor valor promedio en peso determinado para esta cuenca.

#### *Distribución de tallas*

El análisis de la distribución de tallas por periodo de muestreo, bajo el supuesto que todos los individuos pertenecen a la misma población, es limitado dado el número de muestreos con resultados positivos durante el estudio. Considerando esta dificultad, los histogramas correspondientes se presentan de manera secuencial, sin mantener la distancia asociada con el periodo temporal correspondiente (Fig. 6).

Aunque los resultados no son definitivos, se observa que en los meses de febrero de 2013 y 2014 existe una moda entre los 9 y 10 cm y que para el mes de marzo de 2014 la distribución muestra un arreglo bimodal en las longitudes de 9 y 11 cm, lo que pudiera representar un corrimiento de la cohorte hacia las longitudes mayores, coincidiendo con la distribución del mismo mes en 2016. Finalmente, el desplazamiento hacia la derecha se mantiene en el mes de mayo de 2014 y 2015, con modas sobre los 12 y 13 cm, para posteriormente reducirse las proporciones a valores mínimos, teniendo como límite el valor máximo de  $Lt$  a los 21 cm. De seguir esa tendencia se esperaría que al completar el segundo año alcancen longitudes entre 17 y 18 cm sin embargo no hay información suficiente para corroborarlo.

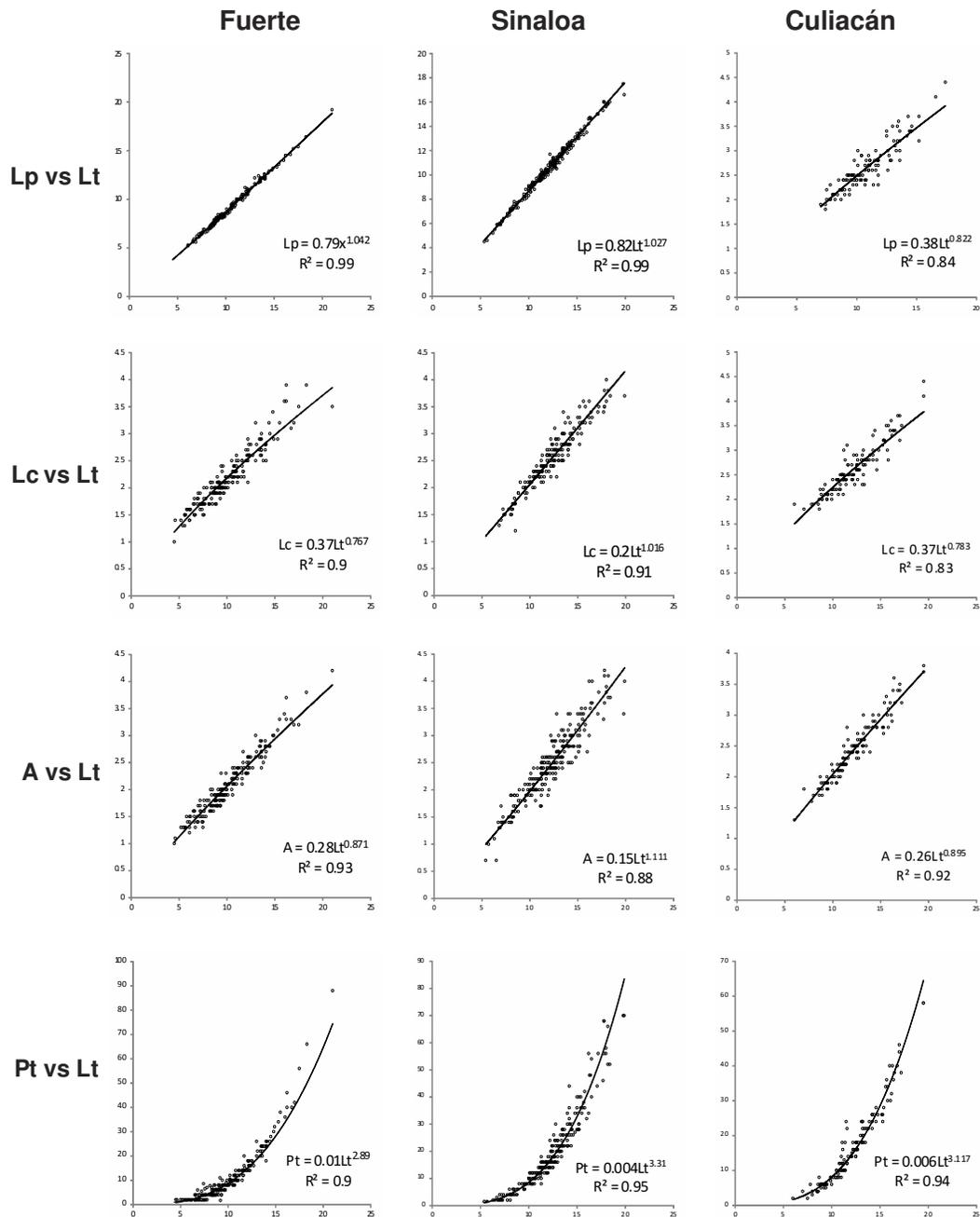


Figura 5. Modelos de relación entre la longitud total (Lt) y otras variables biométricas de individuos de *Oncorhynchus chrysogaster* obtenidos por cuenca, en los ríos Fuerte, Sinaloa y Culiacán. Longitud patrón (Lp), Longitud cefálica (Lc), Altura (A) y peso total (Pt). Se indica el valor del coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>).

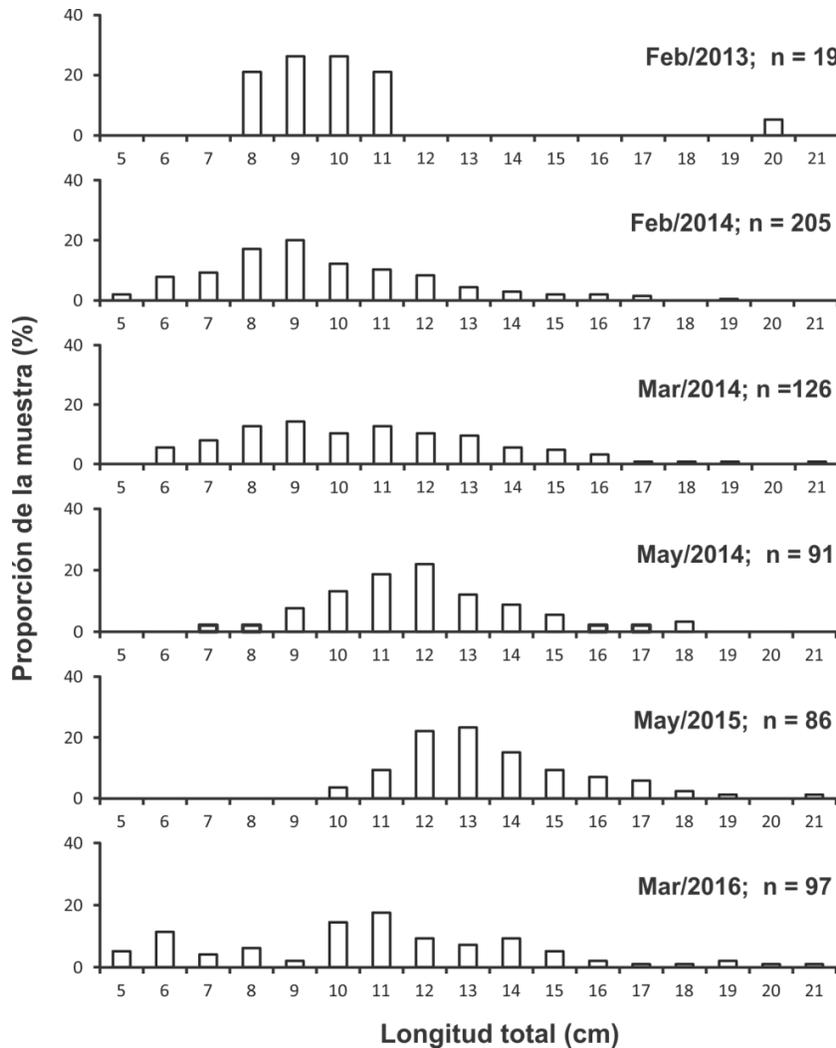


Figura 6. Distribución de clases de longitud total de 1 cm, para muestras de trucha dorada mexicana *Oncorhynchus chrysogaster* de la Sierra Madre Occidental.

## DISCUSIÓN

Los resultados del presente estudio ayudan a comprender mejor la biología de la trucha dorada mexicana, a través del estudio de algunos de los aspectos que la definen y para los que existen escasos antecedentes con el enfoque seguido en esta investigación, que por otra parte se han realizado considerando la totalidad de las especies de trucha nativa distribuidas en la Sierra Madre Occidental (Reyes-Valdez et al. 2006; Ruiz-Campos et al. Capítulo 7, esta obra).

Es evidente que para consolidar las conclusiones que de aquí se desprenden se requiere mejorar el diseño de muestreo, extendiendo el periodo a todo lo largo del año, por lo menos tratando de cubrir los periodos estacionales. Aunado a esto, es necesario dar seguimiento a los sitios ya muestreados y extender los muestreos a otras localidades no exploradas, con base en los modelos de distribución potencial de la especie que se han

venido generando en los últimos años (Hendrickson 2002; Ruiz-Luna et al. 2013; Ruiz-Luna et al. Capítulo 8, esta obra).

Se ha podido determinar que no existe una distribución homogénea de la población en las distintas localidades visitadas, con capturas de distinta magnitud aplicando un esfuerzo similar en cada sitio. Para cerca del 40% de las localidades visitadas no hubo registro de la especie, aún en localidades donde históricamente se registró su presencia, por lo que se recomienda corroborar la permanencia de la trucha dorada mexicana en estos sitios, particularmente al norte de la cuenca del río Fuerte, que en el peor escenario podría significar una posible extinción local. De corroborarse, podrían implementarse estrategias de repoblamiento similares a las que se han dado para otras especies del género (Ruiz-Campos 1989; Harig y Fausch 2002), apoyándose en la serie de estudios genéticos que se han venido realizando (Abadía-Cardoso et al. 2015; Escalante et al. 2014), que permitan una translocación exitosa reduciendo las posibilidades de introgresión o deterioro del pool génico.

Considerando asimismo la propuesta de un sistema de monitoreo más intensivo permitiría determinar de manera definitiva el rango de altitud en el que habita la especie, ya que de los presentes resultados se desprende que la altitud mínima se ubica alrededor de los 2000 msnm como se discute en Ruiz-Luna et al. (Capítulo 8, esta obra) y no a partir de los 1500 msnm, como se ha documentado en general para las truchas nativas de la SMO (Hendrickson 2002; Mayden 2005).

Por lo que toca al análisis de las distintas relaciones biométricas, se observó que no hay grandes diferencias entre sexos, aun cuando es elevada la variación intrapoblacional con coeficientes de variación  $> 20\%$  en cuanto a tallas y  $> 80\%$  con respecto a peso.

En todos los casos analizados se obtuvieron valores del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) cercanos o superiores a 0.9, lo que implica una relación estrecha entre las variables evaluadas. Resalta del análisis que existe una aparente isometría entre  $L_t$  con  $L_p$  y  $A$ , mientras que con respecto a la  $L_c$ , se obtuvieron valores que reflejan una alometría negativa, con valores del coeficiente de alometría (pendiente) sensiblemente menores a 1.0 y que ponen de manifiesto ciertas diferencias morfométricas entre machos y hembras, ya que al ser evaluados por separado, el indicador de alometría se reduce, alejándose en ambos casos del valor estimado al incluir todos los ejemplares. Esta diferencia puede deberse a un posible dimorfismo sexual en la especie, mismo que es confirmado por García-De León et al. (Capítulo 5, esta obra). Algo similar ocurre con la relación  $P_t$  vs  $L_t$ , que tiende a la isometría que caracteriza a esta relación en peces ( $W = L^3$ ). Cuando se evalúa por separado, la relación tiende a ser alométrica positiva, con una ligera ventaja para el grupo de las hembras, diferencia que pudiera atribuirse en parte a que la mayoría de los muestreos se realizaron durante la época reproductiva, cuando se cuenta con una mayor reserva energética.

Cuando el análisis se hizo considerando a la población distribuida por cuencas, los resultados fueron similares, es decir, en todas las relaciones evaluadas existe una estrecha relación que al ser ajustada con modelos exponenciales, explicó desde el 83% al 99% de la variación. Se estima también en la mayoría de los casos una posible isometría entre variables, lo que de alguna manera es indicador del estado de salud de las poblaciones analizadas, ya que el crecimiento de las distintas dimensiones corporales se mantiene proporcional en el tiempo (Froese 2006; Cifuentes et al. 2012).

Respecto a la relación talla – madurez sexual, se observó que algunos individuos, particularmente machos, se encuentran sexualmente maduros a partir de una  $L_t = 7.0$  cm y

aún cuando no ha sido posible estimar la relación edad – longitud, esta talla pudiera asociarse con al menos un año de edad, considerando la edad de primera madurez de otros salmónidos del género *Oncorhynchus*, la que varía de uno hasta siete años, dependiendo de las condiciones ambientales (temperatura y alimento), de su estrategia reproductiva (semelparidad vs iteroparidad) y su carga genética (Nævdal 1983; Kinnison et al 2011). Algunas evidencias apuntan a que existe mayor precocidad en organismos iteroparos que en semelparos y al respecto, García-De León et al. (Capítulo 5, esta obra) han encontrado que *O. chrysogaster* puede tener periodos reproductivos consecutivos.

Asimismo alcanzar la madurez sexual con tallas reducidas, es un indicador de proximidad a la talla máxima ( $L_{\infty}$ ) que pueden alcanzar los peces. Sin embargo como lo señala Copper (1961) para *Salvelinus fontinalis* y como ha sido evidenciado por Barriga et al. (Capítulo 11, esta obra) y Abadía-Cardoso et al. (Capítulo 12, esta obra), se pueden alcanzar tallas mayores, con potencial comercial, en ambientes controlados con suministro de alimento artificial.

En conclusión, los resultados obtenidos indican que en conjunto, la trucha dorada mexicana, presenta una proporción de machos ligeramente menor a la unidad, muestran indicadores de dimorfismo sexual, confirmando lo observado por García-De León et al. (Capítulo 5, esta obra) y se observan diferencias en sus relaciones biométricas, relacionadas con la cuenca de origen, aunque deberán validarse en futuros trabajos, ya que el resultado puede ser debido a la diferencia en el tamaño de las muestras y época de captura. En todo caso, el crecimiento isométrico es casi una constante entre las distintas variables analizadas.

Sin que pueda confirmarse, dada la ausencia de análisis de la relación edad-longitud, se identificaron modas en la distribución de tallas que podrían indicar probables cohortes y que indican un crecimiento lento y una estructura de tallas, si bien estable, con escasos representantes de los grupos de mayor edad, con representantes de tallas mayores a 16 cm.

Con base en lo anterior, se recomienda consolidar este y otro tipo de estudios relacionados con la biología y ecología de la especie, asociados con su distinto origen geográfico, para que sea posible determinar el posible impacto de la explotación de este recurso, de los efectos de los cambios en su hábitat y que de ser necesario se promuevan programas de repoblación y de cultivo de las especies nativas para consolidar la actividad trutícola regional, sin impactos negativos sobre éstas y beneficiando el desarrollo regional en un esquema de sostenibilidad y mantenimiento de la biodiversidad.

## **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo fue financiado por los proyectos CONABIO (JM058), CONACYT (CB-2010-01-152893). Para los muestreos en campo se contó con los permisos de pesca (SGPA/DGVS/02485/13, SGPA/DGVS/02968/14 y SGPA/DGVS/05052/15), expedidos por la Dirección General de Vida Silvestre de la SEMARNAT.

## **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. J.L. Damas-Aguilar, J.L. Falcón-Rodríguez, F.J. García-De León, J.C. Garza y G. Ingle de la Mora. 2016. Primeras gestiones para el cultivo de trucha nativa de la Sierra Madre Occidental: recolecta, determinación de identidad genética y

- reproducción. En: Ruiz-Luna A. y F.J. García-De León (eds.). *La trucha dorada mexicana*. Cap. 12.
- 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.
- Cifuentes, R., J. González, G. Montoya, A. Jara1, N. Ortiz, P. Piedra y E. Habit. 2012. Relación longitud-peso y factor de condición de los peces nativos del río San Pedro (cuenca del río Valdivia, Chile). *Gayana (Concepc.)*. 76, suppl.1: 101-110.
- Cooper, E.L. 1961. Growth of wild and hatchery strains of Brook trout. *Transactions of the American Fisheries Society*. 90: 424-438.
- Craig, J.K., C.J. Foote and C.C. Wood. 2011. Evidence for temperature-dependent sex determination in sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*). *Ecology*. 71: 678-690.
- Csirke, J., 1989. *Introducción a la dinámica de poblaciones de peces*. FAO, Doc. Téc. Pesca. 192. 82 p. Roma.
- 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.
- Espinosa, P.H., F.J. García-De León, G. Ruiz-Campos, A. Varela R., I.A. Barriga S., J.L. Arredondo F., D.A. Hendrickson, F. Camarena y A.B De Los Santos. 2007. Las truchas mexicanas. Peces enigmáticos del noroeste. *Especies. Revista sobre conservación y biodiversidad*. Ene-Feb 2007: 9-14.
- Froese, R. 2006. Cube law, condition factor and weight-length relationships: history, meta-analysis and recommendations. *Journal of Applied Ichthyology*. 22:241-253.
- García-De León, F.J., L.N. Getino M., J. Rodríguez, S. Sánchez G., F. Márquez y A. Ruiz-Luna. 2016. Dimorfismo sexual y periodo reproductivo de la trucha dorada mexicana, *Oncorhynchus chrysogaster* en los ríos Fuerte, Sinaloa y Culiacán. En: Ruiz-Luna A. y F.J. García-De León (eds.) *La trucha dorada mexicana*. Cap. 5.
- Gulland, J.A. and Rosenberg A.A. 1992. *A review of length-based approaches to assessing fish stocks*. FAO Fisheries Technical Paper. No. 323. Rome. 100 p.
- Harig, A.L. and Fausch K.D. 2002. Minimum habitat requirements for establishing translocated Cutthroat trout populations. *Ecological Applications*. 12: 535–551
- Hendrickson, D.A., H. Espinosa Pérez., L.T. Findley, W. Forbes, J.R. Tomelleri, R.L. Mayden, J.L. Nielsen, B. Jensen, G. Ruiz Campos., A. Varela Romero, A. van der Heiden, F. Camarena and F.J. García-De León. 2002. Mexican native trouts: a review of their history and current systematic and conservation status. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*. 12: 273-316.
- 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. Mcnyset, 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.

- Hilborn, R. and C.J. Walters (eds.). 1992. *Quantitative fisheries stock assessment: Choice, dynamics and uncertainty*. Springer. USA. 570 p.
- Holtby, L.B. and M. C. Healey. 1996, Sex-specific life history tactics and risk-taking in Coho Salmon. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 53: 141-147.
- Kinnison, M.T., T.P. Quinn and M.J. Unwin. 2011. Correlated contemporary evolution of life-history traits in New Zealand Chinook salmon, *Onchorhynchus tshawytscha* *Heredity*. 106: 448-459.
- Mayden, R. 2005. SGER: Biodiversity of native Mexican trout (Genus *Oncorhynchus* spp.) and the impending treat of their demise by the exotic rainbow trout *O. mykiss gairdneri* (Teleostei: Salmonidae). DEB 0240184. *Final Report*. 33 p. En línea: <[http://bio.slu.edu/mayden/truchas/NSF\\_trout\\_final\\_report.pdf](http://bio.slu.edu/mayden/truchas/NSF_trout_final_report.pdf)>.
- Nævdal, G. 1983. Genetic factors in connection with age at maturation. *Aquaculture*. 33: 97-106.
- Pauly, D. 1984. *Fish population dynamics in tropical waters; a manual for use with programmable calculators*. ICLARM Studies and Review. 8. 325 p.
- Reyes-Valdéz, C.A., G. Ruiz-Campos, F. Camarena-Rosales and A. Varela-Romero. 2006. Diet composition of native trout (Salmonidae: *Oncorhynchus*) from the Sierra Madre Occidental, Mexico. En: Lozano-Vilano M.L. and A.J. Contreras-Balderas (eds.). *Studies of North American Desert Fishes in Honor of E.P. (Phil) Pister, Conservationist. Mexico*. Faculty of Biological Sciences. UANL. México. pp: 125-137.
- Ruiz-Campos, G. 1989. Repoblación natural por trucha arcoiris (*Salmo gairdneri nelsoni*) en un transecto del arroyo San Rafael, noroeste de la Sierra San Pedro Mártir, Baja California, México. *The Southwestern Naturalist*. 34: 552-556.
- Ruiz-Campos, G., C.A. Reyes-Valdez, F. Camarena- Rosales, A.F. González-Acosta. 2016. 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. En: Ruiz-Luna A. y F.J. García-De León (eds.) *La trucha dorada mexicana*. Cap. 7.
- Ruiz-Luna, A., C.A. Berlanga-Robles, R. Hernández-Guzmán y M.A. Escalante-Sánchez. 2013. Modelación de la distribución de truchas nativas de la Sierra Madre Occidental y su relación con la estructura del paisaje adyacente. *Informe técnico final*. Proyecto CONABIO JM058. 49 pp.
- Ruiz-Luna, A., R. Hernández-Guzmán, F.J. García-De León y A.L. Ramírez-Huerta. 2016. Predicción de la distribución geográfica de trucha dorada *Oncorhynchus chrysogaster* (Needham y Gard 1964) en los ríos Sinaloa y Culiacán, México. En: Ruiz-Luna A. y F.J. García-De León (eds.) *La trucha dorada mexicana*. Cap. 8.

## 7. 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

### INTRODUCCIÓN

Un elenco de truchas nativas del género holártico *Oncorhynchus* se encuentra distribuido en los arroyos de cabecera de las cuencas hidrológicas del noroeste de México, que comprende a la Sierra Madre Occidental (SMO) en los estados de Sonora, Sinaloa, Chihuahua y Durango; y a la Sierra de San Pedro Mártir (SSPM) en el estado de Baja California (Behnke 2002; Mayden et al. 2004, 2010). De este complejo de truchas nativas mexicanas, solamente la trucha dorada mexicana (*O. chrysogaster*) de la SMO y la trucha de SSPM (*O. mykiss nelsoni*) han sido formalmente descritas (Mayden et al. 2010), por lo que el resto de las formas permanecen aún sin describir y se han ubicado de modo provisional y para fines de este estudio, en dos grupos de poblaciones (norteñas y sureñas) con base en un análisis comparativo de tipo morfométrico y patrón de coloración (Ruiz-Campos et al. 2003) y relaciones genéticas (Camarena-Rosales et al. 2008; Abadía-Cardoso et al. 2015). El primer grupo (norteñas) está compuesto por las poblaciones de los ríos Yaqui y Mayo y el segundo grupo (sureñas) por las poblaciones de los ríos San Lorenzo, Piaxtla, Presidio, Baluarte y Acaponeta.

El estado de conocimiento de la bionomía y ecología poblacional de estas truchas nativas del noroeste de México muestra diferencias en cuanto el grado de conocimiento, siendo la trucha de SSPM la especie más estudiada (cf. Ruiz-Campos 1989; Ruiz-Campos y Cota-Serrano 1992; Ruiz-Campos 1993; Ruiz-Campos y Pister 1995; Valles-Ríos y Ruiz-Campos 1996; Ruiz-Campos et al. 1997; Ruiz-Campos et al. 2003, 2014) y recientemente se han incorporado los estudios de la trucha dorada mexicana (cf. Reyes-Valdéz et al. 2006 y los diferentes capítulos de esta obra). En este capítulo se describen y comparan las relaciones biométricas de peso y longitud de las diferentes formas de truchas nativas del género *Oncorhynchus* en el noroeste de México, con el propósito de brindar información base para futuros estudios de edad y crecimiento e índices estructurales (factor de condición) de estas unidades evolutivas.

### MÉTODOS

Los ejemplares de truchas nativas fueron recolectados entre 1987 y 2012, en 18 localidades de la SMO (1,363 a 2,637 msnm) en los estados de Sonora, Chihuahua y Durango y siete localidades de la SSPM (500 a 2,030 msnm) en Baja California, México (Fig. 1). Los muestreos de las truchas se realizaron con equipos de electropesca Smith Root (15B POW y LR-24) en transectos de 200 m de arroyo. En el campo, los ejemplares recolectados fueron medidos en longitud (longitud patrón [Lp] y longitud total [Lt] en milímetros [mm], precisión 0.1 mm) y en peso (peso total [Pt] en gramos [g], precisión 0.1 g). Los ejemplares fueron individualmente etiquetados con sus respectivos datos de recolecta (número de

ejemplar, localidad y fecha de captura) y enseguida fijados (formaldehído 10% neutralizado con borato de sodio durante 1 semana) y preservados (etanol 70%) mediante el método de Hall (1962). Finalmente los ejemplares fueron depositados en la colección ictiológica de la Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC).

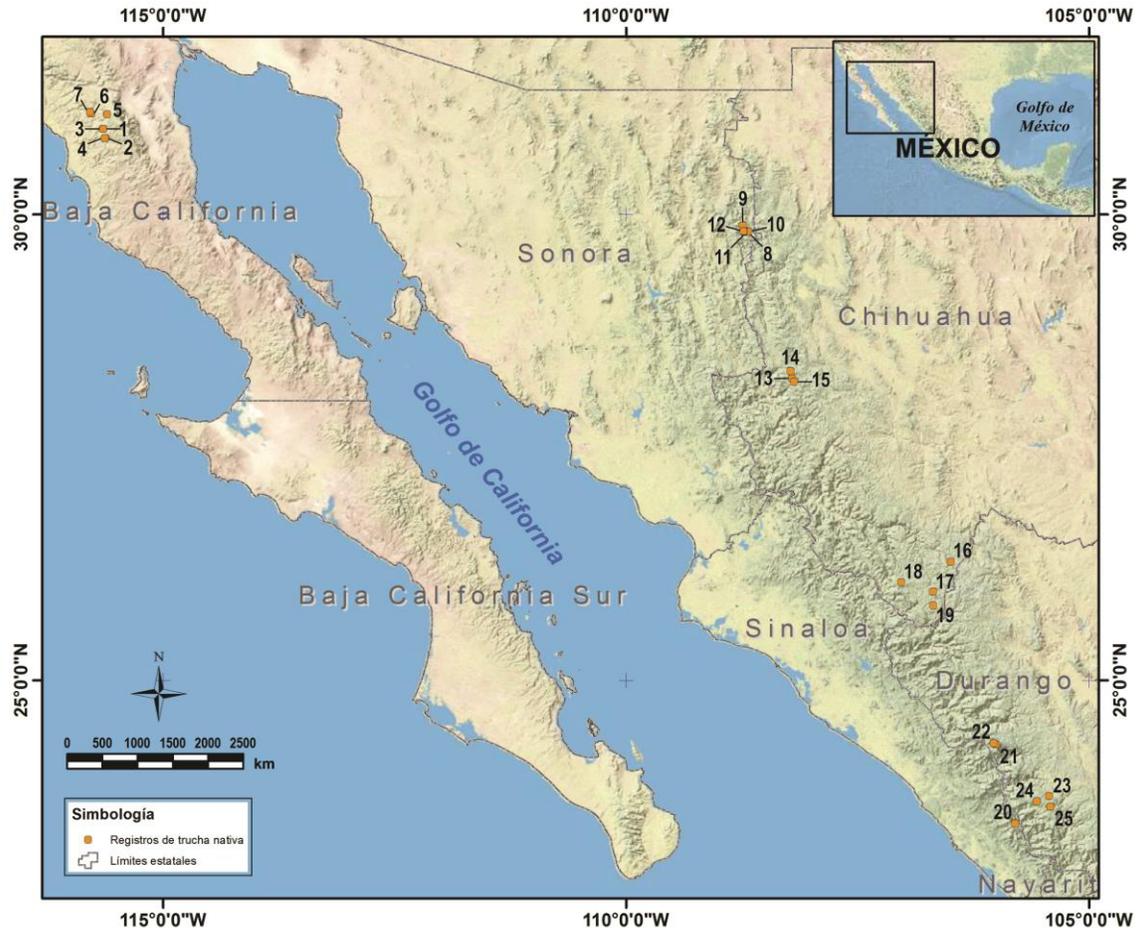


Figura 1. Localización geográfica de sitios de recolecta de truchas nativas en el noroeste de México. El número de la localidad de recolecta se describe en el texto.

Las poblaciones de truchas nativas analizadas en este estudio fueron clasificadas en cuatro grupos de acuerdo al criterio de Ruiz-Campos et al. (2003): (1) trucha dorada mexicana (Fig. 2-A), (2) trucha de San Pedro Mártir (Fig. 2-B), (3) truchas nativas norteñas (Fig. 2-C), (4) trucha nativas sureñas (Fig. 2-D).

A continuación se enlistan las 25 localidades de muestreo de truchas nativas en el noroeste de México, mismas que se indican en la Fig. 1. Trucha de San Pedro Mártir representada por ejemplares capturados en las localidades del río Santo Domingo (1: San Antonio de Murillos, 2: La Zanja, 3: El Potrero, 4: La Grulla) y del río San Rafael (5: Rancho Garet, 6: Intermedia y 7: Mike's Sky). Las truchas referidas aquí como las truchas nativas norteñas incluye a ejemplares de las localidades de las cuencas del río Yaqui (8: La Presita, 9: San Antonio, 10: Los Pescados, 11: La Cueva y 12: El Palmillo) y río Mayo

(13: El Potrero de Gil, 14: El Concheño y 15: La Estrella). Trucha dorada mexicana, representada por ejemplares capturados en las localidades de las cuencas del río Fuerte (16: río Verde, 17: La Onza), río Sinaloa (18: Casa Quemada) y río Culiacán (19: Mesa San Rafael). Las truchas referidas como truchas nativas sureñas, incluyen ejemplares de las localidades de las cuenca de los ríos San Lorenzo (20: La Sidra), Piaxtla (21: La Quebrada y 22: El Pinto), Presidio (23: El Agua), Baluarte (24: Coscomate) y Acaponeta (25: El Metate-Los Laureles).

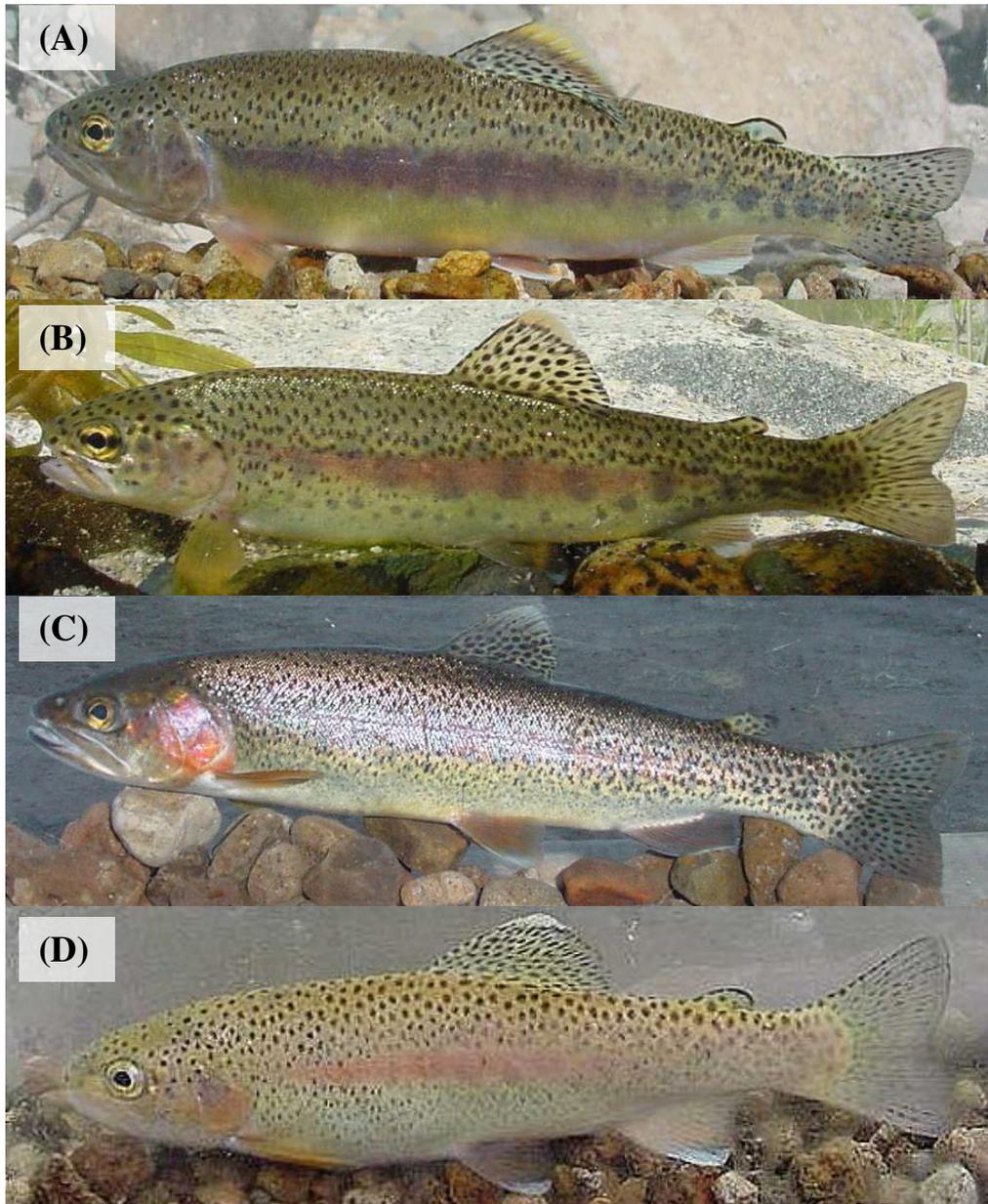


Figura 2. Representantes de truchas nativas del género *Oncorhynchus* del noroeste de México: (A) trucha dorada mexicana (Río Fuerte), (B) trucha de San Pedro Mártir, (C) truchas norteñas (Río Yaqui) (D) truchas sureñas (Río Piaxtla). Fotografías: Gorgonio Ruiz-Campos.

Cada ejemplar recolectado fue medido en fresco con un vernier digital (precisión 0.01 mm) conectado a una computadora personal y pesado con una balanza analítica (precisión 0.01 g), donde las medidas y pesos registrados fueron capturados en una base de datos en formato Excel.

La relación peso-longitud por taxón se calculó con la ecuación logarítmica (base 10) de regresión lineal descrita en Ricker (1975):  $\log Pt = \log a + b \log Lp$ ; donde  $Pt$ = peso total calculado (g),  $Lp$ = longitud patrón (mm), “a” y “b” son constantes de la regresión obtenidas a partir de los datos de peso y longitud observados. Los parámetros fueron calculados mediante el programa XLSTAT 2016 (Addinsoft, New York City, NY, USA).

La relación longitud patrón–longitud total fue calculada mediante la ecuación de regresión simple:  $Lt = a + b Lp$ ; donde  $Lt$ = longitud total calculada (mm),  $Lp$ = longitud patrón (mm), “a” y “b” son constantes de la regresión obtenidas a partir de ambas longitudes observadas. Ejemplares juveniles y de ambos sexos de la trucha de San Pedro Mártir fueron combinados para calcular la relación peso-longitud ya que un estudio previo para este taxón demostró que las pendientes de la regresión son estadísticamente similares (Ruiz-Campos et al. 1997).

Para determinar si el crecimiento somático en cada taxón es de tipo isométrico ( $b=3.0$ ) o alométrico ( $b \neq 3.0$ ), se aplicó una prueba “t de Student” (Sokal y Rohlf 1981).

## RESULTADOS

Un total de 1,112 ejemplares de truchas nativas del género *Oncorhynchus* del noroeste de México fue analizado en el presente estudio para evaluar las relaciones biométricas de peso y longitud (trucha dorada mexicana,  $n=141$ ; trucha de San Pedro Mártir,  $n=750$ ; truchas nativas norteñas,  $n=76$ ; y truchas nativas sureñas,  $n=145$ ).

El intervalo de tallas registrado para las diferentes formas de truchas se presenta en la Tabla 1. Comparativamente, la trucha de San Pedro Mártir posee una mayor longitud patrón promedio ( $111.1 \pm 35.1$  mm) en comparación con la trucha dorada mexicana ( $85.1 \pm 35.1$  mm) y las truchas nativas referidas como norteñas ( $107.6 \pm 20.5$  mm) y sureñas ( $101 \pm 40.4$  mm).

Tabla 1. Parámetros de la relación peso-longitud de la trucha dorada mexicana (*O. chrysogaster*), trucha de San Pedro Mártir (*O. mykiss nelsoni*), truchas nativas norteñas (*O. spp. 1*) truchas nativas sureñas (*O. spp. 2*) del noroeste de México.

Taxa	n	Longitud patrón (mm)		Log a	b	95% I.C. de b		r <sup>2</sup>
		Min.	Max.			Min.	Max.	
<i>O. chrysogaster</i>	141	37.0	203.0	-4.9025	3.073	3.003	3.143	0.98
<i>O. mykiss nelsoni</i>	750	44.0	257.0	-4.3283	2.796	2.768	2.824	0.98
<i>O. spp. 1</i>	76	72.4	156.0	-5.0302	3.134	2.989	3.279	0.96
<i>O. spp. 2</i>	145	42.7	243.0	-4.7033	2.996	2.936	3.057	0.98

$n$ = número de individuos;  $a$  = intercepto,  $b$  = pendiente,  $r^2$ = coeficiente de determinación; I.C.= intervalo de confianza.

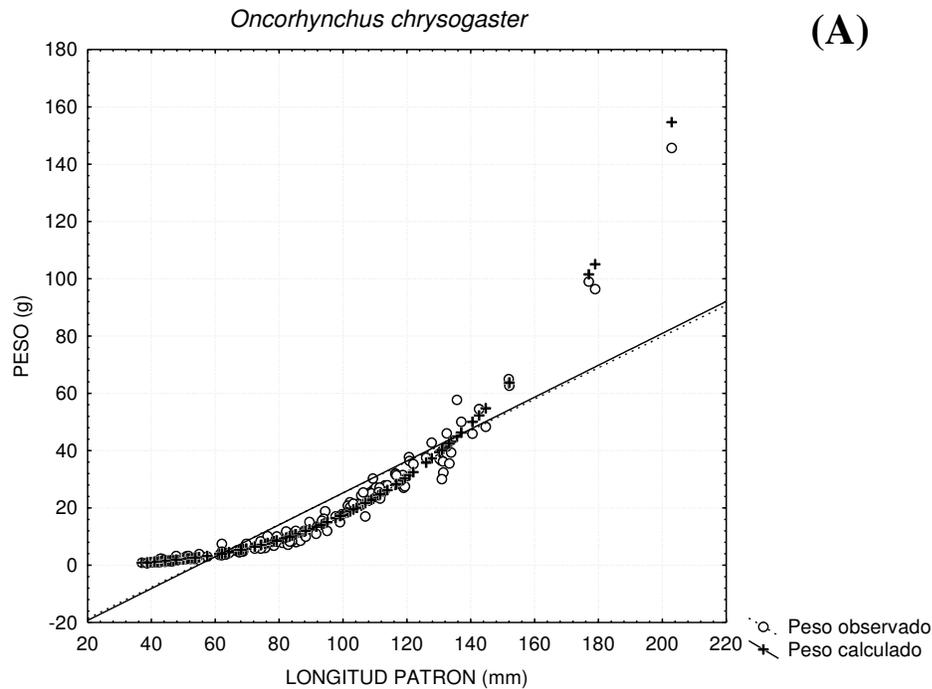
Por otra parte, los parámetros de la regresión peso-longitud para estas mismas formas de truchas nativas se ofrecen en la Tabla 1, mientras que aquéllos de la relación longitud patrón-longitud total se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Relación longitud patrón-longitud total (LP-LT) de la trucha dorada mexicana (*O. chrysogaster*), trucha de San Pedro Mártir (*O. mykiss nelsoni*), truchas nativas norteñas (*O. spp. 1*) y truchas nativas sureñas (*O. spp. 2*) en el noroeste de México.

Taxa	n	Parámetros de la regresión Lp-Lt		
		a	b	r
<i>Oncorhynchus chrysogaster</i>	124	1.32	1.18	0.99
<i>Oncorhynchus mykiss nelsoni</i>	295	-1.89	1.19	0.99
<i>Oncorhynchus spp.1</i> (norteñas)	76	-3.81	1.24	0.97
<i>Oncorhynchus spp. 2</i> (sureñas)	151	1.35	1.18	0.99

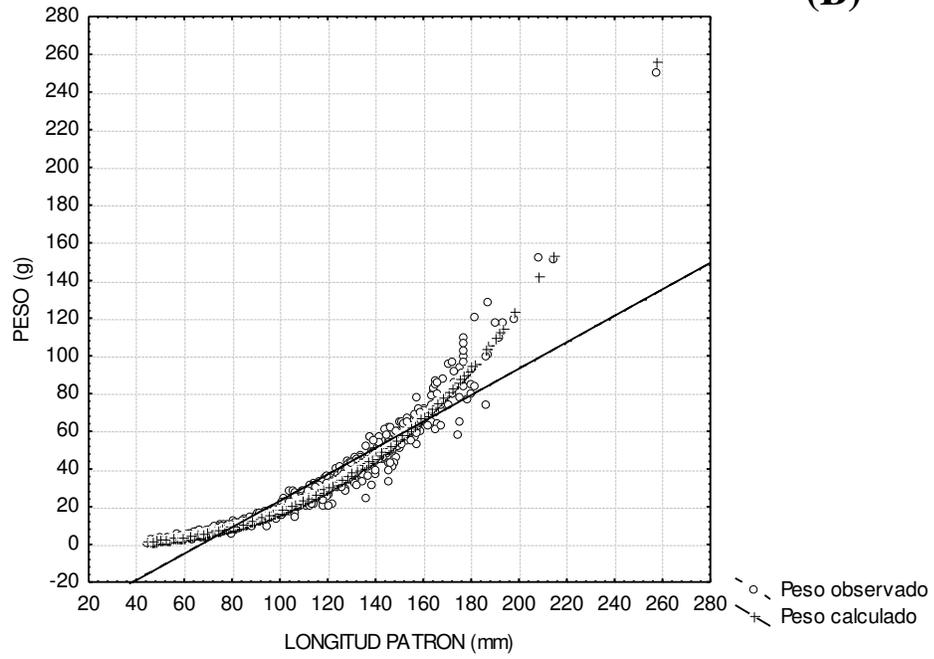
n = número de ejemplares; a = intercepto, b = pendiente, r= coeficiente de correlación.

La ecuación de la relación peso-longitud obtenida para cada uno de los grupos de truchas nativas fue como sigue: trucha dorada mexicana ( $\log Pt = -4.9025 + 3.073 \log Lp$ ; Fig. 3-A), demostrando un crecimiento de tipo isométrico ( $b=3.073$ ; Prueba t de Student,  $t = 2.073$ ,  $p > 0.001$ ); trucha de San Pedro Mártir ( $\log Pt = -4.3283 + 2.796 \log Lp$ ; Fig. 3-B), siendo su crecimiento somático de tipo alométrico negativo ( $b = 2.796$ ;  $t = -14.364$ ,  $p < 0.001$ ); truchas nativas norteñas ( $\log Pt = -5.0302 + 3.134 \log Lp$ ; Fig. 3-C), con un crecimiento somático de tipo isométrico ( $b=3.134$ ;  $t = 1.837$ ,  $p > 0.001$ ) y por último, las truchas nativas sureñas ( $\log Pt = -4.7033 + 2.996 \log Lp$ ; Fig. 3-D), exhibiendo también un crecimiento de tipo isométrico ( $b=2.996$ ;  $t = -0.1214$ ,  $p > 0.001$ ).



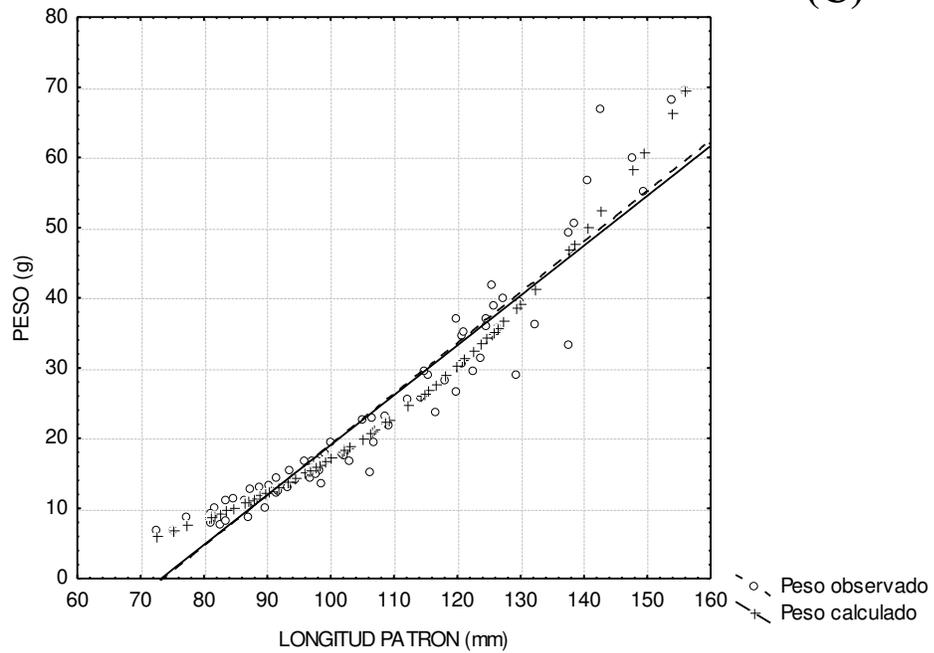
*Oncorhynchus mykiss nelsoni*

(B)



*Oncorhynchus* spp. 1 (norteñas)

(C)



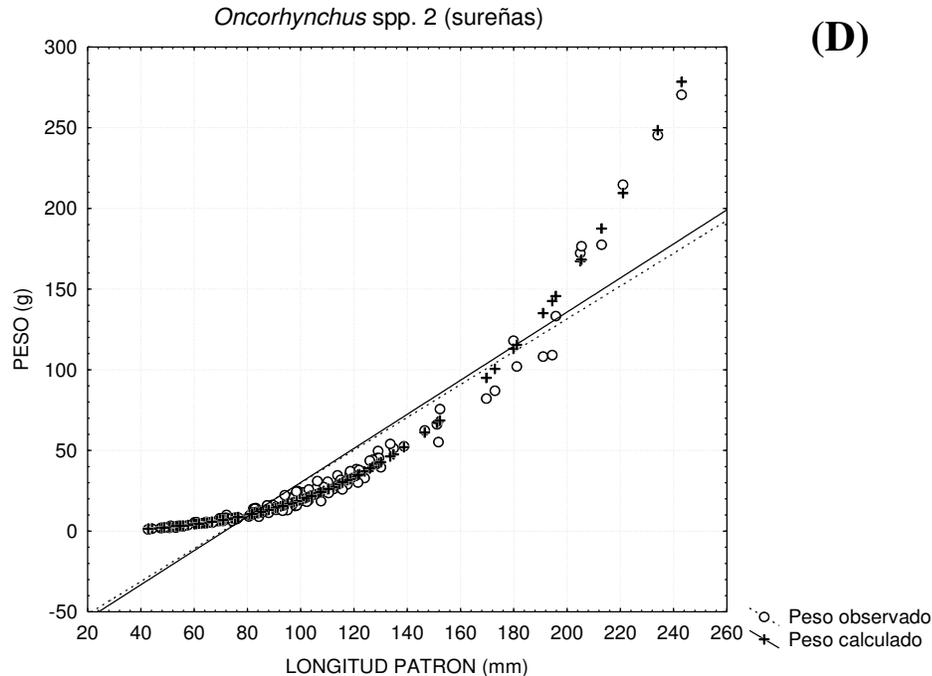


Figura 3. Relación peso-longitud de truchas nativas del género *Oncorhynchus* del noroeste de México. (A) trucha dorada mexicana (Río Fuerte), (B) trucha de San Pedro Mártir, (C) truchas norteñas (Río Yaqui), y (D) truchas sureñas (Río Piaxtla).

Finalmente, las ecuaciones respectivas para convertir de longitud patrón a longitud total ( $L_p$ - $L_t$ ) en los grupos de truchas nativas aquí estudiados fueron: trucha dorada mexicana,  $L_t = 1.319 + 1.181 L_p$ ; trucha de San Pedro Mártir,  $L_t = -1.894 + 1.186 L_p$ ; truchas nativas norteñas,  $L_t = -3.807 + 1.243 L_p$ ; y truchas nativas sureñas:  $L_t = 1.351 + 1.185 L_p$ .

## DISCUSIÓN

Este es el primer estudio que analiza y compara las relaciones biométricas de las poblaciones de truchas nativas del género *Oncorhynchus* del noroeste de México. En este contexto, la relación del peso en función de la longitud patrón para la trucha dorada mexicana fue de tipo isométrico ( $b = 3.073$ ), estando este valor dentro del intervalo recientemente registrado para esta misma especie ( $b = 2.89$  a  $3.31$ , ver Ruiz-Luna et al. Capítulo 6, esta obra).

Las diferencias en los valores de las pendientes de regresión peso-longitud entre las truchas de la SMO (grupos trucha dorada mexicana, norteñas y sureñas) y la trucha de SSPM podrían ser atribuidas a sus proporciones morfométricas particulares, lo cual ha sido previamente demostrado en al menos 17 caracteres morfométricos que distinguen a la trucha de SSPM de aquellas de la SMO (Ruiz-Campos et al. 2003).

El valor de la pendiente “b” obtenido para 750 especímenes selectos de trucha de San Pedro Mártir de 2.796 fue muy similar al calculado previamente para esta misma subespecie (2.810) basado en 509 individuos recolectados entre 1987 y 1989 (Ruiz-Campos 1993; Ruiz-Campos et al. 1997); en ambos casos indicando un crecimiento alométrico negativo. Lo anterior se manifiesta en la tendencia de que el cuerpo del pez se vuelve más esbelto conforme crece. Esto contrasta con lo observado en ejemplares de esta misma subespecie mantenidos en cautiverio durante 12 meses (temperatura, fotoperiodo y

alimento regulado) que demostraron un crecimiento de tipo alométrico positivo ( $b = 3.136$ , Vásquez-Gallegos 2014), donde el pez desarrolló un cuerpo más robusto conforme incrementó su longitud. En nuestro estudio, el valor de “b” obtenido para 750 ejemplares se encuentra dentro del intervalo de 2.59 a 3.34 reportado para poblaciones de trucha arcoíris en diferentes localidades de Norteamérica (Carlander 1969).

En el caso de la trucha dorada mexicana, el valor de la pendiente “b” de 3.07 indicó un crecimiento de tipo isométrico, al igual que en el registrado para las truchas nativas norteñas (3.134) y sureñas (2.996). Un crecimiento isométrico significa que las proporciones somáticas se mantienen estables conforme el pez crece, sin embargo la aplicación de métodos de morfometría geométrica para esta especie ha demostrado la presencia de un dimorfismo sexual secundario que se manifiesta en una mayor robustez de la cabeza del macho (ver García-De León et al. Capítulo 5, esta obra).

En otras truchas nativas del género *Oncorhynchus* del suroeste americano, el valor calculado de la pendiente “b” es 3.14 para la trucha Gila *Oncorhynchus gilae* (Carlander 1969), 2.83 a 3.10 para trucha garganta cortada *Oncorhynchus clarkii* (Carlander 1969.) 2.70 para la trucha dorada de California *O. mykiss aguabonita* (Knapp y Dudley 1990).

Finalmente, una de las utilidades prácticas de conocer los parámetros de la relación longitud patrón-longitud total para las diferentes formas de truchas nativas del noroeste de México, es que permiten realizar conversiones de una longitud a otra, lo cual facilita la comparación de resultados entre estudios que han utilizado cualquiera de las longitudes corporales aquí descritas.

## 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.
- Behnke, R.J. 2002. *Trout and salmon of North America*. Chanticleer press, inc., New York.
- 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.
- Carlander, K.D. 1969. *Handbook of freshwater fishery biology*. Volume I. The Iowa State University Press, Ames, USA.
- García-De León, F.J., L.N. Getino M., J. Rodríguez, S. Sánchez G., F. Márquez y A. Ruiz-Luna. 2016. Dimorfismo sexual y periodo reproductivo de la trucha dorada mexicana, *Oncorhynchus chrysogaster* en los ríos Fuerte, Sinaloa y Culiacán. En: Ruiz-Luna A. y F.J. García-De León (eds.). *La trucha dorada mexicana*. Cap. 5.
- Knapp, R.A. and T.L. Dudley. 1990. Growth and longevity of golden trout, *Oncorhynchus aguabonita*, in their native streams. *California Fish and Game*. 76: 161-173.
- Mayden, R.L. 2004. Biodiversity of Mexican trout (Teleostei: Salmonidae: *Oncorhynchus*): recent findings, conservation concerns, and management recommendations. En: Lozano M.L. y A.J. Contreras (eds.). *Homenaje al doctor Andrés Reséndez Medina: un ictiólogo mexicano*. Dirección de Publicaciones, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México. pp. 269-282.
- Mayden, R.L., C.B. Dillman, H. Espinosa-Pérez, J.R. Tomelleri, B.R. Kuhajda, D.A. Hendrickson, G. Ruiz-Campos, A.B. De los Santos-Camarillo, F. García-De León, A. Varela-Romero, D.L. Propst, J.E. Brooks, L.T. Findley, A.L. George, D.A. Neely, I.A.

- Barriga-Sosa and K.E. Mayden. 2010. Evolution and Diversity of Trout Species in México. En: Carline, R.F. and LoSapio, C. (eds.). *Conserving wild trout. Proceedings of the Wild Trout*. X symposium. Bozeman, USA. pp. 134-144.
- Hall, E.R. 1962. *Collecting and preparing study specimens of vertebrates*. Museum of Natural History. The University of Kansas., Miscellaneous Publication No. 30: 1-46.
- Reyes-Valdéz, C.A., G. Ruiz-Campos, F. Camarena-Rosales and A. Varela-Romero. 2006. Diet composition of native trout (Salmonidae: *Oncorhynchus*) from the Sierra Madre Occidental, Mexico. En: Lozano-Vilano M.L. and A.J. Contreras-Balderas (eds.). *Studies of North American Desert Fishes in Honor of E.P. (Phil) Pister, Conservationist*. Mexico. Faculty of Biological Sciences. UANL. México. pp: 125-137.
- Ruiz-Campos, G. 1989. Repoblación natural por trucha arcoiris (*Salmo gairdneri nelsoni*) en un transecto del arroyo San Rafael, noroeste de la Sierra San Pedro Mártir, Baja California, México. *The Southwestern Naturalist*. 34(4): 552-556.
- Ruiz-Campos, G. y P. Cota-Serrano. 1992. Ecología alimenticia de la trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss nelsoni*) del Arroyo San Rafael, Sierra de San Pedro Mártir, Baja California, México. *The Southwestern Naturalist*, 37: 166-177.
- Ruiz-Campos. 1993. Bionomía y ecología poblacional de la trucha arcoíris, *Oncorhynchus mykiss nelsoni* (Evermann), de la Sierra San Pedro Mártir, Baja California, México. *Tesis Doctoral*. Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México.
- Ruiz-Campos, G. and E.P. Pister, 1995. Distribution, habitat, and current status of the San Pedro Mártir rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss nelsoni* (Evermann). *Bulletin of the Southern California Academy of Sciences*. 94(2): 131-148.
- Ruiz-Campos, G., E.P. Pister and G. Campeán-Jiménez. 1997. Age and growth of Nelson's trout, *Oncorhynchus mykiss nelsoni*, from Arroyo San Rafael, Sierra San Pedro Mártir, Baja California, México. *The Southwestern Naturalist*, 42: 74-85.
- Ruiz-Campos, G., F. Camarena-Rosales, A. Varela-Romero, S. Sánchez-González and J. De La Rosa-Vélez. 2003. Morphometric variation of wild trout populations from northwestern Mexico (Pisces: Salmonidae). *Reviews in Fish Biology and Fisheries*. 13: 91-110.
- Ruiz-Campos, G., F. Camarena-Rosales, A.F. González-Acosta, A.M. Maeda-Martínez, F.J. García-De León, A. Varela-Romero y A. Andreu-Soler. 2014. Estatus actual de conservación de seis especies de peces dulceacuícolas de la Península de Baja California, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 85: 1235-1248.
- Sokal, R. R. and F. J. Rohlf. 1981. *Biometry: the principles and practice of statistics in biological research*. Second ed. W.H. Freeman and Company, New York, USA.
- Valles-Ríos, M.E. y G. Ruiz-Campos. 1996. Prevalencia e intensidad de helmintos parásitos del tracto digestivo de la trucha arcoíris *Oncorhynchus mykiss nelsoni* (Pisces: Salmonidae), de Baja California, México. *Revista de Biología Tropical*. 44(3)/45(1): 579-584.
- Vásquez-Gallegos, P. 2014. Maduración sexual de la trucha de San Pedro Mártir *Oncorhynchus mykiss nelsoni* evaluada mediante un método no invasivo. *Tesis de Maestría en Ciencias* (Acuicultura), Centro Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Ensenada, Baja California, México.



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

---

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

### INTRODUCCIÓN

La gestión de recursos naturales, sea para propósitos de aprovechamiento, manejo o conservación, requiere de información más o menos precisa sobre la ubicación y abundancia de un recurso determinado. Particularmente para especies que se encuentran sometidas a una fuerte presión ambiental o cuya historia natural es poco conocida, esta situación es crítica, pues de este conocimiento se pueden derivar las estrategias requeridas para su mantenimiento y conservación.

En esas circunstancias se encuentra un grupo de truchas nativas de México (*Oncorhynchus* spp.), peces de agua dulce pertenecientes a la familia Salmonidae, que representan el límite natural de distribución austral (Behnke y Tomelleri 2002), considerando que la distribución geográfica natural de los salmónidos se limita al hemisferio norte, particularmente asociados con zonas montañosas de climas templados y fríos (Contreras-Balderas y Escalante 1984; Behnke y Tomelleri 2002; Espinosa et al. 2007; Miller et al. 2009). Cabe mencionarse que diversas especies de la familia han sido introducidas a nivel mundial, con fines de cultivo y para la pesca deportiva.

Aunque estudios recientes consideran que las truchas mexicanas forman un complejo de especies (Hendrickson et al. 2002, 2006; Mayden 2005; Escalante et al. 2014; Abadía-Cardoso et al. 2015), que probablemente rebasa la decena de especies, en la Sierra Madre Occidental (SMO) solo la denominada trucha dorada mexicana, *O. chrysogaster* (Needham y Gard 1964), ha sido descrita formalmente, asociando su área de distribución natural con la cuenca alta de los ríos Fuerte, Sinaloa y Culiacán, en altitudes superiores a los 1500 msnm (Camarena-Rosales et al. 2001; Hendrickson et al. 2006; Reyes-Valdez et al. 2006; Espinosa et al. 2007).

Las evidencias genéticas sugieren que la trucha dorada mexicana pertenece a un linaje genético único, sin embargo se tiene la certidumbre de que la introducción con propósitos de cultivo de la trucha arcoíris (*O. mykiss* (Walbaum 1792)) ha propiciado distintos grados de introgresión genética, es decir el intercambio de genes de una especie a otra por efecto de hibridación, situación asociada principalmente con un mal manejo de la actividad acuícola (Escalante et al. 2014; Escalante et al. Capítulo 10, esta obra). Aunado a lo anterior, actividades humanas como la deforestación, pesca y minería, sitúan a la trucha dorada en un escenario desfavorable, por lo que se le ha reconocido como especie vulnerable, en riesgo o en peligro de extinción por instancias nacionales (Norma Oficial Mexicana; NOM-059-SEMARNAT-2010) e internacionales (IUCN 2015).

Ante la amenaza de extinción de *O. chrysogaster* y en general de las truchas nativas de México, tanto a nivel local como regional, se han generado diversas iniciativas en años recientes, con el fin de incrementar el conocimiento que sobre estas especies se tiene (Hendrickson et al. 2002, 2006; Ruiz-Luna et al. 2013), proporcionando así elementos que

coadyuven a la gestión de este recurso de importancia regional, pero sobre todo para su mantenimiento y conservación, posiblemente a través de proyectos para su protección y para cultivo (Barriga-Sosa et al. ver Capítulo 11, esta obra).

Por lo anterior, se requiere de información sobre la biología y ecología de estas especies, siendo determinante el conocimiento sobre la extensión y características de su área de distribución. De acuerdo con Hendrickson et al. (2002), que ubican los primeros registros de trucha en la SMO a finales del siglo XIX, no es sino a mediados del siglo XX cuando se empieza a sistematizar el registro en diversas localidades, ubicándose particularmente en Durango y Chihuahua. El registro se incrementó y ha ido mejorando a raíz de la organización del grupo binacional Truchas Mexicanas (México-EUA; [http://w3.biosci.utexas.edu/tnhc/fish/research/truchas\\_mexicanas/](http://w3.biosci.utexas.edu/tnhc/fish/research/truchas_mexicanas/)), a fines de la década de 1990.

Con todo y esta iniciativa, hasta el año 2009 el número de registros para trucha en la SMO es relativamente reducido (<300), considerando la amplitud geográfica de los mismos, restringida a altitudes superiores a los 1500 msnm. La insuficiencia de datos es la resultante de la falta de un programa de monitoreo y que se ha limitado históricamente por la dificultad de acceso a la zona de distribución de estos peces y a la inseguridad provocada por la problemática social que se vive en la región (Hendrickson 2006; Ruiz-Luna et al. 2013).

Para contrarrestar este tipo de situaciones donde existe insuficiencia de datos, se han generado técnicas basadas en herramientas estadísticas asociadas a los Sistemas de Información Geográfica (SIG), a partir de las cuáles es posible generar modelos de distribución de especies (Guisan y Zimmermann 2000; Scott et al. 2002), inclusive para especies dispersas en áreas grandes, permitiendo la reducción del esfuerzo y ampliando las posibilidades de éxito de localización, aún para especies en peligro de extinción, cuyos tamaños poblacionales son reducidos. Aun para estas situaciones extremas, los métodos desarrollados pueden ser viables con un reducido número de registros, como lo refieren Proosdij et al. (2015), quienes evaluaron el desempeño de los modelos de distribución de especies (SDM por sus siglas en Inglés), encontrando valores entre 14 y 25 registros para distintas situaciones en condiciones reales.

El desarrollo de SDM, que involucra distintas técnicas, intenta contrarrestar la carencia de información (Guisan y Zimmermann 2000; Araújo y Peterson 2012) y se basa en el conocimiento de las condiciones ambientales de los sitios conocidos con ocurrencias de las especies objetivo. A partir de dicha información es posible proponer un modelo de distribución potencial de la especie, con un nivel asociado de incertidumbre, útil para propósitos de monitoreo (Anderson 2003; Guisan y Thuiller 2005).

El método de modelación requiere datos de localidades donde ha sido confirmada la presencia de la especie a estudiar y sus variables ambientales asociadas, a partir de lo cual se genera un modelo de requerimientos de la especie o modelo de nicho ecológico (Anderson 2003; Soberón y Nakamura 2009; Soberón 2010; Peterson y Soberón 2012), que puede ser proyectado geográficamente, proveyendo información útil para la identificación del área de distribución y mejorar la planificación y manejo del recurso en un contexto de conservación (Naoki et al. 2006; Torres y Jayat 2010).

Particularmente relacionados con la SMO, se cuenta con dos trabajos previos en los que se han generado modelos sobre la distribución de especies del género *Oncorhynchus*. El primero fue propuesto por Hendrickson et al. (2006) a partir de la aplicación del algoritmo GARP (*Genetic Algorithm of Rule-Set Prediction*) que fue desarrollado por

Stockwell y Peters (1999), con el cual fue posible identificar y verificar en campo nuevas localidades de ocurrencia de truchas en la cuenca del río Conchos, para las que no se tenían registros previos (Mayden 2005; Hendrickson et al. 2006). Por otra parte Ruiz-Luna et al. (2013) generaron un modelo de distribución potencial para la trucha dorada mexicana *O. chrysogaster* con la aplicación del modelo MaxEnt (*Maximum Entropy Modeling*; Phillips et al. 2006), obteniéndose resultados con un relativo sesgo debido a la mejor representación de registros para la cuenca de río Fuerte, uno de los tres ríos considerados dentro del área de distribución de la trucha dorada mexicana. Por lo anterior el presente estudio se centró en la generación de un modelo de distribución y su validación para las dos cuencas restantes, ríos Sinaloa y Culiacán, generando más información correspondiente a estas cuencas para tal propósito.

## MÉTODOS

### *Área de estudio y registros de trucha dorada mexicana*

El área de estudio, ubicada en la región noroeste de la SMO, se determinó a partir de los límites de cuenca de los ríos Sinaloa y Culiacán, descargados del Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas del Instituto Nacional de Estadística y Geografía ([http://antares.inegi.org.mx/analisis/red\\_hidro/SIATL/?s=geo&c=1693&e=00#](http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/SIATL/?s=geo&c=1693&e=00#)), acotando el espacio a una altitud mínima de 1500 msnm, con base en un polígono derivado de los Modelos Digitales de Elevación (MDE) con resolución de 15 metros, a partir de los cuales se extrajeron las curvas de nivel. La extensión final del área de estudio es de aproximadamente 9160 km<sup>2</sup> y se encuentra dentro de las coordenadas extremas 24°45' y 26°29'N, 107°28' y 105°44'O (Fig. 1).

El área de estudio es geológicamente compleja y provee una gran diversidad de ambientes terrestres, dominados por coníferas y pastizales, así como de ambientes acuáticos que fueron delineados generando una red hidrográfica siguiendo los métodos descritos por Hernández-Guzmán (2006) y Lin et al. (2006). Finalmente se obtuvieron los órdenes de cauce (*Stream Order*) mediante el método propuesto por Strahler (1957), con las modificaciones propuestas por Hernández-Guzmán (2006). Los procedimientos anteriores y otros posteriores que implicaron el uso de capas en formato raster o vectorial, así como la elaboración de mapas se llevaron a cabo con aplicaciones de SIG con el programa ArcGIS 10.1.

Los registros de ocurrencia de truchas en la región de estudio fueron recabados a partir de la publicación de Hendrickson et al. (2002), así como de la base de datos proporcionada por el grupo binacional Truchas Mexicanas. De igual manera se revisaron distintas bases de datos de libre acceso, tanto internacionales como nacionales como *Global Biodiversity Information Facility* (<http://www.gbif.org/species/>); la colección ictiológica de la Academia de Ciencias de California (<http://collections.calacademy.org/ich>) y la Colección Nacional de Peces (<http://www.ibiologia.unam.mx/peces/Peces.htm>).

Para propósitos del presente estudio, se incrementaron y actualizaron los registros de trucha dorada mexicana dentro de su área de distribución, realizándose una serie de muestreos entre febrero del 2013 y junio de 2015, llevándose a cabo principalmente durante la época de secas, cuando el flujo de agua permite realizar la actividad. La campaña de muestreo se llevó a cabo en localidades para las que se cuenta con registro histórico así como explorando localidades nuevas. Las capturas se realizaron con el uso de electropesca (Smith-Root, Inc.; 15-D POW), registrándose la posición geográfica del sitio con el sistema de coordenadas UTM, posteriormente estandarizadas con el resto de las localidades a

coordenadas geográficas (latitud – longitud), en formato grados decimales. Adicionalmente se registró la altitud (msnm) y se obtuvieron fotografías georreferenciadas con equipos GPS GARMIN modelo Rino 655t.



Figura 1. Localización geográfica del área de estudio.

Para la base de datos final se utilizaron solamente aquellos datos históricos que contaron con información geográfica suficiente para identificar positivamente el sitio de registro, verificando que correspondiera con la información proporcionada por los recolectores y que la posición correspondiera a sitios al menos próximos a ríos o arroyos identificables a través de *Google Earth*. Finalmente se eliminaron coincidencias o puntos cuya cercanía aportaba escasa información dentro del proceso de modelado.

#### *Modelos de distribución.*

Para generar los mapas de distribución potencial de la trucha dorada mexicana en la región de estudio se emplearon dos aproximaciones metodológicas basadas en registros de presencia, ambas usadas previamente en la SMO (Hendrickson et al. 2006; Ruiz-Luna et al.

2013), si bien los resultados de las experiencias previas se derivaron con todos los registros disponibles para *Oncorhynchus* spp., no necesariamente asociados con alguna cuenca en específico.

El primer método es conocido como GARP y su aplicación se encuentra disponible en el programa DesktopGARP v.1.1.6 (<http://www.nhm.ku.edu/desktopgarp/>). El otro método de modelación es conocido como Maxent, disponible en línea en su versión MaxEnt 3.3.3k (<http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/>). Elegimos estos algoritmos debido a que: (1) son de uso común; y (2) se ha encontrado que funcionan bien para pequeños tamaños de muestra; sin embargo, (3) son sensibles a los ajustes del algoritmo que afectan la complejidad del modelo (Phillips y Dudík 2008; Shcheglovitova y Anderson 2013; Morales et al. 2015).

Ambos algoritmos identifican áreas geográficas con las condiciones adecuadas para la especie, con base en datos conocidos de ocurrencia. Parten de información incompleta sobre los requerimientos ambientales de las especies, retomando los valores de las condiciones ambientales encontradas en las localidades donde se ha registrado la presencia de la especie estudiada, derivando de ellas las condiciones aptas para su desarrollo. Son dos de los métodos más empleados para la modelación de nicho, siendo común su comparación ya que ambos están sujetos a error y generan sesgo, requiriendo ambos de mayor análisis y desarrollo para garantizar resultados (Peterson et al. 2007).

Para su aplicación se descargaron 19 capas raster con resolución espacial de 1 km, representando variables bioclimáticas del proyecto WorldClim versión 1.4 (Hijmans et al. 2005), correspondientes a la zona 22 de dicho sistema (<http://www.worldclim.org>). Adicionalmente se incluyeron capas correspondientes a un modelo altitudinal y al Índice Topográfico Compuesto (CTI) del proyecto HYDRO1k (<https://lta.cr.usgs.gov/HYDRO1K>), con la misma resolución espacial, siendo acotadas a los límites geográficos del área de estudio.

Se descartaron las variables altamente correlacionadas entre sí ( $\geq 0.90$ ), para evitar redundancia y una vez definidas las capas, se procedió a la aplicación de ambos métodos. Para el algoritmo GARP se utilizó el 100% de los datos, ajustando el programa para desarrollar 100 modelos independientes con un máximo de 1000 iteraciones y un límite de convergencia de 0.01. Los mapas resultantes son de tipo binario (ausencia = 0; presencia = 1) y del total obtenido, se seleccionaron los diez mejores en función del tamaño del error de omisión (<10%) y del error de comisión (> 50%). A partir de este juego de mapas se generó el mapa consenso (suma de los mapas), que representa la distribución geográfica potencial de la especie con valores de 1 a 10, de acuerdo al procedimiento descrito por Anderson (2003). Finalmente se procedió a reclasificar dicho mapa considerando solamente el área con valor de 10, al que se asignó un valor de 1, mientras que para áreas con valores inferiores se asignó el valor de cero, generando un nuevo mapa que representa localidades con presencia (1) y con ausencia (0) de la especie. Los puntos que representan las localidades con registro de presencia fueron agregados como una capa adicional en el mapa, para verificar si el modelo los predice en su totalidad.

Para la aplicación del algoritmo MaxEnt, que intenta ajustar distribuciones de probabilidad de ocurrencia de la especie, se utilizaron los parámetros de entrada definidos por defecto por el programa con la opción *Auto Features* activada, pero sin extrapolar a regiones del espacio ambiental fuera de los límites encontrados durante el entrenamiento, esto genera una representación de la probabilidad acumulativa de ocurrencia de la especie que adquiere valores de 0 a 1, para posteriormente obtener un mapa binario de presencia (1)

y ausencia (0), utilizando el criterio del valor mínimo de presencia (*minimum training presence*). Bajo esta regla de umbral, los píxeles con valores iguales o mayores que el umbral de presencia más bajo se consideran adecuados, mientras que los píxeles con valores por debajo de ella no lo son (Anderson y Raza 2010).

#### *Evaluación de los modelos*

Para la evaluación de los modelos y considerando el reducido número de localidades con registro para la especie, se procedió a aplicar el método estadístico de remuestreo Jackknife descrito por Pearson et al. (2007). Con este procedimiento cada una de las localidades se remueve una vez del grupo de datos y se construye el modelo usando las localidades restantes  $n-1$ . Por lo tanto, para la especie con  $n$  localidades observadas,  $n$  modelos fueron construidos. Posteriormente se evaluó el rendimiento predictivo basado en la capacidad de cada modelo para predecir la localidad excluida del conjunto de datos. El nivel de significancia del conjunto de modelos fue evaluado con base a valor de probabilidad  $p$ , siguiendo lo descrito en Pearson et al. (2007) utilizando el programa ejecutable *pValueCompute*, desarrollado por el Centro de Investigación en Matemáticas, A.C. (CIMAT). Un valor de  $p \leq 0.05$  para las pruebas de Jackknife indica que las localidades de evaluación (o de prueba) son predichas mejor que una predicción al azar (Anderson y Raza 2010). Finalmente, para permitir una evaluación estandarizada de los dos modelos empleados, las predicciones se expresaron como mapas binarios (1/0) presencia-ausencia.

## **RESULTADOS**

### *Registros de *O. chrysogaster* en la zona de estudio*

De acuerdo con los métodos empleados se determinó que ambas cuencas presentan un patrón de drenaje dendrítico, caracterizado por numerosos y pequeños tributarios que se unen en un ángulo agudo con uniones en Y a arroyos de mayor jerarquía, formando eventualmente los ríos más grandes. La red hidrográfica generada para la zona de estudio, cuenta con una longitud total aproximada de 5500 km, que en mayor proporción (80%) corresponden a arroyos primarios de orden de cauce 1 (2850 km) y 2 (1529 km), principalmente situados en la cuenca del río Culiacán (Fig. 2).

Para esta región se obtuvo un total de 31 registros de ocurrencia de trucha dorada mexicana, con referencia geográfica, correspondiendo 14 de los mismos a registros históricos obtenidos entre 1953 y hasta 2009. Los restantes 17 registros fueron obtenidos durante el presente estudio (2013-2015), algunos de los cuáles se realizaron en los sitios históricos para verificar la presencia actual de truchas, pero al mismo tiempo se registraron localidades nuevas (12).

Durante el proceso de depuración, la mayoría de los registros históricos fueron substituidos por los registros más actuales realizados en las mismas localidades, eliminándose también los puntos cuya cercanía aporta poco al proceso de modelado, por lo que la base de datos final contiene un total de 18 registros de presencia de *O. chrysogaster*, de los que 11 se obtuvieron dentro de los límites de la cuenca del Sinaloa y 7 en la del Culiacán.

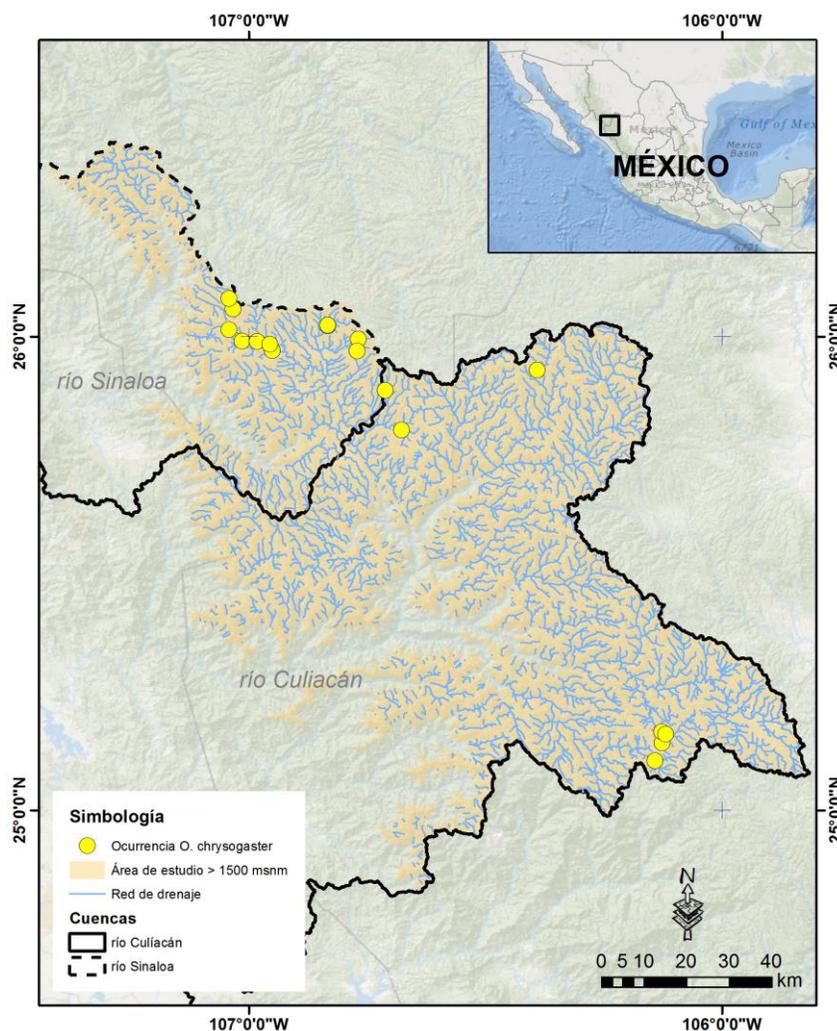


Figura 2. Red de drenaje de las cuencas del Sinaloa y Culiacán y localización de los sitios con registro de trucha dorada mexicana, *Oncorhynchus chrysogaster* en el área de estudio.

De los anteriores, solamente tres registros forman parte del padrón histórico y el resto fue obtenido en las campañas realizadas dentro del presente estudio, obteniéndose el registro más austral en la cuenca del río Culiacán, realizándose la mayoría de las capturas en arroyos de orden de cauce 2 de la cuenca hidrográfica, capturándose a los especímenes en altitudes superiores a 2200 msnm (Tabla 1).

Tabla 1. Registros de presencia de trucha dorada mexicana, *Oncorhynchus chrysogaster* en las cuencas de los ríos Sinaloa y Culiacán. Institución o Colección de referencia (SLU: Saint Louis University; CIAD Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo; CAS: California Academy of Sciences), datos de referencia geográfica y orden de cauce de la red hídrica donde se obtuvo la muestra.

Id	Cuenca	Colección	Fecha Colecta	Latitud	Longitud	Elevación (m)	Orden de cauce
1	Sinaloa	SLU	2007	25.995	-106.768	2517	2
2	Sinaloa	CIAD	2014	26.059	-107.033	2617	2
3	Sinaloa	CIAD	2014	25.991	-107.014	2412	2
4	Sinaloa	CIAD	2014	25.990	-106.982	2334	3
5	Sinaloa	CIAD	2014	25.971	-106.950	2314	2

6	Sinaloa	CIAD	2014	25.984	-106.955	2261	3
7	Sinaloa	CIAD	2014	26.081	-107.042	2480	2
8	Sinaloa	CIAD	2014	26.015	-107.042	2638	1
9	Sinaloa	CIAD	2015	25.970	-106.771	2447	3
10	Sinaloa	CIAD	2015	26.023	-106.833	2391	2
11	Sinaloa	CIAD	2015	26.025	-106.833	2398	2
12	Culiacán	CIAD	2015	25.803	-106.677	2340	2
13	Culiacán	CAS	1953	25.930	-106.390	2734	2
14	Culiacán	SLU	2007	25.887	-106.711	2435	2
15	Culiacán	CIAD	2014	25.105	-106.141	2438	2
16	Culiacán	CIAD	2014	25.143	-106.126	2309	2
17	Culiacán	CIAD	2014	25.166	-106.127	2256	3
18	Culiacán	CIAD	2014	25.161	-106.119	2251	3

### *Variables ambientales*

De las 21 capas seleccionadas en formato raster, que incluían variables climáticas y fisiográficas representativas de clima y fisiografía del área de estudio, se seleccionaron solo aquellas menos correlacionadas y con significación biológica. Dichas variables son representativas de la temperatura, precipitación y del perfil topográfico de la zona de estudio (Tabla 2).

Tabla 2. Total de variables climáticas y fisiográficas ambientales derivadas de WorldClim e Hydro 1K y las seleccionadas para el análisis, asociadas con su contribución (%) al modelo Maxent.

<b>Tipo de variable</b>	<b>Clave</b>	<b>Descripción</b>	<b>Incluida</b>
	BIO1	Temperatura media anual	
	BIO2	Rango de temperatura media diaria	
	BIO3	Isotermalidad	13.0%
	BIO4	Estacionalidad de la temperatura	
	BIO5	Temperatura máxima del mes más cálido	17.7%
	BIO6	Temperatura mínima del mes más frío	21.4%
	BIO7	Amplitud térmica anual	
	BIO8	Temperatura media del trimestre más húmedo	
	BIO9	Temperatura media del trimestre más seco	
Climáticas	BIO10	Temperatura media del trimestre más cálido	
	BIO11	Temperatura media del trimestre más frío	
	BIO12	Precipitación anual	
	BIO13	Precipitación del mes más húmedo	
	BIO14	Precipitación del mes más seco	
	BIO15	Estacionalidad de la precipitación	
	BIO16	Precipitación media del trimestre más húmedo	15.6%
	BIO17	Precipitación media del trimestre más seco	
	BIO18	Precipitación media del trimestre más cálido	
	BIO19	Precipitación media del trimestre más frío	16.9%
Topográficas	Alt	Altitud (msnm)	
	CTI	Índice Compuesto Topográfico	15.4%

Las variables seleccionadas corresponden a un índice de Isotermalidad (BIO3) que es un indicador de variabilidad de la temperatura, derivado de una relación entre el rango de temperatura media diaria (BIO2) y la amplitud térmica anual (BIO7). Adicionalmente los valores de temperatura extrema más cálida (BIO5) y más fría (BIO6) formaron parte de las variables seleccionadas. Con relación a la precipitación, se consideraron los periodos de mayor precipitación en el trimestre más húmedo (BIO16) y del más frío (BIO19). Finalmente un índice compuesto que considera la pendiente y flujo (CTI).

### Modelos

Los resultados que se obtuvieron con las dos aproximaciones metodológicas fueron muy similares, si bien presentan diferencias, particularmente asociadas con la altitud. El modelo de consenso generado con los diez mejores mapas obtenidos con GARP resultó ligeramente menor en superficie, que el producido con Maxent. En la figura 3 se observa el área acotada a niveles de 1500 msnm o mayores, para las dos cuencas estudiadas. El área definida por el modelo se presenta en color café oscuro, concentrándose en altitudes superiores al límite de los 1500 m, quedando vacíos hacia el noroeste, noreste y más específicamente al sur.

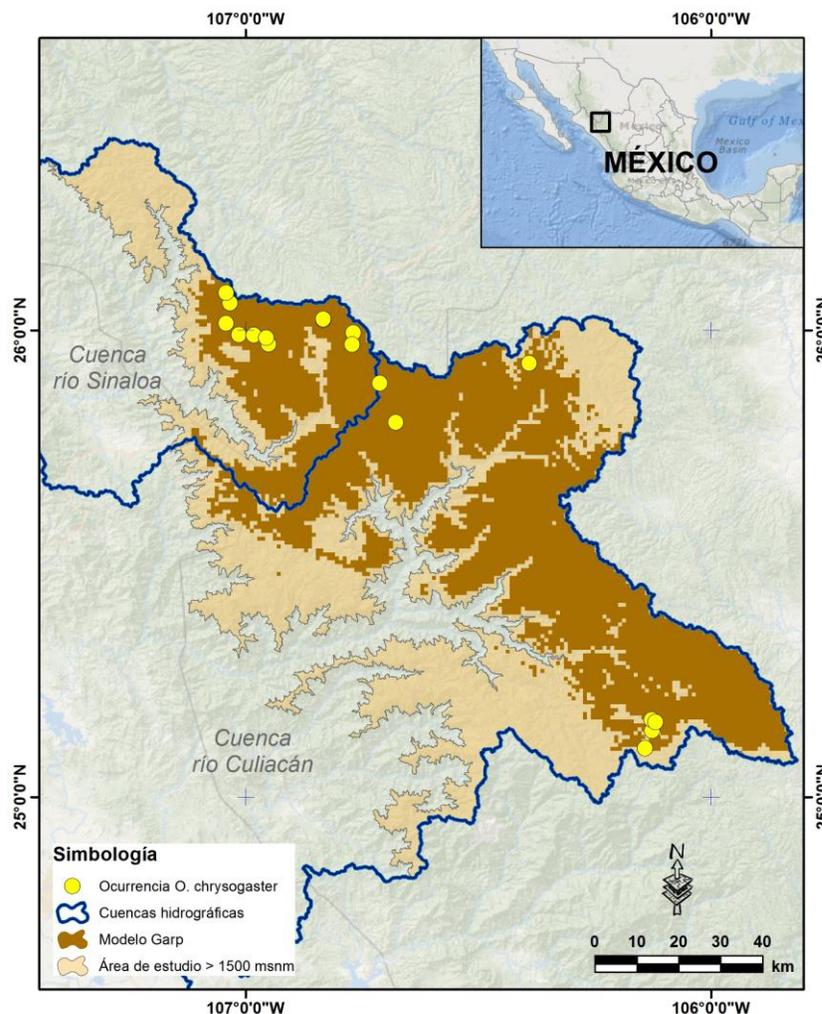


Figura 3. Área de distribución potencial y localidades de registro de trucha dorada mexicana, *Oncorhynchus chrysogaster* en las cuencas de los ríos Sinaloa y Culiacán, a partir del modelo GARP.

En el caso del modelo generado con Maxent (Fig. 4), el área de distribución potencial se extiende ligeramente y cubre parte de las áreas no incorporadas por el modelo GARP, alcanzando altitudes cercanas a los 1500 msnm, sobre todo al norte del área de estudio, por lo que prácticamente toda la cuenca del río Sinaloa, por encima de los 1500 se observa como apta para la distribución de la trucha dorada.

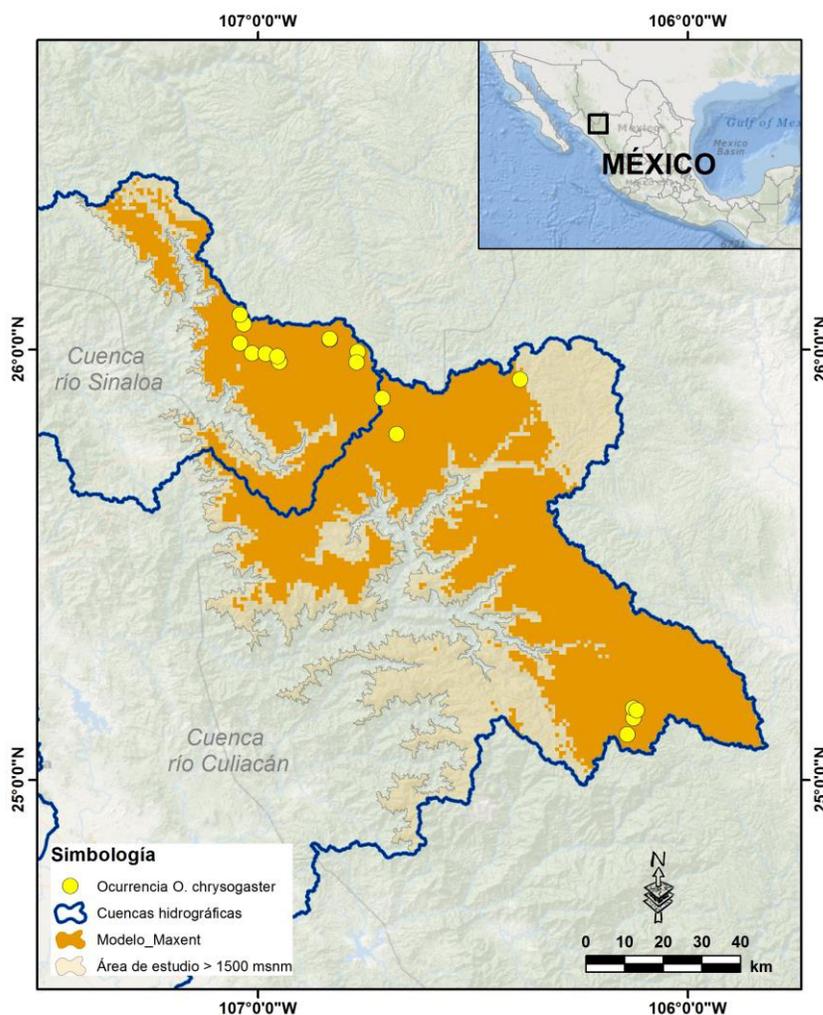


Figura 4. Área de distribución potencial y localidades de registro de trucha dorada mexicana *Oncorhynchus chrysogaster* en las cuencas de los ríos Sinaloa y Culiacán, a partir del modelo de Máxima Entropía (MaxEnt).

La superposición de ambos modelos genera una superficie que coincide en aproximadamente un 85% y que para propósitos de este estudio se considera como la zona de distribución de la trucha dorada mexicana, con mayor probabilidad de ocurrencia y en la que se observa coincidencia con los registros de trucha realizados en campo (Fig. 5).

La diferencia de superficie entre ambos modelos es ligeramente superior a 1000 km<sup>2</sup> y como ya se señaló anteriormente, la mayor superficie correspondió al modelo Maxent

(5540 km<sup>2</sup>) y considerando que el área total de estudio es de aproximadamente 9100 km<sup>2</sup>, la estimación generada con Maxent representa más del 60% del total.

Siguiendo un razonamiento similar, la superficie obtenida con GARP solo representó poco menos del 50%, con una superficie estimada en 4310 km<sup>2</sup>. Una vez que se obtuvo el solapamiento de superficies, la superficie ocupada es similar a la producida por GARP, sin embargo no coinciden en su totalidad, destacando un área al noreste de la zona de estudio, en la cuenca del Culiacán.

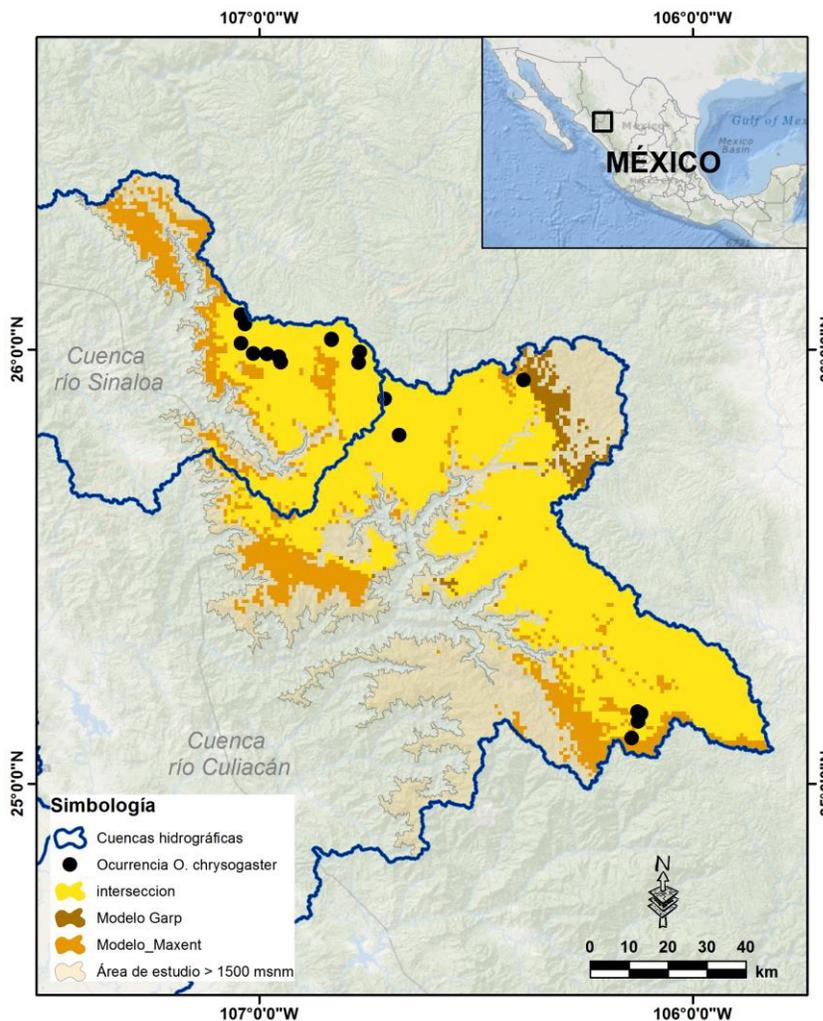


Figura 5. Área de distribución potencial y localidades de registro de trucha dorada mexicana, *Oncorhynchus chrysogaster* en las cuencas de los ríos Sinaloa y Culiacán, con coincidencia en los resultados derivados del modelo GARP y el de Máxima Entropía (MaxEnt).

Con relación al modelo Maxent, las principales diferencias están en zonas localizadas al noroeste y al sur, en altitudes más próximas al límite inferior de altitud. Cabe mencionarse que las diferencias se minimizan cuando solo se considera la red hidrográfica, que es prácticamente la misma y donde hay una elevada coincidencia con las localidades con registro de trucha nativa.

### Validación

El método de validación Jackknife mostró que las dos aproximaciones aplicadas fueron adecuadas, considerando únicamente el  $p$ -valor de significancia del análisis ( $< 0.005$ ). Sin embargo, el total de éxitos obtenidos por cada modelo (número de posiciones predichas positivamente) fue menor para el modelo de GARP (83%), a diferencia del obtenido por el modelo MaxEnt (94%).

Las dos aproximaciones coinciden en no predecir el sitio de recolecta identificado con el número 13, que de acuerdo con la fecha de recolecta pertenece a un registro histórico (1953), siendo éste el más antiguo que se utilizó para el proceso de modelado y que se ubica dentro de la cuenca del río Culiacán. En general, MaxEnt fue el método con mayor capacidad predictiva, ya que no predijo un sitio de los 18; seguido de GARP el cual dejó tres sitios sin predecir, uno para la cuenca del río Sinaloa y dos en la cuenca del río Culiacán, incluyendo el ya mencionado.

Los resultados del test, con relación a los casos de éxito y valor de probabilidad ( $p$ ), se incluyen en la Tabla 3, en general, la capacidad predictiva de los diferentes modelos fue buena.

Tabla 3. Porcentaje de éxito y significancia de la prueba Jackknife aplicada a los modelos GARP y MaxEnt para trucha dorada mexicana, *Oncorhynchus chrysogaster* en las cuencas de Culiacán y Sinaloa.

<b>Id</b>	<b>Fecha Colectada</b>	<b>Localidad</b>	<b>Cuenca</b>	<b>GARP</b>	<b>MaxEnt</b>	
1	2007-04-15	Arroyo Rancho de El Medio	Sinaloa	1	1	
2	2014-03-27	Arroyo Macheras	Sinaloa	1	1	
3	2014-03-28	Arroyo El Soldado	Sinaloa	1	1	
4	2014-03-28	Arroyo Osera	Sinaloa	1	1	
5	2014-05-29	Arroyo Hondo	Sinaloa	1	1	
6	2014-05-29	Arroyo Baluarte	Sinaloa	0	1	
7	2014-05-30	Arroyo Potrero	Sinaloa	1	1	
8	2014-05-30	Arroyo San Miguel	Sinaloa	1	1	
9	2015-05-13	Arroyo Cerro Solo	Sinaloa	1	1	
10	2015-05-13	Arroyo Pericos	Sinaloa	1	1	
11	2015-05-13	Arroyo Cebollín	Sinaloa	1	1	
12	2015-05-12	Arroyo Agua Blanca o La Mesa	Culiacán	1	1	
13	1953-08-11	Arroyo Dulces Nombres	Culiacán	0	0	
14	2007-04-16	Arroyo Santa Rosa	Culiacán	1	1	
15	2014-02-18	Arroyo San Juan del Negro	Culiacán	0	1	
16	2014-02-19	Arroyo El Desecho	Culiacán	1	1	
17	2014-02-23	Arroyo El Río I	Culiacán	1	1	
18	2014-02-23	Arroyo El Río II	Culiacán	1	1	
				p-valor	< 0.005	< 0.005
				Tasa de éxito	0.8333	0.9444

## DISCUSIÓN

Particularmente relacionado con el presente estudio, existen dos modelos generales de distribución para el género *Oncorhynchus* para la SMO, el primero propuesto por Mayden

(2005) y su equipo de investigadores generado a partir de la aplicación de GARP (Stockwell y Peters 1999) y el segundo propuesto por Ruiz-Luna et al. (2013) generado a partir de la aplicación de MaxEnt (Phillips et al. 2006). Ambos trabajos de investigación se enfocan en las cuencas que se distribuyen a lo largo de la SMO, el primer acercamiento puede resultar un poco ambiguo aunque en su momento fue de utilidad, ya que permitió identificar ríos y regiones con alta probabilidad de contener poblaciones de truchas nativas y priorizar el esfuerzo de muestreo en la cuenca del río Conchos y como resultado de estas predicciones fue posible identificar y verificar en campo, nuevos sitios con la presencia de una especie de trucha aun no descrita dentro de esta cuenca (Hendrickson et al. 2002, 2006; Mayden 2005). El segundo acercamiento se enfocó en generar el modelo de distribución potencial para los salmónidos que se distribuyen en la SMO considerando los 1500 msnm como la cota límite inferior de distribución, utilizando registros con referencia geográfica de la especie *O. chrysogaster*.

Es importante mencionar que las dos técnicas aplicadas en el presente trabajo tienen diferentes arquitecturas (GARP – Algoritmo genético; MaxEnt – Principio de la máxima entropía). Debido a los elementos estocásticos en el algoritmo de GARP (múltiples soluciones con el mismo valor del criterio de optimización), no se produce una solución única, por lo tanto, la variabilidad entre los modelos GARP (típico de los algoritmos genéticos) y las complicaciones en la interpretación de los resultados basados sólo en datos de entrada asimétricos (presencia), hace crítica la selección del modelo (Anderson et al. 2003). MaxEnt por su parte, se centra en el ajuste de una distribución de probabilidad de ocurrencia de la especie en cuestión al conjunto de píxeles a través de la región de estudio, basado en la idea de que la mejor explicación de los fenómenos desconocidos maximizará la entropía de la distribución de probabilidad, sujeto a las restricciones apropiadas (Phillips et al. 2006).

Los resultados de nuestra validación sugieren que ambos modelos definen bien el área de distribución potencial de *O. chrysogaster*. GARP y MaxEnt se desempeñan de manera similar; ambos son algoritmos potentes en la caracterización de nicho ecológico, ambos son aplicados ampliamente y a menudo producen resultados complementarios (Peterson et al. 2008). En este último punto, algunos autores sugieren que mientras GARP puede errar por un lado en la producción de resultados excesivamente amplios, MaxEnt a menudo se equivoca por el lado del sobreajuste, de tal forma que juntos proporcionan un contrapunto útil (Papes y Gaubert 2007). Estos últimos autores encontraron que los niveles de concordancia entre las predicciones de GARP y MaxEnt fueron bajas cuando el número de ocurrencia fue menor a 15, sugiriendo que MaxEnt extrapola mejor que GARP en el contexto del tamaño de muestra. Lo anterior probablemente indica el número mínimo necesario bajo el cual obtener modelos con buen poder predictivo.

A pesar de las altas exactitudes obtenidas, los resultados deben considerarse con cautela, ya que algunos autores consideran cambiar los parámetros de configuración por default a condiciones específicas de la especie para mejorar el desempeño de ambos modelos (Phillips y Dudik 2008; Anderson y Raza 2010; Shcheglovitova y Anderson 2013; Radosavljevic y Anderson 2014). En su forma más simple de configuración, algunos autores sugieren considerar el percentil 10 como regla de umbral, sin embargo, el valor empleado aquí (*minimum training presence*) y que confiamos produjo buenos resultados corresponde al valor más bajo de la predicción para cualquiera de los píxeles que corresponden a las localidades utilizadas en la calibración del modelo; por lo tanto, indica las condiciones ambientales menos adecuadas para las cuales se dispuso una localidad en el

conjunto de datos de calibración (Anderson y Raza 2010). De acuerdo a Shcheglovitova y Anderson (2013), cuando se cuenta con pocos registros, ésta representa una regla conservadora, poco probable de sobreestimar las zonas adecuadas para la especie (Allouche et al. 2006; Lemes y Loyola 2013).

Es importante mencionar que a pesar de los avances que la percepción remota ofrece para coleccionar datos que pueden ser adaptados para representar predictores más adecuados a la especie en cuestión; la mayoría de los estudios parecen utilizar sólo los datos que están al alcance de la mano y fallan al explicar la relevancia de los predictores seleccionados, excluyendo quizás otros indicadores ecológicos más importantes. El enfoque empleado aquí, es un enfoque novedoso que incorpora capas adicionales a las variables bioclimáticas construidas mediante el procesamiento de modelos digitales de elevación.

Como principal conclusión del presente trabajo, se propone que la trucha dorada mexicana encuentra las mejores condiciones para su distribución en altitudes superiores a los 2000 msnm, en corrientes de agua que corresponden a niveles de cauce de primer y segundo orden, principalmente.

Cabe mencionarse que, posiblemente por defectos en el diseño de muestreo, o bien por ser una zona donde hay mayor concentración de la especie, se cuenta con un mayor número de registros en la confluencia de las tres cuencas que forman parte del área de distribución de esta especie, incluyendo el sur de la cuenca del río Fuerte. Independientemente de lo anterior, la amplia coincidencia obtenida con las dos aproximaciones metodológicas, permite distinguir un territorio vasto donde existen posibilidades de encontrar nuevos registros de la especie, particularmente en la cuenca del río Culiacán.

## AGRADECIMIENTOS

El trabajo fue financiado por los proyectos CONABIO (JM058), CONACYT (CB-2010-01-152893). Para los muestreos en campo se contó con los permisos de pesca (SGPA/DGVS/02485/13, SGPA/DGVS/02968/14 y SGPA/DGVS/05052/15), expedidos por la Dirección General de Vida Silvestre de la SEMARNAT.

## 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.
- Allouche, O., A. Tsoar and R. Kadmon. 2006. Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistics (TSS). *Journal of Applied Ecology*. 43(6): 1223-1232.
- Anderson, R.P. 2003. Real vs. artefactual absences in species distributions: tests for *Oryzomys albigularis* (Rodentia: Muridae) in Venezuela. *Journal of Biogeography*. 30(4): 591-605.
- Anderson, R.P., D. Lew and T. Peterson. 2003. Evaluating predictive models of species' distributions: criteria for selecting optimal models. *Ecological Modelling*. 162: 211-232.
- Anderson, R.P. and A. Raza. 2010. The effect of the extent of the study region on GIS models of species geographic distributions and estimates of niche evolution: preliminary tests with montane rodents (genus *Nephelomys*) in Venezuela. *Journal of Biogeography*. 37: 1378-1393.

- Araújo, M.B. and A.T. Peterson. 2012. Uses and misuses of bioclimatic envelope modeling. *Ecology*. 93(7): 1527-1539.
- Barriga-Sosa, I.A., J.L. Arredondo-Figueroa, G. Ingle de la Mora y F.J. 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.L. and J.R. Tomelleri. 2002. *Trout and salmon of North America*. The Free Press. Chicago, 359 p.
- Camarena-Rosales, F., G. Ruiz-Campos, A. Varela-Romero y J. de la Rosa-Vélez. 2001. En busca de las truchas nativas de México. *Divulgare*. 9(36): 37-49.
- Contreras-Balderas, S. and M.A. Escalante C. 1984. Distribution and known impacts of exotic fishes in Mexico. En: Courtenay W.R. and J.R. Stauffer (eds.). *Distribution, Biology and management of exotic fishes*. The John Hopkins University Press, Baltimore, MA. 102-130.
- 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.
- Escalante, M.A., F.J. García-De León, C.B. Dillman, A.B. De los Santos C., A. George, I.A. Barriga S. 2016. Introgresión genética de la trucha arcoíris exótica en la trucha dorada mexicana. En: Ruiz-Luna A. y F.J. García-De León (eds.) *La trucha dorada mexicana*. Cap. 10.
- Espinosa, H., F.J. García-De León, G. Ruiz, A. Varela, I. Barriga, J.L. Arredondo, D. Hendrickson, F. Camarena y A.B. De los Santos C. 2007. Las Truchas Mexicanas: Peces Enigmáticos del Noroeste. *Especies: Revista sobre Conservación y Biodiversidad*, Naturalia A.C. Enero-Febrero: 8-14.
- Guisan, A. and N.E. Zimmermann. 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*. 135(2): 147-186.
- Guisan, A. and W. Thuiller. 2005. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*. 8(9): 993-1009.
- Hendrickson, D.A., H. Espinosa Pérez, L.T. Findley, W. Forbes, J.R. Tomelleri, R.L. Mayden, J.L. Nielsen, B. Jensen, G. Ruiz Campos, A. Varela Romero, A. van der Heiden, F. Camarena and F.J. García-De León. 2002. Mexican native trouts: a review of their history and current systematic and conservation status. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*. 12: 273-316.
- 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. Mcnyset, 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.
- Hernández-Guzmán, R. 2006. Caracterización física de la sub-cuenca Río San Pedro, Nayarit, México a través de sistemas de información geográfica y modelos digitales

- de elevación. *Tesis de Maestría*. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo. 112 p.
- Hijmans, R.J., S.E. Cameron, J.L. Parra, P.G. Jones and A. Jarvis. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*. 25: 1965-1978.
- IUCN. 2015. The IUCN Red list of threatened species. Version 2015-4. <[www.iucnredlist.org](http://www.iucnredlist.org)>. Recuperado 17 Febrero 2016.
- Lemes, P. and R.D. Loyola. 2013. Accommodating species climate forced dispersal and uncertainties in spatial conservation planning. *PLoS One*. 8(1): e54323.
- Lin, W.T., W.C. Chou, D.Y. Lin, P.H. Huang and J.S Tsai. 2006. Automated suitable drainage network extraction from digital elevation models in Taiwan's upstream watersheds. *Hydrological processes*. 20(2): 289-306.
- Mayden, R. 2005. SGER: Biodiversity of native Mexican trout (Genus *Oncorhynchus* spp.) and the impending treat of their demise by the exotic rainbow trout *O. mykiss gairdneri* (Teleostei: Salmonidae). DEB 0240184. Final Report. 33 p. En línea: <[http://bio.slu.edu/mayden/truchas/NSF\\_trout\\_final\\_report.pdf](http://bio.slu.edu/mayden/truchas/NSF_trout_final_report.pdf)>.
- Miller, R.R., W.L. Minckley y S.M. Norris. 2009. *Peces dulceacuícolas de México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 545 p.
- Morales, N.S., I.C. Fernández, B. Carrasco and C. Orchard. 2015. Combining niche modelling, land use change, and genetic information to assess the conservation status of *Pouteria splendens* populations in central Chile. *International Journal of Ecology*, ID 612194: 12 p.
- Naoki, K., M.I. Gómez y R.P. López. 2006. Comparación de modelos de distribución de especies para predecir la distribución potencial de vida silvestre en Bolivia. *Ecología en Bolivia*. 41(1): 65-78.
- Papes, M. and P. Gaubert. 2007. Modelling ecological niches from low numbers of occurrences: assessment of the conservation status of poorly known viverrids (Mammalia, Carnivora) across two continents. *Diversity and Distributions*. 13: 890-902.
- Pearson, G.R., C.J. Raxworthy, M. Nakamura and A.T. Peterson. 2007. Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography*. 34: 102-117.
- Peterson, A.T., M. Papes and M. Eaton. 2007. Transferability and model evaluation in ecological niche modeling: a comparison of GARP and Maxent. *Ecography*. 30: 550-560.
- Peterson, A.T., M. Papes and J. Soberón. 2008. Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. *Ecological Modelling*. 213: 63-72.
- Peterson, A.T. and J. Soberón. 2012. Species distribution modeling and ecological niche modeling: getting the concepts right. *Natureza & Conservação*. 10(2): 102-107.
- Phillips, S.J., R.P. Anderson and R.E. Schapire. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*. 190(3): 231-259.
- Phillips, S.J. and M. Dudík. 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*. 31(2): 161-175.
- Proosdij, A.S.J. van, M.S.M. Sosef, J.J. Wieringa and N. Raes. 2015. Minimum required number of specimen records to develop accurate species distribution models. *Ecography*. 39(6): 542-552.

- Radosavljevic, A. and R.P. Anderson. 2014. Making better MaxEnt models of species distributions: complexity, overfitting and evaluation. *Journal of Biogeography*. 41: 629-643.
- Reyes-Valdéz, C.A., G. Ruiz-Campos, F. Camarena-Rosales and A. Varela-Romero. 2006. Diet composition of native trout (Salmonidae: *Oncorhynchus*) from the Sierra Madre Occidental, México. En: Lozano-Vilano M.D.L. and A.J. Contreras-Balderas (eds.). *Studies of North American desert fishes in Honor of E.P. (Phil) Pister, Conservationist*. México. Faculty of Biological Sciences, UANL. 125-137.
- Ruiz-Luna, A., C.A. Berlanga-Robles, R. Hernández-Guzmán y M.A. Escalante-Sánchez. 2013. Modelación de la distribución de truchas nativas de la Sierra Madre Occidental y su relación con la estructura del paisaje adyacente. *Informe técnico final*. Proyecto CONABIO JM058. 49 p.
- Scott, J.M., P.J. Heglund, M.L. Morrison, J.B. Haufler, M.G. Raphael, W.A. Wall and F.B. Samson. 2002. *Predicting species occurrences: Issues of accuracy and scale*. Island Press, Washington, EE.UU.
- Shcheglovitova, M. and R.P. Anderson. 2013. Estimating optimal complexity for ecological niche models: A Jackknife approach for species with small samples sizes. *Ecological Modelling*. 269: 9-17.
- Soberón, J. and M. Nakamura. 2009. Niches and distributional areas: concepts, methods, and assumptions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 106(2): 19644-19650.
- Soberón, J.M. 2010. Niche and area of distribution modeling: a population ecology perspective. *Ecography*. 33(1): 159-167.
- Stockwell, D.R.B. and D.P. Peters. 1999. The GARP modeling system: problems and solutions to automated spatial prediction. *International Journal of Geographic Information Systems*. 13:143-158.
- Strahler, A.N. 1957. Quantitative analysis for watershed geomorphology. *American Geophysical Union Transactions*. 38: 913-920.
- Torres, R. y J.P. Jayat. 2010. Modelos predictivos de distribución para cuatro especies de mamíferos (Cingulata, Artiodactyla y Rodentia) típicas del Chaco en Argentina. *Mastozoología Neotropical*. 17(2): 335-352.



## 9. 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

### INTRODUCCIÓN

La trucha dorada mexicana (*Oncorhynchus chrysogaster*) es una especie endémica de ríos de la Sierra Madre Occidental (SMO), en México. Aun cuando se distribuye en áreas con escaso desarrollo y reducidas actividades antropogénicas, es una especie amenazada por modificación o reducción de hábitat, sobreexplotación y otros factores de origen antrópico que afectan su existencia, incluidos los efectos de organismos introducidos, la hibridación, la competencia o la depredación (Hendrickson et al. 2002; Jelks et al. 2008). Es un pez de agua dulce, que habita en corrientes de agua limpia y fría, normalmente de alta montaña. Habitan en arroyos entre los estados de Chihuahua y Durango, en las cuencas de los ríos Fuerte, Sinaloa y Culiacán (Needham y Gard 1964).

La SMO se extiende desde Arizona, EUA, al centro del país, con diversidad de hábitats y con altitudes que en promedio alcanzan los 1600 msnm, con máximos alrededor de los 3300 msnm. No existen grandes e importantes cuerpos de agua, pero de aquí surgen vertientes de ríos muy importantes como son el Fuerte, Sinaloa y Culiacán que desembocan en la costa de Sinaloa.

En esta región existe escaso desarrollo agrícola e industrial y normalmente los asentamientos humanos son de baja densidad. Sin embargo se presenta actividad minera de pequeña a gran escala, además de otras actividades con carácter ilegal (Descroix et al. 2004), que de alguna manera pueden incidir en la contaminación de suelos y agua, con la presencia de metales pesados y compuestos orgánicos persistentes (COPs).

De acuerdo con Kannan et al. (1995), la determinación de COPs en peces, sedimentos y agua puede dar una indicación de la magnitud de la contaminación acuática y comprender, a través de la acumulación de estos compuestos en la biota acuática, el comportamiento y destino de estos productos químicos persistentes. En ese sentido vale la pena mencionar que los peces se utilizan ampliamente como indicadores para la vigilancia del medio ambiente, debido a que adquieren los contaminantes directamente del agua y de la dieta (Lanfranchi et al. 2006). Asimismo, cuentan con capacidad moderada para metabolizar los COPs, por lo que la carga contaminante en el pescado es un reflejo del nivel de contaminación en los ambientes circundantes (Guo et al. 2008).

Con relación a este tipo de contaminantes, el Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes (COPs) fue firmado en mayo de 2001 por diversos países, incluido México, entrando en vigor en mayo de 2004. Este tratado estableció inicialmente un listado de sustancias a eliminar o restringir a escala global, para proteger a la salud humana y al medio ambiente de productos químicos que no se degradan por períodos largos, siendo acumulables en tejidos animales, particularmente en tejido graso y además se distribuyen ampliamente por todo el mundo (Kelly et al. 2007). Los COPs, también llamados la docena sucia, incluyen dioxinas, furanos, PCB, hexaclorobenceno y

los plaguicidas DDT, aldrin, clordano, dieldrin, endrin, heptacloro, mirex y toxafeno. Después de la reunión de Dakar, la lista se amplió con cinco sustancias más, con el éter de pentabromodifenil y el hexabromo bifenilo (retardantes de flama o ignífugos), así como clordecona, lindano (plaguicida) y el perfluoro octosulfonatos PFOS (surfactante y antiadherente) (Yarto et al. 2003).

Los COPs se han relacionado con efectos significativos en el medio ambiente en una gran variedad de especies y en casi todos los niveles tróficos (Mackay y Fraser 2000; Houde et al. 2008). De acuerdo con Larsson et al. (1992), las formas de contaminación puede ser principalmente por riego en suelos agrícolas, por arrastre e infiltración que hace que estos COPs alcancen los ríos hasta los ecosistemas costeros y marinos.

En particular, los plaguicidas organoclorados, usados ampliamente en agricultura y para el combate de mosquitos, se caracterizan por presentar baja polaridad, baja solubilidad en agua y alta en lípidos (lipofilia) y como resultado tienen el potencial de bioacumularse a través de la cadena alimentaria lo que representa una gran amenaza para la salud humana y el medio ambiente a nivel mundial (Afful et al. 2010). La tasa de volatilización de un COP depende de su presión de vapor, de la temperatura, de su volatilidad intrínseca y de la velocidad de difusión hacia la superficie de evaporación (Morell y Candela 1998). Aunado a esto las características físicas y las condiciones climáticas del sitio de aplicación contribuyen al transporte de los contaminantes (Fig. 1).

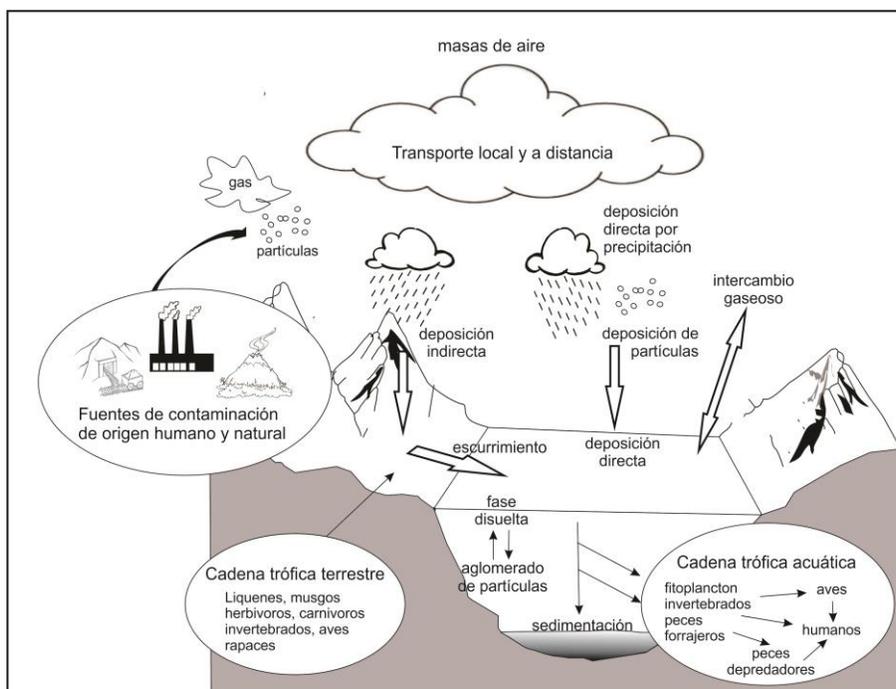


Figura 1. Ruta y transporte de plaguicidas en el ambiente. (Modificado de: *Report 1 - Pesticides: Making the Right Choice for the Protection of Health and the Environment*. 2000. Recuperado de <http://www.parl.gc.ca/Committees/en/ENVI/Work?show=reports&parl=36&session=2>; Julio de 2016).

Existen evidencias de la presencia de contaminantes orgánicos en ecosistemas de montaña, detectados en muestras de líquenes y musgos, aun en altitudes superiores a los 1500 msnm, como es el caso de Kenia y Bolivia (Calamari et al. 1991), sistemas montañosos del oeste

de Canadá (Blais et al. 1998) y aún en la cordillera del Himalaya (Guzzella et al. 2011). A partir de este tipo de hallazgos se eliminó la percepción de que tanto los polos como las áreas montañosas de gran altitud son sitios escasamente perturbados, particularmente por contaminación química. También a raíz de esos resultados se ha encontrado que el transporte atmosférico de largo alcance de COPs, es un sistema con el cual son depositados en diferentes regiones geográficas del planeta, independientemente de su latitud (Wania y Mackay 1996).

El sistema de transporte atmosférico se realiza en zonas donde las temperaturas templadas y tropicales o subtropicales favorecen la evaporación de los COPs, que en regiones de temperaturas frías de altas latitudes donde se condensan. Por otro lado las temperaturas frías favorecen la adsorción de estos compuesto una vez que son depositados en la superficie, lo que disminuye la descomposición natural haciendo que estos compuestos permanezcan intactos por un largo periodo de tiempo y se vuelvan aún más persistentes (Wania y Mckay 1996).

En particular para México, la agricultura intensiva dedicada a cultivos de exportación se ha concentrado en diversas regiones del país, particularmente en estados del noroeste y centro del país, así como en Tamaulipas, Chiapas, Veracruz y Tabasco. En las zonas noroeste, norte y centro (Sinaloa, Sonora, Chihuahua, Baja California, Guanajuato y Jalisco) se utilizan cantidades importantes de plaguicidas de todo tipo para producir granos y una gran variedad de hortalizas de exportación como tomate, cucurbitáceas y chile (Albert y Benítez 2005; Hernández y Hansen 2011).

Para la producción de plaguicidas, la Comisión Federal para la Protección Contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS), tiene autorizados aproximadamente 782 ingredientes activos, usados en alrededor de 5 mil 600 formulaciones comerciales (esto incluye los de síntesis química, aceites y extractos vegetales y organismos vivos). Algunos están incluidos en convenios internacionales en materia ambiental, particularmente por sus características de toxicidad, persistencia y capacidad de transporte a grandes distancias.

En el país hay 160 ingredientes activos que son plaguicidas altamente peligrosos autorizados para uso agrícola; entre ellos 31 ingredientes activos que están clasificados como probables carcinógenos en humanos según el Sistema Global Armonizado que adopta la Unión Europea y 90 han sido cancelados o restringidos en los Estados Unidos por su toxicidad, persistencia y su capacidad para ser bioacumulados (Albert y Benítez 2005).

Particularmente, en el noroeste de México la amplia llanura costera representada por la provincia fisiográfica Llanura costera y deltas de Sonora y Sinaloa, con amplitudes mayores a 80 km, facilita la práctica de una agricultura altamente tecnificada, con dependencia del uso de agroquímicos, siendo Sinaloa en particular, uno de los estados con mayor aplicación de plaguicidas (Albert 2005; Leyva-Morales et al. 2014). En la mayoría de los casos las principales regiones agrícolas se sitúan en valles de baja altitud, como ocurre con el valle de Culiacán en Sinaloa, que favorecen la incorporación de los contaminantes a la atmosfera y su posterior arrastre, favoreciendo que estos contaminantes alcancen poblaciones humanas y ecosistemas de mayor altitud, como ya se ha observado en otras regiones del planeta (Wania y Mckay 1996).

Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo se centró en determinar la presencia de COP's, en la trucha dorada mexicana de la SMO para la que, dado su aislamiento geográfico, se presume cuenta con escaso o nulo aporte de contaminantes en su hábitat.

## MÉTODOS

Los ejemplares de trucha dorada mexicana analizados en el presente estudio, se obtuvieron utilizando equipo de electropesca en diversas localidades ubicadas en la SMO. Las capturas se registraron en nueve arroyos localizados dentro del área de distribución de la especie en la SMO. Los arroyos se distribuyeron en la cuenca del río Fuerte (Las Cuevas, Del Agua, La Quebrada y San José), con altitud promedio de 2551 msnm; en la cuenca del río Sinaloa (Hondo, Baluarte y Potrero) con altitud promedio de 2325 msnm y en la cuenca del río Culiacán (El Desecho y Rio 2), con altitud promedio de 2272 msnm (Fig. 2).

Se recolectaron cinco individuos de trucha dorada mexicana por estación de muestreo, en el año 2014, durante febrero (cuenca de Culiacán y el Fuerte), marzo (cuenca del Fuerte) y mayo (cuenca de Sinaloa), con un total de 45 ejemplares, mismos que fueron congelados (completos) para posteriormente ser liofilizados y molidos para su análisis en el laboratorio de Cromatografía del CIAD, Unidad Mazatlán.



Figura 2. Zona de estudio y localidades de muestreo.

El procedimiento de extracción se realizó siguiendo la metodología 3545A de extracción por presión de fluido (PFE) publicada por la agencia de protección de los Estados Unidos (USEPA 2007). Dicha extracción se realizó con hexano/acetona 15:85 v/v, lo que permitió extraer tanto los plaguicidas organoclorados como los PCBs. Posteriormente se les realizó una eliminación de grasa de acuerdo con la NOM-028-ZOO-1995 y una purificación con sílica gel EPA 3630C (USEPA 1996). Con el análisis de cada 10 muestras se realizó una muestra por duplicado y duplicado fortificado y dos blancos como control de calidad. Las muestras fueron evaporadas nuevamente, para re-suspender en 0.5 ml de ciclohexano para su análisis en el cromatógrafo de gases.

Para la realización de la identificación y cuantificación de los COPs, se utilizó un cromatógrafo de gases (HP 5890) equipado con dos detectores de captura de electrones (CG-ECD) acoplado a dos columnas especiales. Las condiciones del cromatógrafo se establecieron siguiendo las especificaciones descritas en el método EPA 8081B (USEPA 2000). Las concentraciones de contaminantes son reportadas en nanogramos por gramo de muestra seca (ng/g). Dado que este es un trabajo de naturaleza exploratoria y descriptiva, se omiten análisis estadísticos.

## RESULTADOS

En la figura 3 se observa la frecuencia de detección de COPs en las cuencas de los ríos Culiacán, El Fuerte y Sinaloa. De los 33 COPs analizados, el grupo de PCBs fue el más frecuente, detectándose en 43 de las 45 muestras totales, seguidos por los grupos de HCHs (20), Heptacloro (14), Endosulfán (12) y Aldrín y DDT (10).

En términos generales se obtuvo una frecuencia de detección de COPs similar entre sitios. Para los arroyos de la cuenca del río Sinaloa se detectaron 120 COPs en 20 muestras, seguido de los sitios de la cuenca del río Fuerte, con 90 COPs en 15 muestras y para la cuenca del río Culiacán 60 COPs en 10 muestras, con un promedio general de 6 COPs por muestra. Todos los COPs fueron detectados en las tres cuencas con excepción de la cuenca del río Culiacán, donde no se detectaron compuestos del grupo de los DDTs.

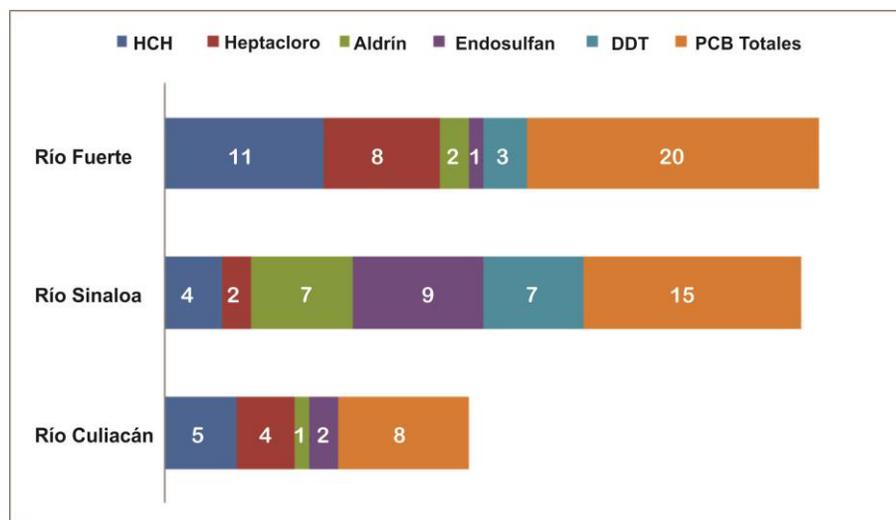


Figura 3. Frecuencia de detección de COPs (sumatorias por grupo) en la trucha dorada mexicana (*Oncorhynchus chrysogaster*), en arroyos de la cuenca de los ríos Fuerte (n=15), Sinaloa (n=20) y Culiacán (n=10). Los números representan la frecuencia absoluta de los distintos plaguicidas, por cuenca.

La mayor concentración de COPs (ng/g) se detectó en la cuenca de los arroyos del río Sinaloa, siguiendo en magnitud los arroyos de las cuencas de los ríos Fuerte y Culiacán (Fig. 4). Los PCBs fueron los contaminantes que presentaron las mayores concentraciones en todos los sitios. Sin embargo, en la cuenca del río Sinaloa las concentraciones de PCBs fueron 5.3 veces mayores en comparación a las otras dos cuencas.

De la misma manera, la concentración de Endosulfán se presentó 6.2 veces mayor en la cuenca del río Sinaloa, mientras que Aldrín y DDT, también en la cuenca del río Sinaloa, fueron 5.8 y 6.4 veces mayor respectivamente. La concentración de HCH fue muy similar en las cuencas de los ríos Sinaloa y Culiacán, siendo 3.5 veces mayor que la detectada para la cuenca del río Fuerte. En contraste, la cuenca del río Sinaloa tuvo la menor concentración de heptacloro, con aproximadamente la mitad respecto a las otras dos cuencas.

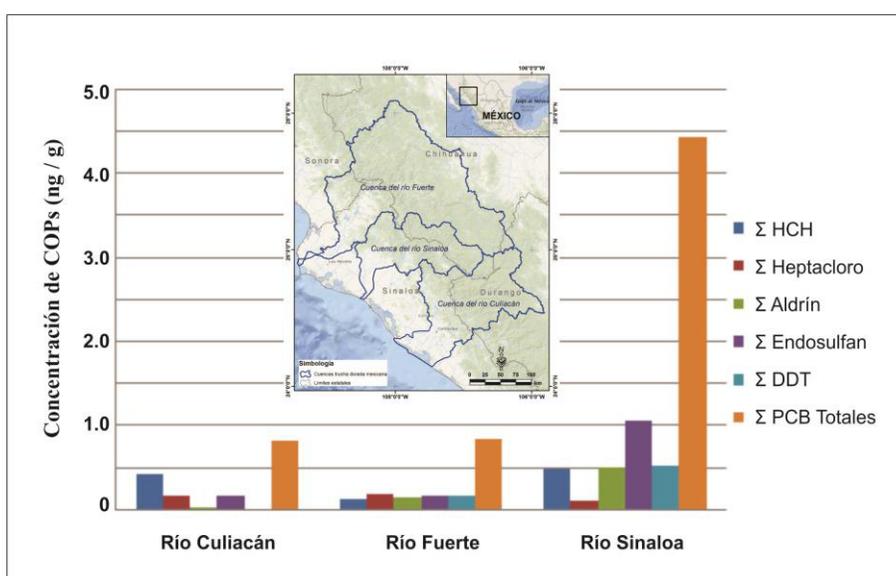


Figura 4. Sumatoria de las concentraciones de COPs en la trucha dorada mexicana (*Oncorhynchus chrysogaster*) de los arroyos de las cuencas de los ríos Culiacán, Fuerte y Sinaloa.

## DISCUSIÓN

El análisis permitió identificar la presencia de contaminantes en la trucha dorada mexicana. Hasta donde se conoce, el presente trabajo es el primer reporte de la presencia de COPs en esta especie. La trucha dorada mexicana es un pez de agua dulce encontrada normalmente en arroyos de la alta montaña, lo que confirma que los COPs son contaminantes ambientales globales. Según Espeland et al. (1997), dichos contaminantes son trasladados desde áreas agrícolas a regiones muy apartadas, como pueden ser las zonas montañosas de la SMO.

Como se mencionó anteriormente, el río Sinaloa es el que presenta mayor contaminación, posiblemente relacionada con la cercanía a la zona agrícola de Culiacán. Dado que la zona de estudio se encuentra en una región tropical, es de esperarse que las temperaturas en los valles agrícolas favorezcan la volatilización tanto de plaguicidas como de otros contaminantes y su deposición final en los ambientes más templados de las

montañas (Wania y Mackay 1996). Sin embargo, aunque se cuenta con algunos estudios sobre los patrones de uso reciente de plaguicidas en Sinaloa (Leyva-Morales 2014), no es posible su asociación directa con los resultados encontrados, ya que la mayoría de los plaguicidas corresponden a residuales de aplicaciones históricas, para las que no se tiene un registro confiable.

Otros aspectos que deberán revisarse con relación a la distribución de COPs en el área de estudio incluyen la dirección de los vientos dominantes y su posible relación con las superficies cultivadas, así como el tipo de cultivo. En este sentido, es necesario contar con información histórica que permita explicar el proceso de dispersión y si estos factores están relacionados con las menores concentraciones observadas en la cuenca del río Culiacán el cual se encuentra en una latitud más al sur respecto a las cuencas de los ríos Sinaloa y el Fuerte y más alejado de la zona agrícola.

Por otro lado, la importante presencia de PCBs (43 de 45 muestras) indica que la zona de estudio no solo está influenciada por el desarrollo agrícola, sino también está sujeta a recibir compuestos derivados de contaminación industrial. Es importante mencionar que la gran mayoría de los PCBs encontrados pertenecen al grupo de los mono, bi y tri clorobifeniles (41 de 45 muestras), los cuales tienen la característica de ser altamente volátiles y se condensan fácilmente a bajas temperaturas. A medida que aumenta el número de cloros disminuye su volatilidad, de tal manera que aquellos con 9 y 10 cloros (nona y decaclorobifeniles) caen en la categoría de compuestos químicos no volátiles. Se ha demostrado que por esta razón la mayoría de los PCBs que se encuentran en zonas polares son los de tipo volátil (Wania y Mackay 1996); esto también podría explicar su presencia en la SMO, ya que no hay un desarrollo industrial importante en la región.

La presencia de COPs en las truchas de la SMO seguramente tiene su origen en la dieta de estos organismos, dada su capacidad de biomagnificación. Sin embargo no hay evidencias que avalen este argumento, pues además de un reducido número de estudios relativos al contenido estomacal de estos salmónidos (Reyes-Valdez et al. 2006; Ruiz-Luna et al. Capítulo 4, esta obra), no se cuenta con mayor información sobre la calidad de su dieta.

Con base en reportes en la literatura, es posible describir el probable efecto que estos contaminantes tienen sobre los organismos, particularmente si están expuestos a mezclas de compuestos o en concentraciones elevadas (Geyer et al. 2000). Por ejemplo los COPs se han relacionado con efectos significativos en gran variedad de especies y prácticamente en todos los niveles tróficos. En el mismo sentido, se ha notificado que los COPs generan inmunotoxicidad, inmunodeficiencia, deficiencias reproductivas, alteración del rendimiento y carcinogenicidad, cambios metabólicos, efectos cutáneos, deformidades y defectos de nacimiento, tumoraciones, cambios conductuales, así como fallas en el sistema hormonal (Connell et al. 2003; Yarto et al. 2003). También se ha demostrado una relación causa-efecto entre la exposición y los problemas reproductivos, aumento de la mortalidad de las crías y de adultos, además de la viabilidad de las larvas de varias especies, adelgazamiento de la pared de los huevos, así como la disminución de la población de varias especies (Yarto et al. 2003).

Considerando los posibles mecanismos de acceso de los COPs a la ruta trófica de las truchas doradas mexicanas, así como de las tasas de incorporación a estos organismos, es necesario continuar con los estudios de monitoreo de COPs en el medio ambiente de esta región, incrementando en lo posible el tamaño y representatividad de la muestra por sitio. Adicionalmente es importante incorporar otros elementos del ecosistema en el proceso de

muestreo, tales como los insectos y otros organismos que forman parte de la dieta de la truchas, sedimentos y muestras de agua, que posiblemente podrían coadyuvar a identificar las fuentes de contaminación de mayor importancia, así como la dinámica de estos compuestos, posiblemente con la elaboración de modelos de destino de los contaminantes orgánicos persistentes y otras técnicas que permitan la evaluación de riesgo y posibles medidas preventivas y de manejo.

Finalmente se reitera que al ser éste el primer reporte de COPs en trucha dorada mexicana de la SMO, se han observado diferencias en cuanto a la distribución y concentración de estos contaminantes en las cuencas estudiadas, lo cual indica posibles diferencias de ingreso de contaminantes. Sin embargo se necesita incrementar el tamaño de muestra y considerar los resultados del presente estudio como un análisis exploratorio, que permita en un futuro breve evaluar el posible impacto de contaminantes sobre estas especies y ecosistemas.

### AGRADECIMIENTOS

El trabajo fue financiado por el proyecto de CONACYT Ciencia – Básica (CB-2010-01-152893). Para los muestreos en campo se contó con los permisos de pesca (SGPA/DGVS/02485/13, SGPA/DGVS/02968/14 y SGPA/DGVS/05052/15), expedidos por la Dirección General de Vida Silvestre de la SEMARNAT.

### REFERENCIAS

- Afful, S., A.K. Anim and Y. Serfor-Armah. 2010. Spectrum of organochlorine pesticide residues in fish samples from the Densu Basin. *Research Journal of Environmental and Earth Sciences*. 2(3): 133-138.
- Albert, L.A. 2005. Panorama de los plaguicidas en México. *Revista de Toxicología en línea*. 8: 1-17. Recuperado de <http://desarrollandome.net/ambiens/plaguicidas/archivos/panorama-de-las-plaguicidas-en-Mexico.pdf>. 21/07/2016.
- Albert, L.A. y J.A. Benítez. 2005. Impacto ambiental de los plaguicidas en los ecosistemas costeros. En: Botello, A.B., J. Rendón-von Osten, G. Gold-Bouchot y C. Agraz-Hernández. (eds). *Golfo de México, Contaminación e impacto ambiental: Diagnóstico y tendencias*. Universidad Autónoma de Campeche – UNAM-INE-SEMARNAT-UAJAT-U. Iberoamericana.-Gobierno de Veracruz. pp. 157-175.
- Blais, J.M., D.W. Schindler, D.C.G. Muir, L.E. Kimpe, D.B. Donald and B. Rosenberg. 1998. Accumulation of persistent organochlorine compounds in mountains of western Canada. *Nature*. 395: 585-588.
- Calamari, D., E. Bacci, S. Focardi, C. Gaggi, M. Morosini and M. Vighi. 1991. Role of plant biomass in the global environmental partitioning of chlorinated hydrocarbons. *Environmental Science & Technology*. 25(8): 1489–1495.
- Connell, D.W., C.N. Fung, T.B. Minh, S. Tanabe, P.K.S. Lam, B.S.F. Wong, M.H.W. Lam, L.C. Wong, R.S.S. Wu and B.J. Richardson. 2003. Risk to breeding success of fish-eating Ardeids due to persistent organic contaminants in Hong Kong: evidence from organochlorine compounds in eggs. *Water Research*. 37(2): 459-467.
- Guzzella, L., G. Poma, A. De Paolis, C. Roscioli and G Viviano. 2011. Organic persistent toxic substances in soils, waters and sediments along an altitudinal gradient at Mt. Sagarmatha, Himalayas, Nepal. *Environmental Pollution*. 159(10): 2552–2564.

- Descroix, L., J.L. González Barrios y J. Estrada Avalos (Eds.). 2004. *La Sierra Madre Occidental, una fuente de agua amenazada*. Ediciones INIFAP- IRO. Gómez Palacio, Durango, México. 300 p.
- Espeland, O., L. Kleivane, S. Haugen and J.U. Skaare. 1997. Organochlorines in mother and pup pairs in two Arctic seal species: Harp seal (*Phoca groenlandica*) and hooded seal (*Cystophora cristata*). *Marine Environmental Research*. 44: 315–330.
- Geyer, H.J., G. Rimkus, I. Scheunert, A. Kaune, K.-W. Schramm, A. Kettrup, M. Zeeman, D.C.G. Muir, L.G. Hansen and D. Mackay. 2000. Bioaccumulation and occurrence of endocrine-disrupting chemicals (EDCs), persistent organic pollutants (POPs), and other organic compounds in fish and other organisms including humans. En: Beek, B. (ed.). *Bioaccumulation – New aspects and developments*. Springer Berlin Heidelberg. 166 p.
- Guo, Y., X.Z. Meng, H.L. Tang and E.Y. Zeng. 2008. Tissue distribution of organochlorine pesticides in fish collected from the Pearl River delta, China: implications for fishery input source and bioaccumulation. *Environmental Pollution*. 155(1): 150–156.
- Hendrickson, D.A., H. Espinosa Pérez, L.T. Findley, W. Forbes, J.R. Tomelleri, R.L. Mayden, J.L. Nielsen, B. Jensen, G. Ruiz Campos, A. Varela Romero, A. van der Heiden, F. Camarena and F.J. García-De León. 2002. Mexican native trouts: a review of their history and current systematic and conservation status. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*. 12: 273-316.
- Hernández, A.A. y A.M. Hansen. 2011. Uso de plaguicidas en dos zonas agrícolas de México y evaluación de la contaminación de agua y sedimentos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 27(2): 115-127.
- Houde, M., D.C. Muir, K.A. Kidd, S. Guildford, K. Drouillard, M.S. Evans, X. Wang, D.M. Whittle, D. Haffner and H. Kling. 2008. Influence of lake characteristics on the biomagnification of persistent organic pollutants in lake trout food webs. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 27(10): 2169–2178.
- Jelks, H.J., S.J. Walsh, N.M. Burkhead, S. Contreras-Balderas, E. Díaz-Pardo, D.A. Hendrickson, J. Lyons, N.E. Mandrak, F. McCormick, J.S. Nelson, S.P. Platania, B.A. Porter, C.B. Renaud, J.J. Schmitter-Soto, E.B. Taylor and M.L. Warren Jr. 2008. Conservation status of imperiled North American freshwater and diadromous fishes. *Fisheries*. 33(8): 372-407.
- Kannan, K., S. Tanabe and R. Tatsukawa. 1995. Geographical distribution and accumulation features of organochlorine residues in fish in tropical Asia and Oceania. *Environmental Science & Technology*. 29(10): 2673–2683.
- Kelly, B.C., M.G. Ikonomou, J.D. Blair, A.E. Morin and F.A.P.C. Gobas. 2007. Food Web-Specific Biomagnification of Persistent Organic Pollutants. *Science*. 317(5835): 236-239.
- Lanfranchi, A.L., M.L. Menone, K.S.B. Miglioranza, L.J. Janiot, J.E. Aizpun and V.J. Moreno. 2006. Striped weakfish (*Cynoscion guatucupa*): A biomonitor of organochlorine pesticides in estuarine and near-coastal zones. *Marine Pollution Bulletin*. 52(1): 74–80.
- Larsson, P., C. Jämmark and A. Södergren. 1992. PCBs and chlorinated pesticides in the atmosphere and aquatic organisms of Ross Island, Antarctica. *Marine Pollution Bulletin*. 25(9-12): 281- 287.
- Leyva-Morales, J.B., L.M. García de la Parra, J.E. Astorga-Rodríguez, P.J. Bastidas-Bastidas., J. Bejarano-Trujillo, A. Cruz-Hernández, I.E. Martínez-Rodríguez y M. Betancourt-Lozano. (2014). Uso de plaguicidas en un valle agrícola tecnificado en el

- noroeste de México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 30(2): 247-261.
- Morell, I. y L. Candela (eds.). 1998. *Plaguicidas: aspectos ambientales, analíticos y toxicológicos*. Castelló de la Plana: Publicacions de la Universitat Jaume I. España. 348 p.
- Needham, P.R. and R. Gard. 1964. A new trout from central Mexico: *Salmo chrysogaster*, the Mexican golden trout. *Copeia*. 1964(1): 169-173.
- Norma Oficial Mexicana NOM-028-ZOO-1995. Determinación de residuos de plaguicidas organofosforados, en hígado y músculo de bovinos, equinos, porcinos, ovinos, caprinos, cérvidos y aves, por cromatografía de gases. Recuperado de internet. [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=4867167&fecha=24/01/1996](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4867167&fecha=24/01/1996). Julio de 2016.
- Reyes-Valdez, C.A., G. Ruiz-Campos, F. Camarena-Rosales and A. Varela-Romero. 2006. Diet composition of native trout (Salmonidae: *Oncorhynchus*) from the Sierra Madre Occidental, Mexico. En: Lozano-Vilano, M.L. 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: 125-137.
- Ruiz-Luna, A. y F.J. García-De León. 2016. Análisis del contenido estomacal de la trucha dorada mexicana *Oncorhynchus chrysogaster* (Needham y Gard 1964) en los ríos Fuerte, Culiacán y Sinaloa, México. En: Ruiz-Luna, A. y F.J. García-De León (eds.) *La trucha dorada mexicana*. Cap. 4.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). 1996. Method 3630C: Silica Gel Cleanup. Recuperado de internet. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/3630c.pdf>. Julio de 2016.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). 2000. Guidance for assessing chemical contaminant data for use in fish advisories. Vol. 1. Recuperado de internet. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/volume1.pdf>. Julio de 2016.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). 2007. Method 8081B: Organochlorine Pesticides by Gas Chromatography. Revisión 2. Recuperado de internet. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/8081b.pdf>. Julio de 2016.
- Wania, F. and D. Mackay. 1996. Tracking the distribution of persistent organic pollutants. Control strategies for these contaminants will require a better understanding of how they move around the globe. *Environmental Science & Technology*. 30(9): 390-396.
- Yarto, M., A. Gavilán y J. Barrera. 2003. El Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes y sus implicaciones para México. *Gaceta Ecológica*. 69: 7-28.

## 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

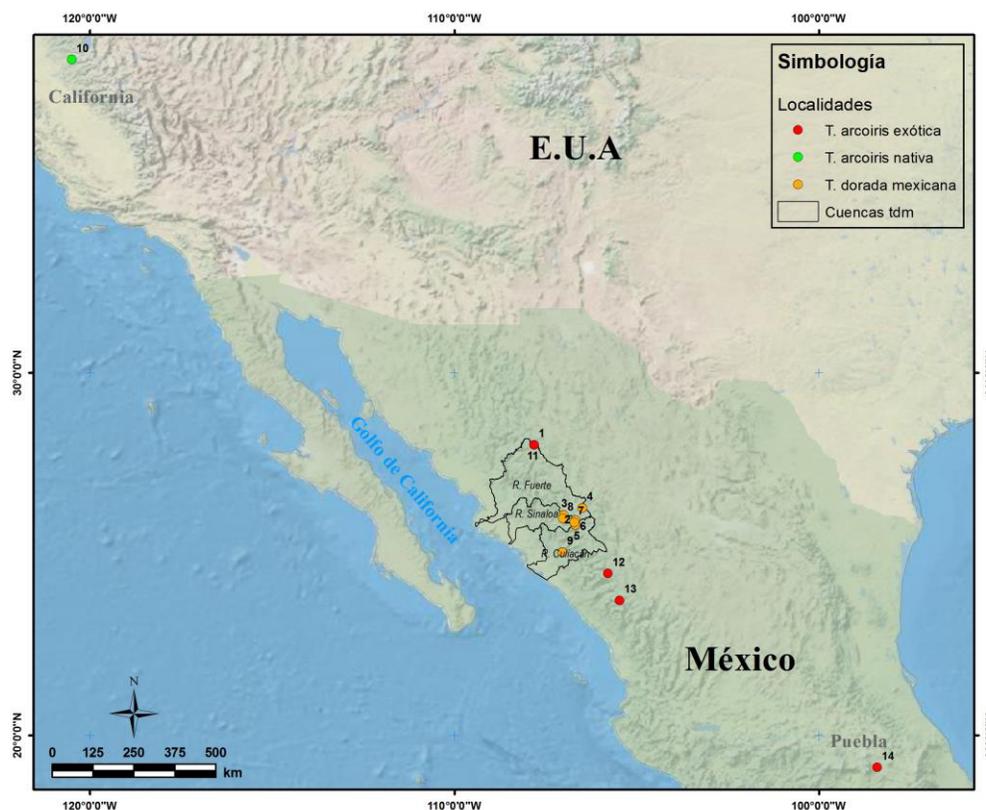


Figura 1. Localización geográfica de los sitios de recolecta de ejemplares de trucha dorada mexicana (TDM) utilizados en este estudio. Los números corresponden a los sitios descritos en Tabla 1. La localidad correspondiente al estado de Puebla es solo una aproximación,

### *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).

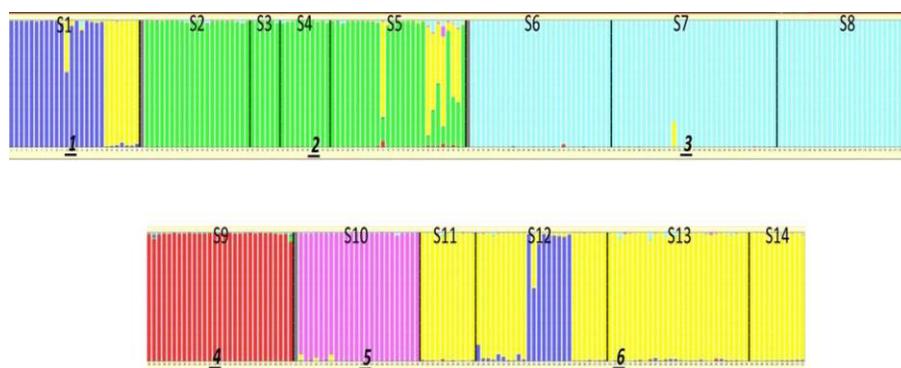


Figura 2. Poblaciones genéticamente homogéneas obtenidas mediante 11 loci microsatélites y el método de análisis de grupos y asignación de individuos en *Oncorhynchus chrysogaster*. Cada individuo es representado por una línea vertical y las distintas poblaciones se representada por un color distinto. 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](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.

# 11. Estrategias acuícolas para la conservación de trucha nativa: primeras experiencias

---

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

## INTRODUCCIÓN

Desde hace un siglo el salmónido más cultivado en nuestro país es la trucha arcoíris *Oncorhynchus mykiss*. Esta especie fue introducida en el año de 1883, procedente del sur de los EUA (Arredondo-Figueroa 1983). Existen reportes de la introducción de otras especies de salmónidos como la trucha de arroyo *Salvelinus fontinalis* y la trucha café *Salmo trutta*, sin embargo, la trucha arcoíris seleccionada es la única con alta rentabilidad, generando una producción estimada de 3,500 toneladas anuales, en cerca de 1,000 granjas comerciales, siendo los estados de Estado de México, Michoacán, Puebla, Hidalgo, Chihuahua y Veracruz los que cuentan con una mayor cantidad de granjas comerciales (Carta Nacional Pesquera 2012).

Recientemente, se han realizado diversos estudios que demuestran la existencia de por lo menos seis entidades genéticas de salmónidos nativos, localizados en la Sierra de San Pedro Mártir en Baja California y en la Sierra Madre Occidental en los estados de Baja California, Chihuahua, Sonora, Sinaloa y Durango. Entre estas especies de trucha nativa se encuentra una subespecie, *Oncorhynchus mykiss nelsoni*, que habita en la Sierra de San Pedro Mártir en Baja California; la especie conocida como trucha dorada mexicana, *Oncorhynchus chrysogaster*, en la Sierra Madre Occidental entre los límites de Durango y Chihuahua y al menos otras cuatro entidades genéticas todavía no identificadas del género *Oncorhynchus* al norte y al sur de la distribución de *O. chrysogaster* (Nielsen y Sage 2001; Hendrickson et al. 2002; Ruiz-Campos et al. 2003; Hendrickson et al. 2006; Espinosa et al. 2007; Abadía-Cardoso et al. 2015). Esta condición privilegia a nuestro país al poseer una gran diversidad de salmónidos, con especies únicas en el mundo. Este amplio recurso genético se encuentra vulnerable, debido a distintas circunstancias que incluyen entre otras la deforestación creciente de los bosques de coníferas, el cambio de hábitat, el cambio climático y la sobreexplotación del recurso. Así mismo, la introducción y cultivo de *O. mykiss* ha ocasionado la introgresión génica de las especies nativas con ésta última (Escalante et al. 2014; Abadía-Cardoso et al. 2015).

Los diferentes salmónidos que forman este conglomerado de especies o subespecies, viven en condiciones adversas como la alta variabilidad en los flujos de agua de los arroyos y ríos, debido a la deforestación, limitación de espacio, competencia interespecífica, fluctuaciones de las condiciones climáticas, pesca furtiva y descontrolada y disminución de las poblaciones (Hendrickson et al. 2002). En muchos de los casos las truchas nativas no alcanzan grandes tallas y su fecundidad y reproducción es limitada por la falta de espacio y alimento, a tal grado que no crecen adecuadamente y se presentan organismos de tallas pequeñas con ovarios desarrollados durante el invierno, dando la impresión que esa es la talla máxima que alcanzan dichas truchas y que por lo tanto su potencial en la acuicultura está limitado por su talla y peso; esto mismo ocurre en muchas truchas residentes en los Estados Unidos (Wilson 1997).

Debido al interés creciente para la conservación y uso sustentable de estos salmónidos nativos, el objetivo de este trabajo consistió en la captura de organismos silvestres de trucha nativa no identificada y su posterior aclimatación a los sistemas de cultivo en canales de corriente rápida, para estudiar su posible adaptación a las condiciones de cultivo y al alimento balanceado, así como para determinar su tasa de crecimiento y obtener su reproducción controlada.

## MÉTODOS

Se realizaron dos recolectas de trucha nativa en la parte alta de los ríos Sinaloa (arroyo Casa Quemada, Municipio de Guadalupe y Calvo, Chihuahua) y Culiacán (arroyo Cerro Solo, Municipio de Guadalupe y Calvo, Chihuahua), una en octubre del 2006 y otra en diciembre del 2007, respectivamente. Los organismos fueron capturados con anzuelo y colocados en una jaula ubicada en la parte profunda del río. Posteriormente, los organismos fueron colocados en bolsas de plástico con oxígeno y transportados al Centro Trutícola de Guachochi (perteneciente a la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, SAGARPA), Chihuahua. Las truchas fueron colocadas en canales de corriente rápida y mantenidas en cuarentena. La identidad del lote se determinó a partir del marcador *r16S* y la diversidad genética del gen citocromo b y la región control mitocondrial así como con 12 loci microsatélites.

### *Identidad y diversidad genética del stock*

Se obtuvieron secuencias de regiones mitocondriales de los genes *r16S* para determinar la identidad genética del stock fundador en relación a otros miembros del género *Oncorhynchus*; y se utilizaron secuencias de un fragmento del citocromo b (*cit b*) y de la región control mitocondrial (RC dominio derecho) así como 12 loci microsatélites para determinar la diversidad genética del lote.

La extracción de ADN total (ADNt) se realizó a partir del tejido de aleta de los reproductores y de acuerdo a los procedimientos empleados con los estuches comerciales de extracción Dneasy™ Tissue Kit, QUIAGEN®, USA.

Las amplificaciones vía PCR de la región mitocondrial *r16S* se realizaron de acuerdo a Barriga-Sosa et al. (2005), mientras que para las regiones *cit b* y RC se siguieron los procedimientos referidos en Tabla 1.

Tabla 1. Indica la región mitocondrial amplificada y las condiciones de amplificación.

Región	Ciclos térmicos		
r16S	30 ciclos	{	94 °C - 45 segundos
			50.5 °C - 45 segundos
			72 °C - 1:30 minutos
<i>cit b</i>	30 ciclos	{	94 °C - 45 segundos
			50 °C - 45 segundos
			72 °C - 1:30 minutos
RC	30 ciclos	{	94 °C - 45 segundos
			53 °C - 45 segundos
			72 °C - 1:30 minutos

Los iniciadores utilizados para amplificar cada una de las regiones fueron: SAR L2150 y SBR H3080 (Palumbi et al. 1991); H15915 y L14724 para *r16S* (Kocher et al. (1989) y *cit*

*b*, respectivamente. Para amplificar la región control (RC) se diseñaron iniciadores a partir de secuencias de Zardoya et al. (1995) (GENBANK NC 001717). Los iniciadores son: DL04F 5'-CAA CTT TCA GCA TCA GTC CGG CTT-3' y DL03R 5'-GAA AGT GTA CGC ATT ACA GCG-3'.

Para la amplificación de los 12 loci microsatélites, se utilizaron los pares de iniciadores utilizados por De Los Santos Camarillo (2008), los cuales han sido utilizados previamente por Nielsen (1996, 1999) y Nielsen et al. (1999).

La electroforesis tanto de las tres regiones mitocondriales como de los 12 loci microsatélites se llevaron a cabo en un secuenciador automático ABI Prism Modelo 3100 Avant del Laboratorio Divisional de Biología Molecular de la División de Ciencias Biológicas de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa. Las tallas alélicas de cada uno de los 12 loci microsatélites se trabajaron siguiendo los métodos descritos en De Los Santos (2008).

#### *Análisis de datos genéticos*

Las secuencias compiladas de las regiones mitocondriales fueron alineadas utilizando ClustalW, implementado en *Bioedit Sequence Alignment Editor* (Hall 1999) y ajustadas a ojo. Se realizó un análisis de comparación por homología con secuencias de GenBank (*National Center for Biotechnology Information*) vía BLASTN (Altschul et al. 1997). Las secuencias resultantes fueron comparadas con secuencias de regiones homólogas obtenidas de especímenes de *Oncorhynchus chrysogaster* colectadas en las cuencas de Fuerte y Sinaloa en 2007 por miembros del grupo binacional Truchas Mexicanas así como con secuencias de otros salmónidos del género (ei., *O. clarkii henshawi*, *O. kisutch*, *O. keta*, *O. gorbuscha*, *O. nerka*, *O. mykiss* Washington y Idaho). Las secuencias parciales del gen *cit b* fueron traducidas utilizando el código genético mitocondrial de mamíferos implementado en DnaSP versión 2.0 (Rozas y Rozas 1999).

Las secuencias de la región *r16S* se analizaron para la búsqueda del mejor modelo evolutivo, implementado en MEGA 7 y se sometieron a un análisis del vecino más cercano (NJ) con búsqueda heurística y 10000 réplicas de *bootstrap*, utilizando el modelo evolutivo de K2+G (G = 0.05, AICc = 1738.75, lnL = -846.28), resuelto como el modelo de mejor ajuste. Las distancias genéticas se estimaron utilizando el mismo modelo evolutivo.

El análisis de diversidad genética con las secuencias de la RC se determinó a partir de los siguientes estimadores, número de haplotipos (*NH*), sitios segregados (*S*), diversidad haplotípica y nucleotídica (*h* y  $\pi$ , Nei 1987), todos ellos implementados en DnaSP versión 3.14 (Rozas y Rozas 1999).

Por su parte la diversidad de los 12 loci microsatélites se obtuvo a partir de las frecuencias alélicas utilizando GenePop (versión web, Raymond y Rousset, 1995), determinando el número de alelos por locus, las heterocigosidades observada y esperada ( $H_o$  y  $H_E$ ) después de la corrección de Levene.

#### *Desempeño de la población fundadora*

Después de la cuarentena, los organismos que lograron sobrevivir fueron mantenidos durante catorce meses. Se realizaron tres medidas biométricas, una al momento de la captura y transportación al Centro, otra en octubre de 2007 (un año después) y una final en diciembre del 2007. En los tres exámenes biométricos se registró el peso total (Pt) en gramos y la longitud total (Lt) en centímetros, utilizando una balanza digital Ohaus (0.1 g de precisión) y un ictiómetro graduado en cm (1 mm de precisión). El último análisis

biométrico coincidió con la época de reproducción, y el 19 de diciembre del 2007 se obtuvieron los primeros desoves que se continuaron hasta enero del 2009.

#### *Generación F1*

Un total de 492 crías de la F1, con un peso medio de 0.9 g de Pt y 4.1 cm of Lt, fueron seguidas para determinar su desempeño en crecimiento durante un año. En marzo del 2009, estas truchas nativas fueron introducidas en estanques y mantenidas ahí durante los primeros tres meses, para posteriormente ser trasladadas a canaletas por dos meses y finalmente a una canaleta hasta que alcanzaron más de 500 g. Los Pt y Lt fueron registrados mensualmente. Las truchas fueron alimentadas con la formula de Steelhead de diferentes tamaños y de acuerdo al tamaño de las crías. Los parámetros de calidad del agua tanto para los fundadores como para la F1 se mantuvieron como sigue: oxígeno disuelto  $5.4 \pm 1.4$  mg L<sup>-1</sup>; temperatura del agua  $13.2 \pm 2.4$  °C; alcalinidad total  $6.3 \pm 1.2$  mg L<sup>-1</sup>; pH  $8.0 \pm 1.2$ ; TAN  $1.0 \pm 0.4$  mg L<sup>-1</sup>; nitritos  $0.002 \pm 0.003$  mg L<sup>-1</sup> y nitratos  $1.7 \pm 0.5$  mg L<sup>-1</sup>.

#### *Análisis de datos*

Los datos de fundadores y F1 se vaciaron en una hoja Excel y se calcularon y graficaron los estadísticos generales para peso total y longitud total durante el periodo de cultivo, así como la relación longitud-peso y sus parámetros. Para los datos de la F1 registrados se calcularon los siguientes indicadores de desempeño en el crecimiento: días de cultivo, número inicial y final de organismos, porcentaje de sobrevivencia (%), peso total inicial (Pti, g); peso total final (Ptf, g), ganancia total en peso (g), crecimiento diario en peso Pt (g día<sup>-1</sup>), longitud inicial total (Lit, cm), longitud total final (Ltf, cm), ganancia en longitud total (cm), crecimiento diario en Lt (cm día<sup>-1</sup>), tasa específica de crecimiento (Tec, % día<sup>-1</sup>) (Thiessen et al. 2003; Aksnes et al. 2006), tasa de incremento relativo (TIR, %) de acuerdo a Ricker (1975), tasa de conversión alimenticia (TCA) (Thiessen et al. 2003) y factor de condición (FC) (Aksnes et al. 2006).

## **RESULTADOS**

#### *Identidad y diversidad genética del stock.*

Las secuencias compiladas (562 bp) de una región del gen *r16S* mitocondrial de 27 especímenes resolvieron tres haplotipos, H1 (el cual compartieron cuatro organismos); el H2 (compartido por 14 organismos); H3 (compartido por nueve organismos) los cuales fueron homólogos a la misma región de *Oncorhynchus chrysogaster* de las cuencas de los ríos Fuerte y Sinaloa, y mostraron las distancias genéticas más bajas (0.000-0.004). De acuerdo a la estrecha relación de los haplotipos resueltos y a que en la topología los haplotipos de la trucha nativa forman un mismo grupo con la secuencia homóloga de *O. mykiss* de Idaho (0.002-0.005) fuertemente soportado, hace suponer que la trucha arcoíris de Idaho tiene, en efecto, una relación muy cercana con *O. chrysogaster* (Fig. 1). El par de especies reportadas como *O. mykiss* de Washington y *O. clarkii henshawi*, tampoco presentaron diferencias en la región analizada (0.00). Por otro lado, las distancias entre las especies de *Oncorhynchus* que conforman el otro clado fueron mayores (0.013-0.030).

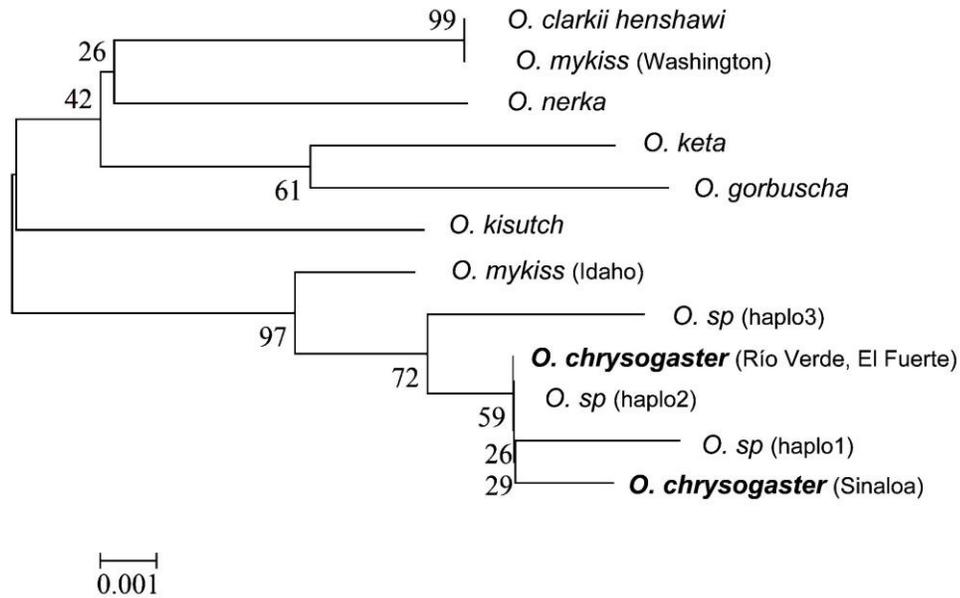


Figura 1. Topología consenso inferida a partir del gen *r16S* mitocondrial y 12 taxa utilizando Neighbor-Joining, 10000 réplicas de bootstrap y la distancia de K2+G.

Los niveles de diversidad encontradas en la trucha identificada como *O. chrysogaster* y mantenidas en cautiverio, con las regiones mitocondriales *cit b* y *RC* se resumen en la Tabla 2. Los niveles de diversidad en cuanto al número de haplotipos encontrados en la región control mitocondrial (RC) son ligeramente mayores a lo reportado por Nielsen et al. (1998) para la trucha de San Pedro Mártir *O. mykiss nelsoni*, y otros organismos de trucha nativa no identificada del río Yaqui, para los cuales, los autores solamente resuelven tres haplotipos.

Tabla 2. Niveles de diversidad haplotípica y nucleotídica encontrados en el lote de trucha dorada del presente estudio. Así como el número de haplotipos (*NH*) y el número de sitios segregados (*S*).

Marcador genético	N	NH	<i>h</i>	$\pi$	S	Fuente
<i>Cit b</i> (379)	13	8	0.808	0.0213	6	Presente trabajo
<i>RC</i> (495)	10	8	0.956	0.0414	41	Presente trabajo
Otros estudios(RC)	43*	3	ND	ND	ND	(Nielsen et al. 1998)

\**O. mykiss nelsoni* y organismos del río Yaqui; ND = no disponible.

Con relación a los 12 loci microsatélites, los niveles de diversidad resueltos en el lote identificado como *O. chrysogaster* y mantenido en cautiverio en el Centro Acuícola Guachochi, se resumen en la Tabla 3 y se encuentran dentro de los reportados para otras truchas mexicanas y otras especies de salmónidos.

Tabla 3. Diversidad del lote de trucha dorada mexicana, mantenido en cautiverio con 12 loci microsatélite. Se contrasta con niveles de heterocigosidad ( $H_E$ ) en otras especies de salmónidos.

Locus	NA	$H_E$	Otras especies y poblaciones	$H_E$	Referencia
OMY-27	6	47.4	<i>Salmo trutta</i> (cultivo, Finlandia)	37.6 - 71.4	Aho et al. 2006
ONEU-8	8	45.6	<i>Salmo salar</i> (silvestre, EUA)	49.0 - 92.0	Spidle et al. 2004
ONEU-11	4	33.9	<i>Salmo salar</i> (silvestre, España)	72.8 - 82.0	Machado et al. 2007
OMY-325	14	49.0	<i>O. clarki lewisi</i> (silvestre, Canadá)	14.0 - 87.0	Taylor et al. 2003
SSA-85	14	52.5	<i>O. mykiss</i> (silvestre, costa de EUA)	27.0 - 90.0	Nielsen 1999
OMY-77	8	47.3	<i>O. mykiss stonei</i> (McCloud, California, EUA)	68.0	Nielsen et al. 1999
OMY-207	18	52.8	<i>O. mykiss nelsoni</i> (St. Domingo)	33.2	De Los Santos 2008*
OTS-1	16	52.0	<i>O. chrysogaster</i> (Fuerte & Culiacán)	54.3	De Los Santos 2008*
OMY-2	17	51.7	Truchas nativas No-descritas (516)	39.0	De Los Santos 2008*
SFO-8	12	49.3			
SSA-14	16	52.6			
SSA-289	10	45.8			
$H_E =$		48.3			

NA = número de alelos por locus; \* intervalo NA = 3.4 - 20

#### Desempeño de la población fundadora

El peso total (Pt) de los organismos silvestres capturados estuvo entre los 5 a 200 g, con promedio de 15.6 g (Fig. 2). Los organismos más pequeños fueron indiferenciados y los de mayor talla presentaron signos de maduración sexual, ya que liberaron esperma y huevos con una ligera presión abdominal, lo que sugería la proximidad de la época reproductiva. Al introducirse los organismos a las canaletas mostraron signos de estrés por una semana, lo cual era notorio al presentar coloración oscura en las regiones laterales del cuerpo, después de ese tiempo la coloración se restableció y las manchas de la línea lateral fueron notables nuevamente. Durante esa primera semana los organismos perdieron peso y ocasionalmente consumieron insectos y larvas presentes en la canaleta, posteriormente iniciaron la ingesta de alimento Steelhead entre la segunda y tercera semanas. En este periodo la mortalidad alcanzó un 50%.



Figura 2. Fotografía de un ejemplar de trucha dorada mexicana (*Oncorhynchus chrysogaster*) capturada en arroyo Casas Quemadas, cuenca de río Fuerte, Chihuahua.

En la figura 3 se muestra la curva de crecimiento del lote fundador. En un inicio la trucha nativa tenía un Pt promedio de 38.3 g y una Lt de 15.6 cm. En un periodo de dos años, los fundadores alcanzaron un Pt promedio de 1950 g y una Lt de 51.9 cm. Al final del estudio un lote de 17 organismos componía el lote fundador (Tabla 5, Fig. 4).

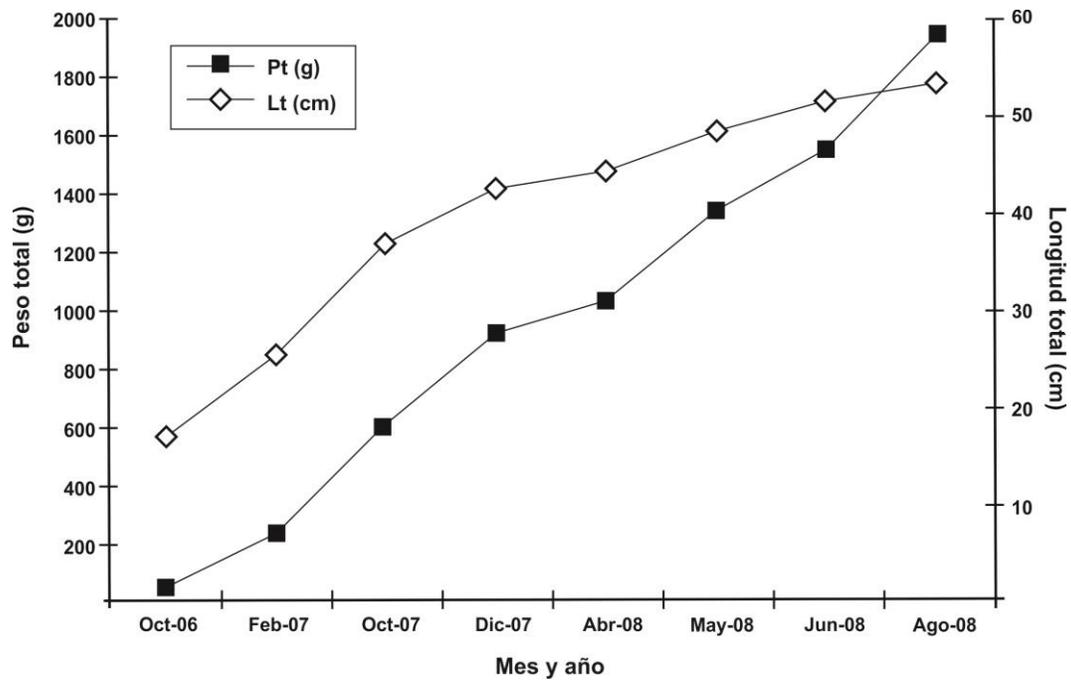


Figura 3. Crecimiento en peso y talla del lote fundador de trucha dorada mexicana (*Oncorhynchus chrysogaster*), de octubre de 2006 a agosto de 2008.

Tabla 4. Estadísticos generales de un lote fundador de 17 organismos de trucha dorada mexicana (*Oncorhynchus chrysogaster*), datos hasta agosto de 2008.

Dato	Peso Total (g)	Longitud Total (cm)	Altura máxima del cuerpo (cm)
Promedio	1,950.0	51.9	14.3
Desviación estándar	421.3	9.2	1.6
Mínimo	850.0	22.0	11.0
Máximo	2,400.0	58.0	16.0



Figura 4. Reproductor de trucha dorada mexicana *Oncorhynchus chrysogaster* (Needham y Gard 1964).

La correlación longitud-peso resolvió un valor de b de 3.1 sugiriendo un modelo de crecimiento isométrico  $Pt = 0.008Lt^{3.122}$ , con una  $R^2 = 0.9954$  (Fig. 5).

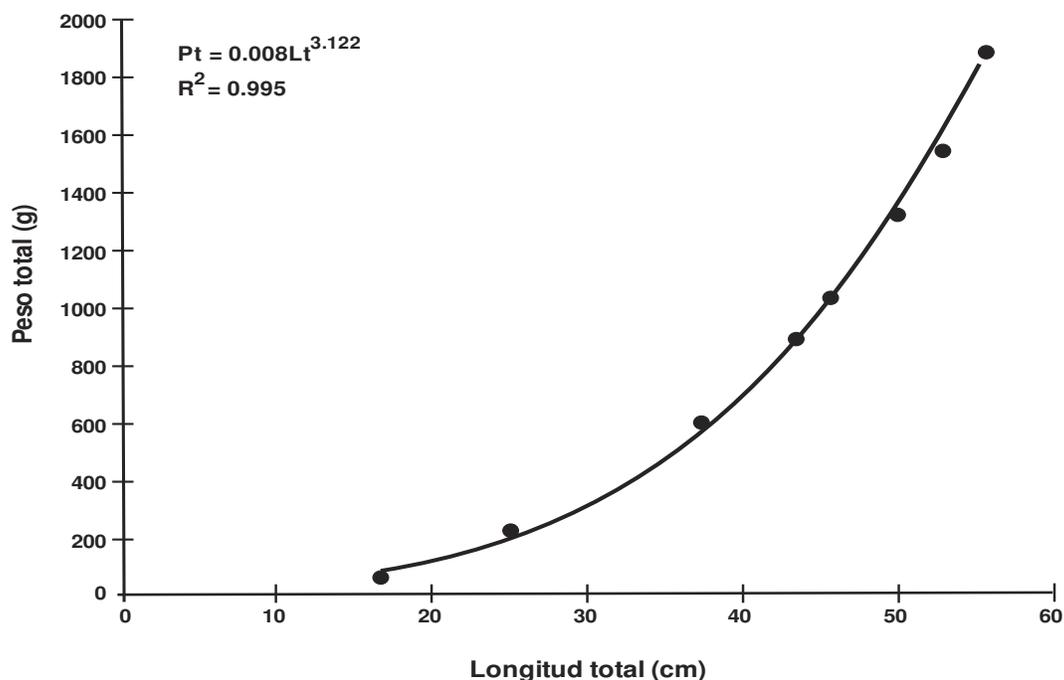


Figura 5. Relación Peso - Longitud de los organismos fundadores de trucha dorada mexicana (*Oncorhynchus chrysogaster*).

#### *Desempeño en el crecimiento de la F1*

La F1 mostró una tendencia de crecimiento ascendente a lo largo del periodo de cultivo. La trucha dorada F1 presentó a los cuatro meses de edad un Pt promedio de 0.9 g y una Lt promedio de 4.4 cm. Al final del estudio presentó un Pt promedio de 570 g y 33.5 cm Lt promedio (Fig. 6). La correlación longitud-peso resolvió un valor de  $b = 3.1$  sugiriendo como en el lote fundador un modelo de crecimiento isométrico con una ecuación de ajuste  $Pt = 0.014Lt^{2.904}$  (Fig. 7). En la Tabla 5 se muestran los indicadores de crecimiento.

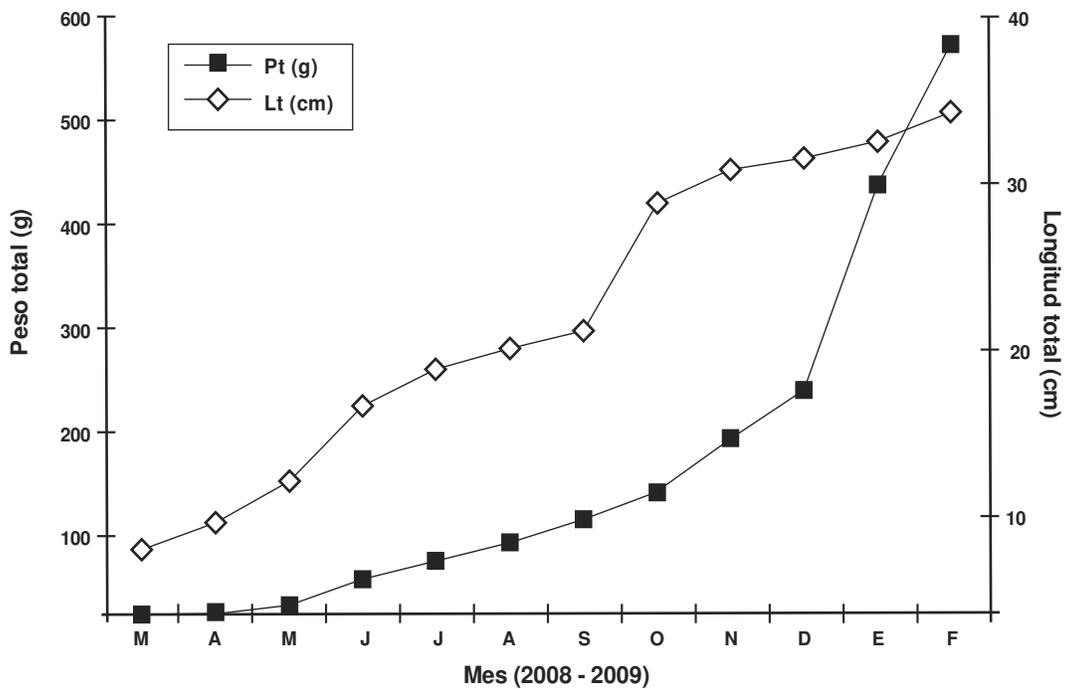


Figura 6. Crecimiento de la F1 de la trucha dorada mexicana (*Oncorhynchus chrysogaster*) durante 12 meses de cultivo.

Tabla 5. Indicadores del desempeño de crecimiento de la trucha dorada mexicana (*Oncorhynchus chrysogaster*), F1.

Indicadores	Valor
Días de cultivo	330
Número inicial de peces	492
Número final de peces	415
Sobrevivencia (%)	80
Peso total inicial (g)	0.9
Peso total final (g)	570
Ganancia en peso total (g)	569.1
Incremento diario de peso total (g día <sup>-1</sup> )	1.72
Longitud inicial total (cm)	4.4
Longitud final total (cm)	33.5
Ganancia en longitud total (cm)	29.1
Incremento diario de longitud total (cm día <sup>-1</sup> )	0.09
Tasa específica de crecimiento (% día <sup>-1</sup> )	1.95
Tasa relativa de crecimiento (%)	63.23
Tasa de conversión alimenticia	1.2
Factor de condición	1.5

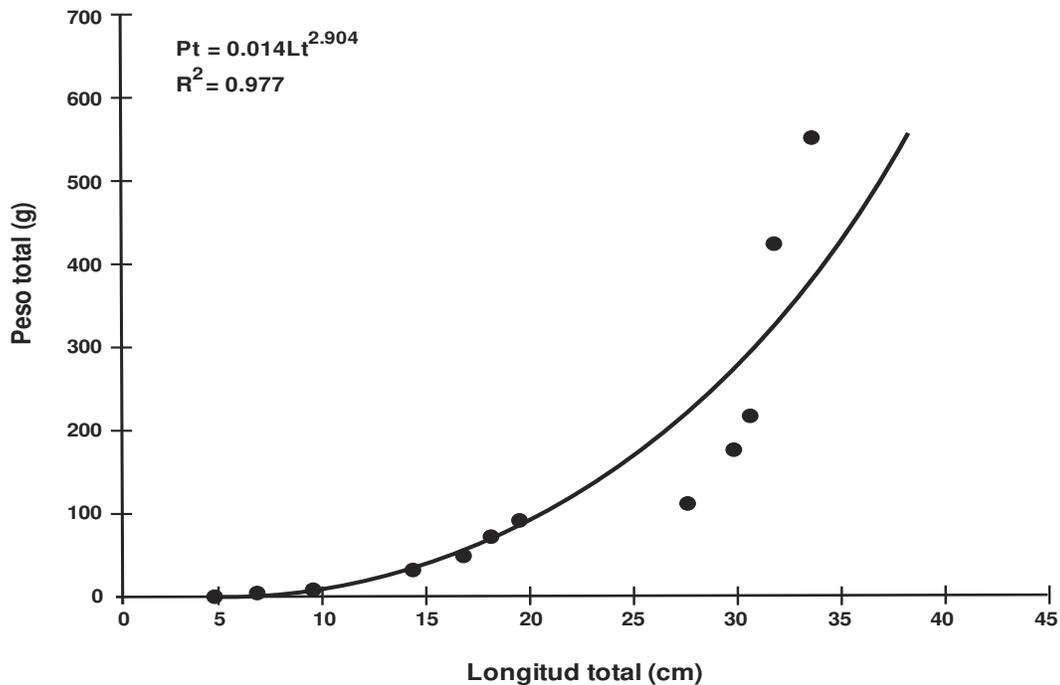


Figura 7. Relación Peso - Longitud- para la F1 de trucha dorada mexicana (*Oncorhynchus chrysogaster*).

## DISCUSIÓN

Aunque existen trabajos en donde se utilizan marcadores moleculares para caracterizar/identificar genéticamente lotes de peces utilizados en programas de repoblamiento, conservación y acuicultura (Nelson et al. 2008; Norris et al. 2000; Pérez-Enriquez et al. 1999; Tan et al. 1999; Thongpan et al. 1997; Heath et al. 1995), este es el primer trabajo que reporta datos sobre el cultivo de trucha dorada mexicana identificada y caracterizada con marcadores mitocondriales y microsátélites y que propone una estrategia metodológica para cultivar especies de truchas nativas para su conservación y posible producción acuícola. Los marcadores utilizados permitieron por un lado, determinar la identidad del lote no identificado y su estrecha relación con otras especies del género (*r16S*). Mientras que los marcadores *cit b*, *RC* y los 12 loci microsátélites diagnosticaron la diversidad del lote dentro de los intervalos reportados para otras especies de salmónidos. La cercanía de la relación de *O. mykiss* y la trucha dorada mexicana ha sido previamente demostrada con varios marcadores bioquímicos y moleculares (Utter y Allendorf 1994; Nielsen, 1996, 1999; Nielsen et al. 1999; Taylor et al. 2003; Spidle et al. 2004; Thrower et al. 2004; Aho et al. 2006; Valiente et al. 2007). Sin embargo, cabe destacar que recientemente Abadia-Cardoso et al. (2015) mencionan que el lote de truchas usado en este estudio para el cultivo en el Centro de Guachochi no corresponde a la trucha dorada mexicana, sino que más bien a *O. mykiss*, encontrándose más cercanamente relacionada a las líneas cultivadas en los Estados Unidos; este estudio se realizó recientemente y usó un mayor número de muestras que incluye la mayor parte de linajes y especies de género *Oncorhynchus*, además de ejemplares provenientes de diferentes centro de cultivo en California, EUA, y marcadores del ADN nuclear (microsátélites y SNPs), lo cual representa una base de datos más completa para los fines de identificación de especies. En nuestro

estudio se empleó el gen *r16S* del ADN mitocondrial para la identificación específica, sin embargo las relaciones filogenéticas entre las especies y linajes dentro del género *Oncorhynchus* usando marcadores del ADN mitocondrial no están bien establecidas (Wilson and Turner 2009; Nielsen et al. 1998) y la base de datos para la comparación genética no incluye los linajes y individuos de cultivo de los Estados Unidos; por otro lado es conocido que la información aportada por los marcadores del ADN nuclear y mitocondrial no siempre coinciden (Nielsen 1996), por lo que queda la incertidumbre sobre la identidad específica del lote de truchas que se usó para las experiencias de cultivo. Lo anterior y la evidencia de introgresión de truchas nativas mexicanas con trucha arcoíris de centros trutícolas cercanos, hace evidente la necesidad de continuar avanzando en el desarrollo y aplicación de marcadores moleculares que permitan delinear de manera más precisa las relaciones de taxa cercanamente relacionados.

Con relación a la diversidad genética del lote, esta se encontró dentro de los intervalos reportados para otras especies de salmónidos e inclusive se resolvieron mayor número de haplotipos a los reportados por Nielsen et al. (1998) para la trucha de San Pedro Mártir *O. mykiss nelsoni* y otros organismos de trucha nativa no identificada del río Yaqui.

Durante años la especie que habita en arroyos de cuencas de la Sierra Madre Occidental fue considerada como un pez pequeño que no crecía más de pocos centímetros. Los resultados presentados aquí, por otro lado, muestran que la especie puede crecer y alcanzar tallas similares a las reportadas para la trucha arcoíris. La trucha arcoíris se ha estudiado durante más de un siglo y su cultivo se ha extendido en muchos países de América, Europa, Asia y Oceanía. El éxito del cultivo de trucha arcoíris se basa en la producción de líneas seleccionadas que mantienen una alta tasa de crecimiento bajo diferentes temperaturas del agua en un intervalo aceptable y son más resistentes a las enfermedades. Estas líneas han mantenido la producción mundial y de acuerdo con Klontz (1991) llegan a la madurez entre los 10 y 24 meses, el peso total de los reproductores varía entre 0.5 y 3 kg a una temperatura de agua de 10 a 15°C, y la producción de huevos oscila entre 1500 y 3000 huevos por kilogramo de hembra. Estas características han servido de referencia estándar para la mayoría de los productores de trucha en México y la producción actual de la trucha se basa en líneas seleccionadas importadas de otros países y continentes, y no hay serios intentos para desarrollar nuevas líneas locales o para estandarizar la tecnología del cultivo de las especies nativas, como el de la trucha dorada mexicana. Sin embargo, en México, la gran diversidad de condiciones geográficas y climáticas requieren de líneas o especies de salmónidos mejor adaptadas. La manera tradicional de cultivar truchas introducidas dió como resultado la importación de enfermedades infecciosas como la Necrosis Pancreática Infecciosa (IPN), la cual ha provocado importantes pérdidas económicas. Las experiencias presentadas en esta investigación en relación con la gestión y la cría de la trucha dorada mexicana muestran varios elementos importantes que deben ser considerados en el cultivo de las truchas nativas. El primer elemento es la importancia de conservar y mantener el genoma de especies nativas de salmónidos ahora en riesgo y que viven en una situación extrema y de peligro (ver Escalante et al. Capítulo 10, esta obra). El segundo elemento es la facilidad de adaptación a los sistemas acuícolas, como se demostró en este trabajo, la fácil aceptación del alimento comercial para trucha arcoíris, la tasa de crecimiento y la alta sobrevivencia. Los datos indicaron que en dos o tres semanas las truchas silvestres pueden consumir alimento balanceado sin ningún problema, período en el cual generalmente se detecta la mayor mortalidad, aunque esto es común cuando peces

silvestres son introducidos a condiciones controladas. La generación F1 mostró una mejor adaptación, pero una baja tasa de sobrevivencia en relación a la trucha silvestre.

La tendencia de crecimiento de la trucha dorada mexicana es similar a la registrada en la trucha arcoíris. La temporada de reproducción se registró de diciembre a febrero de cada año, cuando la temperatura del agua alcanzó los 10 °C. En promedio se produjeron 6000 huevos por kg de hembra, es decir dos veces el número registrado para la trucha arcoíris en México de acuerdo con Klontz (1991). El crecimiento en cultivo de la trucha dorada en Pt y Lt fue similar a la de la trucha arcoíris (2.4 kg y 58 cm, respectivamente). Las experiencias registradas en el Centro trutícola El Zarco, Estado de México, muestran que es posible cultivar a la trucha arcoíris en tiempos y condiciones de cultivo similares, y la correlación talla-peso es la misma en ambos casos, con un valor de b de 3.0.

Otro aspecto a resaltar es que la mayoría de las granjas productoras de crías de trucha arcoíris en México tienen déficit de machos debido la mayor parte de los casos, a que las líneas importadas son poblaciones 100% hembras seleccionadas a lo largo de las generaciones. En el caso de la trucha dorada mexicana la relación hembra: macho en la muestra silvestre fue de 2:1, lo cual garantiza la posibilidad de tener suficientes machos para mantener la actividad reproductiva a lo largo de los años. Esto representaría una ventaja en nuestro país ya que sería posible asegurar la producción continua de huevos y continuar con el cultivo de esta especie. Sin embargo Ruiz-Luna (Capítulo 6, esta obra) encontró diferencias mínimas en la relación hembra: macho, aunque la proporción de individuos no diferenciados sexualmente fue elevada ( $\geq 50\%$ ) en varias de las muestras obtenidas. Por lo anterior será necesario seguir estudiando la biología de estas especies para tener mayor certeza sobre este importante parámetro poblacional.

Los indicadores de crecimiento de la trucha dorada mexicana mostraron una ganancia constante de Pt y Lt a lo largo del período de cultivo y en sólo seis meses los organismos alcanzaron valores promedio de 300 a 350 g, el cual es el tamaño comercial en México. El valor de  $b = 2.9$  en la correlación talla-peso fue similar al obtenido en cultivo de reproductores y muy cercana a la registrada para la trucha en los sistemas acuícolas de recirculación (Rodríguez 2009; Armendáriz 2009). Comparativamente los indicadores de desempeño del crecimiento mostraron que la tasa específica de crecimiento (TEC) es similar a lo registrado para el cultivo de trucha arcoíris por Thiessen et al. (2003) quienes reportan valores de TEC de entre 1.74 y 1.82% por día<sup>-1</sup> y por Aksnes et al. (2006) con 3.0 a 3.1% por día<sup>-1</sup>. El factor de condición (FC) fue mayor que el reportado por Aksnes et al. (2006).

La ganancia diaria en Pt y Lt fue de 1.72 g y cerca de 0.1 cm, respectivamente. Lo anterior indica que la trucha dorada mexicana presenta un desempeño en el crecimiento similar al de la trucha arcoíris bajo diferentes condiciones de cultivo y temperatura del agua. Sin embargo y a pesar de estos avances, todavía hay muchas preguntas por responder, entre ellas ¿Cuál es la densidad óptima de cultivo de la trucha dorada mexicana? ¿Cuáles son los indicadores de desempeño en el crecimiento bajo diferentes condiciones de cultivo? ¿Cuáles son las enfermedades infecciosas comunes en condiciones de cultivo? ¿Cómo es la adaptación a diferentes condiciones de calidad del agua? Para responder a estas preguntas básicas, es necesario realizar más investigaciones con esta especie y considerar seriamente la creación de un Centro de Referencia para el cultivo de truchas nativas, a fin de evitar la pérdida de este importante genoma y promover la conservación de otras especies de salmónidos nativos que ahora son vulnerables o se encuentran en peligro.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a M. Banda-Cortés y L. Rendón del Centro Acuícola de Guachochi por su apoyo a lo largo del desarrollo del trabajo y por la captura del lote de truchas nativas no identificadas.

## REFERENCIAS

- Abadía-Cardoso, A., J. Carlos 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.
- Aho, T., J. Rönn, J. Piironen and M. Björklund. 2006. Impacts of effective population size on genetic diversity in hatchery reared Brown trout (*Salmo trutta* L.) populations. *Aquaculture*. 253: 244–248.
- Altschul, S.F., T.L. Madden, A.A. Schaffer, J. Zhang, Z. Zhang, W. Miller and D.J. Lipman. 1997. Gapped BLAST and PSI-BLAST: a new generation of protein database search programs. *Nucleic Acids Research*. 25: 3389-3402.
- Angers, B., L. Bernatchez, A. Angers and L. Desgroseillers. 1995. Specific microsatellite loci for brook chair reveal strong populationsubdivision on a microgeographic scale. *Journal of Fish Biology*. 47: 177-185.
- Armendáriz, S.N.I. 2009. Evaluación del desempeño productivo de una línea genética seleccionada de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*, Walbaum) cultivada en dos sistemas intensivos. *Tesis Maestría en Biología*. Universidad Autónoma Metropolitana, México, D.F.
- Arredondo-Figueroa, J.L. 1983. Especies animales acuáticas de importancia nutricional, introducidas en México. *Biotica*. 9(1): 23-39.
- Aksnes, A., B. Hope, E. Jonsson, T.B. Bjojnsson and S. Albrektse. 2006. Size-fractioned fish hydrolysate as feed ingredient for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed high plant protein diets. I. Growth, growth regulation and feed utilization. *Aquaculture*. 261:305-317.
- Barriga-Sosa, I.D.L.A., M.Y. Pérez-Ramírez, F. Soto-Aguirre, M. Castillo-Rivera and J.L. Arredondo-Figueroa. 2005. Inter-specific variation of the mitochondrial r16S gene among silversides “Peces Blancos” (ATHERINOPSIDAE: MENIDIINAE) and its utilization for species identification. *Aquaculture*. 250 (3/4): 637-651.
- De Los Santos Camarillo, A.B. 2008. *Definición de unidades taxonómicas en el complejo de truchas del Noroeste de México, mediante el análisis de marcadores microsatélites*. Tesis de Maestro en Ciencias en Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales (Orientación Ecología de Zonas Áridas). Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C., La Paz, Baja California Sur, México. 106 p.
- Escalante, M.A., F. J. García-De León, C.B. Dillman, A. de los Santos Camarillo, 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(5): 1063–1071.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). 2012. Carta Nacional Acuícola. SAGARPA-CONAPESCA, <http://www.inapesca.gob.mx/portal/publicaciones/carta-nacional-acuicola>.
- Espinosa, H., F.J. García-De León, G. Ruiz, A. Varela, I. Barriga, J.L. Arredondo, D. Hendrickson, F. Camarena y A.B. De los Santos C. 2007. Las Truchas Mexicanas:

- Peces Enigmáticos del Noroeste. *Especies: Revista sobre Conservación y Biodiversidad*. Naturalia A.C. Enero-Febrero: 8-14.
- Hall, T.A. 1999. BioEdit: A user-friendly biological sequence alignment editor and analysis program for Windows 95/98/NT. *Nucleic Acids Symposium Series*. 41: 95-98.
- Heath, D.D., R.H. Devlin, T.J. Hilbish, G.K. Iwama, 1995. Multilocus DNA fingerprints in seven species of salmonids. *Canadian Journal of Zoology*. 73: 600–606.
- Hendrickson, D.A., H. Espinosa Pérez, L.T. Findley, W. Forbes, J.R. Tomelleri, R.L. Mayden, J.L. Nielsen, B. Jensen, G. Ruiz Campos, A. Varela Romero, A. van der Heiden, F. Camarena and F.J. García-De León. 2002. Mexican native trouts: a review of their history and current systematic and conservation status. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*. 12: 273-316.
- 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.
- Klontz, W.G. 1991. *Producción de trucha arcoíris en granjas familiares*. College of Forestry, Wildlife and Range Sciences. University of Idaho, USA. 88 p.
- Kocher, T.D., W.K. Thomas, A. Meyer, S.V. Edwards, S. Paabo, F.X. Villablanca and A.C. Wilson. 1989. Evolution dynamics of mitochondrial DNA evolution in animals: Amplification and sequencing with conserved primers (cytochrome b/12S ribosomal DNA/control region/evolutionary genetics/molecular phylogenies). *Proceedings of the Natural Academy of Sciences*. 86: 6196-6200.
- Machado-Schiaffino, G., E. Dopico and E. Garcia-Vazquez. 2007. Genetic variation losses in Atlantic salmon stocks created for supportive breeding. *Aquaculture*. 264: 59-65.
- Needham, P.R. and R. Gard. 1964. A New Trout from Central Mexico: *Salmo chrysogaster*, the Mexican golden trout. *Copeia*. 1: 169-173.
- Nei, M. 1987. *Molecular Evolutionary Genetics*. Columbia University Press. Ed. New York. p. 164 p.
- Nelson, M.L.B., R.P. Ribeiro, J.A. Povh, P.C. Gomes, L. Vargas y S.N. de Oliveira. 2008. Caracterización genética de lotes de peces usados en programas de repoblamiento y su importancia en la conservación genética en la piscicultura. *Zootecnia Tropical*. 26(4): 515-522.
- Nielsen, J.L. 1996. Using mitochondrial and nuclear DNA to separate hatchery and wild stocks of rainbow trout. *Proceedings of the Symposium of the International Congress on the Biology of Fishes of the American Fishery Society*. San Francisco State University, USA. pp. 139-147.
- Nielsen J.L. 1999. The evolutionary history of steelhead (*Oncorhynchus mykiss*) along the US Pacific Coast: Developing a conservation strategy using genetic diversity. *ICES Journal of Marine Science*. 56: 449–458.
- Nielsen, L.J., C.M. Fountain, C.J. Favela, K. Cobble and L.B Jensen. 1998. *Oncorhynchus* at the southern extent of their range: a study of mtDNA control-region sequence with

- special reference to an undescribed subspecies of *O. mykiss* from Mexico. *Environmental Biology of Fishes*. 51: 7-23.
- Nielsen, J.L., K.D. Crow and M.C. Fountain. 1999. Microsatellite diversity and conservation of a relic trout population: McCloud River redband trout. *Molecular Ecology*. 8:S129-S142.
- Nielsen, L.J. and G.K. Sage. 2001. Microsatellite analyses of the trout of northwest Mexico. *Genetica* 111: 269-279.
- Norris, A.T., D.G. Bradley, E.P. Cunningham, 2000. Parentage and relatedness determination in farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*) using microsatellite markers. *Aquaculture*. 182: 73–83.
- Palumbi S., A. Martin, S. Romano, W. O. McMillan, L. Stice and G. Grabowski. 1991. *The simple fool's guide to PCR*. University of Hawaii, Honolulu. 34 p.
- Pérez-Enriquez, R., M. Takagi and N. Taniguchi, 1999. Genetic variability and pedigree tracing of a hatchery-reared stock of red sea bream (*Pagrus major*) used for stock enhancement, based on microsatellite DNA markers. *Aquaculture*. 173: 413–423.
- Raymond, M. and F. Rousset. 1995. GENEPOP (version 1.2): population genetics software for exact tests and ecumenicism. *Heredity*. 86: 248-249.
- Ricker, W.E. 1975. *Computation and Interpretation of Biological Statistics of Fish Populations*. Department of the Environment Fisheries and Marine Service. Ottawa, Canada. 401 p.
- Rodríguez, S.E.O. 2009. Evaluación de bioindicadores de cultivo en un sistema cerrado de circulación de una línea Seleccionada de trucha arcoíris. *Tesis Maestría en Ciencias del Mar*. Universidad de Colima.
- Rozas, J. and R. Rozas. 1999. DnaSP version 3: an integrated program for molecular population genetics and molecular evolution analysis. *Bioinformatics*. 15: 174-175.
- Ruiz-Campos, G., F. Camarena-Rosales, A. Varela-Romero, S. Sánchez-González and J. De La Rosa-Vélez. 2003. Morphometric variation of wild trout populations from northwestern Mexico (Pisces: Salmonidae). *Review in Fish Biology and Fisheries*. 13: 91-110.
- Ruiz-Luna, A. 2016. Relaciones biométricas y aspectos poblacionales de la trucha dorada mexicana *Oncorhynchus chrysogaster* en las cuencas de los ríos Fuerte, Sinaloa y Culiacán, México. En: Ruiz-Luna A. y F.J. García-De León (eds.) *La trucha dorada mexicana*. Cap. 6.
- Spidle, A.P., T.L. Kinga and B.H. Letcher. 2004. Comparison of genetic diversity in the recently founded Connecticut River Atlantic salmon population to that of its primary donor stock, Maine's Penobscot River. *Aquaculture*. 236: 253–265.
- Tan, G., A. Karsi, P. Li, S. Kim, X. Zheng, H. Kucuktas, B.J. Argue, R.A Dunham and Z.J. Liu, 1999. Polymorphic microsatellite markers in *Ictalurus punctatus* and related catfish species. *Molecular Ecology*. 8: 1758–1760.
- Taylor, E.B., M.D. Stamford and J.S. Baxter. 2003. Population subdivision in westslope cutthroat trout (*Oncorhynchus clarki lewisi*) at the northern periphery of its range: evolutionary inferences and conservation implications. *Molecular Ecology*. 12: 2609–2622.
- Thiessen, L.D., L.G. Campbell, L.G and D.P. Adelizi. 2003. Digestibility and growth performance of juveniles rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed with pea and canola products. *Aquaculture nutrition*. 9:67-75.

- Thongpan, A., M. Mingmuang, S. Thinchant, R. Cooper, T. Tiersch and K. Mongkonpunya, 1997. Genomic identification of catfish species by polymerase chain reaction and restriction enzyme analysis of the gene encoding the immunoglobulin M heavy chain constant region. *Aquaculture*.156: 129–137.
- Thrower F., Ch. Guthrie III, J. Nielsen and J. Joyce. 2004. A comparison of genetic variation between an anadromous steelhead, *Oncorhynchus mykiss*, population and seven derived populations sequestered in freshwater for 70 years. *Environmental Biology of Fishes*. 69: 111–125.
- Utter, F. and F.W. Allendorf. 1994. Phylogenetic relationships among species of *Oncorhynchus*: a consensus view. *Conservation Biology*. 8:864-867.
- Valiente, A. G., F. Juanes, P. Nuñez and E. Garcia-Vazquez. 2007. Is genetic variability so important? Non-native salmonids in South America. *Journal of Fish Biology*. 71: 136–147.
- Wilson, MF. 1997. Variation in salmonid life histories: Patterns and perspectives. *Res. Pap. PNW-RP-498*. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. 50 p.
- Wilson W.D. and T.F. Turner. 2009. Phylogenetic analysis of the Pacific cutthroat trout (*Oncorhynchus clarki* ssp.: Salmonidae) based on partial mtDNA ND4 sequences: A closer look at the highly fragmented inland species. *Molecular Phylogenetics and Evolution*. 52: 406–415
- Zardoya R., A. Garrido-Pertierra and J.M. Bautista. 1995. The complete nucleotide sequence of the mitochondrial DNA genome of the rainbow Trout, *Oncorhynchus mykiss*. *Journal of Molecular Evolution*. 41: 942-951.

## 12. 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*

### INTRODUCCIÓN

La Sierra Madre Occidental (SMO) es un ecosistema altamente heterogéneo en términos geológicos y climáticos, lo que permite que haya una gran riqueza y diversidad biológica no sólo en los ecosistemas terrestres sino también en los acuáticos (Brown 1994). Tal es el caso del complejo de truchas del género *Oncorhynchus* que habita en las zonas altas de los ríos de la SMO sobre los 1500 msnm (Hendrickson et al. 2006). A pesar de que únicamente una especie ha sido formalmente descrita, los estudios genéticos han determinado que este complejo de truchas de la SMO muestra una gran diversidad de especies nativas (García-De León et al. en preparación, Camarena-Rosales et al. 2007, Abadía-Cardoso et al. 2015). Desafortunadamente, estos grupos se encuentran en riesgo por varios factores como la deforestación, la contaminación del agua, el cambio climático global y particularmente, la introducción de la trucha arcoíris exótica, *Oncorhynchus mykiss* (Escalante et al. 2014, Abadía-Cardoso et al. 2015).

La trucha arcoíris es nativa del Océano Pacífico Norte, desde la Península de Kamchatka en Rusia hasta Baja California en México pero ha sido introducida en casi todos los países del mundo incluyendo México, para la pesca deportiva y su cultivo en acuicultura con un éxito extraordinario ya que se adapta fácilmente a diferentes condiciones ambientales (Crawford y Muir 2008). En México, esta especie está en la lista del “Sistema de Información sobre Especies Invasoras” de la CONABIO (González-Martínez et al. 2014). La primera introducción de la trucha arcoíris en el país data del año 1888, con 30 mil huevos procedentes del río McCloud en los Estados Unidos de América (Arredondo-Figueroa 1983). La introducción se justificó debido a la falta de información sobre las especies nativas de la misma familia en territorio mexicano (Espinosa-Pérez et al. 2007). El primer centro piscícola del país creado para la reproducción de trucha arcoíris se estableció en la Ciudad de México en 1937 (Carta Nacional Acuícola 2013, <http://www.inapesca.gob.mx/portal/publicaciones/carta-nacional-acuicola>) y desde entonces, el número de centros dedicados al cultivo de esta especie exótica se ha incrementado exponencialmente.

Actualmente, existen registradas 1248 granjas comerciales y 492 de autoconsumo de trucha arcoíris localizadas en 14 entidades federativas y aunque la actividad trutícola se realiza principalmente en zonas con climas de templado a frío y en sitios con altitud superior a los 500 msnm (Carta Nacional Acuícola 2013), existen granjas pequeñas no registradas en prácticamente todos los estados de la República Mexicana, situación que afecta de manera grave y directa a las especies nativas, ya que no se tiene el control adecuado para evitar escapes de las truchas exóticas al medio natural. Esta situación crea la necesidad inminente de generar estudios como el presente que promuevan el desarrollo de biotecnologías para el cultivo de las especies nativas y así reducir el riesgo de hibridación

con la trucha arcoíris exótica. Los objetivos de este trabajo fueron varios: 1) hacer una prospección detallada del norte de la SMO para la búsqueda y colección de reproductores a partir de juveniles y adultos de truchas nativas capturados en su medio natural para el cultivo experimental; 2) determinar y asegurar la identidad nativa de estos reproductores utilizando métodos genéticos y 3) evaluar los aspectos reproductivos bajo condiciones controladas de cultivo.

## **MÉTODOS**

### *Prospecciones y recolectas de truchas nativas*

Se realizaron prospecciones en busca de truchas nativas en diferentes regiones de la SMO en el estado de Chihuahua, México (Fig. 1) en el período 2013 - 2015, tomando como referencia el modelo de delimitación de las cuencas e hidrología y los sitios de recolecta reportados bibliográficamente (Hendrickson et al. 2002). La obtención de datos y análisis de los sitios de recolecta se realizó con la herramienta de modelado hidrológico del ArcGIS 10 (ESRI *Geographic information systems*), la cual proporciona los métodos para describir los componentes físicos de una superficie y permite identificar sumideros, determinar la dirección de flujo, calcular la acumulación de flujo, delinear cuencas hidrográficas y crear redes de corrientes. Además, se utilizó la cartografía base de la unidad hidrográfica del estado de Chihuahua y la cartografía oficial de la hidrografía del área de estudio en formato *shapefile* obtenida del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) a escala 1:50,000 y 1:250,000.

Los datos del área de estudio se obtuvieron a partir de un Modelo Digital de Elevación (MDE) con una resolución de 15 m. Se utilizó la herramienta *Watershed* para la generación de cuencas y establecer el área aportante de la cuenca que drena dentro de ella y que fluye a una dirección determinada (Alves et al. 2010). Se creó el archivo *shapefile* con los polígonos de las unidades hidrográficas delimitadas a través de la herramienta Raster To Polygon. Por último, se llevó a cabo la codificación de cuencas hidrográficas siguiendo las recomendaciones de Galvão y Meneses (2005).

Debido a la presencia de unidades de producción de trucha arcoíris (UPT) no nativa en las cuencas de interés, se definieron los sitios de prospección y recolecta en lugares donde la distribución natural de truchas nativas no compartiera un mismo sistema de corrientes con las UPT y así disminuir la posibilidad de capturar escapes de trucha arcoíris.

Las técnicas de recolecta fueron manuales, utilizando redes de cuchara, chinchorro y anzuelos, posteriormente se utilizó un generador de corriente (Honda EUi-10) como sustituto de electropesca. Los sitios de prospección fueron georreferenciados, utilizando un equipo de GPS (GARMIN 62SC).

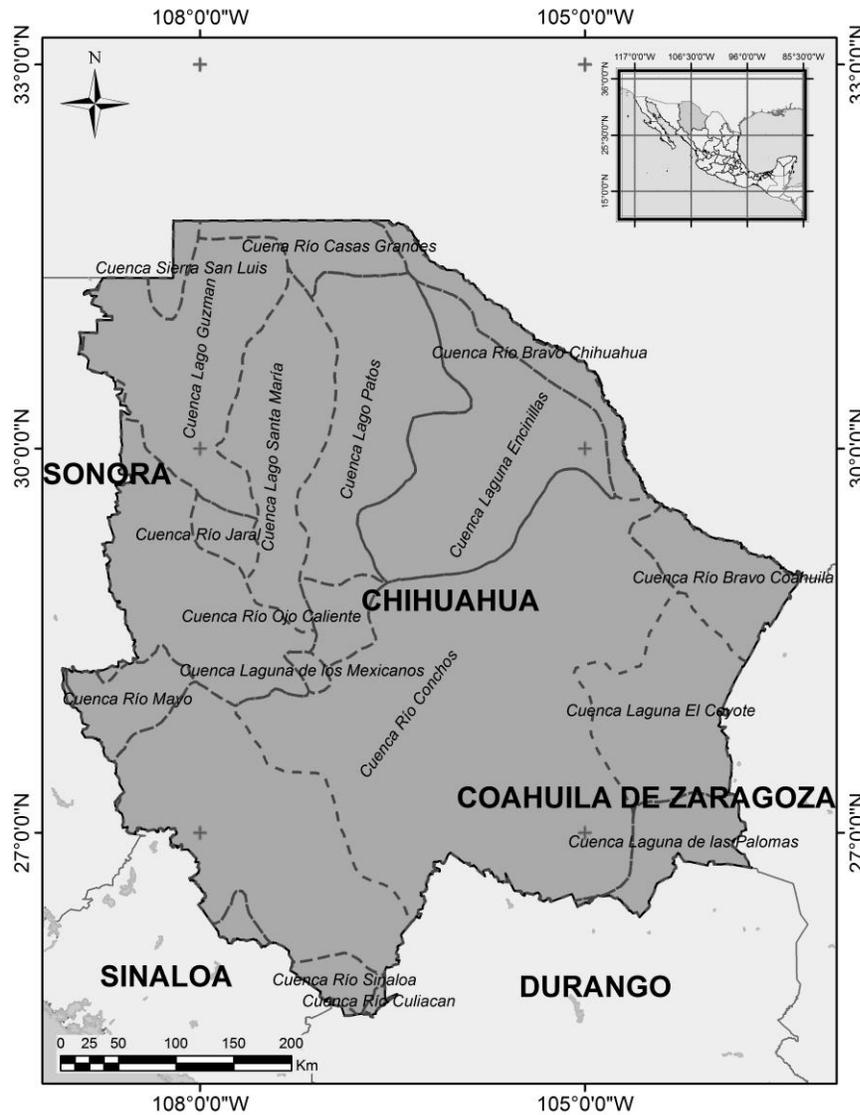


Figura 1. Localización geográfica de las cuencas de los ríos Yaqui y Fuerte exploradas en este estudio.

#### *Determinación de la identidad genética*

Se extrajo el ADN genómico de una submuestra de 144 individuos recolectados en diversos afluentes de las cuencas del río Yaqui-río Tomochic y el río Fuerte. La extracción se realizó utilizando un sistema semiautomático de membranas (DNeasy 96 Tissue Kit) en un BioRobot 3000 (Qiagen Inc.).

Todas las muestras se genotificaron con un panel de 95 polimorfismos nucleotídicos simples (SNPs). Estos SNPs fueron desarrollados para la trucha arcoíris (*O. mykiss*; (Aguilar y Garza 2008, Campbell et al. 2009, Abadía-Cardoso et al. 2011) y validados en múltiples poblaciones de truchas nativas de la SMO (Abadía-Cardoso et al. 2015) incluyendo las cuencas donde fueron colectadas las muestras del presente capítulo.

Primero se llevó a cabo un PCR de pre-amplificación (las condiciones pueden ser consultadas con los autores) y posteriormente la genotificación que se llevó a cabo

usando ensayos de discriminación alélica de la nucleasa 5' (TaqMan™; *Life Technologies*) en arreglos dinámicos de genotipificado de SNPs 96.96 en un sistema EP1 (*Fluidigm Corporation*) utilizando los protocolos recomendados por el fabricante.

Los genotipos generados fueron comparados con los genotipos previamente obtenidos de poblaciones nativas de los ríos Yaqui, Conchos, Fuerte, Sinaloa, Culiacán, San Lorenzo y Piaxtla (Abadía-Cardoso et al. 2015, Tabla 1). Además, se incluyeron cuatro poblaciones de trucha arcoíris de criaderos localizados en ríos donde se han reportado truchas nativas en la SMO y una del Centro Trutícola Guachochi, Chihuahua. Esta última población corresponde a un lote presumiblemente de trucha nativa que resultó contaminado por trucha arcoíris (Abadía-Cardoso et al. 2015). Por último, se incluyeron los genotipos de cuatro sepas de trucha arcoíris de criadero de California que se conocen por exportar huevos a otros criaderos (Pearse y Garza 2015; Tabla 1).

Tabla 1. Poblaciones utilizadas para el análisis de determinación de identidad genética. Los grupos de organismos evaluados corresponden a los números del 1 al 5. N: número de individuos analizados; He: Heterocigosidad esperada; Ho: Heterocigosidad observada.

Núm	Población	N	He	Ho
1	Río Yaqui- Río Sirupa- Río Tomochic- Arroyo La Tinaja	17	0.005	0.006
2	Río Yaqui- Río Sirupa- Río Tomochic- Arroyo Rosacachi	10	0.005	0.006
3	Río Yaqui- Río Sirupa- Río Tomochic A	20	0.043	0.020
4	Río Yaqui- Río Sirupa- Río Tomochic B	44	0.021	0.016
5	Río Fuerte- Río Chinatu- Arroyo San José	50	0.079	0.071
6	Río Yaqui- Río Bavispe- Arroyo Los Cuarteles	25	0.005	0.004
7	Río Yaqui- Río Sirupa- Río Papagochi- Arroyo El Salto	33	0.022	0.019
8	Río Conchos- Río El Porvenir- Arroyo San Antonio- Arroyo El Molino	21	0.007	0.003
9	Río Fuerte- Arroyo Santa Rosalia- Arroyo Las Truchas	29	0.061	0.061
10	Río Sinaloa- Río San José- Río Basonopira- Arroyo Potrero	26	0.007	0.002
11	Río Sinaloa- Río Mohinora- Arroyo Soldado	38	0.107	0.105
12	Río Culiacán- Arroyo Santa Rosa	21	0.119	0.109
13	Río San Lorenzo- Río Los Remedios- Arroyo Las Truchas	27	0.081	0.083
14	Río Piaxtla- Arroyo de la Plazuela- ejido El Maguey	33	0.049	0.050
15	Río Yaqui- Río Bavispe- Criadero Arroyo Yenquin	24	0.346	0.339
16	Río Yaqui- Río Bavispe- Arroyo El Arco- Criadero Truchas la Presita	19	0.332	0.343
17	Río Fuerte- Río Ateros- Arroyo Aparique criadero abandonado	7	0.277	0.284
18	Río San Lorenzo- Río Los Remedios- Criadero Piscicultura Vencedores	18	0.359	0.367
19	Criadero Centro trutícola Guachochi	73	0.332	0.362
20	Battle Creek- Cepa Coleman	46	0.338	0.344
21	British Columbia- Cepa Kamloops	47	0.225	0.221
22	Eagle Lake- Cepa Eagle Lake	47	0.246	0.239
23	Upper American River- Cepa Mt. Shasta	47	0.310	0.312

La variabilidad genética dentro de las poblaciones fue estimada a partir de la heterocigosidad esperada ( $H_E$ ) y la observada ( $H_O$ ) utilizando el programa GENEPOP (Rousset 2008). Múltiples análisis fueron aplicados para determinar el origen y las relaciones genéticas de los organismos. Se determinó la ancestría de los individuos a partir de un análisis Bayesiano de agrupamiento implementado en el programa STRUCTURE 2.2 (Pritchard et al. 2000). Se evaluaron valores de  $K = 2 - 7$ , con cinco iteraciones cada uno. Los resultados se organizaron y visualizaron con los programas CLUMPP (Jakobsson y

Rosenberg 2007) y DISTRUCT (Rosenberg 2004). Además, se llevó a cabo un Análisis de Componentes Principales (ACP) usando el paquete adegenet 1.3-4 (Jombart 2008) en el programa R (R Development Core Team 2011). Por último, se generó un dendrograma (representación gráfica de datos genéticos en forma de árbol) sin raíz utilizando el método del vecino más cercano y distancias genéticas de Cavalli-Sforza y Edwards con el programa PHYLIP (Felsenstein 2005). Los loci que fallaron para una población completa fueron eliminados de forma que el dendrograma incluyó 89 SNPs y 23 poblaciones.

### *Parámetros reproductivos*

Los organismos recolectados (Tabla 2) fueron trasladados al Centro Trutícola Guachochi, donde fueron aclimatados y liberados en dos estanques de concreto previamente acondicionados. En cada estanque se introdujo un lote de peces de acuerdo al origen.

La revisión de la madurez gonádica de los organismos colectados se llevó a cabo al inicio de la época de invierno, ya que se ha observado que las características climáticas en México propician la reproducción de otros salmónidos como la trucha arcoíris entre los meses de noviembre a febrero (Ingle de la Mora et al. 2009). Una vez seleccionados los organismos maduros, se procedió a obtener las ovas y el semen, y se llevó a cabo la fecundación artificial. Los desoves se realizaron en tres tiempos para los reproductores del río Yaqui (2013, 2014 y 2015) y dos para los del río Fuerte (2015 y 2016).

Las ovas fertilizadas fueron colocadas en charolas de incubación. La totalidad de ovas obtenidas fue contada manualmente en la etapa de huevo oculado. La mortalidad por estadio de desarrollo fue retirada y registrada. Se obtuvo una submuestra de 142 óvulos de cuatro hembras (dos por cuenca de origen) para evaluar el diámetro de ova (mm) utilizando un microscopio binocular estereoscópico (Olympus SZ61) y el programa *Image-Pro Plus Media Cybernetics* v6.2 siguiendo la metodología reportada en Ingle de la Mora et al. (2009).

Los parámetros reproductivos evaluados de los machos fueron: peso pre y post-espermiación (g), y peso teórico del esperma (peso pre - peso post-espermiación (g)). Los parámetros reproductivos evaluados de las hembras fueron: fecundidad absoluta (número de ovas por hembra), fecundidad relativa (número total de ovas/peso post-desove (g)), diámetro de ova (mm), porcentaje del huevo oculado (número de huevos oculados/número total de huevos obtenidos X 100), porcentaje de eclosión (número de alevines obtenidos/número total de huevos obtenidos X 100). La edad del embrión se determinó a partir de la “Unidad Térmica”, que equivale a un grado de temperatura sobre cero durante un periodo de veinticuatro horas. La suma acumulativa de la temperatura media diaria por el número de días para alcanzar la eclosión (grados día) define el tiempo que se necesita para que el embrión alcance su desarrollo (Blanco 1995). Los datos obtenidos se expresaron en grados día (de huevo verde a oculado y de huevo oculado a eclosión). Los desoves se clasificaron de acuerdo al periodo en el que se realizó cada uno y de acuerdo a la cuenca de origen. El desempeño reproductivo se evaluó sometiendo las bases de datos a pruebas de normalidad (Shapiro-Wilk) y homogeneidad (Test de Barlett) y se aplicó un análisis de varianza de dos factores con nivel de confianza del 95%. El análisis estadístico se realizó con el software Statistica v10.

## RESULTADOS

### *Prospecciones y colectas de truchas nativas*

Las colectas de truchas nativas se realizaron exitosamente en ocho arroyos localizados en las cuencas de los ríos Yaqui y Fuerte, en el periodo de 2013 - 2015 (Tabla 2). En la cuenca del río Yaqui se colectaron 104 organismos en seis arroyos localizados en la subcuenca del río Tomochic (Fig. 2) y en la cuenca del río Fuerte se colectaron 82 organismos en dos arroyos localizados en las subcuencas de los ríos Chinatú y río Verde (Fig. 3).

Tabla 2. Truchas nativas colectadas en las cuencas de los ríos Yaqui y Fuerte, en el estado de Chihuahua, México. N: número de organismos colectados.

<b>Año</b>	<b>Mes</b>	<b>Cuenca</b>	<b>Subcuenca</b>	<b>Arroyo</b>	<b>N</b>
2013	Abril	Río Yaqui	Río Tomochic	El Piñón	5
2013	Abril	Río Yaqui	Río Tomochic	La Tinaja	10
2013	Junio	Río Yaqui	Río Tomochic	La Tinaja	7
2013	Agosto	Río Yaqui	Río Tomochic	El Piñón	2
2013	Agosto	Río Yaqui	Río Tomochic	Rosacachi	12
2013	Septiembre	Río Yaqui	Río Tomochic	El Carrizo	13
2014	Julio	Río Yaqui	Río Tomochic	Ochocachi	8
2014	Julio	Río Yaqui	Río Tomochic	Erepreachi	37
2014	Diciembre	Río Yaqui	Río Tomochic	Ochocachi	3
2014	Diciembre	Río Yaqui	Río Tomochic	Erepreachi	7
2014	Diciembre	Río Fuerte	Río Chinatú	San José	23
2015	Diciembre	Río Fuerte	Río Chinatú	San José	56
2015	Diciembre	Río Fuerte	Río Verde	-	3

Se registró una sobrevivencia al final de periodo experimental de 46% del total de las truchas nativas colectadas en las dos cuencas. La causa principal de la mortalidad fueron las lesiones causadas por los anzuelos durante la recolecta, contingencias durante el manejo de los organismos y la poca aceptación de alimento suministrado.

De acuerdo al análisis de los sitios de recolecta y de la base de datos de las UPT en el estado de Chihuahua, no se registraron UPT cercanas a los sitios de recolecta en la cuenca del río Yaqui. Por otro lado, se observaron tres UPT en la cuenca del río Fuerte (Fig. 3), sin embargo, estas no comparten la misma corriente de agua con los sitios de recolecta, los cuales se ubican en altitudes superiores a 2400 msnm en contraste con las UPT que se localizan a una altitud aproximada de 1994 msnm.

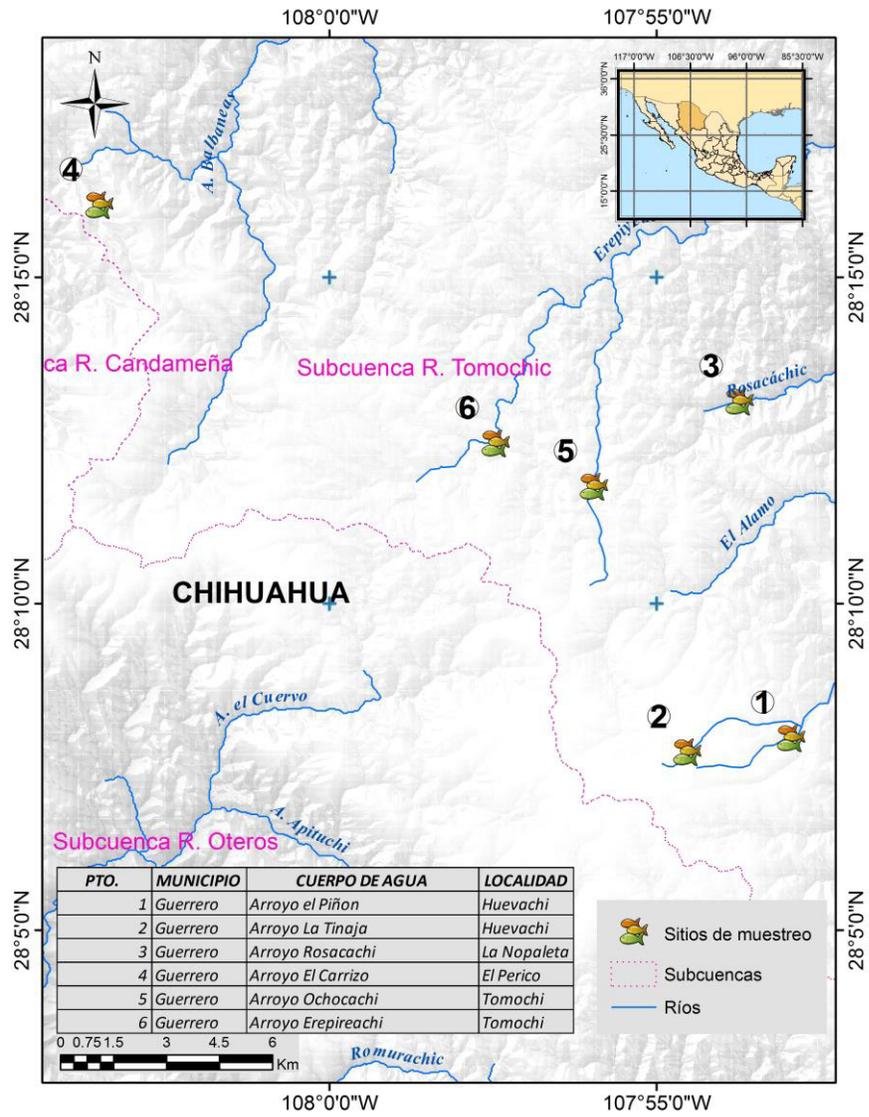


Figura 2. Sitios de recolecta de trucha nativa en la subcuenca del río Tomochic, cuenca del río Yaqui.

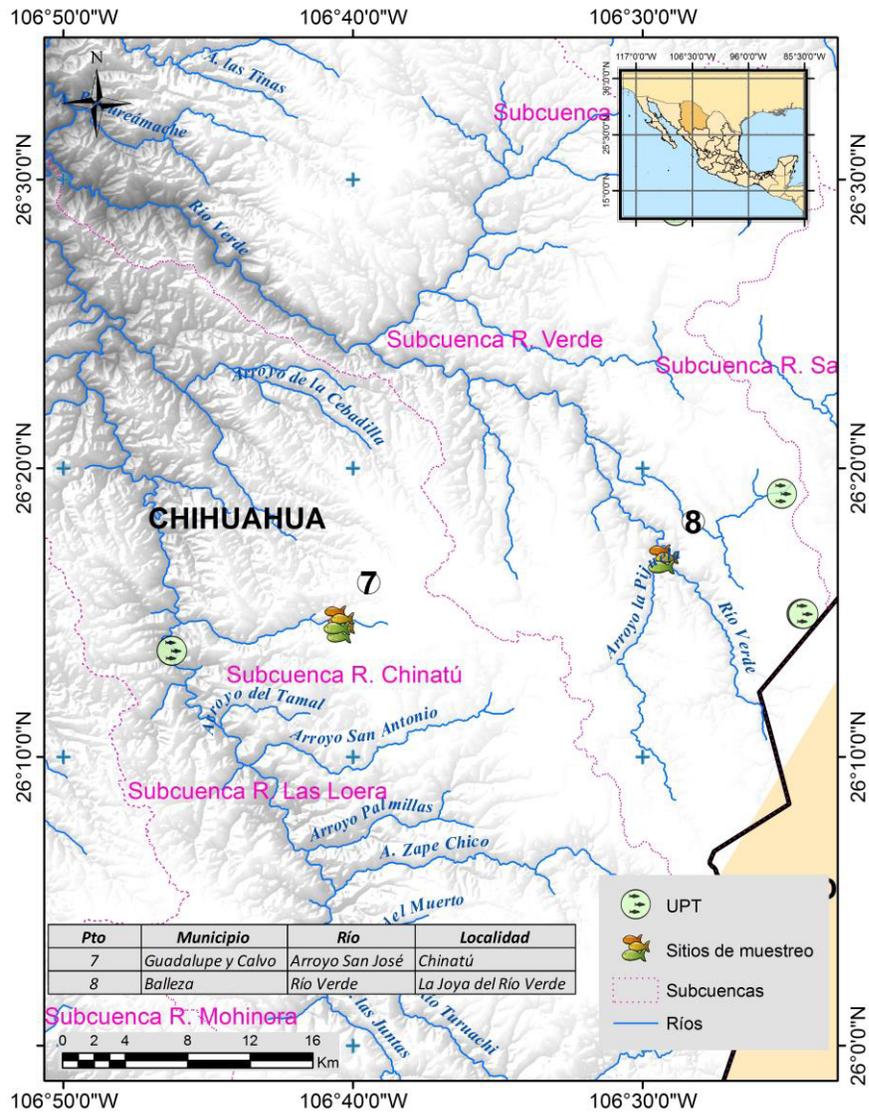


Figura 3. Unidades de Producción de Trucha arcoíris (UPT) en referencia a los sitios de recolecta de trucha nativa en la cuenca del río Fuerte.

#### Determinación de la identidad genética

Todos los 144 organismos de la submuestra fueron genotipados exitosamente con el panel de 95 SNPs. La heterocigosidad observada de las truchas evaluadas fue baja en comparación a las poblaciones de criadero pero similar a las poblaciones nativas, siendo la más baja en el río Yaqui-arroyo Rosacachi ( $H_o = 0.005$ ) y la más alta en el río Fuerte-arroyo San José ( $H_o = 0.079$ ; Tabla 1). Los resultados del análisis Bayesiano y del ACP indican que la mayoría de los organismos evaluados vienen de poblaciones nativas excepto por dos organismos, uno perteneciente al grupo Yaqui-Tomochic A y el otro al grupo Yaqui-Tomochic B que se agrupan con las truchas arcoíris de criadero (Figs. 4 y 5).

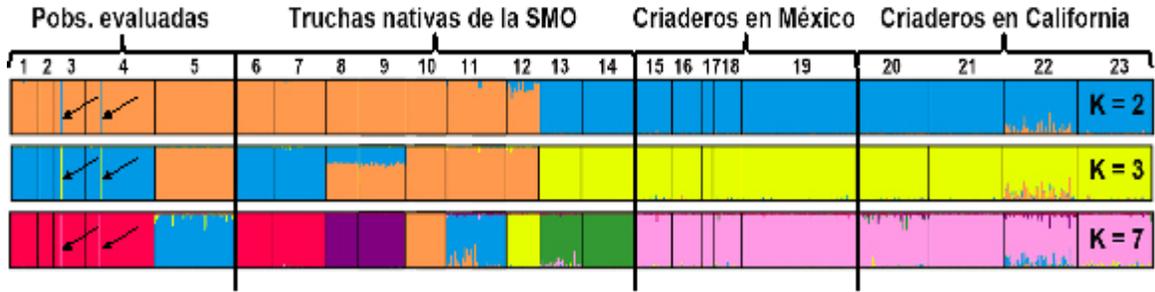


Figura 4. Estimación de la ancestría (representada por colores) de los 144 organismos evaluados (poblaciones 1 al 5) en comparación con organismos pertenecientes a nueve poblaciones de truchas nativas de diferentes cuencas (dos del río Yaqui (6 y 7), una del río Conchos (8), una del río Fuerte (9), dos del río Sinaloa (10 y 11), una del río Culiacán (12), una del río San Lorenzo (13) y una del río Piaxtla (14)), cinco poblaciones de trucha arcoíris de criaderos en México (15 al 19) y cuatro cepas de trucha arcoíris de criadero de California, E.U.A (20 al 23). Cada línea delgada vertical representa a un individuo y las líneas negras separan las diferentes localidades. Se muestra el patrón más frecuente de cinco iteraciones para los valores de  $K = 2, 3$  y 7. Las flechas señalizan a los organismos evaluados identificados como trucha arcoíris.

El resto de los organismos evaluados provenientes de los arroyos de la subcuenca río Tomochic se agrupan claramente con la población nativa del río Yaqui en ambos análisis. Por otro lado, los organismos colectados en el río Fuerte-arroyo San José muestran una afinidad mayor a las poblaciones de *O. chrysogaster* (Figs. 4 y 5).

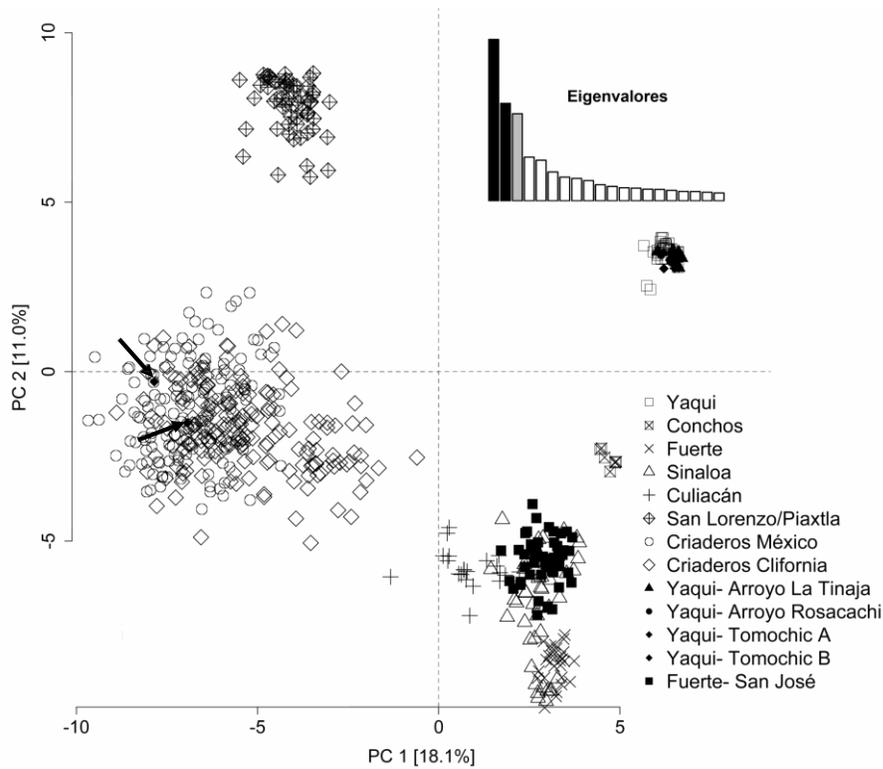


Figura 5. Análisis de Componentes Principales a partir de las frecuencias alélicas de 95 SNPs. Las flechas señalizan a los organismos evaluados identificados como trucha arcoíris.

Además, en el análisis Bayesiano se observa que los organismos del río Fuerte-arroyo San José se agrupan con la población nativa de *O. chrysogaster* del río Culiacán a valores altos de K (e. g. K = 7), sin embargo, en el ACP muestra una mayor proximidad a la población del río Sinaloa (Figs. 4 y 5).

Finalmente, los resultados del dendrograma son consistentes con lo observado en los análisis previos, es decir, los grupos evaluados pertenecientes a la cuenca del río Yaqui-río Tomochic se agruparon con las poblaciones nativas del río Yaqui y el grupo evaluado de la cuenca del río Fuerte- arroyo San José se asoció con la rama correspondiente a *O. chrysogaster*, específicamente a la población del río Culiacán al igual que en el análisis Bayesiano (Fig. 6).

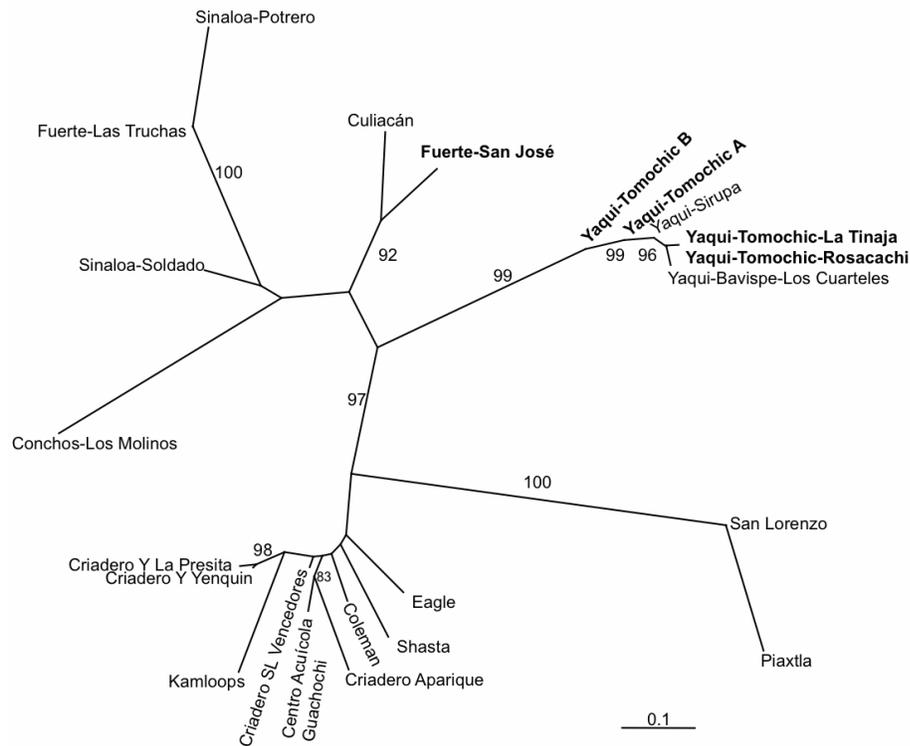


Figura 6. Dendrograma construido con el método del vecino más cercano a partir de 89 SNPs y utilizando distancias genéticas de Cavalli-Sforza y Edwards. Se muestran valores de bootstrap mayores al 80%. Los grupos de organismos evaluados se muestran en negritas.

### Parámetros reproductivos

La fecundación artificial de los organismos colectados en las cuencas de los ríos Yaqui y Fuerte se completó exitosamente. Se obtuvieron desoves y espermiaciones en tres tiempos para los reproductores del río Yaqui y en dos tiempos para los de la cuenca del río Fuerte (Tabla 3).

Tabla 3. Número de organismos utilizados en cada tiempo de reproducción para las cuencas de los ríos Yaqui y Fuerte.

	Río Yaqui						Río Fuerte			
	Primer tiempo	%	Segundo tiempo	%	Tercer tiempo	%	Primer tiempo	%	Segundo tiempo	%
Hembras desovadas	15	43	15	38	10	56	9	41	16	24
Machos espermeados	12	34	14	36	8	44	9	41	9	13
Inmaduros	8	23	10	26	0	0	4	18	42	63
<b>Total de organismos</b>	35		39		18		22		67	
<b>Porcentaje de sobrevivencia</b>	71		38		17		96		2	

Los machos de ambas cuencas utilizados en estas cruza presentaron un aumento en el peso corporal y peso teórico del esperma durante la temporada de reproducción, aunque los organismos del río Fuerte presentaron valores más bajos, siendo el organismo más pequeño de 10.7 g (Tabla 4).

Tabla 4. Valores obtenidos del peso pre-espermiación (Peso Pre), peso post-espermiación (Peso Post), peso teórico del esperma y número de machos utilizados en la fecundación de las hembras (n) durante el manejo reproductivo. Cada valor es la media  $\pm$  DE (desviación estándar).

Cuenca	Tiempo de espermiación	Peso Pre (g)	Peso Post (g)	Peso teórico esperma (g)	n
Yaqui	Primero	59.1 $\pm$ 23.4 (32.9-100.2)	58.2 $\pm$ 23.2 (32.3-99.2)	0.9 $\pm$ 0.2 (0.5-1.2)	12
Yaqui	Segundo	90.3 $\pm$ 30.6 (39.6-150.9)	89.6 $\pm$ 30.4 (39.3-149.7)	0.7 $\pm$ 0.5 (0.2-2)	14
Yaqui	Tercero	208.1 $\pm$ 102.3 (60.1-350)	207.0 $\pm$ 102.0 (59.9-349)	1.1 $\pm$ 0.6 (0.2-2)	8
Fuerte	Primero	35.8 $\pm$ 11.0 (24.7-51.6)	35.5 $\pm$ 11.1 (24-51.3)	0.4 $\pm$ 0.3 (0.1-1)	9
Fuerte	Segundo	56.1 $\pm$ 33.2 (10.7-112.8)	55.6 $\pm$ 32.9 (10.7-112.1)	0.5 $\pm$ 0.4 (0-1)	9
<b>Total</b>		85.8 $\pm$ 72.0 (10.7-350)	85.1 $\pm$ 71.7 (10.7-349)	0.7 $\pm$ 0.5 (0-2)	52

Los resultados muestran que el peso de las hembras de ambas cuencas está positivamente relacionado con la fecundidad absoluta pero negativamente relacionado con la fecundidad relativa ( $p < 0.05$ ). Se observaron diferencia estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ) con respecto a los valores de fecundidad relativa de las hembras de la cuenca del río Yaqui, siendo más altos en el primer desove con respecto a los del segundo y tercero.

Tabla 5. Parámetros reproductivos y biométricos de las hembras reproductoras del río Yaqui. Cada valor es la media  $\pm$  DE (desviación estándar). Mismos subfijos no representan variaciones significativas, ( $p > 0.05$ ) diferentes subfijos, representan variaciones significativas ( $p < 0.05$ ).

	<b>Primer tiempo</b> <b>n= 15</b>	<b>Segundo tiempo</b> <b>n= 15</b>	<b>Tercer tiempo</b> <b>n= 10</b>
Peso pre-desove (g)	42.2 $\pm$ 11.3 (28.1 - 71.8)	50.2 $\pm$ 18.5 28.1 - 100.2	91.4 $\pm$ 27.6 49.1 - 131.4
Peso post-desove (g)	34.1 $\pm$ 10.2	41.6 $\pm$ 14.7 (26.0 - 79.1)	72.2 $\pm$ 25.1 (41.7 - 118.5)
Longitud estándar (cm)	13.4 $\pm$ 1.4 (11.8 - 17.1)	14.6 $\pm$ 1.7 (12.0 - 18.0)	17.3 $\pm$ 2.1 (14.3 - 21.0)
Fecundidad absoluta (Número de ovas)	215 $\pm$ 39b (143 - 309)	200 $\pm$ 103b (67 - 484)	316 $\pm$ 90c (182 - 522)
Fecundidad relativa (Número de ovas/g)	6 $\pm$ 2a (4 - 6)	5 $\pm$ 2b (3 - 6)	5 $\pm$ 1b (4 - 4)
Peso de ova (g)	ND	0.04 $\pm$ 0.01 (0.02- 0.05)	0.06 $\pm$ 0.01 (0.03 - 0.08)
Díámetro de ova (mm)	ND	ND	4.0 $\pm$ 0.19 (3.5 - 4.7)
Huevo oculado (%)	83.5 $\pm$ 14.5 (52.9 - 99.1)	76.2 $\pm$ 26.6 (0 - 96.6)	70.6 $\pm$ 42.2 (0 - 100)
Eclosión (%)	83.0 $\pm$ 14.5 (52.9 - 99.1)	74.6 $\pm$ 27.1 (0 - 96.6)	70.6 $\pm$ 42.2 (0 - 100)
Grados día de huevo verde a oculado (grados día)	205.7 $\pm$ 21.8 (171.6 - 232.2)	197.7 $\pm$ 7.8 (183.0 - 206.4)	178.0 $\pm$ 7.93 (171.0 - 190)
Grados día de huevo oculado a eclosión (grados día)	390.2 $\pm$ 11.2 (374.1-425.1)	370.7 $\pm$ 40.5 (317.2-425.7)	323.0 $\pm$ 56.2 (194.0 - 388.0)

Los porcentajes de huevo oculado y eclosión obtenidos en el primer desove fueron más altos con respecto a los del segundo y tercer desoves, aunque el peso y talla fueron mayores (Tabla 5).

Tabla 6. Parámetros reproductivos y biométricos de las hembras reproductoras del río Fuerte. Cada valor es la media  $\pm$  DE (desviación estándar). Mismos subfijos, no presentaron variación significativa  $P > 0.05$ , diferentes subfijos, mostraron variación significativa  $p < 0.05$ .

	Primer tiempo n= 9	Segundo tiempo n= 16
Peso pre-desove (g)	40.1 $\pm$ 19.9 (15.8 - 73.7)	67.8 $\pm$ 27.8 (34.3 - 129.9)
Peso post-desove (g)	34.9 $\pm$ 18.2 (13.3 - 71.0)	57.1 $\pm$ 25.4 (28.6 - 113.9)
Longitud estándar (cm)	13.4 $\pm$ 2.2 (9.7 - 17.1)	16.1 $\pm$ 2.2 (12.8 - 20.0)
Fecundidad absoluta (Número de ovas)	161 $\pm$ 60a (84 - 313)	280 $\pm$ 106b (72 - 464)
Fecundidad relativa (Número de ovas / g)	5 $\pm$ 2b (4 - 6)	5 $\pm$ 3b (3 - 4)
Peso de ova (g)	0.03 $\pm$ 0.02 (0.01 - 0.06)	0.04 $\pm$ 0.03 (0.02 - 0.14)
Diámetro de ova (mm)	3.8 $\pm$ 0.17 (3.1 - 4.4)	3.8 $\pm$ 0.17 (3.1 - 4.4)
Huevo oculado (%)	77.3 $\pm$ 34.1 (0 - 100)	92.9 $\pm$ 7.7 (77.7 - 99.8)
Eclosión (%)	73.6 $\pm$ 34.7 (0 - 100)	92.1 $\pm$ 7.7 (77.7 - 99.8)
Grados día de huevo verde a oculado (grados día)	189.6 $\pm$ 12.3 (171.0 - 207.4)	177 $\pm$ 13.6 (171.0 - 203.2)
Grados día de huevo oculado a eclosión (grados día)	345.1 $\pm$ 28.5 (292.8 - 393.7)	351.8 $\pm$ 21.9 (319.2 - 387.6)

Las hembras del río Fuerte desovadas presentaron valores promedio de fecundidad absoluta y relativa mayores en 2016 con respecto a las del 2015, en contraste, la fecundidad relativa no presentó diferencias estadísticamente significativas ( $P > 0.05$ ) entre el primero y segundo tiempo. Además, los porcentajes de huevo oculado y de eclosión fueron mayores en las hembras desovadas en el 2016 con respecto a las del 2015 (Tabla 6).

## DISCUSIÓN

### *Prospecciones y colectas de truchas nativas*

En México se cuenta con limitada información geográfica de unidades hidrográficas (ver Hernández-Guzmán y Ruiz-Luna Capítulo 2, esta obra), es por esto que los resultados del presente trabajo ayudan a minimizar este requerimiento para las cuencas del estado de Chihuahua. El procedimiento descrito para determinar los sitios óptimos de recolecta se eligió con base en estudios desarrollados en diferentes países de Sudamérica (Aguirre et al.

2003; Rinner et al. 2014) y México (Hendrickson et al. 2006; Ruiz-Luna et al. 2014). En este trabajo, el uso de los datos altimétricos del MDE de 15 m de resolución espacial y la cartografía validada de cuencas hidrográficas disponible de forma oficial nos ayudó en la identificación de los sitios de prospección de la trucha nativa en las cuencas seleccionadas. Es importante resaltar que el establecer unidades hidrográficas en este estudio tuvo como función principal constituir unidades planificadoras, esto es que la delimitación del sistema hidrográfico nos ayudó a discriminar los sitios en donde las UPT tienen influencia directa en la recoleta de organismos.

#### *Determinación de la identidad genética*

El uso de análisis genéticos para la identificación del stock o población de origen de algún individuo es un método altamente eficaz, ya que cada organismo tiene una marca genética única. Estos métodos se han utilizado por décadas en la determinación de la identidad genética en pesquerías y acuicultura (i.e. Pérez y García-Vázquez 2004; Clemente et al. 2014; Hoareau et al. 2015). Las herramientas genéticas utilizadas en este estudio nos permitieron corroborar de manera precisa la identidad nativa de los organismos utilizados en el cultivo experimental. Los resultados muestran que la mayoría de los organismos colectados pertenecen al linaje genético nativo de la cuenca en la que fueron colectados. Únicamente dos organismos fueron identificados como trucha arcoíris exótica, los cuales no mostraron mezcla genética por lo tanto, al menos en el momento de la recolecta no hibridaron. Es importante mencionar que estos organismos se colectaron en la cuenca del río Yaqui-río Tomochic a pesar de que el análisis de los sitios de recolecta y la base de datos de las UPT no mostraran UPT cercanas a los sitios de recolecta en esta cuenca. Una posible explicación es que la base de datos no esté actualizada y haya más granjas de cultivo de trucha arcoíris establecidas en estas cuencas que las registradas, por lo tanto, una mayor probabilidad de escapes cerca de los sitios de recolecta. También es posible que exista translocación humana de trucha arcoíris de forma activa en la zona. Por otro lado, es conocida la gran capacidad de las truchas para migrar y trasladarse grandes distancias (Shapovalov y Taft 1954), por lo tanto, es posible que estos animales hayan viajado desde otras áreas donde hay UPT hasta los sitios de recolecta, sin embargo, esto depende de la conectividad física entre afluentes (ver Hernández-Guzmán y Ruiz-Luna capítulo 2 en esta obra). Otra posibilidad es que a pesar de que los sitios de recolecta de ejemplares vivos de trucha nativa se encontraban fuera de las zonas de cultivo de trucha arcoíris, la logística para su captura requirió movilizarse por zonas de difícil acceso y frecuentemente a días de distancia caminando entre una zona y otra. Con la finalidad de asegurar la sobrevivencia de los organismos mientras se concluía la recolecta, los ejemplares se acopiaron en un estanque de una granja de cultivo de trucha arcoíris, por lo que se presume que algunos animales saltaron al estanque de trucha nativa contaminando la muestra.

#### *Parámetros reproductivos*

En el presente estudio, se evaluaron los parámetros reproductivos de truchas nativas colectadas en las cuencas de los ríos Yaqui y Fuerte en Chihuahua, México, donde se incluyeron como reproductores a 65 hembras y 52 machos (relación de 1.3:1), esta proporción es muy similar al óptimo que propone Erdahl (2009), quien indica que el recomendable de la relación macho:hembra en el apareamiento de los salmónidos en cautiverio es de 1:1 para prevenir la pérdida de variabilidad genética.

Los periodos de desove para los peces de ambas cuencas se realizaron entre los meses de diciembre a marzo, incrementando su intensidad para ambas poblaciones en el mes de enero. Lo anterior coincide con un decremento de la temperatura del agua de 1 a 2°C y con un incremento paulatino de la misma durante los tres meses siguientes ya cuando las crías iniciaron su alimentación en condiciones naturales. El periodo de reproducción coincide con el reportado por Ruiz-Campos (1993) para la subespecie de trucha arcoíris *Oncorhynchus mykiss nelsoni* aunque el pico de desove se da en febrero.

Las tallas mínimas de reproducción de las hembras de las poblaciones de las cuencas Yaqui y Fuerte (9.7 cm y 11.8 cm respectivamente) son similares a las reportadas para *O. m. nelsoni*, la cual presenta madurez sexual entre los 103 y 112 mm a partir del primer año de vida (Ruiz-Campos 1993). La madurez sexual de los machos se presenta a menor talla (8.8 cm para el río Fuerte y 11.2 cm para el río Yaqui). La talla de primera maduración puede diferir ya que éstos ejemplares proceden de poblaciones naturales y durante la recolecta se procuró seleccionar los animales más grandes, sin embargo, este proceder genera mucha varianza, así que hay que ser precavidos en establecer las tallas de primera madurez y tomar en cuenta el tamaño de la muestra.

Las hembras de los ríos Yaqui y Fuerte presentaron la misma tendencia con respecto a la fecundidad absoluta, incrementando el número de huevos cuando incrementa el peso y lo inverso ocurrió con la fecundidad relativa, la cual disminuye al incrementar la talla. Este patrón ha sido referenciado ampliamente en *O. mykiss* (Bromage y Cumaranatunga 1988; Bromage 1992). La fecundidad absoluta y relativa del primer desove de las hembras del río Yaqui presentaron diferencias significativas con respecto a los dos desoves subsiguientes y con respecto a los valores obtenidos para las hembras del río Fuerte. La cautividad del lote y la dificultad para que éste consumiera el alimento comercial pudo intervenir para disminuir la cantidad de huevos producidos en los siguientes desoves. Los reportes de fecundidad en *O. mykiss* son sumamente variables oscilando entre los 900-4600 huevos/kg hembra y un diámetro promedio de 3-5 mm. El diámetro promedio del huevo registrado para ambas poblaciones de trucha nativa se encuentra dentro del rango reportado para *O. mykiss* (Bromage et al. 1990; Bromage et al. 1992; Estay et al. 1994) por lo que el número de huevos producidos y el diámetros de los mismos sugiere que se ha privilegiado la reproducción más que el crecimiento, es decir, que el crecimiento corporal disminuye durante la gametogenesis, lo cual es un fenómeno común en metazoarios.

Con respecto al porcentaje de huevo oculado y el porcentaje de eclosión, se encontró que la mortalidad aumenta con el tiempo de cautiverio, esto puede atribuirse a problemas con la calidad de alimento y posiblemente a la calidad de los gametos. En este estudio, se registró una tasa de eclosión del 100%, pero también una tasa de mortalidad del 100%. No se encontró diferencia significativa en los grados día requeridos para el desarrollo del huevo a oculación y a eclosión entre las poblaciones de trucha los ríos Yaqui y Fuerte.

Los resultados obtenidos del peso pre-espermación y desove de los organismos de trucha nativa durante el manejo reproductivo (Tablas 4-6) contrastan considerablemente con lo reportado previamente para la trucha arcoíris. Por ejemplo, Reyes y Ortega (1998) reportan valores en los machos con rangos de peso que van de 236 a 2,500 g, y para las hembras de 195 a 3,500 g; Özgür y Bayir (2013) reportan pesos de 3,679 a 3,810 g; y Serezli et al. (2010) de 787 a 2,156 g. Este contraste de valores entre ambas especies puede estar relacionado con el hecho de que la trucha arcoíris lleva más de 100 años de domesticación, mientras que este es el primer trabajo de domesticación y manejo reproductivo para esta población de río Fuerte y para el linaje del río Yaqui.

Los organismos recolectados de la cuenca del río Yaqui, registraron en promedio los valores más altos de desoves, alcanzando en el tercer tiempo el 100%, en contraste con los de la cuenca del río Fuete, los cuales tuvieron un valor más alto en el primer tiempo (82%) que en el segundo (37%) considerando machos y hembras. Estos resultados se atribuyen a que los organismos no habían alcanzado la madurez gonádica, que en la recolecta se obtuvieron juveniles, o que los machos pudieron desfasarse y no ser sincrónicos con la maduración de las hembras. Diferentes aspectos de la biología reproductiva de truchas *O. mykiss* de cultivo difieren entre machos y hembras, por ejemplo, la edad a la cual maduran sus gametos, siendo que los machos maduran al año de edad y las hembras a los dos años, igualmente, las hembras maduran una sola vez por año y los machos lo hacen varias veces durante un ciclo anual (Bastardo 1999).

## CONCLUSIONES

La posibilidad de conocer y controlar el proceso reproductivo e iniciar su caracterización es primordial para la domesticación de las especies. Generalmente, el cautiverio introduce variaciones con respecto a las condiciones naturales que no siempre permiten la reproducción exitosa. En el presente trabajo, el inicio de la caracterización reproductiva y la certidumbre del origen de los reproductores justifica la continuidad de los estudios a fin de propiciar la utilización de la acuicultura como una herramienta de protección de la biodiversidad. La incorporación de nuevas técnicas genéticas al desarrollo de la biotecnología de cultivo de las truchas nativas permitirá optimizar espacios y ahorrar tiempo para disponer de un paquete tecnológico que facilite las decisiones de repoblamiento o reservas. Los resultados de este estudio permiten asegurar la incorporación de políticas ambientales y productivas que prevengan la pérdida de la biodiversidad de salmónidos en México.

## AGRADECIMIENTOS

La realización de este trabajo fue posible gracias a los esfuerzos de todas las personas que forman parte del grupo binacional “Truchas Mexicanas” y con los que estamos muy agradecidos. Además, agradecemos al personal de INAPESCA (T. Duran Moreno, J. Pérez López, M. Y. Mena Carballar, B. Olalde Ramírez y C. Antonio Cano) por el apoyo logístico y operativo, y a los miembros del Molecular Ecology and Genetic Analysis Team del Southwest Fisheries Science Center en Santa Cruz por su asistencia en los análisis de laboratorio. Este trabajo se realizó con el financiamiento de INAPESCA y con el fondo de fundación Produce Chihuahua folio 08-2011-0016.

## REFERENCIAS

- Abadía-Cardoso, A., A.J. Clemento and J.C. Garza. 2011. Discovery and characterization of single-nucleotide polymorphisms in steelhead/rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. *Molecular Ecology Resources*. 11: 31-49.
- 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.
- Aguilar, A. and J.C. Garza. 2008. Isolation of 15 single nucleotide polymorphisms from coastal steelhead, *Oncorhynchus mykiss* (Salmonidae). *Molecular Ecology Resources*. 8: 659-662.
- Aguirre, M., H. Torres y R. Ruiz. 2003. *Documento Guía para la Delimitación y*

- Codificación de las Unidades Hidrográficas del Perú*. SIG Intendencia de Recursos Hídricos del INRENA. Perú.
- Alves, T, P. Oliveira, D. Rodrigues e F. Ayres. 2010. Delimitação automática de bacias hidrográficas utilizando dados SRTM. *SciELO*. 30: 46-57.
- Arredondo-Figueroa, J.L. 1983. Especies animales acuáticas de importancia nutricional introducidas en México. *Biotica*. 9: 23-39.
- Bastardo, H. 1999. Efecto del alimento sobre algunos aspectos reproductivos de la trucha arcoíris, *Oncorhynchus mykiss*, en un criadero venezolano. *Nutrición*. 49: 367-372.
- Blanco, C.M. 1995. *La trucha cría industrial*. Ed. Mundi prensa España. 489 p.
- Bromage N., J. Jones, C. Randall, M. Thrush, B. Davies, J. Springate, J. Duston and G. Barker. 1992. Broodstock management, fecundity, egg quality and the timing of egg production in the rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture*. 100:141-166.
- Bromage, N., P. Hardiman, J. Iones, J. Springate and V. Bye. 1990. Fecundity, egg size and total egg volume differences in 12 stocks of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* Richardson. *Aquaculture Research*. 21:269-284.
- Bromage, N. and P.R.C. Cumaranatunga. 1988. Egg production in the rainbow trout. En: Roberts R.J. and J.F. Muir (eds.). *Recent Advances in Aquaculture*. Croom Helm, London. pp. 63-138.
- Brown, D.E. 1994. *Biotic communities: southwestern United States and northwestern Mexico*. University of Utah Press, Salt Lake City.
- Camarena-Rosales, F., G. Ruiz-Campos, J. De La Rosa-Velez, R.L. Mayden, D.A. Hendrickson, A. Varela-Romero and F.J. García-De León. 2007. Mitochondrial haplotype variation in wild trout populations (Teleostei: Salmonidae) from northwestern Mexico. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*.18: 33-45.
- Campbell, N.R., K. Overturf and S.R. Narum. 2009. Characterization of 22 novel single nucleotide polymorphism markers in steelhead and rainbow trout. *Molecular Ecology Resources*. 9: 318-322.
- Clemento A.J., E.D. Crandall, J.C. Garza and E.C. Anderson. 2014. Evaluation of a single nucleotide polymorphism baseline for genetic stock identification of Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) in the California Current large marine ecosystem. *Fish bulletin*. 112: 112-130.
- Crawford, S.S. and A.M. Muir. 2008. Global introductions of salmon and trout in the genus *Oncorhynchus*: 1870-2007. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*. 18: 313-344.
- Erdahl, D.A. 2009. *Inland salmon broodstock management handbook*. United States Department of Interior, *Fish and Wildlife Service*, Report. 712 FW 1.
- 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.
- Espinosa, H., F.J. García-De León, G. Ruiz, A. Varela, I. Barriga, J.L. Arredondo, D. Hendrickson, F. Camarena y A.B. De los Santos C. 2007. Las Truchas Mexicanas: Peces Enigmáticos del Noroeste. Especies: *Revista sobre Conservación y Biodiversidad*, Naturalia A.C. Enero-Febrero: 8-14.
- Estay, F., N.F. Diaz, R Neira and X. Fernández. 1994. Analysis of reproductive performance of rainbow trout in a hatchery in Chile. *Progressive Fish Culturist*. 56: 244-249.
- Felsenstein, J. 2005. PHYLIP (Phylogeny Inference Package) version 3.6. *Distribuido por*

- el autor*. Department of Genome Sciences, University of Washington, Seattle.
- Galvão, W.S. e P.R. Meneses. 2005. Avaliação dos sistemas de classificação e codificadas bacias hidrográficas brasileiras para fins de planejamento de redes hidrométricas. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. 12: 2511-2518.
- García-De León, F.J., C.B. Dillman, A.B. De los Santos-Camarillo, A.L. George, F. Camarena-Rosales, I. de los A. Barriga-Sosa and R.L. Mayden. (*en preparación*). First steps towards the identification of evolutionarily significant units in Mexican native trout: an assessment of microsatellite variation.
- González, A.I., Y. Barrios, G. Born-Schmidt y P. Koleff. 2014. El sistema de información sobre especies invasoras, en R. Mendoza y P. Koleff (coords.), *Especies acuáticas invasoras en México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, pp. 95-112.
- Hendrickson, D.A., H. Espinosa Pérez, L.T. Findley, W. Forbes, J.R. Tomelleri, R.L. Mayden, J.L. Nielsen, B. Jensen, G. Ruiz Campos, A. Varela Romero, A. van der Heiden, F. Camarena and F.J. García-De León. 2002. Mexican native trouts: a review of their history and current systematic and conservation status. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*. 12: 273-316.
- 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. Mcnyset, 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.
- Hernández-Guzmán, R. y Ruiz-Luna, A. 2016. Caracterización paisajística e hidrológica de la Sierra Madre Occidental utilizando técnicas de Percepción Remota, Modelos Digitales de Elevación y Sistemas de Información Geográfica. En: Ruiz-Luna A. y F.J. García-De León (eds.) *La trucha dorada mexicana*. Cap. 2.
- Hoareau, T.B., A.W. Klopper, S.M.R. Dos Santos, C.J. Oosthuizen and P. Bloomer. Evaluating the resolution power of new microsatellites for species identification and stock delimitation in the Cape hakes *Merluccius paradoxus* and *Merluccius capensis* (Teleostei: Merlucciidae). *Journal of Fish Biology*. 86: 1650-1657.
- Ingle de la Mora, G., I. de los A. Barriga-Sosa, J. L. Arredondo-Figueroa, M. Chiharo y F. García-De León. 2009. Modificación de la época de desove de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) mediante la regulación del fotoperiodo. SAGARPA-CONACYT, No. 12386. *Informe Final*. México. 47 p.
- Jakobsson, M. and N.A. Rosenberg. 2007. CLUMPP: a cluster matching and permutation program for dealing with label switching and multimodality in analysis of population structure. *Bioinformatics*. 23: 1801-1806.
- Jombart, T. 2008. adegenet: a R package for the multivariate analysis of genetic markers. *Bioinformatics*. 24:1403-1405.
- Özgür, M.E. and I. Bayir. 2013. A research on reproduction performance for broodstocks of rainbow trout in a fish farm. *Biyoloji Bilimleri Araştırma Dergisi*. 6: 1-7.
- Pearse, D.E. and J.C. Garza. 2015. You can't unscramble an egg: Population Genetic structure of *Oncorhynchus mykiss* in the California Central valley inferred from

- combined microsatellite and single nucleotide polymorphism data. *San Francisco Estuary and Watershed Science*. 13: 2-17.
- Pérez, J. and E. García-Vázquez. 2004. Genetic identification of nine hake species for detection of commercial fraud. *Journal of Food Protection*. 67: 2792-2796.
- Pritchard, J.K., M. Stephens and P. Donnelly. 2000. Inference of population structure using multilocus genotype data. *Genetics*. 155: 945-959.
- R Development Core Team. 2011. *R: A language and environment for statistical computing*. The R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Reyes, B.H. and S.A.A. Ortega. 1998. Reproducción de la trucha arcoiris *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum, 1792) de 1985 a 1988 en la Piscifactoria Apulco Puebla, México. *Ciencia y Mar*. 4: 3-14.
- Rinner, J., M. Bruhn, F. Miralles-Wilhelm, and R. Muñoz-Castillo. 2014. Base de datos de hidrología analítica para América Latina y el Caribe. Parte 1. Departamento de Infraestructura y Medio Ambiente, Banco Interamericano de Desarrollo, IDB-TN-528. *Nota Técnica IDB-TN-528*. 54 p.
- Rosenberg, N.A. 2004. Distruct: a program for the graphical display of population structure. *Molecular Ecology Notes*. 4: 137-138.
- 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. 1993. Bionomía y ecología poblacional de la trucha arcoiris, *Oncorhynchus mykiss nelsoni* (Evermann), de la sierra San Pedro Mártir, Baja California, México. Universidad Autónoma de Nuevo León. *Tesis doctoral*. 223 p.
- Ruiz-Luna, A., C.A. Berlanga-Robles, R. Hernández-Guzmán y M.A. Escalante-Sánchez. 2014. Modelación de la distribución de truchas nativas de la Sierra Madre Occidental y su relación con la estructura del paisaje adyacente. Proyecto CONABIO JM058. *Reporte técnico*. México. 67 p.
- Serezli, R., S. Guzel and M. Kocabas. 2010. Fecundity and egg size of three salmonid species (*Oncorhynchus mykiss*, *Salmo labrax*, *Salvelinus fontinalis*) cultures at the same farm condition in North-Eastern Turkey. *Journal of Animal and Veterinary Advances*. 9: 576-580.
- Shapovalov, L. and L. Taft. 1954. The life histories of the steelhead rainbow trout (*Salmo gairdneri gairdneri*) and silver salmon (*Oncorhynchus kisutch*) with special reference to Waddell Creek, California, and recommendations regarding their management. *California Department of Fish and Game Fish Bulletin*. 98: 303.



## 13. La truticultura en México y sus implicaciones para las truchas nativas.

---

*Héctor Espinosa Pérez, Christian Lambarri Martínez, Armando Martínez Castro*

### INTRODUCCIÓN

Las truchas nativas mexicanas se dividen en dos linajes evolutivos, uno de ellos corresponde a la línea evolutiva de la trucha arcoíris *Oncorhynchus mykiss* y se distribuye en el norte de Baja California. El resto de las truchas nativas pertenecen al complejo de la trucha dorada mexicana *Oncorhynchus chrysogaster* y se reconocen alrededor de diez especies (varias aún no descritas) que se distribuyen en las cabeceras de varios ríos en Chihuahua, Durango, Nayarit, Sonora y Sinaloa (Ruiz-Campos et al. 2003).

En general, las truchas habitan ambientes fríos y templados, ya sea en latitudes septentrionales y altitudes superiores a 1000 msnm, por lo que las truchas mexicanas son las que se distribuyen naturalmente a menor latitud en el mundo. La capacidad de estas especies para habitar regiones más sureñas refleja la singularidad de su genética y de su historia evolutiva, razones suficientes para justificar su investigación y conservación. Los ríos en que se distribuyen estas especies son de acceso muy restringido debido a la altitud, orografía, humedad, vegetación y la poca urbanización, lo que ha dificultado su estudio y hasta cierto punto, la introducción descontrolada de otras especies de trucha.

La introducción de especies exóticas tiene consecuencias severas en cuanto a la pérdida de biodiversidad y la alteración de ecosistemas, tanto en ambientes terrestres como acuáticos. Entre las especies de mayor introducción a nivel mundial está la trucha arcoíris, que se cultiva oficialmente en México, Estados Unidos de América y en otros países tan lejanos como Australia. En Norteamérica, la introducción de truchas exóticas, ha ocasionado la pérdida de la identidad genética de varias poblaciones nativas, así como su desplazamiento ecológico debido al interés por cultivar trucha arcoíris (Escalante et al. 2014; Abadía-Cardoso et al. 2015).

Estas consecuencias pueden surgir en cualquier lugar en que se introducen especies exóticas, por lo que las especies nativas mexicanas también son susceptibles a la competencia, introgresión, depredación y desplazamiento que estas puedan ocasionar. El establecimiento de centros para el cultivo de trucha, aunque económicamente útil, es otro factor de riesgo para la diversidad acuática, especialmente donde existen poblaciones nativas de especies similares. El uso de truchas nativas en centros de acuicultura podría disminuir los daños a los ecosistemas acuáticos mexicanos.

#### *Taxonomía de las truchas mexicanas*

La familia Salmonidae se caracteriza por la inestabilidad de sus formas específicas, atribuida a su origen reciente y gran plasticidad (Fuster de Plaza 1949). En México se conocen varias formas nativas de truchas, pero formalmente se reconocen – y protegen – únicamente dos especies que se distribuyen en la región nor-occidental del país.

La trucha dorada mexicana *Oncorhynchus chrysogaster* se distribuye en las partes altas de las cuencas de los ríos Fuerte, Sinaloa y Culiacán en Chihuahua y Durango, México (Behnke y Tomelleri 2002). Además, se conocen otras formas no descritas aun,

incluidos en el complejo de *O. chrysogaster*, que presentan características morfológicas y genéticas claras de ese grupo (Ruiz-Campos et al. 2003; Abadía-Cardoso et al. 2015).

La otra especie, reconocida como *Oncorhynchus mykiss*, se divide en dos subespecies: *O. mykiss irideus*, que se distribuye desde la península de Alaska, EUA y Canadá a lo largo de las costas del Pacífico hasta la mitad del estado de Baja California, México, (aunque no se reconocen registros actuales en el país); y *O. mykiss nelsoni*, que se encuentra sólo en la vertiente occidental de la Sierra de San Pedro Mártir, en el río Santo Domingo (Ruiz-Campos 1989).

La trucha dorada mexicana *O. chrysogaster* Needham y Gard 1964, caracterizada por la coloración ventral dorada y naranja en ejemplares vivos, fue descrita a partir de una población del río Fuerte en Chihuahua. Esta especie es endémica de los ríos Fuerte, Culiacán y Sinaloa (Sinaloa y Sierra Tarahumara en Durango) (Camarena-Rosales et al. 2008), pero sus poblaciones se consideran amenazadas. Su estatus de riesgo se debe principalmente a la hibridación y a otras interacciones negativas con la trucha arcoíris (que ha sido introducida exitosamente en los ríos Acaponeta, Baluarte, Mayo, Piaxtla, Presidio, San Lorenzo y Yaqui), así como también por la contaminación y destrucción de su hábitat, asociada a la tala excesiva, a la construcción de presas y a la minería subterránea y a cielo abierto (Ruiz-Campos et al. 2003).

Existen registros de truchas nativas en el norte de México desde finales del siglo XIX e inicios del siglo XX, aunque los ejemplares se extraviaron, no fueron formalmente descritos o no fueron colectados (Espinosa et al. 2007). Posteriormente Needham y Gard (1964), en la descripción de la trucha *Oncorhynchus chrysogaster*, reconocieron diversos morfotipos de truchas en ríos cercanos a la zona de distribución de la trucha dorada mexicana. Actualmente se considera que existen por lo menos cinco linajes genéticos distintos correspondientes a dos especies ya descritas y tres especies de truchas aún no descritas formalmente (Abadía-Cardoso et al. 2015). Las formas norteñas incluyen a las truchas del río Yaqui y río Mayo, mientras que las sureñas se encuentran en los ríos San Lorenzo, Piaxtla, Presidio, Baluarte y Acaponeta (Ruiz-Campos et al. 2003).

Hasta hace unos 30 años, la biología de las truchas nativas del norte de México había sido poco estudiada, principalmente por la dificultad de llegar a sus áreas de distribución en zonas escarpadas, poco urbanizadas, con problemas socioeconómicos muy fuertes o utilizadas para el cultivo de sustancias ilegales en la Sierra Madre Occidental (Hendrickson et al. 2002; Mayden et al. 2010). Esta falta de acceso ha preservado la integridad de muchas poblaciones por años, aunque actualmente la salud de las poblaciones de truchas nativas mexicanas se ve afectada por factores como el cambio climático, la contaminación ambiental, el cambio del uso de suelo, la ganadería extensiva, la tala inmoderada y el establecimiento de granjas de cultivo de truchas exóticas (Ruiz-Campos et al. 2003, Hendrickson et al. 2006 y Espinosa et al. 2007). A su vez, la introducción de ejemplares exóticos ha ocasionado la modificación de hábitat y la restricción de la distribución geográfica de las truchas nativas (Hendrickson et al. 2002), así como su desplazamiento e hibridación (de efectos negativos) con ejemplares que escapan de las granjas (Camarena-Rosales et al. 2008; Escalante et al. 2014; Abadía-Cardoso et al. 2015).

#### *Introducción de truchas en México*

La introducción de especies es muy común en ambientes dulceacuícolas a nivel mundial, especialmente en presas y lagos o lagunas donde pretenden aprovecharse especies de mayor rendimiento económico o alimenticio (Arredondo-Figueroa 1996).

El uso de truchas nativas para acuicultura es poco conocido, aunque se sabe que han sido trasladadas en México a varias localidades en Chihuahua y la Ciudad de México (Hendrickson et al. 2002). Sin embargo, estas truchas no tienen la adaptabilidad ni el rápido crecimiento de la trucha arcoíris y la trucha café, por lo que su cultivo en granjas y sus introducciones han sido escasas (Escalante et al. 2014). Por lo tanto, ha sido notable la preferencia del gobierno federal mexicano por el cultivo de especies exóticas en sus centros acuícolas, lo que ha resultado en que la producción pesquera de las especies exóticas haya rebasado a la de las nativas, que representan menos del 10% de la captura nacional (Ibáñez et al. 2011).

El cultivo de la trucha café *Salmo trutta* en México también está poco extendido, pero se sabe que los miembros del club La Trucha importaron e introdujeron ejemplares de esta especie en la Ciudad de México en 1982 (Pueyo-Bravo 2004) y que algunos centros trutícolas mantienen su crianza exitosa en la actualidad (Espinosa-Pérez y Ramírez 2015). Aparentemente en el mismo año se introdujeron también 5,000 huevos de trucha café en tres ríos de Chihuahua, incluyendo 1500 en el río Piedras Verdes y 2500 en el río Gavilán, pero no se han vuelto a ver ejemplares de esta trucha en esas localidades (Hendrickson et al. 2002).

La trucha de mayor introducción en México es la trucha arcoíris *Oncorhynchus mykiss*, principalmente para fines de acuicultura y para su aprovechamiento en centros de pesca deportiva, ya que tiene gran facilidad para crecer en diversos ecosistemas. A pesar de que esta trucha se considera nativa del norte de México (Hendrickson et al. 2002), su cultivo es sostenido con ejemplares traídos de Estados Unidos, Suramérica y Australia (Ibáñez et al. 2011).

Se considera que el registro más antiguo de la importación de trucha arcoíris a México fue en 1888 (McDonald 1891, en Needham y Gard 1959). Esta versión establece que se enviaron 33,000 huevos [25, 000 de acuerdo a Sevilla-Hernández (1960)] como donación del Departamento de Estado de Estados Unidos al Gobierno Mexicano. Aunque Arredondo-Figueroa (1983) menciona que la primera importación de huevos de trucha a México fue en 1886, ya que en ese año comenzaron las operaciones del centro trutícola de Chimaleapan, Estado de México; pero fue hasta 1888 que este centro recibió los huevos de las primeras truchas arcoíris que habitaron el país por medios artificiales (Pueyo-Bravo 2004).

De cualquier manera todas las fuentes coinciden en que los huevos de las primeras truchas arcoíris provenían de la Estación Baird, en el río McCloud, California, la cual comenzó a operar en 1879 para la propagación de la trucha arcoíris *Salmo irideus*, aunque los indicios sugieren que solo utilizaba poblaciones de trucha locales. Es interesante que aunque Cházari (1884) menciona que la trucha arcoíris del río McCloud era su salmónido preferido para pescar en México y además recomendó hacer estudios sobre los salmónidos que habitan naturalmente en este país, fue él quien impulsó la importación de las primeras truchas exóticas a México.

Entre los años 1930-1970, la política gubernamental de Piscicultura agrícola impulsó la introducción de especies para el mejoramiento del nivel alimenticio de los nacionales, actividad directamente ligada a la construcción de obras hidráulicas promovidas por la Comisión Nacional de Irrigación (García-Mondragón et al. 2013). A partir de esta política se crearon estaciones acuícolas productoras de crías de trucha arcoíris con fines de repoblación. La primera estación fue El Zarco, ubicada en los límites del Estado de México y el Distrito Federal (ahora Ciudad de México). Eventualmente la construcción de unidades

de producción intensiva con presupuesto federal se convirtió en una fuente de ingresos complementaria a la agricultura y ganadería (NACA/FAO 2001). Ya para 2008 la trucha arcoíris representaba el 48.1% de la producción pesquera nacional, siendo el estado de México el principal productor (52% de la producción nacional) (SAGARPA 2011, en García-Mondragón et al. 2013).

Actualmente la trucha arcoíris se encuentra entre los tres peces de mayor introducción en el mundo (Fuller et al. 1999); al respecto, Lowe et al. (2004) afirmaron que es uno de los cinco peces exóticos más dañinos. Sin embargo, Camarena-Rosales et al. (2008) mencionan que la presencia de truchas nativas en la Sierra Madre Occidental y las amenazas potenciales inherentes a las introducciones de truchas exóticas han sido ignoradas por las agencias gubernamentales mexicanas durante sus programas de apoyo a la acuicultura rural, ocasionando que las granjas trutícolas se establezcan en estanques rústicos o sistemas de flujo que operan en cuencas o sistemas en que se distribuyen las truchas nativas (Ruiz-Campos et al. 2003 y Espinosa et al. 2007).

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

Se realizó una búsqueda en medios digitales de centros de pesca deportiva, cartas pesqueras, el Diario Oficial de la Federación y otras fuentes digitales e impresas, así como visitas y comunicaciones personales de los autores para registrar los centros trutícolas (ya sea productores o distribuidores de truchas) actuales o activos históricamente en el país. Una vez registrados los centros trutícolas, se determinó la especie que se cultiva y la ubicación específica de las instalaciones. En lo posible se registró también la antigüedad y periodo de operaciones de los centros.

Las localidades de colecta de la trucha dorada *Oncorhynchus chrysogaster* se obtuvieron de manera independiente, a partir de las bases de datos de la Colección Nacional de Peces (CNPE-IBUNAM), Global Biodiversity Information Facility (GBIF), FishNet 2 y de los sitios de colecta registrados por Hendrickson et al. (2002). Ya que las traslocaciones e introducciones de trucha dorada mexicana son escasas o poco exitosas, se consideraron las localidades de colecta como la distribución natural de la trucha dorada.

Además se ubicaron las localidades de colecta y registros visuales de otras truchas nativas del norte de México, en los estados de Chihuahua, Coahuila, Durango y Sinaloa. Las localidades se obtuvieron de publicaciones (Hendrickson et al. 2002), comunicaciones personales y ejemplares depositados en la CNPE-IBUNAM. A partir de las coordenadas geográficas se elaboró un polígono de las cuencas hidrográficas en que se distribuye el complejo de truchas nativas mexicanas (diferentes de *O. chrysogaster*).

Posteriormente se integraron las tres bases de datos de las localidades y áreas de distribución (centros trutícolas, trucha dorada y otras truchas nativas) en un mapa elaborado con ArcMap 10.01 (ESRI®). En este mapa se determinaron las áreas y puntos de convergencia geográfica de los centros trutícolas con la distribución de la trucha dorada y con las demás truchas nativas.

## **RESULTADOS**

### *Centros trutícolas en México*

Hasta 2007 se reconocían más de 700 granjas de producción de trucha arcoíris ubicadas en los estados de Ciudad de México, Sonora, Chihuahua, Sinaloa, Durango, Chiapas, Coahuila, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, México, Michoacán, Morelos, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, Querétaro, Tlaxcala y Veracruz (Espinosa et al. 2007). Sin embargo

no se cuenta con información oficial acerca del número y ubicación precisa de todos los centros trutícolas en el país, por lo que este estudio provee un acercamiento al inventario de estos centros y a los lugares en que podrían tener afectaciones directas hacia las poblaciones de truchas nativas.

En este trabajo se muestran 300 centros trutícolas, activos en el país en los últimos 30 años (Fig. 1).

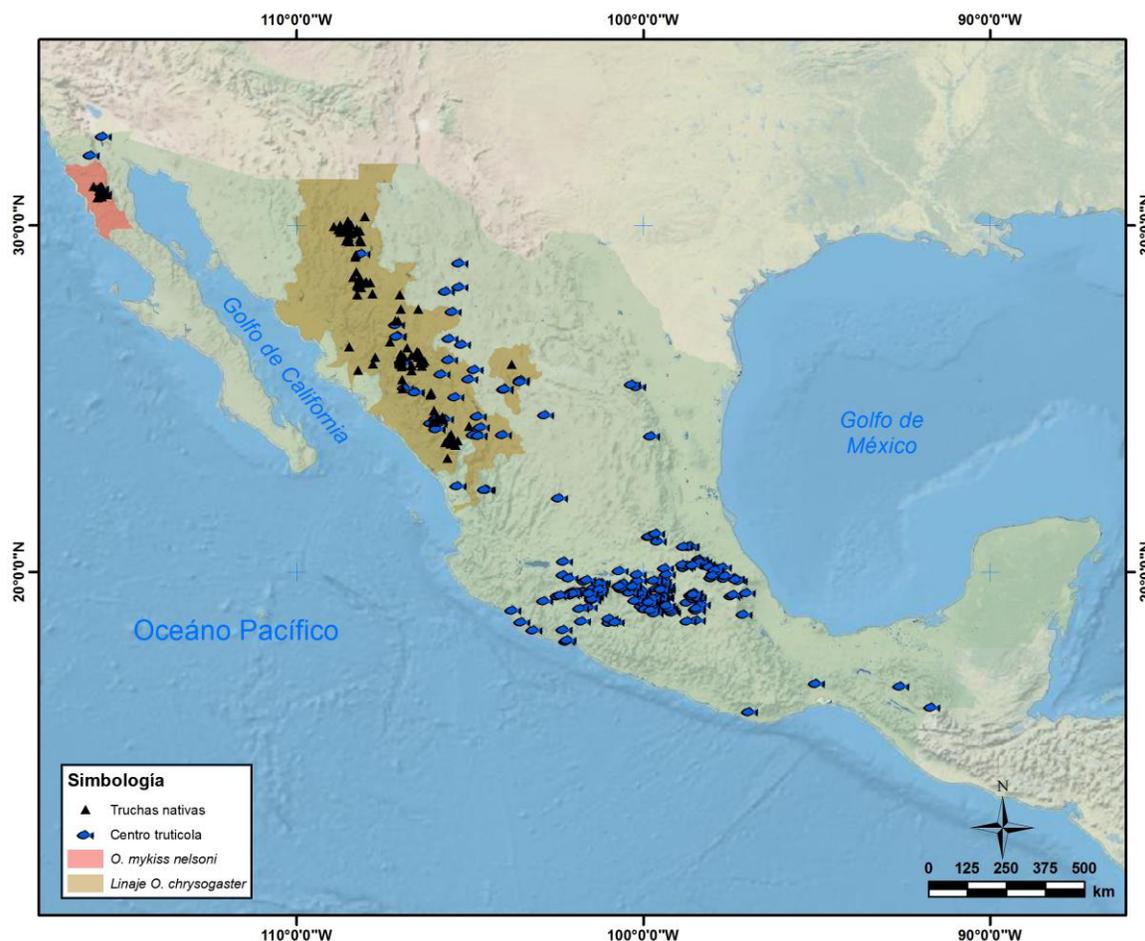


Figura 1. Distribución de las truchas nativas mexicanas y de los centros trutícolas activos en los últimos 30 años. Se muestran los puntos de colecta y las cuencas de distribución de la trucha *Oncorhynchus mykiss nelsoni* y de las truchas del linaje de *Oncorhynchus chrysogaster*, que incluye nueve especies no descritas. Además se muestran los centros trutícolas registrados en este trabajo.

Estos centros se distribuyen en 17 estados de la República, con mayor abundancia en el estado de Michoacán (77 centros), seguido del estado de México (72 centros), Puebla (41 centros) y Durango (40 centros) [Fig. 2]. Casi todos los centros trutícolas se dedican a la reproducción de trucha arcoíris, mientras que únicamente seis cultivan trucha café (tres en el Estado de México y tres en Puebla).

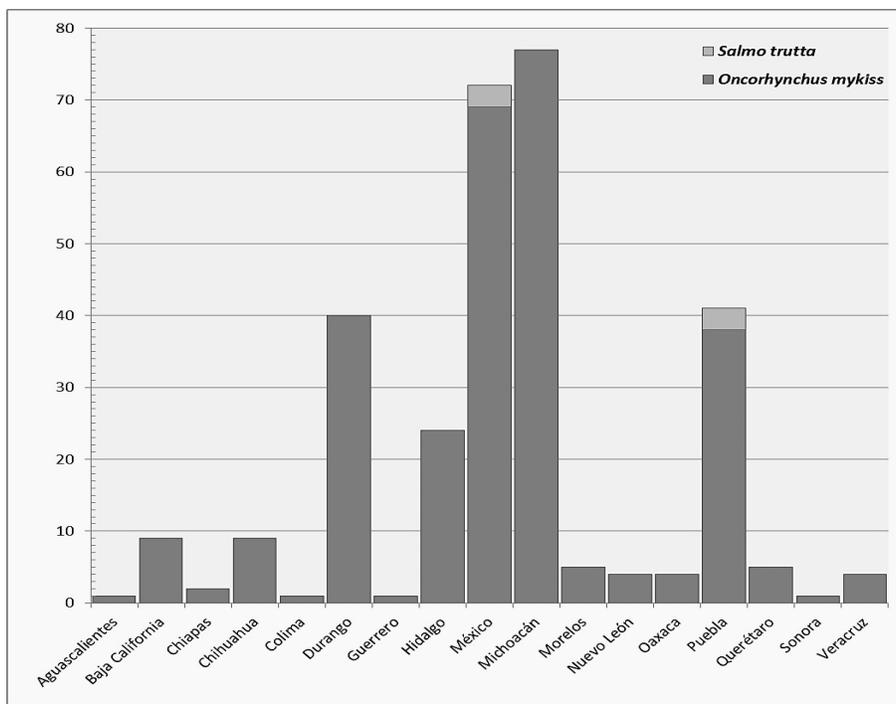


Figura 2. Centros trutícolas establecidos en México (funcionales en los últimos 30 años).

Michoacán y el estado de México reúnen el mayor número de centros trutícolas en funcionamiento debido a la altitud de su relieve y a la disponibilidad de agua. La trucha arcoíris está adaptada a climas fríos, ya sea por gradientes latitudinales o altitudinales, por lo que la disponibilidad de agua en regiones por arriba de los 1000 msnm beneficia su cultivo. Aunado a esto, las propuestas de los gobiernos estatales han favorecido el uso de estos cuerpos de agua naturales para la introducción de trucha arcoíris.

Aunque no se cuenta con tantos registros oficiales de centros trutícolas en Durango (40 centros) y Chihuahua (9 centros) como en el centro del país, los existentes están establecidos en cuencas donde existen truchas nativas. Lo anterior sugiere que las áreas de distribución natural de las truchas mexicanas se han explotado para propagar el cultivo de trucha arcoíris. Esta superposición de centros trutícolas en cuencas de distribución de truchas nativas se nota principalmente a lo largo de las cabeceras de los ríos en la Sierra Madre Occidental, en el río Conchos y en menor intensidad en la Sierra de San Pedro Mártir.

Los puntos de superposición son sitios potenciales o reales (Hendrickson et al. 2002, Espinosa et al. 2007 y Mayden et al. 2010) de escape de ejemplares de truchas nativas, lo que ha provocado introgresión genética (Escalante et al. 2014; Abadía-Cardoso et al. 2015) y podría ocasionar el desplazamiento ecológico e incluso la desaparición de las poblaciones o especies de truchas nativas mexicanas.

Cabe mencionar que esta introgresión genética no sólo amenaza la integridad de las truchas nativas, sino que puede ser un factor crucial para la caracterización de las mismas. Es decir que en su descripción y delimitación, será indispensable utilizar todas las herramientas disponibles (incluyendo morfología, morfometría y genética) para determinar su verdadera identidad, ya que la mezcla de linajes que ha existido podría generar errores

de determinación y la sobre o subestimación de la diversidad de salmónidos nativos de México.

## CONCLUSIONES

La escasa documentación y nula disponibilidad de registros de ubicación precisa de numerosas instalaciones de cultivo de peces impiden el registro de centros de producción de trucha en funcionamiento actual y reciente; y que podrían estar establecidos en las mismas cuencas que las especies nativas. Tal es el caso de los centros registrados en los ríos Fuerte, Presidio, Baluarte, San Lorenzo y Acaponeta por Camarena-Rosales et al. (2008) y Escalante et al. (2014) o los mencionados por Hendrickson et al. (2002) y Espinosa et al. (2007) en la Ciudad de México, Coahuila, Guanajuato, Jalisco, Sinaloa y Tlaxcala.

Ya se ha comprobado que las poblaciones de truchas del complejo de la trucha dorada mexicana *Oncorhynchus chrysogaster*, que se distribuyen en las cuencas de los ríos Fuerte, Sinaloa y Culiacán han estado expuestas a contaminación genética reciente por parte de granjas de truchas exóticas, lo que es consecuencia de la cercanía de estas instalaciones con las poblaciones nativas (Escalante et al. 2014; Abadía-Cardoso et al. 2015). En este sentido, las zonas de superposición que se muestran en la Figura 1 se interpretan como áreas de riesgo y posible introgresión de truchas exóticas con truchas nativas, por lo que representarían regiones de importancia para el estudio de la integridad morfológica y genética de las truchas nativas mexicanas.

Es muy probable que la introducción de trucha arcoíris ya haya ocasionado la pérdida de una o más poblaciones de truchas nativas que no fueron formalmente reconocidas, por lo que es de suma importancia que las poblaciones restantes sean estudiadas, descritas y conservadas, antes de que este fragmento de la biodiversidad mexicana se pierda para siempre.

Las truchas nativas mexicanas pertenecen a los linajes evolutivos más sureños en el planeta, lo que implica que están adaptadas a regiones y ambientes más cálidos que el resto de las especies de truchas del mundo (Espinosa et al. 2007 y Escalante et al. 2014). Esta característica debería facilitar su uso como especies de cultivo, por lo que se recomienda su crianza en centros trutícolas mexicanos, especialmente en los establecidos dentro de las áreas de distribución natural de las truchas nativas, de modo que pueda evitarse su desaparición. Por otra parte, el cultivo de trucha arcoíris deberá restringirse a zonas donde no haya.

## AGRADECIMIENTOS

A los editores por su invitación a participar en este libro. Al grupo de Truchas Mexicanas por el esfuerzo en colectas, análisis y procesamiento de ejemplares, así como la abundante información que se ha generado gracias a este esfuerzo binacional.

## 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.
- Arredondo-Figueroa, J.L. 1996. Estado actual y perspectivas de la acuicultura en México. *ContactoS*. 14: 28-38.

- Arredondo-Figueroa, J.L. 1983. Especies animales acuáticas de importancia nutricional introducidas en México. *Biotica*. 8(2): 175-199.
- Behnke, R.L. and J.R. Tomelleri. 2002. *Trout and salmon of North America*. The Free Press. Chicago, 359 p.
- Camarena-Rosales F., G. Ruiz-Campos, J. de la Rosa-Vélez, R.L. Mayden, D.H. 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*. 18:33-45.
- Cházari, E. 1884. *Piscicultura en agua dulce*. Secretaría de Fomento. México. 828 pp.
- Escalante, M.A., F.J. García-De León, C.B. Dillman, A.B. 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(5): 1063-1071.
- Espinosa, H., F.J. García-De León, G. Ruiz, A. Varela, I. Barriga, J.L. Arredondo, D. Hendrickson, F. Camarena y A.B. De los Santos C. 2007. Las Truchas Mexicanas: Peces Enigmáticos del Noroeste. *Especies: Revista sobre Conservación y Biodiversidad*. Naturalia A.C. Enero-Febrero: 8-14.
- Espinosa-Pérez, H. and M. Ramírez. 2015. Exotic and invasive fishes in Mexico. *Check List*. 11(3): 1627 (1-13).
- Fuller P.L., L.G. Nico and J.D. Williams. 1999. *Nonindigenous fishes introduced into inland waters of the United States*. American Fisheries Society, Special Publication 27. 613 pp. EUA.
- Fuster de Plaza, M.L. 1949. Obtención de híbridos entre “trucha arcoiris”, *Salmo iridea Gibbons* y “Trucha de arroyo”, *Salvelinus fontinalis (Mitchill) Jordan*. Ministerio de Agricultura y ganadería. Publicación miscelánea No. 319. Buenos Aires.
- García-Mondragón, D., I. Gallego-Alarcón, A. Espinoza-Ortega, A. García-Martínez y C.M. Arriaga-Jordán. 2013. Desarrollo de la producción de trucha arcoiris (*Oncorhynchus mykiss*) en el Centro de México. *AquaTIC* 38:46-56.
- Hendrickson, D.A., H. Espinosa Pérez, L.T. Findley, W. Forbes, J.R. Tomelleri, R.L. Mayden, J.L. Nielsen, B. Jensen, G. Ruiz Campos, A. Varela Romero, A. van der Heiden, F. Camarena and F.J. García-De León. 2002. Mexican native trouts: a review of their history and current systematic and conservation status. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*. 12: 273-316.
- 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. Mcnyset, 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.
- Ibáñez, A.L., H. Espinosa-Pérez y J.L. García-Calderón. 2011. Datos recientes de la distribución de la siembra de especies exóticas como base de la producción pesquera en aguas interiores mexicanas. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 82:904-914.
- Lowe, S., M. Brown, 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)*, Comisión de Supervivencia de Especies (CSE) de la Unión Mundial para la Naturaleza (UICN). 12 pp.
- Mayden R.L., C.B. Dillman, H. Espinosa-Pérez, J.R. Tomelleri, B.R. Kuhajda, D.A. Hendrickson, G. Ruiz-Campos, A.B. de los Santos-Camarillo, G. García-De León, A. Varela-Romero, D.L. Propst, J.E. Brooks, L.T. Findley, A.L. George, D.A. Neely, I. de los A. Barriga Sosa and K.E. Mayden. 2010. Evolution and diversity of trout species in México. En: Carline R.F. and L. LoSapio (eds.). *Conserving wild trout: Proceedings of the Wild Trout X Symposium*. Bozeman, Montana. Pp: 134-144.
- McDonald, M. 1891. Report of the commissioner for 1887. *US Comm. Fish and Fish.* 63 pp.
- Needham, P.R. and R. Gard. 1959. *Rainbow trout in Mexico and California, with notes on the Cutthroat Series*. University of California Publications in Zoology. 67:1-149.
- Needham, P.R. and R. Gard. 1964. A new trout from central Mexico: *Salmo chrysogaster*, the Mexican golden trout. *Copeia*. 1964(1): 169-173.
- Pueyo-Bravo, L. 2004. Manual de la trucha y su pesca en México. Arco Iris Sport Fishing. México, Distrito Federal. 313 p.
- Ruiz-Campos, G. 1989. Repoblación natural por trucha arcoiris (*Salmo gairdneri nelsoni*) en un transecto del arroyo San Rafael, noroeste de la sierra San Pedro Mártir, Baja California, México. *Re-impreso de The Southwestern Naturalist*. 34(4): 552-556.
- Ruiz-Campos, G., F. Camarena-Rosales, A. Varela-Romero, S. Sánchez-González and J. de la Rosa-Vélez. 2003. Morphometric variation of wild trout populations from northwestern Mexico (Pisces. Salmonidae). *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 13: 91-110.
- NACA/FAO. 2001. Aquaculture in the Third Millennium. Subasinghe, R.P., P. Bueno, M.J. Phillips, C. Hough, S.E. McGladdery and J.E. Arthur (Eds.) *Technical Proceedings of the Conference on Aquaculture in the Third Millennium*, Bangkok, Thailand, 20-25 February 2000. Roma. 471 p.
- Sevilla-Hernández, M.L. 1960. *Estudio preliminar de las posibilidades piscícolas en la Tarahumara (II)*. Secretaría de Industria y Comercio. Dirección General de Pesca e Industrias Conexas. Oficina de Estudios Biológicos, Vol. 10(3-4): 4-11.



## 14. Conservación de truchas del Pacífico.

---

Brooke E. Penaluna

### INTRODUCCIÓN

La historia de las truchas del Pacífico, pertenecientes al género *Oncorhynchus*, es una historia muy interesante que se basa en la persistencia y diversificación de sus especies debido, en gran parte, al dinamismo propio que existe en su medio ambiente. Desde el oeste de Norteamérica, extendiéndose hasta el este de Asia, las truchas del Pacífico han experimentado la influencia de los avances y retrocesos de glaciares, vulcanismo, condiciones extremas en el caudal de los ríos, al igual que eventos geotectónicos, que han permitido la formación de cordilleras y mesetas. Dichos eventos son los que han determinado el curso actual de los ríos modernos.

Las truchas del Pacífico se encuentran en cuencas hidrográficas que generalmente drenan hacia el océano Pacífico, en el subártico y hasta los subtrópicos, aunque algunas poblaciones viven en cuencas endorreicas, mientras que otras existen en cuencas que desembocan en el golfo de México, al este de la divisoria continental. Es en éstas cuencas donde las truchas del Pacífico se han convertido en parte del paisaje.

En el oeste de Norteamérica, entre las especies de trucha del Pacífico se incluyen la trucha degollada (*O. clarkii* ssp.), la arcoiris (*O. mykiss* ssp.), la dorada (*O. aguabonita* ssp.), la trucha gila (*O. gilae*), la trucha Apache (*O. apache*) y la trucha dorada Mexicana (*O. chrysogaster*), además del complejo diverso de truchas de la Sierra Madre Occidental (SMO) en México que aún no son clasificadas taxonómicamente (Fig. 1).

Aunque las truchas del Pacífico comparten el mismo género y una historia de vida similar a los salmones del Pacífico, como el salmón Coho (*O. kisutch*), Chinook (*O. tshawytscha*), Chum (*O. keta*), Pink (*O. gorbuscha*) y Sockeye (*O. nerka*), también mantienen rasgos muy distintivos. Por ejemplo, el hecho de que opcionalmente pueden ser anádromas (al menos en el caso de *O. mykiss* y *O. clarkii*), reproducirse en más de una ocasión, reproducirse durante primavera (aunque con mucha variación debido a condiciones locales y de tiempo) y finalmente tener una expectativa de vida de hasta diez años o más. Por otro lado, las truchas del Pacífico han sobrevivido en aquellas cuencas donde los salmones del Pacífico no lo han podido hacer. Su diversidad genética, fenotípica y de historia de vida, al igual que su habilidad de migrar largas distancias sobre hábitats diversos, les ha permitido sobrellevar condiciones climáticas fluctuantes y cambios ambientales. Estas características de las truchas del Pacífico son clave para su persistencia en el futuro.

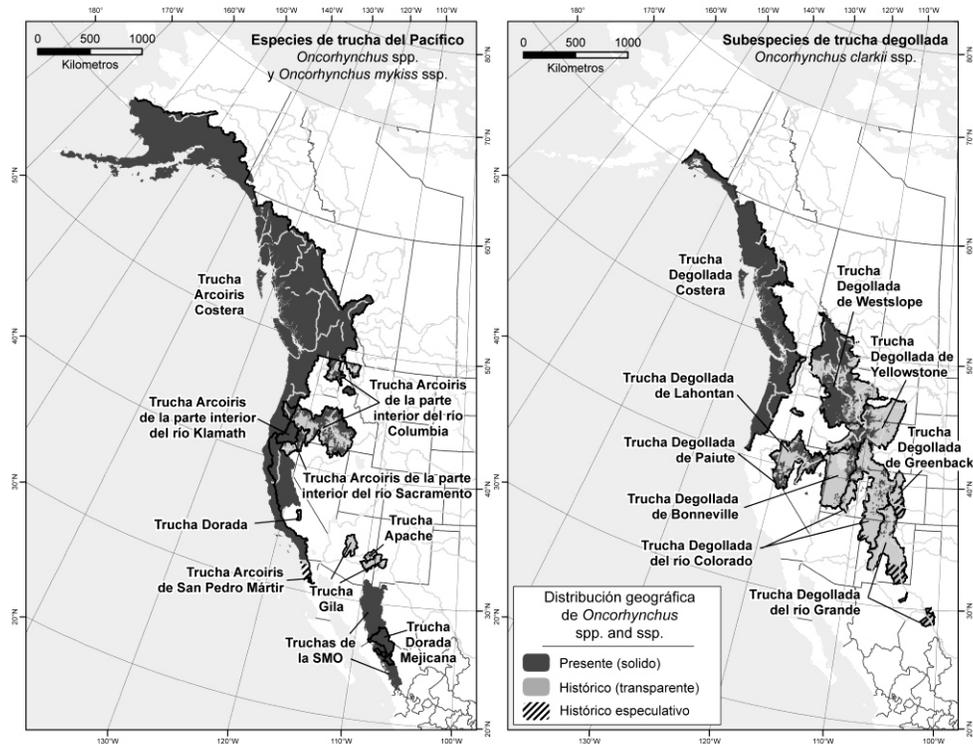


Figura 1. Distribución histórica y actual de las truchas del Pacífico en el oeste de Norteamérica incluyendo *O. mykiss* ssp. y otras (panel izquierdo) y *O. clarkii* ssp. (panel derecho). La distribución de la trucha de banda roja del río Columbia termina en la frontera entre Estados Unidos y Canadá debido a que no se le reconoce taxonómicamente en Canadá (Reproducida con el permiso de la American Fisheries Society; Penaluna et al. 2016).

Sin embargo, la disminución en las abundancias y contracción de la distribución de las poblaciones de trucha, en al menos dos tercios de las tendencias históricas, ha significado una mayor protección ejercida por las agencias del gobierno federal, estatal y provincial o municipal sobre algunas zonas geográficas donde las truchas habitan. A la fecha, dos especies de trucha degollada, incluyendo la trucha Alvord (*O. clarkii alvordensis*) y la trucha de aleta amarilla (*O. clarkii macdonaldi*) son consideradas extintas. La declinación de las truchas del Pacífico durante las décadas recientes y, en algunos casos durante el siglo pasado, es reflejo de los desafíos para balancear los intereses de la sociedad, recursos naturales y ambientes silvestres afectados por el cambio climático.

La declinación en las truchas del Pacífico comenzó con la colonización europea en Norteamérica (Fig. 2). En los inicios del siglo XIX, los exploradores euroamericanos y colonizadores comenzaron a moverse hacia el oeste, al igual que la destrucción de los paisajes ribereños. El exterminio del castor americano (*Castor canadensis*), el pastoreo intensivo por parte del ganado bovino, la tala del bosque, los diques y drenajes construidos en zonas naturales de inundación, además de la expansión de la industria minera, contribuyeron de distinta manera a la degradación de los ecosistemas nativos. Cambios similares han ocurrido en el norte de México y aunque más tarde, al final las consecuencias son negativas en estos ambientes. Colectivamente, las actividades históricas y contemporáneas han transformado los ecosistemas del oeste de Norteamérica de una forma

fundamental. La pesca recreativa y las actividades de siembra de peces en granjas piscícolas han significado la introducción de nuevas especies de truchas exóticas en ambientes naturales, incluyendo la trucha café (*Salmo trutta*), la trucha de arroyo (*Salvelinus fontinalis*) y la trucha de lago (*S. namaycush*), las que también han contribuido a la disminución de las poblaciones de las truchas del Pacífico. Además, *O. mykiss* ssp. y *O. clarkii* ssp. han sido movidas dentro y fuera de su rango de distribución en el oeste de Norteamérica.

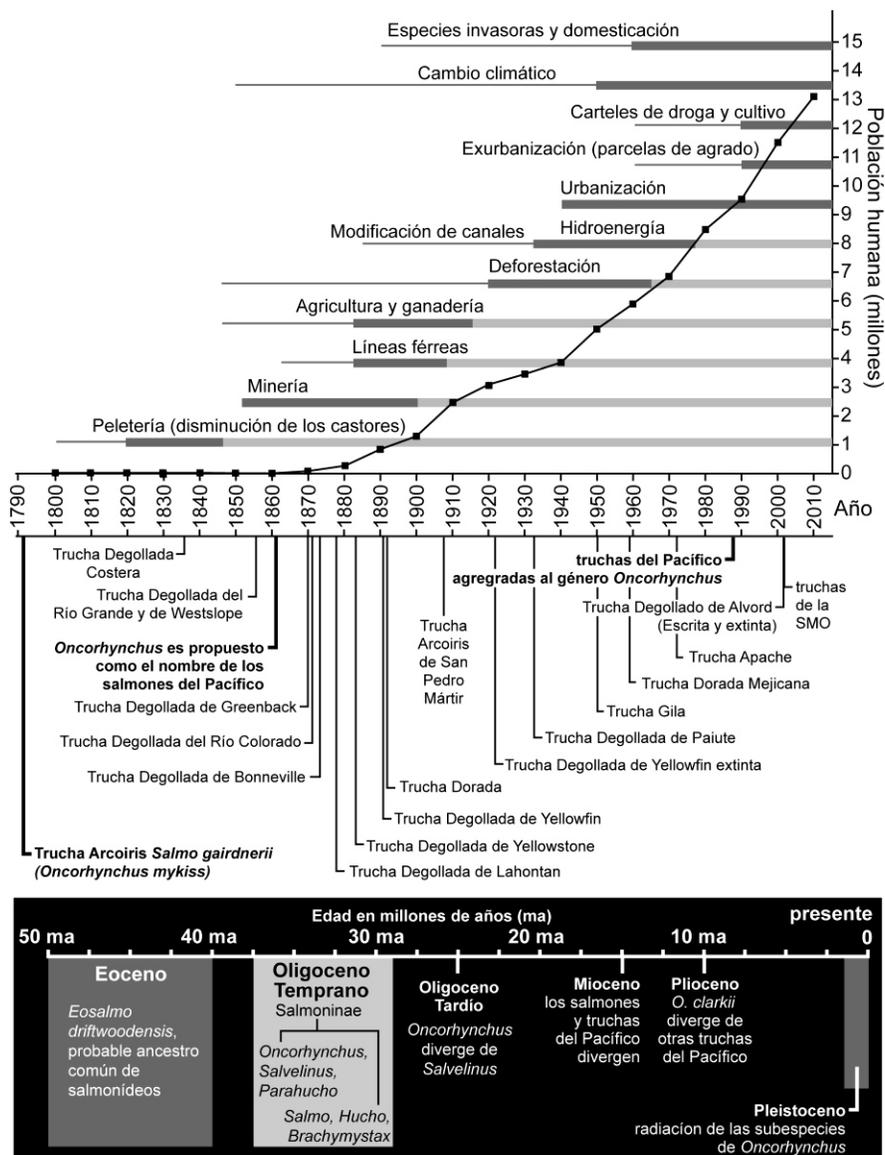


Figura 2. Diagrama de tiempo de las amenazas pasadas, presentes y futuras a las truchas del Pacífico. Se identifican las fechas donde se han descrito las distintas especies y aquellas de importancia evolutiva en escala de tiempo geológica. Aunque existe incertidumbre sobre la divergencia de las especies, se indican las cronologías que han sido de mayor consenso. Las barras anchas oscuras en el gráfico de barras de la parte superior indican el máximo valor del período de desarrollo humano y conversión de los hábitats. Las barras más claras indican el efecto continuo, luego del período inicial de cambios rápidos. Se muestran además, los cambios en el tamaño de las poblaciones humanas en el Pacífico Noroeste de Estados Unidos (Reproducida con el permiso de la American Fisheries Society; Penaluna et al. 2016).

Durante el siglo XX, particularmente después de la segunda guerra mundial, el paisaje ha sufrido la fragmentación de los hábitats acuáticos debido a la construcción de grandes represas en los ríos principales, además de un sinnúmero de barreras menores en el cruce de ríos y caminos y canales fluviales de regadío, lo que ha provocado el aislamiento de las poblaciones nativas de truchas del Pacífico en sitios río arriba. El cambio climático también ha contribuido como un problema para las truchas, especialmente en el caso de las poblaciones que han sido previamente fragmentadas y degradadas por otras actividades humanas que requieren del uso de agua y suelo. La interacción entre estas múltiples amenazas aparece como un problema emergente que se ha expresado con más intensidad durante los años recientes. Con todo ello, es crucial el reconocimiento de los efectos acumulativos sobre las truchas del Pacífico cuando se considere evaluar el estatus actual y la persistencia en el futuro de dichas poblaciones. A pesar de todos estos problemas, las truchas del Pacífico han logrado persistir en el tiempo, algunos linajes mejor que otros (Penaluna et al. 2016).

A principios de la década de los años 70 se proclamó un nuevo marco ambiental regulatorio en los Estados Unidos con la proclamación del Acta de Especies Amenazadas (Endangered Species Act) y el Acta del Agua Limpia (Clean Water Act). De igual manera esta década se marca como el comienzo de una mayor preocupación de los administradores de recursos naturales por dar valor a las truchas salvajes nativas. Aunque era claro que las truchas del Pacífico estaban en peligro, en aquel tiempo hubo un cambio en la percepción y comienza un esfuerzo y dedicación mayor hacia la conservación y protección de las truchas como un indicador importante del funcionamiento de los ecosistemas de agua dulce de ambientes fríos. Desde que esta nueva era de preocupación por las truchas del Pacífico se inició, han existido muchas historias de éxitos y fracasos en la conservación efectiva de las truchas del Pacífico en los Estados Unidos.

Al parecer, no hay historias que den cuenta de una recuperación completa de alguna de las especies de truchas del Pacífico; al contrario, existen lecciones aprendidas con historias de éxitos que han logrado el retraso o freno en la disminución de sus poblaciones. Se han realizado una serie de esfuerzos de restauración principalmente en Estados Unidos y Canadá, aunque también existen iniciativas emergentes en México, que han aumentado la confianza sobre la posibilidad de proteger y restaurar los ambientes de las truchas del Pacífico. Éxitos y fracasos han proporcionado valiosas lecciones en el ámbito científico y socioeconómico.

Algunas de las lecciones que ilustran dichos esfuerzos de conservación se resumen en cuatro ideas principales, incluyendo 1) la conectividad entre hábitats heterogéneos, 2) maximizar la heterogeneidad de los hábitats, 3) protección de los hábitats a una escala mayor y 4) conservación de las aguas de ambientes fríos. En última instancia, la conservación de las truchas del Pacífico en el oeste de Norteamérica está estrechamente ligada con la capacidad de entender el pasado, presente, futuro y la habilidad de describir adecuadamente su diversidad evolutiva en conjunto con la capacidad de comunicar su valor de conservación a nuestra sociedad. Se describen a continuación.

### *Conectividad entre hábitats heterogéneos*

La conectividad entre hábitats heterogéneos es el grado en el cual el paisaje permite migraciones y movimientos de las truchas del Pacífico en tiempo y espacio. Es decir, la conectividad existente entre los hábitats de ríos, arroyos, lagos y el océano. Migraciones y movimientos a nivel local han permitido a las poblaciones de truchas del Pacífico adaptarse evolutivamente desde hace miles de años, lo cual les ha proporcionado la habilidad de persistir bajo las actuales condiciones ambientales cambiantes. A medida que las truchas del Pacífico se mueven entre fragmentos de hábitat, ellas atraviesan corredores que conectan dichos fragmentos los cuales varían en distancia que separa a unos de otros. Dichos corredores se fragmentan cuando existen represas y alcantarillas que crean potenciales barreras al movimiento. Esto es especialmente relevante para especies con rangos de movimiento limitado como son el caso de la trucha dorada (*O. aguabonita* ssp.), trucha gila (*O. gilae*), trucha Apache (*O. apache*) y la trucha dorada Mexicana (*O. chrysogaster*), además del complejo de truchas no clasificado taxonómicamente de SMO. Dichas especies podrían ser más vulnerables a las barreras que impiden migraciones, por lo que mantener la conectividad entre hábitats permite a los individuos moverse entre áreas adyacentes en casos donde las poblaciones experimenten pérdida en la calidad y extensión de sus hábitats. Además, muchos de los escenarios de cambio climático indican que las especies necesitarán moverse a nuevos hábitats, lo cual hace necesario pensar en mantener la conectividad como una medida esencial que permita la adaptación de las especies dados dichos cambios.

### *Maximizar la heterogeneidad de los hábitats*

Maximizar la heterogeneidad de los hábitats en las cuencas hidrográficas y el paisaje provee las condiciones geofísicas de los hábitats, necesarias para soportar la diversidad de poblaciones y especies. Manteniendo una diversidad de hábitats dentro y entre cuencas hidrográficas permite su uso a los individuos de una población, lo que a su vez promueve diversidad. Las truchas del Pacífico usan y siguen la heterogeneidad de su ambiente a través de una navegación activa del paisaje en búsqueda de los hábitats preferidos. Cuando el paisaje se torna homogéneo su complejidad disminuye lo que significa que no puede soportar una mayor diversidad de poblaciones. A su vez, en la medida que los terrenos alrededor de las truchas sean protegidos, existen mayores probabilidades de que las truchas persistan en el tiempo.

### *Protección de los hábitats a una escala mayor*

Si la protección de los hábitats ocurre a una escala mayor en el paisaje, entonces un espectro más amplio en la diversidad de poblaciones será también posible. Esto garantiza conservar la mayor cantidad de área posible, independientemente del tipo de uso de suelo y tenencia de la tierra y no solo en áreas donde existan especies de alto valor de conservación, áreas de poblaciones saludables, o aquellas menos costosas de mantener. Al contrario, conservar la mayor cantidad de área posible permite una respuesta más amplia en cuanto a la variabilidad de las truchas del Pacífico y su capacidad de persistir en el tiempo. Si sólo se protegen poblaciones saludables en ausencia de planes de conservación más amplios, que reconozcan la importancia de otros sitios, poblaciones y periodos de tiempo, entonces las características únicas de algunas poblaciones no persistirán, especialmente en aquellas poblaciones menos saludables donde la diversidad de características no está representada en las poblaciones más saludables.

### *Conservación de las aguas de ambientes fríos*

Las truchas del Pacífico requieren aguas frías que estén interconectadas para sobrevivir. Aunque las truchas del Pacífico han sobrevivido condiciones muy cambiantes por milenios, ahora necesitan persistir bajo cambios globales en el clima, unidos a otros problemas emergentes debido a la acción humana. Dependiendo del linaje específico, las truchas necesitan aguas con temperaturas por debajo de los 18 °C, aunque pueden soportar temperaturas más altas por un periodo corto de tiempo. Las truchas también necesitan espacio para vivir, es decir, más espacio significa más agua. Una reducción de espacio puede producirse debido a cambios horizontales y verticales en la columna de agua, los cuales ocurren naturalmente por cambios estacionales en el clima y caudal de los ríos y arroyos, o cambios debido al uso humano del agua, tales como represas para producir energía eléctrica y tomas de agua para riego o agua potable.

### **CONCLUSIONES**

Las truchas del Pacífico nos cuentan una historia de adaptación y sobrevivencia a condiciones del ambiente que son muy dinámicas a través del paisaje y del tiempo. Sin embargo, dicha historia nos dice también que las truchas del Pacífico han disminuido durante las décadas recientes y en algunos casos en el último siglo, debido al desbalance en los valores de la sociedad en cuanto al uso de los recursos naturales y su conservación en un escenario de cambio climático. Mucho queda por aprender en cuanto a la historia evolutiva de la diversidad de truchas del Pacífico en el oeste de Norteamérica. Nos quedan incertidumbres que representan grandes desafíos para su conservación, incluyendo la mezcla no-intencional de distintos linajes y las fallas en cuanto a la apreciación del amplio rango de diversidad de las truchas del Pacífico, lo que ha resultado en no enfocar prioridades en taxa más raras. Muchas de las amenazas actuales de las truchas del Pacífico están enfocadas en el cambio climático, invasiones biológicas, urbanización y sus interacciones, las cuales pueden representar el foco de futuras investigaciones. El amplio rango de variabilidad observado en las truchas del Pacífico representa desafíos en cuanto a la detección de respuestas que sean generalizadas, aunque quizás lo más importante es entender dichas respuestas individualmente para dar contexto al entendimiento de futuros impactos y amenazas.

### **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a los editores Francisco García-De León y Arturo Ruiz Luna por sus comentarios y sugerencias. Ivan Arismendi por la traducción al Español y Kathryn Ronnenberg por confección de las figuras. El uso de nombres comerciales o razones sociales es sólo para información del lector y no constituye endoso de ningún producto o servicio del gobierno de Estados Unidos.

### **REFERENCIAS**

Penaluna, B.E., A. Abadía-Cardoso, J.B. Dunham, F.J. Garcia-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.M. Temple, J.E. Williams, K.R. 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: 286–302.

## 15. 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*

### INTRODUCCIÓN

La acuicultura es un término que se utiliza para referirse al conjunto de actividades que tiene por objeto la producción, el crecimiento y desarrollo de organismos acuáticos, animales o vegetales; en agua dulce, salobre o salada. Derivado de este concepto está el de piscicultura, el cual únicamente se refiere al cultivo de peces, actividad que se viene desarrollando desde hace siglos (Meyer 2004).

A pesar de ser un sistema productivo antiguo, éste se ha intensificado en los últimos 30 años debido al crecimiento poblacional, la demanda de proteína de origen animal, la procuración de la seguridad alimentaria, la sobreexplotación de los recursos pesqueros y las políticas públicas, las cuales la consideran estrategia de desarrollo rural (FAO 2014).

En la piscicultura de agua dulce, uno de los cultivos de mayor importancia es el de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*), esto debido a la capacidad de adaptación de dicha especie y a que es un proceso de cultivo bien establecido, lo que ha originado el aumento de la producción de salmones y truchas a nivel mundial, derivando en un crecimiento considerable en el consumo anual *per capita* (FAO 2014).

La trucha arcoíris es una especie íctica que pertenece a la familia Salmonidae y es originaria de las costas del Pacífico de América del Norte. En México fue introducida en distintas épocas con la intención de promover el desarrollo rural y desarrollar la piscicultura como actividad productiva con fines comerciales (Torres-Orozco y Pérez-Hernández 2011).

Para el 2014, según el Anuario Estadístico de Acuicultura y Pesca que publica la Comisión Nacional de Pesca y Acuicultura (CONAPESCA), los principales estados productores de trucha arcoíris eran Michoacán, Estado de México, Puebla, Veracruz, Chihuahua, Hidalgo, Durango y Guerrero. El estado de Durango ocupaba el séptimo lugar en producción de trucha arcoíris bajo sistema acuícola intensivo con una producción anual en peso vivo de 82 toneladas y un valor de casi cuatro millones y medio de pesos.

A pesar de que existen números oficiales de producción y valor de la venta de la trucha arcoíris en Durango, en la actualidad no se cuenta con datos que permitan dimensionar la importancia social y económica de esta actividad en el Estado. Adicionalmente; aspectos como la rentabilidad de las granjas, impacto social, canales de distribución, personas beneficiadas, así como información que puede ser relevante con relación a la trucha nativa del estado, se encuentra escasamente documentada.

Por lo anterior, este documento pretende obtener un acercamiento a la actividad truchícola del estado de Durango y caracterizar aspectos sociales y económicos que permitan dimensionar su importancia para el desarrollo regional e identificar aspectos relacionados a la presencia de trucha nativa cultivada.

Se establecerá la importancia de la acuicultura para subsanar la pobreza alimentaria en las regiones más vulnerables, la importancia de la acuicultura a nivel mundial, la historia de la truchicultura en México y en Durango, y se presentan algunos resultados que se obtuvieron en un estudio exploratorio a través de encuestas y entrevistas.

### *Pobreza Alimentaria y Acuicultura*

Según la Organización para las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), la seguridad alimentaria existe “cuando todas las personas, en todo momento, tienen acceso físico o económico a alimentos nutritivos, inocuos y suficientes para satisfacer las necesidades dietéticas y de su preferencia para una vida activa y saludable”, esto bajo las condicionantes de la disponibilidad, acceso, consumo y aprovechamiento de los alimentos en ambientes sanos (FAO 2007).

Por otro lado se considera que el sistema alimentario está constituido por subsistemas; el biológico, geográfico, físico y humano, los cuales influyen las actividades y los resultados de la cadena productiva o alimentaria, la cual se considera está constituida por los eslabones de la producción, industrialización, comercialización y consumo final (FAO 2007). Así pues partiendo de los conceptos anteriormente mencionados, se puede decir que la seguridad alimentaria está sujeta al buen funcionamiento del sistema alimentario.

Una de las consecuencias graves que se viven actualmente debido a la inseguridad alimentaria, es la desnutrición, la cual se manifiesta en las personas adultas e infantiles en diferentes niveles, leve moderada y severa. Algunos síntomas son pérdida de peso, anemia, menor crecimiento en menores, cansancio y fatiga, entre otros. FAO en el 2014 estimaba que en el mundo existían más de 800 millones de personas que padecían de malnutrición crónica y en México, los últimos datos publicados por el Instituto Nacional de Salud Pública muestran que más de la cuarta parte de los mexicanos tiene acceso deficiente a la alimentación (Urquía-Fernández 2014).

Según datos oficiales generados por la Comisión Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL) en México, entre 1988 y 2012 se ha reducido la desnutrición infantil, sin embargo, hoy por hoy existen aproximadamente 1.5 millones de menores de cinco años con este padecimiento, lo que representa un 14% de los preescolares mexicanos, los cuales presentan baja talla para la edad. En este sentido la población indígena es la que mayor prevalencia presenta, con más del doble de niños con desnutrición, se estima que el 33.1% de la población infantil indígena la padece (Urquía-Fernández 2014).

La desnutrición en los niños, de no tratarse a tiempo, puede llegar a afectar de forma irreversible el desarrollo de su cerebro y con ello las capacidades de concentración y aprendizaje, su capacidad de relacionarse con otras personas y su rendimiento físico. Lo anterior repercute en la edad adulta, limitando la capacidad productiva y el acceso a un ingreso económico adecuado para el sostenimiento personal y familiar, el aporte a la comunidad y al país en general (Gómez, 2003).

En México, a pesar de que existen programas dirigidos a combatir la desnutrición, sobre todo en las primeras etapas de la vida en grupos de mayor vulnerabilidad ubicados en comunidades rurales e indígenas, no garantizan la seguridad alimentaria. De acuerdo con el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL 2015), estos programas resultan asistencialistas y no atienden el problema real que es mucho más complejo y multidimensional. Se considera que los programas de desarrollo social no contemplan factores como la educación, las capacidades de la población, la autogestión, la producción para autoconsumo y el manejo de recursos naturales de forma sustentable, entre otros aspectos.

A nivel internacional, entre los años 1999 y 2000 el Departamento de Pesquería y Acuicultura de la FAO a través de su servicio para el desarrollo y planeación, inició la promoción de la acuicultura como negocio auto-sostenible, con el fin de lograr que las propias comunidades satisficieran su demanda alimentaria y con esto, hacer frente a dos problemas centrales, la pobreza y seguridad alimentaria.

La FAO aseguraba que el desarrollo de una actividad acuícola por familias de escasos recursos en zonas rurales, permitiría obtener ingresos económicos, proveer a la población de una carne rica en proteína, vitaminas, minerales y ácidos grasos omegas 3 y 6, contribuyendo a enfrentar el problema de la

inseguridad alimentaria y pobreza. Catorce años después, la FAO a través de su documento *El estado actual de la pesca y la acuicultura 2014*, continúa afirmando que la pesca y la acuicultura desempeñan un papel importante en la eliminación del hambre, el fomento a la salud y la reducción de la pobreza.

Sin embargo no se ha contemplado el costo indirecto que la acuicultura ha generado a lo largo de los años como la pérdida y desplazamiento de especies endémicas o nativas, la dependencia de los productores a especies introducidas y tecnologías importadas para el desarrollo de la actividad, generando que la idea de “negocios auto-sostenibles” se vuelva un asunto costoso y poco factible para muchos, por lo que habría que replantearse algunos aspectos para lograr el propósito de garantizar proteína animal a la población y abatir la pobreza alimentaria en comunidades rurales.

### *Dimensión Mundial de la Acuicultura*

A nivel mundial se considera que el consumo per cápita de productos pesqueros ha pasado de 9.9 kilogramos en 1960 a 19.2 kilogramos en el año 2012, se estima que el pescado proporcionó a más de 2 900 millones de personas cerca del 20% de su aporte de proteínas de origen animal y a 4 300 millones de personas un 15% (FAO 2014).

Por lo que la actividad acuícola representa un medio de subsistencia para millones de personas en todo el mundo, se considera que en el 2012, 18.9 millones de personas trabajaban en esta actividad, de tiempo completo o parcial, concentrándose principalmente en Asia (más del 96%), seguida de África (1.6 %) y América Latina y el Caribe (1.4 %).

El empleo en la pesca y la acuicultura no es considerado el único indicador de la importancia de estas actividades para una economía de un país, además de los acuicultores que participan directamente en la producción, existen personas involucradas en diversas actividades complementarias como proveedores de insumos y servicios, industrialización, comercialización y la distribución, investigación y otras actividades que soportan la actividad. La FAO estima que por cada persona empleada de forma directa en la pesca de captura y la acuicultura, hay unos cuatro puestos de trabajo en actividades secundarias, incluida la fase posterior a la captura.

A pesar de lo anterior, el ritmo de crecimiento de la producción acuícola se ha reducido, debido en parte a la preocupación pública y los señalamientos sobre prácticas acuícolas inadecuadas como el uso de hormonas en tilapia para el monosexado, la hibridación de especies y el uso de alimentos balanceados. Esto puede afectar la calidad del pescado proveniente de la acuicultura, aumentar el riesgo de extinción de especies nativas debido a la introducción de especies exóticas, además de otros factores que representan los retos más significativos de la acuicultura. En este contexto, la demanda de los consumidores está directamente ligada a una diversidad de aspectos que incluyen la salud y el bienestar humano y de los animales, la inocuidad y la calidad alimentaria, la integridad medioambiental y la responsabilidad social.

Por lo antes expuesto es claro que la acuicultura presenta grandes retos y limitaciones, los cuales la FAO divide en las siguientes categorías: a) microeconómicas (acceso a capitales, insumos recurrentes y mercados); b) de conocimiento (competencia técnica, administrativa, legal, financiera y de gestión); c) sociales (cultura, organización, adaptación de nuevas tecnologías, políticas públicas y factores exógenos); d) ambientales (adaptación al cambio climático, impactos ambientales, recursos naturales y genéticos).

Algunos estudios en México se han tomado con seriedad el tema de los recursos genéticos. En el caso de la trucha, se han identificado por lo menos seis entidades genéticas de salmónidos nativos en regiones de la Sierra de San Pedro Mártir en Baja California Norte y en la Sierra Madre Occidental en los estados de Chihuahua, Sonora, Sinaloa y Durango, considerando que estos están en riesgo y vulnerables debido a la deforestación de bosques, cambio de hábitat, cambio climático, sobreexplotación

del recurso, inducción de especies y escaso interés de las autoridades en preservar y mantener el genoma (Hendrickson et al. 2002).

#### *La Trucha Arcoíris en México*

En México, los inicios de la piscicultura de trucha arcoíris datan de finales del siglo XIX, se considera que en el año de 1888 se inicia la piscicultura institucional a partir de la construcción del vivero nacional de Chimalapan en el estado de México, con un lote de 500 mil huevos de trucha arcoíris importados de los Estados Unidos (Arredondo-Figueroa 1983; Pueyo 2004).

En 1892 se realizan las primeras siembras en diversos cuerpos de agua de especies exóticas introducidas como trucha arcoíris y carpa, con ejemplares cultivados en los viveros de Chimalapan y la Condesa como parte de las políticas públicas que existían en esa época con el fin de desarrollar la pesca deportiva, el consumo de proteína animal y la acuicultura extensiva (Contreras-MacBeath et al. 2014).

En 1937 se construyó la estación piscícola de Almoloya del Río y en 1943 se inaugura la del Zarco en el Distrito Federal, con estas dos estaciones se intensificó el desarrollo del cultivo extensivo de trucha y se incrementaron las operaciones de siembra y repoblación en aguas interiores, lo que favoreció una mayor distribución de esta especie en nuestro país (Camacho et al. 2000).

Debido al desarrollo tecnológico de otros países y el derivado de la investigación científica nacional, a partir de 1981 se comienzan a dar los cimientos de los cultivos controlados operados por piscicultores rurales y acuicultores industriales, estos últimos especialmente de camarón (Camacho et al. 2000).

La primer especie acuícola de agua dulce que se empezó a consolidar comercialmente en México fue la trucha arcoíris que se cultiva en zonas frías y montañosas, sin embargo su crecimiento ha sido moderado y su mercado se ha limitado a satisfacer la demanda local de donde se cultiva; dicha consolidación se debe principalmente a que se dispone de un completo dominio de su tecnología ya que se manejan todas las fases de su desarrollo desde su reproducción, engorda y cosecha, además se cuenta con disposición de crías y alimentos balanceados de buena calidad (Camacho et al. 2000).

#### *La Trucha Arcoíris en Durango*

En el estado de Durango, el gobierno promovió el establecimiento del cultivo de trucha en la zona serrana debido a que resultaba una forma de aprovechamiento del recurso hídrico que se tiene en la sierra, es decir, aprovechamiento de arroyos y manantiales; como fuente de ingresos y de trabajo en comunidades consideradas con alto grado de marginación y pobreza, como una fuente de alimentos con alto contenido de proteína (18%) y como una diversificación a la actividad económica principal que es el aprovechamiento forestal con el fin de evitar o mitigar la deforestación de la Sierra Madre Occidental. Sin embargo, fue una especie introducida sin considerar los riesgos al recurso genético nativo, ya que la técnica de cultivo de la trucha arcoíris ya estaba establecida y el desconocimiento de la existencia de especies nativas en la región.

Debido a políticas públicas y considerando que era la mejor opción para el desarrollo de la actividad acuícola con trucha en su momento, en el año de 1986 se logró incubar y eclosionar el primer lote de truchas en el centro acuícola del Guadiana ubicado en el poblado 15 de Septiembre, el cual actualmente no opera. La primera granja de truchas fue “La Victoria” perteneciente al ejido del mismo nombre ubicada a 10 km del Salto, Pueblo Nuevo, la cual comenzó a operar en el año de 1987. Esta granja consta de instalaciones adecuadas para la reproducción de crías.

Las granjas de trucha en Durango se localizan en lugares fríos del noroeste, en los municipios de Topia, Tamazula, Otáez, Santiago Papasquiaro, Pueblo Nuevo, San Dimas y una en la parte sur de la Sierra del Mezquital. Estas cuentan con agua clara y corriente, con temperaturas del agua que no superen

los 23°C en verano y cuyo contenido de oxígeno es igual o superior a 5 ppm, por lo que la zona serrana es ideal para el cultivo de salmónidos.

El estado de Durango, según Mar Tovar y colaboradores (2004), presenta condiciones adecuadas para el cultivo de trucha ya que se cuenta con bosques con agua y temperatura adecuada para establecer unidades piscícolas, sin embargo también afirman que en el 2010 existían 40 granjas truchícolas en el estado y que solo cinco de ellas se consideraban rentables.

La producción promedio en el cultivo de la trucha a nivel semi-intensivo (ríos, presas, etc.) es de apenas 1.5 a 3 kg/m<sup>3</sup>, sin embargo con la aplicación de la tecnología para cultivo intensivo de trucha se pueden obtener rendimientos en un promedio de 26 a 30 kg/m<sup>3</sup>. La producción en Durango se ha ido incrementando con el tiempo, estimándose que en 1995 la producción de trucha reportada para el estado fue de nueve toneladas, para el 2005 había incrementado a 160 toneladas y para el 2010 a 1 182 toneladas, siendo la mayor producción reportada hasta ahora en los diarios estadísticos de pesca y acuicultura. En ese año, Durango ocupó el tercer lugar nacional en la producción de trucha, superado por el Estado de México con 3046 toneladas y Tamaulipas con 1407 toneladas (Fig. 1).

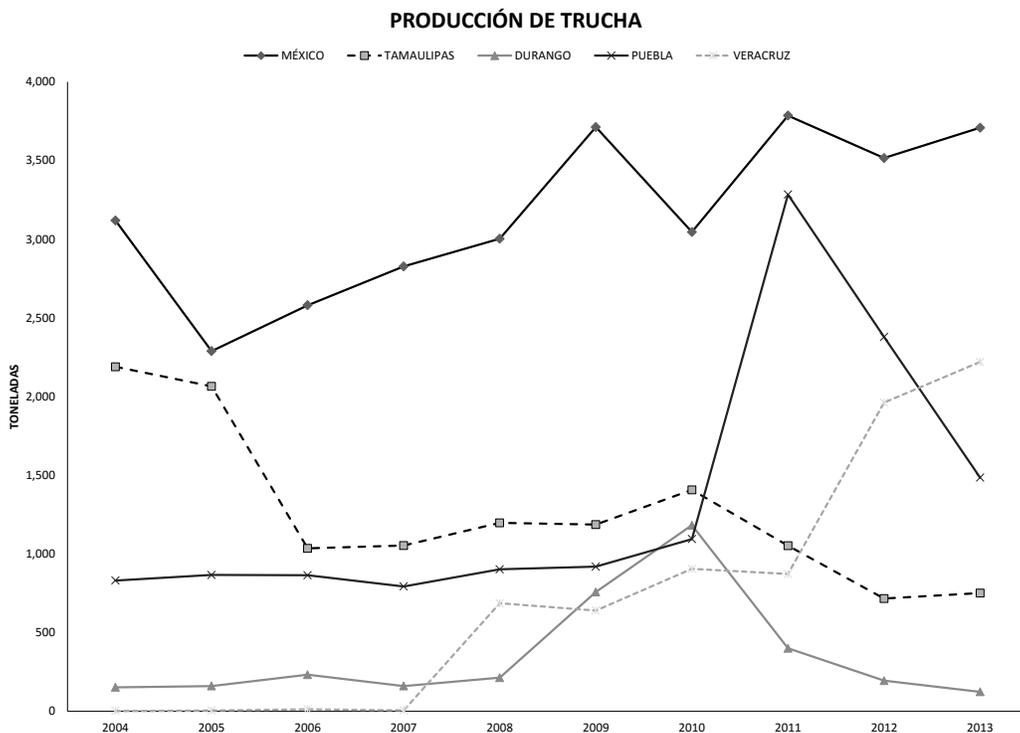


Figura 2. Comparación de la producción de trucha en Durango con otros estados (2004 a 2013).

Para los años siguientes se registró un decremento importante en la producción llegando a 82 toneladas en el 2014, por razones que se desconocen hasta el momento (Tabla 1).

Tabla 1. Producción en peso desembarcado, vivo y valor de la producción de trucha en México. Fuente: Anuario Estadístico CONAPESCA (2014).

ENTIDAD	PESO DESEMBARCADO (KG)	PESO VIVO (KG)	VALOR (PESOS)
MICHOACAN	6,457,832.00	6,461,565.90	339,327,584.38
EDO. MÉXICO	4,794,787.71	4,794,875.81	247,860,205.19
PUEBLA	2,775,584.05	2,775,834.05	147,206,299.76
VERACRUZ	770,136.00	770,136.00	42,482,096.85
CHIHUAHUA	386,765.00	386,765.00	18,409,932.25
HIDALGO	300,200.65	300,200.65	17,314,275.75
DURANGO	82,026.00	82,856.60	4,345,570.12
GUERRERO	45,000.00	45,000.00	2,293,485.22
QUERETARO	26,010.00	26,010.00	1,452,329.38
OAXACA	22,253.00	22,373.30	1,297,218.23
JALISCO	16,259.00	16,259.00	898,299.04
MORELOS	12,563.00	12,563.00	718,093.95
TLAXCALA	800.00	800.00	54,048.00
BAJA CALIFORNIA	136.40	136.40	8,078.32
GUANAJUATO	95.00	95.00	4,756.10

A pesar de que se considera que Durango cuenta la capacidad biológica, física, geográfica y humana para producir y competir con otros estados de manera importante, los registros muestran que no se ha logrado. En cuanto a la derrama económica que deja esta actividad, se tiene registro de más de cuatro millones de pesos en el estado. Sin embargo y debido a los avances en investigación que se han tenido en los últimos años en relación a la trucha nativa, en este caso la denominada trucha dorada mexicana, algunos estudios sugieren podría representar una alternativa importante para su cultivo y conservación de genoma, lo que posiblemente pudiera representar una alternativa para la competitividad acuícola (Barriga-Sosa et al. Capítulo 11, esta obra).

Partiendo de la hipótesis de que la actividad acuícola es una alternativa viable para proveer seguridad alimentaria y mitigar la pobreza y que el Estado de Durango cuenta con la capacidad de ser uno de los principales productores del país debido a sus condiciones ambientales propicias para el cultivo, se determinó realizar un estudio que permitiera tener una aproximación de la actividad truchícola en el estado con el fin de dimensionar su importancia social y económica.

#### *Procedimiento Metodológico*

La recolección de información se obtuvo de diferentes fuentes; bibliográfica, oficial y a través de encuestas y entrevistas a actores clave. Se consideró como unidad de análisis a las granjas acuícolas del estado y con el fin de determinar el número de unidades existentes, se obtuvo una base de datos pública de las granjas registradas ante la CONAPESCA, a través del Registro Nacional de Pesca y Acuicultura (RNPA). En ésta se obtuvo que existe un total de 36 unidades registradas, sin embargo en entrevista con el Delegado Federal de la CONAPESCA en Durango y el Jefe de Oficina de la misma dependencia, se estableció que existen granjas que están activas y que no cuentan con RNPA desconociendo el número

exacto de granjas en esta situación. Para fines de este estudio se estableció como universo las 36 granjas que están registradas oficialmente a la fecha.

La selección de la población fue aleatoria, del total de las granjas se visitaron y entrevistaron a los productores que estuvieron dispuestos a participar en el estudio, se visitaron *in situ* con el fin de conocer la granja, tomar su posición geográfica y algunas fotografías.

La ubicación de las granjas es en la zona serrana del estado, en la Sierra Madre Occidental, esto debido a que ahí es donde se presentan las condiciones ambientales necesarias para dicha actividad como clima, afluentes y calidad de agua (Fig. 2).

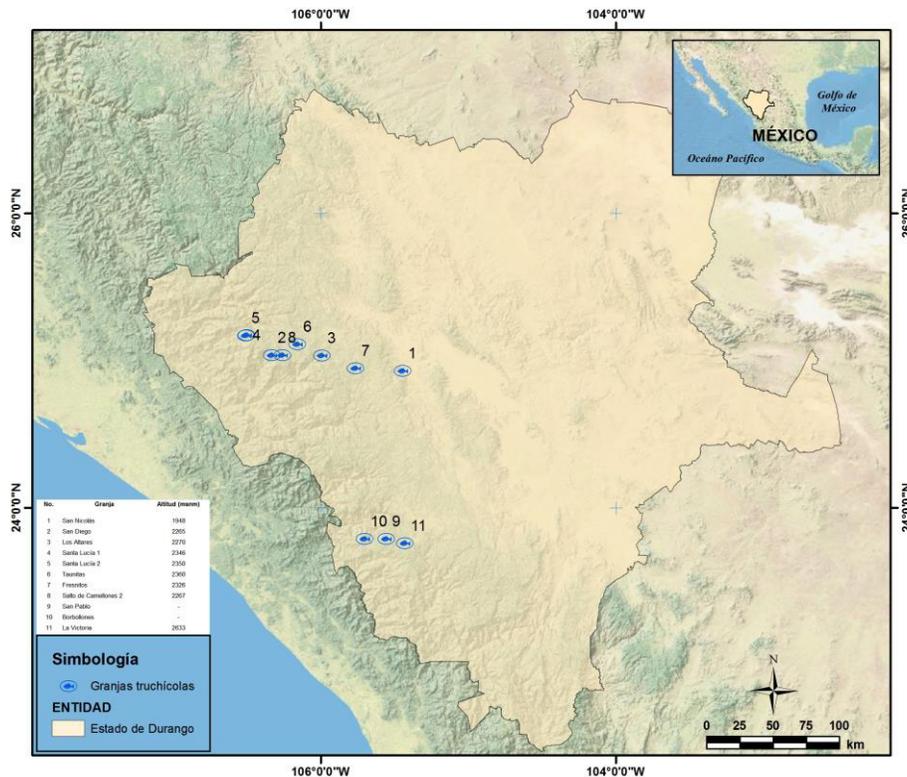


Figura 2. Mapa de la ubicación de las granjas en el estado de Durango y altitud.

Se aplicó una encuesta estructurada y se levantaron datos principalmente económicos relacionados con el tipo de organización, actividades productivas primarias y de la actividad truchícola con el fin de determinar la importancia económica de la actividad en relación a otras actividades que realizan los productores. Estas se realizaron en la zona norte y sur de la sierra del estado de Durango. Este estudio se puede considerar como exploratorio, ya que no se levantó el número de encuestas suficiente para una validación que pueda dar un diagnóstico más certero, debido a que no se contaba con los recursos suficientes para hacer un levantamiento representativo estadísticamente. Sin embargo y a pesar de lo anterior, se obtuvo un panorama amplio de la situación de las granjas en el estado.

## RESULTADOS

### *Caracterización Social*

La caracterización social se realizó básicamente a partir de indicadores generados por la CONEVAL en el año 2014, publicados en el 2016, con el fin de establecer el grado de marginación y pobreza de las

regiones. Las granjas registradas en el RNPA, se encuentran ubicadas en zonas rurales y ejidales en su mayoría, en los municipios serranos de Santiago Papasquiaro, Pueblo Nuevo, San Dimas, Tepehuanes y Otáez. Las granjas visitadas están en su mayoría en los municipios de Pueblo Nuevo, Santiago Papasquiaro y Tepehuanes.

Durango es un estado en donde la mayor parte de sus municipios cuenta con un alto índice de pobreza, según datos del CONEVAL (2016), sin embargo la mayor parte de los municipios serranos son los que cuentan con mayor porcentaje de población en situación de pobreza (Fig. 3).

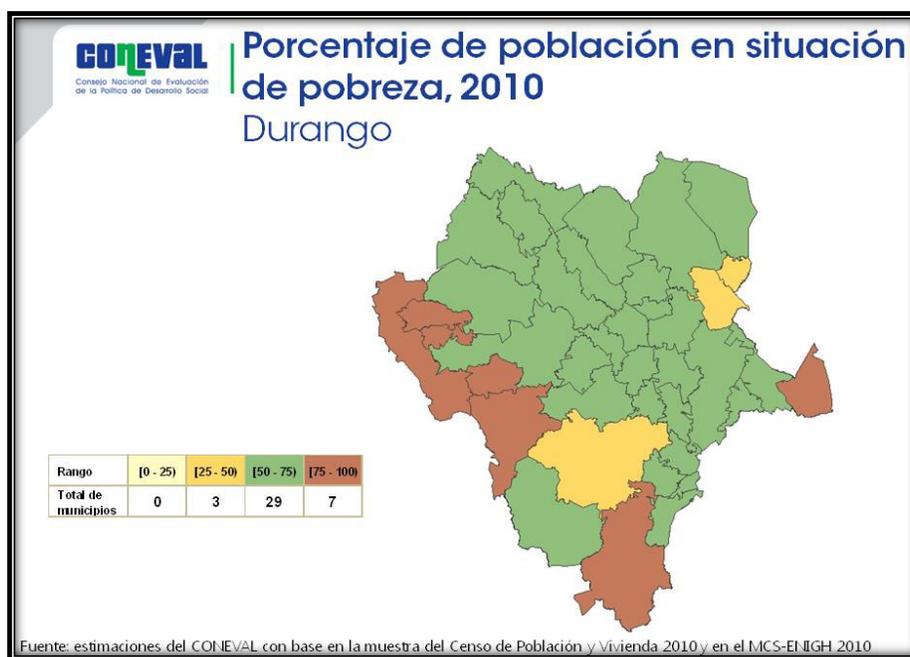


Figura 3. Población en situación de pobreza en Durango. Recuperado del CONEVAL [http://www.coneval.org.mx/coordinacion/entidades/Durango/Paginas/pob\\_municipal.aspx](http://www.coneval.org.mx/coordinacion/entidades/Durango/Paginas/pob_municipal.aspx), Julio de 2010.

De igual manera, la CONEVAL (2016) indica que los municipios con mayor porcentaje de población en pobreza son el Mezquital, Otáez, San Dimas, Canelas y Tamazula (Fig. 4).

Durango						
Municipios con mayor y menor porcentaje de población en situación de pobreza, 2010						
Municipio	Pobreza			Pobreza extrema		
	Porcentaje	Personas	Carencias	Porcentaje	Personas	Carencias
<b>Municipios con mayor porcentaje de población en pobreza</b>						
Mezquital	90.8	29,587	3.6	58.0	18,884	4.1
Otáez	88.1	6,419	2.9	38.4	2,801	3.8
San Dimas	83.7	20,536	2.7	32.0	7,858	3.6
Canelas	83.3	4,500	2.9	34.1	1,840	3.7
Tamazula	82.1	26,015	3.1	35.9	11,384	3.7
<b>Municipios con menor porcentaje de población en pobreza</b>						
Gómez Palacio	38.8	122,292	2.1	5.6	17,498	3.4
Durango	42.2	241,325	2.0	5.1	28,951	3.4
Lerdo	46.6	67,677	2.1	6.7	9,679	3.6
Tlahualilo	50.8	12,735	2.0	6.1	1,540	3.5
Rodeo	52.3	6,214	1.7	5.5	655	3.4
Total de municipios en el estado: 39						
Fuente: estimaciones del CONEVAL con base en el MCS-ENIGH 2010 y la muestra del Censo de Población y Vivienda 2010.						
Nota: de acuerdo con la metodología de medición de pobreza publicada en el Diario Oficial de la Federación el 16 de junio de 2010, las estimaciones de pobreza que se reportan toman en cuenta la variable combustible para cocinar y si la vivienda cuenta con chimenea en la cocina en la definición del indicador de carencia por acceso a los servicios básicos en la vivienda.						
Nota: las estimaciones municipales de pobreza 2010 han sido ajustadas a la información reportada a nivel estatal en julio de 2011. Pueden variar ligeramente debido a valores faltantes en el MCS-ENIGH 2010.						

Figura 4. Municipios con población en situación de pobreza en el estado de Durango. Recuperado del CONEVAL. [http://www.coneval.org.mx/coordinacion/entidades/Durango/Paginas/pob\\_municipal.aspx](http://www.coneval.org.mx/coordinacion/entidades/Durango/Paginas/pob_municipal.aspx). Julio de 2010.

Por otro lado el porcentaje de población con carencia por acceso a la alimentación según CONVAL en el 2014, era relativamente baja en el estado, sin embargo se observa que algunos municipios serranos son los que cuentan con un valor más alto que la mayoría (Fig. 5).

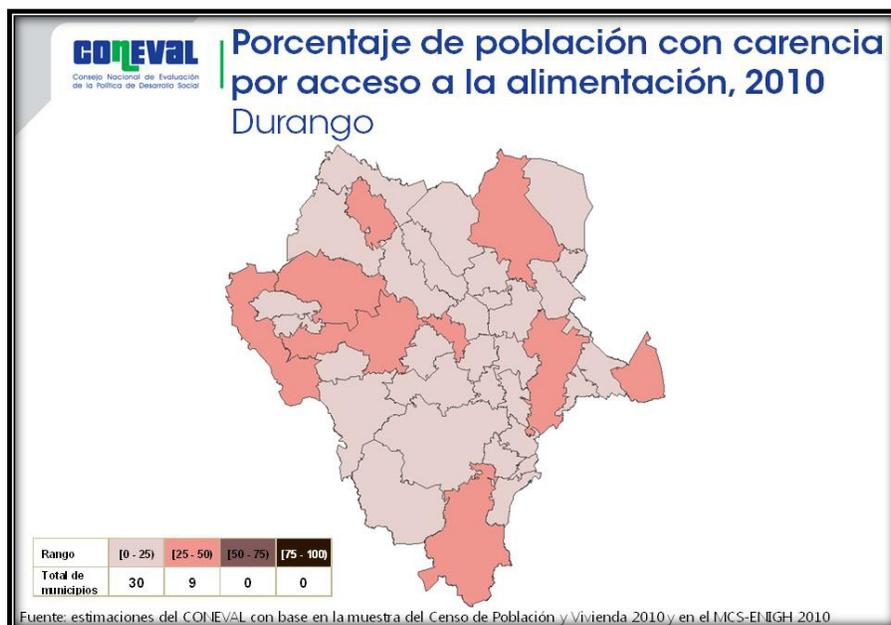


Figura 5. Carencia por acceso a la alimentación en Durango. Recuperado del CONEVAL [http://www.coneval.org.mx/coordinacion/entidades/Durango/Paginas/pob\\_municipal.aspx](http://www.coneval.org.mx/coordinacion/entidades/Durango/Paginas/pob_municipal.aspx). Julio de 2010.

Las granjas están constituidas en su mayoría por sociedades ejidatarias, con un gran número de miembros, los cuales comenzaron con actividades productivas relacionadas principalmente al sector forestal. Con el tiempo y debido al crecimiento poblacional dentro de los ejidos, de la deforestación que estos generaban y de las políticas públicas, las cuales fomentaron los cultivos de trucha en la zona serrana a partir del año 2000, se diversificaron sus actividades e incluyeron la truchicultura como sistema productivo para la generación de ingresos.

#### *Caracterización Económica*

En cuanto a la caracterización económica se preguntaron aspectos como tipo de organización, número de socios, cantidad de empleados, actividades alternas a la truchicultura y nivel de importancia que les representa económicamente, antigüedad de la granja, si cuentan con el equipo necesario para la actividad, proveedores, tipo de cultivo, capacidad instalada, si cuentan con infraestructura para la reproducción, producción anual, destino de la producción, precio de venta, principales compradores, ingreso promedio, entre otras.

Con los resultados obtenidos de las once encuestas aplicadas por granja, podemos decir que todos los productores que se dedican a la truchicultura tienen como actividad primaria la forestal, la agricultura y la ganadería, representando la truchicultura la actividad que les deja el menor de los ingresos.

Los sistemas de cultivo con los que cuentan son semi-intensivos, con ciclos de cultivos anuales, esto es una o dos cosechas por año produciendo de 2 a 16 toneladas anuales dependiendo del tamaño de la granja, sin embargo una de las inquietudes de las once granjas encuestadas es la posibilidad de realizar cultivos escalonados, esto es poder sembrar y cosechar constantemente durante todo el año, sin embargo la escasez de cría y la capacitación son limitantes para realizar este tipo de cultivos (Fig. 6).

Por otro lado, las once granjas destinan la producción a la venta en la comunidad y los socios ejidatarios y solo dos de ellas venden en otras localidades, municipios o estados, sin embargo todos manifestaron deseos de ampliar sus mercados.



Figura 6. Fotos de la granja San Pablo, la Victoria y Anexos y Ejido Borbollones en el Estado de Durango.

Por otro lado y en relación a los proveedores de insumos, siete de las granjas compran la cría o alevín a proveedores ubicados en el estado, éstas granjas son, Quebrada Honda, S.P.R. de R.L., Ejido San Pablo, Granja Trutícola la Cieneguilla, S.C.R.L. de C.V. y Ejido la Victoria y Anexos, los cuales compran el huevo fertilizado fuera del estado, ya sea en Toluca, Estado de México, o incluso en Estados Unidos ya que cuentan con equipo para eclosionarlo, convirtiéndose así mismo en los proveedores de cría o alevín para el resto de los productores encuestados (Fig. 7).

La mayoría no cuentan con todo el equipo necesario para el cultivo. Las siete granjas que manifestaron comprar el alevín a granjas locales, no cuentan con el equipo ni la infraestructura para eclosionar huevo fertilizado, las once granjas carecen de equipo como termómetros, medidores de pH, equipo de laboratorio, redes, oxímetros, separadores y clasificadores de tallas, infraestructura y equipo para dar valor agregado, como mesas de acero inoxidable, tarjas, cuchillos, cámaras de conservación, además de equipo para transportar producto vivo, fresco o congelado.

Las once granjas encuestadas cuentan con uno a tres empleados fijos y de tres a quince empleados eventuales. De las onces solo dos de ellas la venden entera y las nueve restantes entera eviscerada, haciendo la limpieza del producto en lugares que pueden provocar contaminación en el producto. Dos de los productores cuentan con negocio de restaurant, en el cual venden el producto en platillos, siendo el tradicional la trucha frita entera con papas fritas.



Figura 7. Fotos de sistemas de eclosión de huevos de trucha en las granjas del Estado de Durango

El precio de la trucha va de 80 a 150 pesos el kilogramo entero eviscerado, a pie de granja fresco, siendo sus principales compradores los consumidores finales de la localidad, los cuales son los mismos socios ejidatarios y sus familias y otros pobladores de los ejidos. Ninguna granja vende fuera de sus localidades ya que no cuentan con transporte ni métodos de conservación como empacados al vacío, cámaras de conservación o congelación, ni tampoco transporte para peces vivos.

En cuanto a los costos de producción se considera que el alimento es el costo más fuerte con el que cuentan todas ellas, manifestando que representa del 40 al 50% de sus costos de producción. La especie domesticada para dicha actividad es la trucha arcoíris, sin embargo es importante profundizar sobre este tema en el sentido estrictamente ambiental ya que las granjas de trucha arcoíris pudieran provocar disminución en los flujos de agua de los arroyos y ríos, limitar el espacio de reproducción de las truchas nativas y así disminuir las poblaciones de estas poniendo en riesgo la conservación de las especies nativas.

## CONCLUSIONES

Podemos concluir que el estado de Durango se caracteriza por contar con condiciones ambientales que favorecen el cultivo de trucha en las comunidades ubicadas Sierra Madre Occidental, sin embargo carecen de aspectos como equipo, transporte y capacitación que limita el desarrollo de la actividad para ser más productiva.

Se considera que esta actividad complementa las actividades forestales más no las sustituye, por lo que es importante considerar el equilibrio ambiental que poseen los territorios y su capacidad de carga para realizar los diferentes medios de vida.

Las limitantes observadas se pueden identificar en los diversos eslabones de la cadena productiva y en la red de soporte de la misma. Una de las principales limitantes es la insuficiente producción local de huevo oculado y alta dependencia hacia los proveedores de cría en el estado, que a su vez son de capacidades limitadas en cuanto a la técnica

relacionada con la reproducción e inversiones en la adquisición de huevecillo. Por otro lado, el elevado costo del alimento balanceado es otra limitante de la actividad.

La práctica productiva se hace orientada a obtener una o dos cosechas por año, es decir no se obtiene escalonada, con ello se pierde la oportunidad de generar para el autoconsumo, proteína de alta calidad de forma continua. Para lograrlo sería necesario fortalecer la cadena de producción desde la producción de cría y la capacitación para incorporar los procesos de cultivos escalonados. Debido a lo anterior se ve una limitada valoración social y económica de la actividad por parte de las autoridades y de los propios productores, por lo que es importante resolver la problemática de la cría y del alimento para potenciar la actividad en el estado, además de buscar alternativas de especies como las truchas nativas debido a las problemáticas ambientales que se han detectado por algunos autores.

Ahora bien, la capacidad de la especie tanto nativa como introducida, de ser cultivada muestra potencial productivo, pero es necesario abrir nuevos canales de comercialización o bien transformar el producto para darle valor agregado, además de un estudio profundo de las condiciones que se tienen en las distintas granjas: su infraestructura, sistema de cultivo, el impacto que se está produciendo de forma social, económico, ambiental, para constatar si se están alcanzando las metas para la implantación de este sistema de producción.

Es importante aclarar que este fue un estudio exploratorio por lo que habría que hacer un estudio de mayor alcance para obtener una validez estadística, además de profundizar en el tema ambiental y de la factibilidad de impulsar el cultivo de las truchas nativas con el fin de mitigar algunos daños ambientales que se han observado debido al cultivo de especies introducidas.

## REFERENCIAS

- Arredondo-Figueroa J.L. 1983. Especies animales acuáticas de importancia nutricional introducidas en México. *Biotica*. 8(2): 175-199.
- Barriga-Sosa, I.A., J.L. Arredondo-Figueroa, G. Ingle de la Mora y F.J. García-De León. 2016. 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.
- Camacho, B.E., M.A. Moreno R., M. Rodríguez G., C. Luna R. y M. Vázquez H. 2000. *Guía para el cultivo de trucha*. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, Subsecretaría de Pesca, Dirección General de Acuicultura, México. 135 p.
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social. 2015. *La política de evaluación en México: 10 años del CONEVAL*. México. 77 p.
- Contreras-Macbeath, T., M.T. Gaspar-Dillanes, L. Huidobro-Campos y H. Mejía-Mojica. 2014. Peces invasores en el centro de México. En: Mendoza, R. y P. Koleff (coords.). *Especies acuáticas invasoras en México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México. pp. 413-424.
- FAO. 2007. *Cambio climático y seguridad alimentaria: Documento Marco*. Roma, Italia.
- FAO. 2014. *El estado mundial de la pesca y la acuicultura*. Oportunidades y desafíos. Roma. 253 p.
- Gómez, F. 2003. Desnutrición. *Salud Pública de México*. 45(4): 576-582.
- Hendrickson, D.A., H. Espinosa Pérez, L.T. Findley, W. Forbes, J.R. Tomelleri, R.L. Mayden, J.L. Nielsen, B. Jensen, G. Ruiz Campos, A. Varela Romero, A. van der Heiden, F. Camarena and F.J. García-De León. 2002. Mexican native trouts: a review

- of their history and current systematic and conservation status. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*. 12: 273-316.
- Mar Tovar, C.L., F. Compeán G., F.O. Carrete C., F. Gelwick y T. Jamal. 2004. Establecimiento y operación de granjas para el cultivo de truchas en Durango. *Folleto Técnico 23*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México. 20 p.
- Meyer, D.E. 2004. *Introducción a la Acuicultura*. Escuela Agrícola Panamericana. Honduras. 152 p.
- Pueyo, B.L. 2004. *Manual de la trucha y su pesca en México*. Arco Iris Sport Fishing. México, Distrito Federal. 313 p.
- Torres-Orozco, R.E. y M.A. Pérez-Hernández. 2011. Los peces de México: una especie amenazada. *Revista Digital Universitaria*. 12(1): 1-15.
- Urquía-Fernández, N. 2014. La seguridad alimentaria en México. *Salud Pública de México*. 56(1): 92-98.

## 16. La política pública mexicana de truchicultura

---

*Eduardo Sánchez Ortiz, Erika Cassio Madrazo, Elizabeth Medina Herrera*

La normatividad en México, desprendida de la *Ley General de Pesca y Acuicultura Sustentables* (LGPAS) (D.O.F. 2015) y de la *Ley General de Vida Silvestre* (LGVS) (D.O.F. 2000) pretende, en el primer caso, incentivar la producción acuícola para atender la insuficiencia alimentaria, y en el segundo caso, la conservación de la vida silvestre y las especies nativas. Sin embargo en la práctica, en aparente contrasentido con las intenciones del Estado, ambos propósitos no han sido adecuadamente conciliados y como consecuencia predomina la introducción de especies exóticas bajo la justificación del desarrollo económico, de tal modo que se ha convertido en una amenaza para las especies nativas y genera su desplazamiento de un mercado de por sí exiguo.

Un ejemplo claro de lo anterior es el caso de la Trucha dorada mexicana (*Oncorhynchus chrysogaster*) en la Sierra Madre Occidental, donde la introducción recurrente y extendida de la trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*), una especie exótica y de la cual se ha demostrado que atenta contra la existencia de la especie nativa (ver Escalante-Sánchez et al. Capítulo 10, esta obra) es tolerada y aun incentivada desde los sectores de gobierno que fomentan la acuicultura de trucha, lo cual ocurre sin que aparentemente se considere estar violando el marco legal debido a su falta de precisión y a la carencia de regulaciones regionales.

En este capítulo se hace la revisión del marco jurídico y normativo vigente en nuestro país, poniendo de manifiesto los vacíos tanto legales como de estructura gubernamental para atender lo que en estricto sentido sería su objeto: conservar las especies nativas, regular el aprovechamiento y fomentar el desarrollo de la actividad productiva, todo ello sin comprometer el equilibrio ecológico ni restringir el desarrollo económico.

### *Marco ético político de la actividad pesquera y acuícola*

El marco ético político, específicamente el que involucra la actividad pesquera y acuícola, establecido en los principios fundamentales del artículo 27 de la Constitución de los Estados Unidos Mexicanos (Congreso de la Unión 2016), parte del hecho de la propiedad originaria de la Nación de las tierras y aguas comprendidas dentro de los límites del territorio nacional y en la facultad de la misma de “...regular, en beneficio social, el aprovechamiento de los elementos naturales susceptibles de apropiación, con objeto de hacer una distribución equitativa de la riqueza pública, cuidar de su conservación, lograr el desarrollo equilibrado del país y el mejoramiento de las condiciones de vida de la población rural y urbana...” (Congreso de la Unión 2016).

En consecuencia esto lleva a dictar las medidas necesarias “... para ordenar los asentamientos humanos y establecer adecuadas provisiones, usos, reservas y destinos de tierras, aguas y bosques...” y “... para preservar y restaurar el equilibrio ecológico ... para disponer, en los términos de la ley reglamentaria, la organización y explotación colectiva de los ejidos y comunidades; para el desarrollo de la pequeña propiedad rural; para el fomento de la agricultura, de la ganadería, de la silvicultura y de las demás actividades económicas en el medio rural y para evitar la destrucción de los elementos naturales...” (Congreso de la Unión 2016).

Por tanto la acuicultura como actividad productiva ya sea individual o colectiva está sujeta a la regulación de la ley porque “... *Corresponde a la Nación el dominio directo de todos los recursos naturales...*” y a la vez “... *bajo el principio de concurrencia y con la participación de los productores pesqueros, así como de las demás disposiciones previstas en la propia Constitución que tienen como fin propiciar el desarrollo integral y sustentable de la pesca y la acuicultura...*” es decir se trata de una actividad productiva que aprovecha los recursos originarios de la nación para el desarrollo, el cual deberá además tener una visión de sustentabilidad (Congreso de la Unión 2016).

Es notable el énfasis sobre la conservación de las especies nativas mencionadas como *los recursos originarios* y su preferencia sobre las especies exóticas, aún en la propia *Ley General de pesca y acuicultura sustentables* (LGPAS), se insiste en este concepto al definir el ordenamiento acuícola vinculándolo como la reducción del impacto ambiental, al tiempo de ampliar el número de especies nativas que se cultiven y dándole prioridad sobre las especies exóticas (Artículo 17, fracción VI reformada en 5 de diciembre de 2014, LGPAS). Del mismo modo, al hablar de los programas que incentiva el Programa Nacional de Pesca o en lo referente a estudios técnicos para el desarrollo del sector, insiste en la acuicultura de especies nativas.

#### *Protección de hábitats y especies nativas*

Las bases de la política pública respecto al interés del Estado por proteger tanto los hábitats y las especies nativas se encuentran expresadas de forma fundamental en la Ley General de Vida Silvestre que en su artículo 27 establece que: “*El manejo de ejemplares y poblaciones exóticas sólo se podrá llevar a cabo en condiciones de confinamiento*” de acuerdo con un plan de manejo para evitar los efectos negativos que pudieran tener para la conservación de los ejemplares y poblaciones nativos de la vida silvestre y su hábitat (D.O.F. 2000).

Adicionalmente el artículo 27 Bis menciona que: “*No se permitirá la liberación o introducción a los hábitats y ecosistemas naturales de especies exóticas invasoras*” asimismo la Secretaría en este caso del Medio Ambiente y Recursos Naturales determinará dentro de las normas oficiales mexicanas o acuerdos secretariales las listas de especies exóticas invasoras con una actualización cada tres años por lo menos. En estas listas se indica el género, la especie y, en su caso, la subespecie y son publicadas en el Diario Oficial de la Federación y en la Gaceta Ecológica.

El artículo 27 Bis 1 dicta que no se autorizará la importación de especies exóticas invasoras o especies silvestres que sean portadoras de dichas especies invasoras que representen una amenaza para la biodiversidad, la economía o salud pública.

El propósito de los confinamientos mencionados es prevenir y minimizar los efectos negativos sobre los procesos biológicos y ecológicos, así como la sustitución o desplazamiento de poblaciones de especies nativas que se distribuyan de manera natural en el sitio.

#### *Política pública de pesca y acuicultura*

Las intenciones del Estado para la actividad del cultivo de truchas se encuentran expresadas en la *Ley General de pesca y acuicultura sustentables* (LGPAS), la cual cumple con los dos propósitos expresos en el mandato Constitucional de forma simultánea, la primera como ley reglamentaria del artículo 27 constitucional, expresa en su artículo 1° donde establece como objeto “*regular, fomentar y administrar el aprovechamiento de los recursos pesqueros y acuícolas en el territorio nacional y las zonas sobre las que la nación*

*ejerce su soberanía y jurisdicción” (D.O.F. 2015) y la segunda como ley reglamentaria del 73 fracción XXIX-L, para lo cual busca además “Establecer las bases para el ejercicio de las atribuciones que en la materia corresponden a la federación, las entidades federativas y los municipios, bajo el principio de concurrencia y con la participación de los productores pesqueros, así como de las demás disposiciones previstas en la propia Constitución que tienen como fin propiciar el desarrollo integral y sustentable de la pesca y la acuacultura” (D.O.F. 2015).*

#### *Definiciones de la Ley General de pesca y acuacultura sustentables*

Las definiciones de lo que se entiende por cada término descriptivo de las actividades reguladas se encuentran en el artículo 4° donde define:

*“I. Acuacultura: Es el conjunto de actividades dirigidas a la reproducción controlada, preengorda y engorda de especies de la fauna y flora realizadas en instalaciones ubicadas en aguas dulces, marinas o salobres, por medio de técnicas de cría o cultivo, que sean susceptibles de explotación comercial, ornamental o recreativa;*

*II. Acuacultura comercial: Es la que se realiza con el propósito de obtener beneficios económicos;*

*III. Acuacultura de fomento: Es la que tiene como propósito el estudio, la investigación científica y la experimentación en cuerpos de agua de jurisdicción federal, orientada al desarrollo de biotecnologías o a la incorporación de algún tipo de innovación tecnológica, así como la adopción o transferencia de tecnología, en alguna etapa del cultivo de especies de la flora y fauna, cuyo medio de vida total o parcial sea el agua;*

*IV. Acuacultura didáctica: Es la que se realiza con fines de capacitación y enseñanza de las personas que en cualquier forma intervengan en la acuacultura en cuerpos de agua de jurisdicción federal;*

...

*IV Bis. Acuacultura industrial: Sistema de producción de organismos acuáticos a gran escala, con alto nivel de desarrollo empresarial y tecnológico y gran inversión de capital de origen público o privado;*

*IV Ter. Acuacultura rural: Sistema de producción de organismos acuáticos a pequeña escala, realizada de forma familiar o en pequeños grupos rurales, llevada a cabo en cultivos extensivos o semiintensivos, para el autoconsumo o venta parcial de los excedentes de la cosecha.*

...

*XXXVII. Procesamiento Primario: Proceso basado exclusivamente en la conservación del producto por la acción del frío, enhielado y congelado y que no se le aplican métodos de cocción o calor en ninguna forma, incluyendo actividades de empacado, eviscerado, descabezado, fileteado o desangrado;*

...

*XLII. Sanidad acuícola: Es el conjunto de prácticas y medidas establecidas en normas oficiales, encaminadas a la prevención, diagnóstico y control de las plagas y enfermedades que afectan a dichas especies;*

...

*XLVI. Unidad de manejo acuícola: Se integra con las áreas comprendidas en una zona delimitada, en la que se establece un conjunto de unidades de producción con una*

*infraestructura básica y las instalaciones necesarias para su operación y funcionamiento compartido, operada de forma común;” (D.O.F. 2015).*

Destaca de las anteriores definiciones la acuicultura como una actividad general que deriva en distintas modalidades: comercial, de fomento, didáctica, industrial y rural, en función de los propósitos perseguidos por la actividad regulada.

*Coordinación con las entidades federativas para la actividad pesquera y acuícola*

Para el fortalecimiento de la instrumentación de las actividades de regulación de la pesca y la acuicultura, la LGPAS en el capítulo II específicamente en el artículo 11 establece que la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación podrá celebrar convenios o acuerdos de coordinación con los gobiernos de las entidades federativas para *“El ordenamiento territorial y la sanidad de los desarrollos acuícolas”* (D.O.F. 2015) y estos convenios que serían publicables en del Diario Oficial de la Federación de acuerdo a lo especificado en artículo 12 deberán sujetarse a:

*“I. Establecer su objeto con precisión, las materias y facultades que se asumirán, que deberán ser acordes con la política nacional de pesca y acuicultura sustentables;*

*II. Establecerán las responsabilidades y la participación de cada una de las partes, los bienes y recursos aportados por cada una, su destino y su forma de administración;*

*III. Se celebrarán a petición de una entidad federativa cuando garantice que cuenta con los recursos humanos capacitados y la estructura institucional específica para atender las funciones que asumiría de acuerdo con los recursos financieros que serán transferidos para cumplir con las responsabilidades;*

*IV. Establecerán el órgano u órganos que llevarán a cabo las acciones que resulten de los convenios o acuerdos de coordinación y definirán los procedimientos informativos correspondientes para vigilar el cumplimiento de los objetivos y;*

*V. Definirán la vigencia del instrumento, sus formas de modificación y terminación y, en su caso, la duración de sus prórrogas”*

Con ello establece la posibilidad de coordinación con las entidades federativas a las cuales impone las obligaciones descritas en el capítulo II en su artículo 13 tales como:

*“I. Diseñar y aplicar la política, los instrumentos y los programas para la pesca y la acuicultura estatal, en concordancia con la Política Nacional de Pesca y Acuicultura Sustentables, vinculándolos con los programas nacionales, sectoriales y regionales, así como con su respectivo Plan Estatal de Desarrollo;*

*II. Formular y ejercer la política local de inspección y vigilancia pesquera y acuícola en el marco del Convenio específico signado con la Secretaría en estas materias y participar de conformidad con los acuerdos y convenios que se celebren con la Federación en las acciones de prevención y combate a la pesca ilegal, así como en la formulación y evaluación del Programa Integral de Inspección y Vigilancia para el Combate a la Pesca Ilegal;*

...

*VIII. Promover y apoyar la construcción, mejora y equipamiento de embarcaciones y artes de pesca, así como la creación y operación de esquemas de*

*financiamiento adecuados para el desarrollo integral de la actividad pesquera y acuícola;*

...

*XIV. Promover mecanismos de participación pública de los productores en el manejo y conservación de los recursos pesqueros y acuícolas conforme a lo dispuesto en esta Ley y otras disposiciones jurídicas federales y locales aplicables.” (D.O.F. 2015).*

Además en el artículo 15 de la LGPAS se establece que *“Los Congresos de los Estados, con arreglo a sus respectivas Constituciones y la Asamblea Legislativa del Distrito Federal, expedirán las disposiciones legales que sean necesarias para regular las materias de su competencia previstas en esta Ley. Los ayuntamientos, por su parte, dictarán los bandos de policía y buen gobierno, los reglamentos, circulares y disposiciones administrativas que correspondan, para que en sus respectivas circunscripciones, se cumplan las previsiones del presente ordenamiento” (D.O.F. 2015).*

#### *Visión de sustentabilidad de la pesca y la acuicultura*

En el título Tercero de la LGPAS se refiere a la política nacional de pesca y acuicultura sustentables donde establece los siguientes principios generales:

“ ...

- *La pesca y la acuicultura son actividades que fortalecen la soberanía alimentaria y territorial de la nación*
- *Se orienten a la producción de alimentos para el consumo humano directo para el abastecimiento de proteínas de alta calidad y de bajo costo*
- *Sea compatible con su capacidad natural de recuperación y disponibilidad*
- *La investigación científica y tecnológica se consolide como herramienta fundamental para la definición e implementación de políticas, instrumentos, medidas, mecanismos y decisiones relativos a la conservación, restauración, protección y aprovechamiento sustentable de los recursos pesqueros y acuícolas, además de ser un instrumento que considere la implementación de acciones en materia de pesca y acuicultura sustentables para la mitigación y adaptación al cambio climático*
- *Reconocer a la acuicultura como una actividad productiva que permita la diversificación pesquera*
- *El ordenamiento de la acuicultura a través de programas que incluyan la definición de sitios para su realización, su tecnificación, diversificación, buscando nuevas tecnologías que reduzcan los impactos ambientales*
- *Prioridad en todo momento al cultivo de especies nativas sobre las especies exóticas*
- *Posicionar los productos pesqueros y acuícolas nacionales en los mercados de alto valor*
- *Establecimiento de una cultura de inocuidad*
- *Transversalidad para la instrumentación de políticas públicas con enfoque interdisciplinario*
- *Impulso regional equilibrado y equitativo, que priorice el desarrollo de las comunidades y pueblos indígenas*
- *Financiamiento para el desarrollo e innovación tecnológica y científica, participación, consenso y compromiso de los productores y sus comunidades en la*

*corresponsabilidad de aprovechar de forma integral y sustentable los recursos pesqueros y acuícolas...” (D.O.F. 2015).*

En el título Sexto de la LGPAS se reconocen como instrumentos de la política pesquera

- I. Los programas de ordenamiento pesquero;
- II. Los planes de manejo pesquero; y
- III. Las concesiones y permisos.

#### *Los objetivos de la acuicultura*

La actividad de acuicultura tiene un amplio sentido en la política pública como una actividad productiva con fines de subsistencia, para lo cual el texto legal dedica un título específico a la acuicultura en la cual establece como objetivos:

- *Fomentar el desarrollo de la acuicultura ofertando opciones de empleo en el medio rural*
- *Incrementar la producción acuícola para mejorar la dieta de la población*
- *Fortalecer el programa de acuicultura rural para atender la demanda alimentaria*
- *Fortalecer los programas de capacitación*
- *Promover sitios donde se incremente su eficiencia productiva*
- *Fomentar el uso de tecnologías (D.O.F. 2015).*

#### **La Carta Nacional Acuícola**

La Carta Nacional Acuícola tiene como propósito “... *dar a conocer a los sectores productivos, siendo consultivo y orientador para las autoridades competentes en la resolución de solicitudes de concesiones y permisos para la realización de las actividades acuícolas...*” y adquiere solo carácter informativo para los sectores mediante la “... *presentación cartográfica y escrita de los indicadores de la actividad, de las especies destinadas a la acuicultura, del desarrollo de la biotecnología y de las zonas por su vocación de cultivo...*” (D.O.F. 2013).

En ella se describen de forma detallada las distintas actividades acuícolas clasificándolas en:

- **Acuicultura comercial.**- Es decir por el cultivo de aquellas especies que tienen valor comercial en un mercado establecido y que su producción por tanto requiere de una manifestación de impacto ambiental tales como Abulón Rojo, Atún Aleta Azul, Bagre de canal, Camarón blanco del Pacífico, Langosta de agua dulce y Trucha arcoíris (D.O.F. 2013).
- **Acuicultura de fomento.**- En referencia a aquellas especies cuyo mercado se considera en formación y que para su cultivo no se requiere una manifestación de impacto ambiental tales como: Almeja de sifón, Huachinango, Ostión de placer, Pargo lunarejo, Pepino de mar en el Caribe, Pepino de mar en el Pacífico (D.O.F. 2013).
- **Especies con potencial acuícola.**- Se refiere a aquellas especies susceptibles de desarrollarse en producción acuícola tales como el Camarón rosado del Golfo de México, Mojarra Castarrica y Tenguayaca (D.O.F. 2013).

La trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) cuenta con un apartado específico en el cual se describen desde luego las generalidades de la especie destacándola como un cultivo del que se cuenta con completo dominio de su biotecnología. El apartado menciona también algunos antecedentes de la actividad acuícola ubicando su origen en el siglo XIX en el vivero de Chimela Lerma en el estado de México y destacando la formalización como una política de estado a partir de 1937, llegando en 1943 a establecerse como una acción de Estado a través del Centro Acuícola “El Zarco” el cual aún opera con una producción de 3 millones de organismos, finalmente agrega que en 1950 se estableció el Centro Acuícola de Pucato, Michoacán operado ahora por el Instituto Nacional de Pesca (INAPESCA).

La Carta Nacional Acuícola incluye para el cultivo de trucha arcoíris información descriptiva de su distribución geográfica, morfología, ciclo de vida, descripción del hábitat y las condiciones de alimentación tanto en el medio natural como en cultivos de engorda, así como diversos aspectos técnicos de su cultivo. Agrega además algunos otros aspectos relacionados con la sanidad y manejo acuícola, así como del manejo en el mercado. Incluye además una relación de la normatividad a la que está sujeta la actividad productiva relacionada con aspectos ambientales, de manejo de organismos vivos, pesqueros y acuícolas, calidad del agua utilizada y sanidad animal.

Sin embargo la Carta Nacional Acuícola, no menciona la trucha dorada mexicana ni a ninguna otra especie nativa, por consecuencia no regionaliza tampoco su distribución y tampoco establece medidas de prevención a la mezcla de especies y subespecies, esto se considera un vacío regulatorio dado que se publica en el Diario Oficial de la Federación, convirtiéndose así en referente obligado para cualquier regulación o plan de manejo regional.

### **Normas Oficiales Mexicanas**

La NOM-059 SEMARNAT-2010 refiere en el caso de la trucha dorada mexicana (*Oncorhynchus chrysogaster*), especie endémica amenazada y la trucha arcoíris o trucha de San Pedro Mártir (*Oncorhynchus mykiss nelsoni*), como especie “*sujeta a protección especial*” por lo que su regulación compete a la SEMARNAT, a través de la Dirección General de Vida Silvestre y puntualiza que su manejo y aprovechamiento sustentable sólo puede hacerse a través de Unidades de Manejo para la Conservación de la Vida Silvestre (UMA) y deberá sujetarse a lo dispuesto en la Ley General de Vida Silvestre y su Reglamento.

De forma general el sector pesquero cuenta con regulaciones de carácter ambiental como la NOM-009-PESC-1993 la cual rige el procedimiento para determinar las épocas y zonas de veda para la captura de las diferentes especies de la flora y fauna acuáticas, en aguas de jurisdicción federal.

Se regula la inocuidad de las actividades productivas que involucran organismos acuáticos vivos en la NOM-010-PESC-1993 mediante los requisitos sanitarios para la importación de organismos acuáticos vivos en cualesquiera de sus fases de desarrollo, destinados a la acuicultura u ornato, mediante la aplicación de cuarentenas establecidas en la NOM-011-PESC-1993 para prevenir la introducción y dispersión de enfermedades certificables y notificables, en la importación de organismos acuáticos vivos.

La NOM-017-PESC-1994 publicada el 9 de mayo de 1995 regula aspectos específicos de la pesca deportivo-recreativa en las aguas de jurisdicción federal de los Estados Unidos Mexicanos. Por su parte la NOM-128-SSA1-1994 establece la aplicación de un sistema de análisis de riesgos y control de puntos críticos en los procesos productos

de la pesca. Además existen normas que regulan las descargas de las aguas provenientes de la actividad productiva tales como la NOM-001-ECOL-1996 referente a los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, la NOM-003-ECOL-1997 los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.

### **Plan Maestro Nacional de Trucha**

Existe el documento Plan Maestro Nacional de Trucha propuesto por el Instituto Tecnológico Autónomo de México (ITAM), La Comisión Nacional del Pesca (CONAPESCA), la Cámara Nacional de la industria pesquera (CANAINPESCA) y el Centro de Estudios de Competitividad publicaron en 2007.

En este documento se concentra lo que se conoce acerca de la producción acuícola de trucha, ubica a nuestro país en el lugar 22 de la producción mundial con 968 toneladas anuales (el 0.5% de la producción mundial) y con un valor de 92 mil dólares en el mercado de exportación. Sin embargo señala que en 2003 la producción pesquera nacional de trucha fue de 7,727 toneladas de las cuales 3,734 toneladas vinieron de la acuicultura, de ellas el 93.3% viene de sistemas controlados y 6.7% de “*pesquerías acuiculturales*” (términos no definidos específicamente en el documento), alcanzando un valor de mercado de 175 millones de pesos de los cuales 126 millones de pesos los genera la acuicultura. Con ello el documento pretende destacar la importancia económica de la actividad productiva.

Los tipos de trucha que este documento identifica los basa en una revista citada en el sitio de la FAO (*Food and Agricultural Organization of United Nations*), denominado Fishstat Plus, (versión 2.3 publicada en marzo del 2006), la cual clasifica a la trucha en seis tipos: arcoíris, otros tipos, marina, alpina, de arroyo y lacustre. Lo que hace el documento poco aplicable para la realidad mexicana.

Esto es importante porque destaca una actividad productiva de importancia con 984 unidades de producción de trucha tanto para estados con litoral como sin litoral, en estos últimos (Estados de México, Puebla, Hidalgo, Durango, Chihuahua, Morelos, Querétaro y Nuevo León) se obtiene el 45% de la producción nacional de trucha (CONAPESCA 2007).

El documento identifica los distintos eslabones de la cadena de valor: insumos biológicos, producción, industrialización y comercialización; además establece un análisis de proveedores complementarios al proceso en aspectos tales como alimento y fletes. (CONAPESCA 2007).

En el primer eslabón hace un inventario de los proveedores del insumo biológico de huevo vivo a punto de eclosionar y de crías que fueron encuestados en los estados de Michoacán (3), Puebla (10) y Estado de México (13). Además de proveedores extranjeros de los Estados Unidos, Noruega, España y Francia. Establece también los criterios para seleccionar proveedores y regiones potenciales de insumo biológico, así como los precios promedio de los insumos requeridos. (CONAPESCA 2007).

En el eslabón de producción inventaría 112 granjas dedicadas al cultivo de trucha en Michoacán, 191 en el Estado de México y 88 en el Estado de Puebla. En el correspondiente a la industrialización solo identifica dos plantas de proceso. En el de comercialización inventaría a 2 comercializadores e intermediarios, a dos granjas con habilidades desarrolladas para la comercialización y 23 restaurantes. También establece los criterios para la determinación de comercializadores y las regiones potenciales. Identifica también a los comercializadores actuales y potenciales extranjeros en países tales como España, Chile

y Estados Unidos el cual se constituye como el único mercado al que nuestro país exporta en la actualidad. (CONAPESCA 2007).

En el apartado de programas de apoyo gubernamental hace un recuento de instrumentos y apoyos del sector público para esta actividad bajo la premisa de que el sector pesquero se concentra en pocos programas o fideicomisos como Alianza para el Campo, Fideicomiso Instituidos con Relación a la Agricultura (FIRA) y el Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO) y que quizá por esa razón los agentes del sector desconocen la oferta de apoyos públicos para su desarrollo. (CONAPESCA 2007).

Incluye además un análisis de la tendencia de Políticas Públicas en sistemas acuícolas destacando el enfoque en el incremento de la competitividad del sector a través de hacer crecer las utilidades agregando valor y aumentando el volumen de producción. Además hace un comparativo de las tendencias internacionales en la materia donde por ejemplo en la Unión Europea el mayor énfasis está en la protección de la salud y el cuidado del medio ambiente, en Australia en los controles sanitario, de la calidad del producto, el etiquetado y los impuestos y en los Estados Unidos de América en el marco ambiental y económico. (CONAPESCA 2007).

Destaca que se desconoce el nivel de producción máxima sustentable y por ello la necesidad de integrar una red nacional de quienes producen y comercializan en todos los eslabones de la cadena productiva. (CONAPESCA 2007).

En su parte final propone un programa estratégico de crecimiento para el Sistema Producto Trucha basado en la integración de la información de mercado, la integración de la cadena productiva, análisis comparativo de la cadena productiva entre México y Chile, así como la determinación de las oportunidades de mercado (CONAPESCA 2007).

La estrategia se desarrolló a partir de un diagnóstico de las condiciones del Sistema Producto Trucha dividida en la problemática de las granjas, del sector y del entorno en el cual se desenvuelve la actividad. Identifica además las oportunidades de mercado para la trucha fresca, trucha orgánica, filete de trucha y preparaciones procesadas a base de trucha. Las estrategias de crecimiento planteadas atienden la penetración y desarrollo de mercados, desarrollo de productos y la diversificación de ellos, por lo que las líneas de acción atienden las distintas partes de la cadena y red de valor (CONAPESCA 2007).

Los escenarios de desarrollo son analizados en función de la calidad de los cuales destacan por un lado las mejoras en la facilidad de manejo, a fin de fortalecer la presencia en el mercado con una mayor vida de anaquel optimizando la producción tanto para el mercado nacional como internacional y por el otro el desarrollo de productos Premium posicionando la trucha como un producto de lujo similar al salmón (CONAPESCA 2007).

Con ello se identificaron los proyectos prioritarios para cada uno de los eslabones de la cadena de valor y se calendarizaron en un horizonte de cinco años a partir del 2006.

### **Planes Maestros Estatales**

A partir de la creación de la Comisión Nacional del Pesca el 5 de junio de 2001 se impulsa en los estados productores la elaboración de los planes maestros estatales como instrumentos de planeación y regulación de la actividad acuícola de la producción de truchas, logrando integrarlos para los estados de Chihuahua, Hidalgo, Estado de México, Michoacán, Oaxaca y Puebla:

Nombre del documento	Fecha de elaboración	Conceptos estratégicos y líneas de acción
Programa Maestro Sistema Producto Trucha Estado de México	2004	Programa ecológico, producción eficiente, calidad genética, innovaciones tecnológicas, competitividad
Programa Maestro Estatal Trucha Hidalgo	2007	Penetración de mercados, desarrollo de mercados, desarrollo de productos, diversificación
Programa Maestro Estatal Trucha Michoacán	2007	Atención de la demanda de crías, mejora genética, ordenamiento del cultivo, fortalecer producción
Programa Maestro Estatal Trucha Puebla	2008	Producción eficiente, ampliación de Mercado, fortalecimiento del consorcio
Programa Maestro de Trucha Arcoíris en Oaxaca	2010	No presenta, es un documento de diagnóstico
Plan maestro de la trucha para el estado de Chihuahua	2011	Manejo genético, abastecimiento de agua, tecnificación, planeación en función del mercado, fortalecimiento de puntos de venta

Elaboración propia a partir de la información contenida en el portal de la Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca (<http://conapesca.gob.mx/wb/cona/>).

El resto de los estados no cuenta con un Plan Maestro a pesar de que algunos han sido fuertes impulsores del cultivo de trucha como una actividad complementaria o alterna a la forestal.

## CONCLUSIONES

El marco ético político que rige la política pública de nuestro país respecto de las actividades acuícolas es claro en sus intenciones de favorecer el desarrollo nacional sin comprometer la estabilidad de los sistemas ambientales ni de las especies que los habitan favoreciendo la conservación de las que son nativas, sin embargo su articulación en los instrumentos normativos y en los planes específicos del cultivo de trucha carece de este cuidado dictado en la legislación.

En particular las carencias estructurales y normativas se fundamentan en el desconocimiento de las especies y subespecies de trucha, su distribución y endemismos, pero esto se asocia además a la muy baja vigilancia y efectividad, productos de la carencia tanto de presupuesto y de personal capacitado como de facultades de las delegaciones de la CONAPESCA para detener la introducción de especies exóticas de trucha, por el contrario es tolerada y en ocasiones promovida por las delegaciones.

La propia LGPAS contempla el ordenamiento de la acuicultura a través de “programas que incluyan la definición de sitios para su realización, su tecnificación, diversificación, buscando nuevas tecnologías que reduzcan los impactos ambientales y que permitan ampliar el número de especies nativas que se cultiven” (D.O.F. 2015), sin embargo a la fecha no se cuenta con este tipo de instrumentos para el cultivo de trucha.

Estos programas propuestos por la CONAPESCA se han intentado en diversos momentos, un ejemplo es el *Programa Sectorial de Desarrollo Agropecuario y Pesquero 2007-2012* del cual surgiría el *Programa Rector Nacional de Pesca y Acuicultura con 5 Programas Regionales de Pesca y Acuicultura* y de los cuales se desprenderían los *Planes de Manejo* que en su momento serían diferenciados por cultivo, de ellos a su vez se obtendrían los *Planes Estatales de Manejo Integral de Acuicultura*, por ahora este aparato instrumental sigue pendiente de realizarse y más aun de instrumentarse para su aplicación.

A la fecha solamente seis de los estados productores de trucha, Chihuahua, de México, Hidalgo, Michoacán, Oaxaca y Puebla han elaborado planes maestros de trucha, que no son integrales, muy parecidos entre sí pero con grandes carencias de información de

carácter biológico y por consecuencia de medidas que favorezcan la conservación de especies nativas, particularmente el plan maestro de Chihuahua, estado donde ocurren las especies de trucha nativa. El resto de los estados productores no han publicado ningún tipo de planeación.

Las normas oficiales mexicanas de conservación de vida silvestre enlistan dos especies trucha dorada mexicana y la trucha arcoíris, más no puntualizan en cuanto al riesgo en que puedan encontrarse las subespecies, tampoco regionalizan ni identifican endemismos.

Las limitantes en la Carta Nacional Acuícola de la información biológica, entre ellas la insuficiente clasificación taxonómica, la ausencia de una adecuada regionalización de especies nativas y de identificación de endemismos, la carencia de identificación de vulnerabilidades biológicas o ambientales en general, constituye un problema de fondo ya que mucha de la regulación y planeación regional se basan en ella.

Los Planes Maestros Estatales requieren, además de ampliar sus limitados alcances, de un impulso sistematizado desde el sector pesquero que permita en principio un adecuado diagnóstico de la situación de la acuicultura de trucha en cada uno de los estados asociando la parte biotecnológica a los requerimientos de conservación ambiental y no sólo los del mercado, en algunos estados sería necesario diseñar esquemas de protección regional a la introducción de especies exóticas para favorecer el cultivo de especies nativas, pero además es necesario el fortalecimiento de las instancias estatales y regionales que son responsables del monitoreo y el establecimiento de los criterios locales.

Se identifica una fuerte inclinación de los documentos instrumentales de la política pública hacia la promoción de la actividad acuícola, descuidando o atendiendo de forma muy débil la protección de las especies nativas y la regulación de la introducción de especies exóticas.

#### **Apéndice 1. Compendio de Leyes, Regulaciones y Normatividad relacionadas con la Acuicultura y la Truchicultura**

- LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE.- D.O.F. 28 01 1988.- Última modificación D.O.F. 07 06 2013
- REGLAMENTO DE LA LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE EN MATERIA DE ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS.- D.O.F. 30 11 2000.- Última modificación D.O.F. 21 05 2014
- REGLAMENTO DE LA LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE EN MATERIA DE EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL.- D.O.F. 30 05 2000.- Última modificación.- D.O.F. 31 10 2014
- LEY DE BIOSEGURIDAD DE ORGANISMOS GENÉTICAMENTE MODIFICADOS.- D.O.F. 18 03 2005
- REGLAMENTO DE LA LEY DE BIOSEGURIDAD DE ORGANISMOS GENÉTICAMENTE MODIFICADOS.- D.O.F. 19 03 2008.- Última modificación D.O.F. 06 03 2009
- LEY GENERAL DE VIDA SILVESTRE.- D.O.F. 03 07 2000.- Última modificación.- D.O.F. 13 05 2016
- REGLAMENTO DE LA LEY GENERAL DE VIDA SILVESTRE.- D.O.F. 30 11 2006

- LEY GENERAL DE PESCA Y ACUACULTURA SUSTENTABLES.- D.O.F. 24 07 2007.- Última modificación D.O.F. 07 06 2012
- REGLAMENTO DE LA LEY DE PESCA.- D.O.F. 25 06 1992.- Última modificación.- D.O.F. 28 01 2004

### **Normas Oficiales Mexicanas Aplicables**

NOM-027-SSA1-1993	Establece las especificaciones sanitarias de los pescados frescos-refrigerados y congelados. Indica los límites de contenido en cuanto químicos, las reglas de etiquetado, así como las características del envase, empaque y embalaje que deben de cumplir
NOM-028-SSA1-1993	Establece las especificaciones sanitarias de los pescados en conserva. Indica los límites de contenido en cuanto químicos, las reglas de etiquetado, así como las características del envase, empaque y embalaje que deben de cumplir
NOM-242-SSA1-2005	Productos de la pesca frescos, refrigerados, congelados y procesados. Disposiciones y especificaciones sanitarias y métodos de prueba Establece los requisitos sanitarios para los establecimientos que procesan productos de la pesca frescos, refrigerados, congelados y procesados, incluyendo las embarcaciones de pesca y recolección, así como las especificaciones sanitarias que deben cumplir dichos productos
NOM-093-SSA1-1994	Establece los requisitos necesarios para asegurar que todos los alimentos que se preparen y ofrezcan en los establecimientos fijos lleguen al consumidor de manera inocua (seguro o saludable).
NOM-120-SSA1-1994	Establece las buenas prácticas de higiene y sanidad que deben observarse en el proceso de alimentos, bebidas no alcohólicas y alcohólicas. Prácticas de higiene y sanidad para el proceso de alimentos, bebidas no alcohólicas y alcohólicas
NOM-251-SSA1-2009	Establece los requisitos mínimos de buenas prácticas de higiene que deben observarse en el proceso de alimentos, bebidas o suplementos alimenticios y sus materias primas a fin de evitar su contaminación a lo largo de su proceso
NOM-128-SSA1-1994	Establece la aplicación de un sistema de análisis de riesgos y control de puntos críticos en la planta industrial procesadora de productos de la pesca, por otra parte, indica los estándares de higiene en el procesamiento de pescados y mariscos.
NOM-130-SSA1-1995	Establece las condiciones de proceso para alimentos envasados en recipientes de cierre hermético y sometido a tratamiento térmico. Disposiciones y especificaciones sanitarias.
NOM-201-SSA1-2002	Establece las disposiciones y especificaciones sanitarias que deben cumplir el agua y hielo para consumo humano envasados y a granel.
NOM-040-SSA1-1993	Establece las especificaciones sanitarias de la sal yodada y sal yodada fluorada destinadas para el consumo humano y para la sal yodada destinada para consumo animal
NOM-128-SSA1-1994	Que establece la aplicación de un sistema de análisis de riesgos y control de puntos críticos en la planta industrial procesadora de productos de la pesca
NOM-009-PESC-1993	establece el procedimiento para determinar las épocas y zonas de veda para la captura de las diferentes especies de la flora y fauna acuáticas, en aguas de jurisdicción federal de los Estados Unidos Mexicanos
NOM-010-PESC-1993	Que establece los requisitos sanitarios para la importación de organismos acuáticos vivos en cualesquiera de sus fases de desarrollo, destinados a la acuicultura u ornato en el territorio

	nacional.
NOM-011-PESC-1993	Para regular la aplicación de cuarentenas, a efecto de prevenir la introducción y dispersión de enfermedades certificables y notables, en la importación de organismos acuáticos vivos en cualquiera de sus fases de desarrollo, destinados a la acuicultura y ornato en los estados unidos mexicanos.
NOM-030-PESC-2000	Que establece los requisitos para determinar la presencia de enfermedades virales de crustáceos acuáticos vivos, muertos, sus productos o subproductos en cualquier presentación y artemia ( <i>Artemia spp</i> ), para su introducción al territorio nacional y movilización en el mismo.
NOM-001-ECOL-1996	Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales
NOM-003-ECOL-1997	Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público.
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.

## REFERENCIAS

- CONAPESCA. 2007. *Plan Maestro Nacional de Trucha*. Mexico D.F. ITAM.
- Congreso de la Unión. (29 de enero de 2016). Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Recuperado de *Diario Oficial de la Federación* el 29 de enero de 2016: <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/index.htm>
- D.O.F. (06 de 07 de 2000). Ley General de Vida Silvestre. *Diario Oficial de la Federación*.
- D.O.F. (9 de septiembre de 2013). ACUERDO mediante el cual se aprueba la actualización de la Carta Nacional Acuícola . *Diario Oficial de la Federación*.
- D.O.F. (04 de 06 de 2015). Ley General de pesca y acuicultura sustentables . *Diario Oficial de la Federación*, págs. 1-67.
- Escalante, M.A., F.J. García-De León, C.B. Dillman, A.B. De los Santos C., A. George, I.A. Barriga S. 2016. Introgresión genética de la trucha arcoíris exótica en la trucha dorada mexicana. En: Ruiz-Luna A. y F.J. García-De León (eds.). *La trucha dorada mexicana*. Cap. 10.



# La Trucha Dorada Mexicana

La trucha dorada mexicana (*Oncorhynchus chrysogaster*) es un pez endémico de México que habita en aguas frías de alta montaña en la Sierra Madre Occidental. Es un recurso con gran potencial para desarrollos acuícolas en la región, sin embargo poco se conoce sobre su biología y el estado actual de sus poblaciones, aunque se reconoce que enfrenta fuertes amenazas debido a las actividades humanas que se desarrollan en su área de distribución. Por ello, la información que esta obra contiene sobre esta especie, generada por un amplio grupo de especialistas tanto nacionales como internacionales, se presenta como una línea de base para futuros estudios de mayor profundidad que coadyuven a la conservación y manejo de esta especie.

- **Arturo Ruiz Luna** colabora en el Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD, A.C.), Unidad Mazatlán, como titular del Laboratorio de Manejo Ambiental (LAMA), enfocado en investigación sobre estructura y tendencias de cambio de sistemas y recursos, en diferentes niveles de organización (población, comunidad, ecosistema, paisaje).



- **Francisco Javier García-De León** es investigador nacional nivel 3 del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR) y lidera el grupo de Genética para la Conservación. Sus intereses se centran en el uso de la genética molecular y sus aplicaciones en ecología, evolución y conservación de especies animales y vegetales tanto acuáticas como terrestres.

ISBN: 978-607-7900-26-9

