

**Centro de Investigación Científica y de Educación  
Superior de Ensenada, Baja California**



---

**Maestría en Ciencias  
en Acuicultura**

---

**Adaptación de juveniles de trucha arcoíris (*Oncorhynchus  
mykiss*) al agua de mar para desarrollar su cultivo en sistemas  
de recirculación acuícola**

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias

Presenta:

**Marco Antonio Ontiveros Córdoba**

Ensenada, Baja California, México

2022

Tesis defendida por  
**Marco Antonio Ontiveros Córdoba**

y aprobada por el siguiente Comité

---

**Dra. Mónica Hernández Rodríguez**  
Codirectora de tesis

---

**Dr. Juan Gabriel Correa Reyes**  
Codirector de tesis

Miembro de Comité

**Dr. Misael Rosales Leija**

**Dra. Mónica Tentori Espinoza**



---

**Dr. Roberto Cruz Flores**  
Coordinador del Posgrado en Acuicultura

---

**Dr. Pedro Negrete Regagnon**  
Director de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta **Marco Antonio Ontiveros Córdoba** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Acuicultura.

**Adaptación de juveniles de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) al agua de mar para desarrollar su cultivo en sistemas de recirculación acuícola**

Resumen aprobado por:

---

Dra. Mónica Hernández Rodríguez

**Codirectora de tesis**

---

Dr. Juan Gabriel Correa Reyes

**Codirector de tesis**

La trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*), es una especie dulceacuícola, sin embargo, diversos estudios han demostrado que presenta gran tolerancia a la salinidad, por lo que se han evaluado diferentes métodos de transferencia a ambientes con diferentes concentraciones de salinidad y su efecto en la fisiología de la especie. La capacidad de la trucha para adaptarse al agua de mar permite aprovechar este potencial para diversificar su cultivo. En el presente estudio se evaluaron dos metodologías para transferir a la trucha arcoíris (*O. mykiss*) del agua dulce al agua de mar, y desarrollar su cultivo en sistemas de recirculación acuícola (SRA). Para conocer algunos de los mecanismos que utiliza la especie para restablecer su homeostasis durante la adaptación al agua de mar, se evaluaron algunos parámetros en los peces, tales como el crecimiento absoluto, incremento en peso, tasa de crecimiento específico y tasa de conversión alimenticia (TCA), y se determinó la presión osmótica, el índice hepatosomático (IH) y el factor de condición de Fulton (K). En total se utilizaron 600 juveniles de trucha arcoíris; 200 peces se expusieron al tratamiento gradual continuo (TGC), un segundo grupo de 200 organismos al tratamiento discontinuo abrupto (TDA), y un grupo control con 200 organismos se mantuvo en agua dulce; cada tratamiento y el grupo control se mantuvieron en sistemas de recirculación durante todo el estudio. La concentración de salinidad se incrementó en 5 UPS por día en el TGC y TDA durante 7 días, hasta llegar a las 34.4 UPS en ambos tratamientos. Durante esta fase de adaptación, la supervivencia fue del 99% en ambos tratamientos y en el grupo control. Posteriormente se realizó la fase de cultivo hasta llegar al día 74, durante esta etapa se obtuvo un 94% de supervivencia en el grupo control, 34% para el TDA y 26% en el TGC. En la evaluación de los parámetros productivos registrados durante el cultivo, la ganancia en peso fue superior significativamente ( $p < 0.001$ ) en el grupo control con un 356%, a diferencia de los tratamientos experimentales que obtuvieron un 116% para el TDA y 127% en el TGC, respectivamente; no encontrando diferencias significativas. La TCA fue menor en el grupo control ( $0.95 \pm 0.11\%$ ), a diferencia del TDA ( $1.68 \pm 0.09\%$ ) y el TGC ( $3.57 \pm 0.48\%$ ). No se encontraron diferencias significativas en el IH entre tratamientos ni en el grupo control. El factor de condición fue significativamente diferente con relación a los tratamientos experimentales ( $p < 0.001$ ). La presión osmótica del suero sanguíneo fue mayor en el TDA ( $377 \pm 11.57 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) con respecto al TGC ( $368 \pm 20.77 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) y el grupo control ( $319 \pm 8.18 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), con diferencias significativas ( $p < 0.001$ ) únicamente con el grupo control. Con base en los resultados, se puede comprobar la capacidad osmorreguladora de la trucha arcoíris (*O. mykiss*) para habitar ambientes con altas concentraciones de salinidad; sin embargo, los parámetros productivos fueron más favorables en los peces cultivados en agua dulce.

**Palabras clave:** Trucha arcoíris, salinidad, crecimiento, osmorregulación

Abstract of the thesis presented by **Marco Antonio Ontiveros Córdoba** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Aquaculture.

**Juvenile adaptation to seawater in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) to develop culture in recirculating aquatic systems**

Abstract approved by:

---

Dra. Mónica Hernández Rodríguez  
**Co-Director Thesis**

---

Dr. Juan Gabriel Correa Reyes  
**Co-Director Thesis**

The rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) is a freshwater species; however, several studies have shown that it has great tolerance to salinity, for such, different transfer methods to environments with different concentrations of salinity, and their effect on the species physiology, have been evaluated. The trout's ability to adapt to seawater allows to take advantage of this potential to diversify its culture. In the present study, two methodologies to transfer rainbow trout (*O. mykiss*) from freshwater to seawater were evaluated, in a recirculating aquaculture system (RAS). To know some of the mechanisms that the species uses to restore its homeostasis during adaptation to seawater, some productive parameters were evaluated in fish, such as absolute growth, weight gain, specific growth rate and feed conversion rate (FCR), and osmotic pressure, hepatosomatic index (HI) and Fulton condition factor (K) were determined. A total of 600 juvenile rainbow trout were used; 200 fish were exposed to continuous gradual treatment (CGT), a second group of 200 organisms to the abrupt discontinuous treatment (ADT), and a control group with 200 organisms were kept in fresh-water; each treatment and control group were kept in (RAS) throughout the study. The salt concentration increased 5 UPS per day in the GCT and ADT for 7 days, until reaching 34.6 UPS in both treatments. During this adaptation phase, survival was 99% in both treatments and the control group. Subsequently, the culture phase was carried out until reaching day 74, during this phase a 94% survival was obtained for the control group, 34% for the ADT and 26% in the CGT. In the evaluation of the productive parameters recorded during culture, the weight gain was significantly higher ( $p < 0.001$ ) in the control group with 356%, unlike the experimental treatments that obtained 116% for the ADT and 127% in the CGT, respectively; not finding significant differences. The FCR was lower in the control group ( $0.95 \pm 0.11\%$ ), unlike the ADT ( $1.68 \pm 0.09\%$ ) and CGT ( $3.57 \pm 0.48\%$ ). No significant differences were found for the HI in any treatment or in the control group. The condition factor was significantly different in relation to the experimental treatments ( $p < 0.001$ ). The osmotic pressure of the blood serum was higher in the ADT ( $377 \pm 11.57 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) with respect to the CGT ( $368 \pm 20.77 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) and control group ( $319 \pm 8.18 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), with significant differences ( $p < 0.001$ ) only with the control group. Based on the results, the osmoregulatory capacity of rainbow trout (*O. mykiss*) to inhabit environments with high concentrations of salinity can be verified. However, the productive parameters were more favorable in the fish cultured in freshwater.

**Keywords: Rainbow trout, salinity, growth, osmoregulation**

## **Dedicatoria**

A mis padres

*“Colocado en un tránsito histórico, pagaré con mi vida la lealtad al pueblo”*

*Salvador Guillermo Allende Gossens (1908 - 1973)*

## Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE) y al Departamento de Acuicultura por permitirme formar parte de su prestigiosa institución, así como de brindarme una formación académica de excelente calidad y permitirme hacer uso de sus instalaciones durante mis estudios a nivel maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para estudios de posgrados durante los dos años de estudio y realización de la maestría.

A la Dra. Mónica Hernández por permitirme integrarme a su equipo de laboratorio y adoptarme como tesista para poder sacar mi mayor potencial durante esta investigación, así como compartirme sus conocimientos y experiencias con la finalidad de crecer en el mundo de la ciencia. Pero sobre todo gracias por su gran paciencia y correctivos que fueron los que terminaron de forjarme en la investigación científica.

Al Dr. Juan Gabriel Correa Reyes por aceptar el reto de adoptarme como su tesista y brindarme toda su sabiduría en este trabajo, siempre atendiendo mis dudas con una sonrisa en el rostro y toneladas de paciencia y comprensión ante cualquier situación que se atravesará durante esta investigación.

A mi comité de tesis, el Dr. Misael Rosales Leija y la Dra. Mónica Tentori Espinoza por su valiosa disposición para cada reunión, sus excelentes críticas constructivas y acertadas observaciones lo cual reflejó en mi tesis un mejor resultado.

Al técnico Luis Alberto Murillo Valenzuela por sus valiosas enseñanzas en la elaboración de los sistemas de recirculación utilizados en este trabajo, cada consejo académico y de la vida, así como su enorme paciencia para enseñarme desde cero a trabajar de una manera correcta.

Al personal técnico involucrado en la biometría inicial y el traslado de mis organismos al área experimental Jesús Mariscal Medina y Francisco Morineau, así como mi compañera de generación Lorena Garnica, de antemano muchas gracias. Así como al técnico Abelardo Campos por prestarme la computadora del laboratorio de bioquímica para realizar parte de mis análisis estadísticos, presentación de seminarios y escritura de la tesis.

Al personal docente del Departamento de Acuicultura del CICESE por brindarme su conocimiento durante mi formación académica.

A la secretaria Dalila Mercado por su apoyo en trámites burocráticos y recordatorios de fechas importantes.

Al Doctor Miguel Ángel Tripp Valdez por todo su apoyo y asesoramiento en el análisis estadístico.

A mi hermano de laboratorio Jesus Salvador Olivier Guirado Flores por su ayuda en la elaboración de los sistemas experimentales, así como en el mantenimiento de los organismos, biometrías y cualquier situación anormal que sucediera.

A mis compañeros Ramiro, Juan Carlos, Eugenio, Fernanda, Karen y Lorena, así como a Lety, Lupita y Narda por su valiosa amistad, consejos y experiencias que vivimos juntos en este camino llamado maestría.

A mis padres y hermanos por su apoyo y comprensión durante este proceso.

A mis amigos cercanos, Paolus, Alan, Jerónimo, Jorge, Zuber, Jesus Neri el apá, por creer en mí y siempre apoyarme en los buenos y malos momentos.

Al M.C Salvador González Guzmán por ser mi guía académico durante la licenciatura y motivarme para ingresar al posgrado, aunque ya no esté con nosotros muchas gracias profe Chava. Q.E.P.D.

Al Dr. Alejandro Sánchez González mi tutor en licenciatura, por sus grandes y sabios consejos para motivarme durante mi experiencia en la maestría, y por seguir motivándome para la realización de un doctorado.

A la familia Calleja Vega por su apoyo incondicional, motivación y consejos a pesar de la distancia.

## Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatorias.....	iv
Agradecimientos.....	vi
Lista de figuras.....	x
Lista de tablas.....	xi
<b>Capítulo 1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1 Panorama mundial de la acuicultura.....	1
1.1.1 Taxonomía.....	2
1.1.2 Biología.....	3
1.1.3 Distribución.....	4
1.1.4 Producción de trucha arcoíris ( <i>O. mykiss</i> ) en México.....	5
1.1.5 Estatus de riesgo de la trucha arcoíris ( <i>O. mykiss</i> ) en México.....	6
1.2 Respuestas fisiológicas para evaluar el efecto de la salinidad.....	7
1.3 Respuesta a la salinidad en peces.....	8
1.4 Tolerancia a la salinidad en trucha arcoíris ( <i>O. mykiss</i> ) .....	10
1.5 <b>Justificación</b> .....	14
1.6 <b>Hipótesis</b> .....	14
1.7 <b>Objetivos</b> .....	15
1.7.1 Objetivo general.....	15
1.7.2 Objetivos particulares.....	15
<b>Capítulo 2. Metodología.....</b>	<b>16</b>
2.1 Sistema de incubación.....	16
2.2 Mantenimiento y aclimatación de los organismos.....	16
2.3 Adaptación de sistemas para la transferencia de juveniles al agua de mar.....	18
2.4 Traslado de truchas al área experimental.....	19
2.5 Transferencia al agua de mar tratamiento gradual continuo.....	19
2.6 Transferencia al agua de mar tratamiento discontinuo abrupto.....	21
2.7 Grupo control.....	22

2.8 Cultivo piloto experimental.....	22
2.9 Parámetros fisicoquímicos del agua.....	23
2.10 Supervivencia.....	23
2.11 Tasa de conversión alimenticia.....	23
2.12 Desempeño de los organismos en agua de mar y en agua dulce.....	24
2.12.1 Índice de condición de Fulton (K) .....	24
2.12.2 Índice hepatosomático.....	25
2.12.3 Presión osmótica .....	25
2.13 Análisis estadístico.....	26
<b>Capítulo 3. Resultados.....</b>	<b>27</b>
3.1 Calidad del agua durante la transferencia al agua de mar.....	27
3.2 Supervivencia durante la transferencia al agua de mar.....	28
3.3 Supervivencia durante el cultivo piloto experimental.....	29
3.4 Calidad del agua durante el cultivo piloto experimental.....	29
3.5 Crecimiento durante el cultivo en agua de mar.....	31
3.6 Parámetros productivos.....	32
3.7 Índice hepatosomático.....	33
3.8 Índice de condición de Fulton (K).....	33
3.9 Presión osmótica del suero sanguíneo.....	34
<b>Capítulo 4. Discusión.....</b>	<b>36</b>
<b>Capítulo 5. Conclusiones.....</b>	<b>49</b>
<b>Capítulo 6. Recomendaciones.....</b>	<b>50</b>
<b>Literatura citada.....</b>	<b>51</b>

## Lista de figuras

Figura		Página
1	Producción mundial de la pesca de captura y la acuicultura .....	1
2	Distribución de trucha arcoíris ( <i>O. mykiss</i> ) a nivel mundial .....	4
3	Principales estados de producción de trucha arcoíris en México.....	5
4	Producción de trucha arcoíris en México en diferentes años.....	6
5	Porcentaje de producción de trucha arcoíris en las principales entidades de México...	6
6	Proceso de osmorregulación en peces de agua dulce.....	8
7	Proceso de osmorregulación en peces de agua salada.....	9
8	Huevo oculado de trucha arcoíris.....	17
9	Organismo eclosionado de trucha arcoíris con saco vitelino.....	18
10	Vista lateral sistema de recirculación tratamiento gradual continuo.....	20
11	Supervivencia durante el cultivo piloto experimental.....	29
12	Peso promedio de trucha arcoíris.....	31
13	Valores de índice hepatosomático para el grupo control y los tratamientos experimentales.....	33
14	Índice de condición de Fulton para los tratamientos experimentales y el grupo control .....	34
15	Presión osmótica en el plasma sanguíneo para tratamientos experimentales y el grupo control.....	35

## Lista de tablas

Tabla		Página
1	Tasa de sustitución de agua dulce por agua de mar en el tratamiento gradual continuo durante 7 días.....	21
2	Tasa de sustitución de agua dulce por agua de mar en el tratamiento discontinuo abrupto durante 7 días.....	22
3	Parámetros fisicoquímicos de la calidad del agua durante la transferencia al agua de mar.....	28
4	Valores de supervivencia y desviación estándar durante la transferencia al agua de mar.....	28
5	Parámetros fisicoquímicos de la calidad del agua durante el cultivo piloto experimental.....	30
6	Parámetros productivos evaluados al día 74 del experimento.....	32

## Capítulo 1. Introducción

---

### 1.1 Panorama mundial de la acuicultura

El panorama mundial de la acuicultura muestra que esta actividad ha ido en aumento debido al incremento en la demanda de los productos del mar. En el año 2018, de la producción mundial de pescado que fue de 179 millones de toneladas, un total de 156 millones se destinaron para el consumo humano, y los 22 millones de toneladas restantes se utilizaron para la producción de harina y aceite de pescado (figura 1). La actividad por acuicultura representó un aporte a la producción total de un 46%, del cual 52% de este porcentaje se destinó para la producción del pescado para consumo (FAO, 2020). La producción acuícola de pescado en el continente americano equivale al 4.63% del total a nivel mundial, donde Chile aportó el 1.54%, Latinoamérica y el Caribe el 2.28% y América del Norte solo el 0.8% (FAO, 2020).

Las investigaciones en acuicultura son muy importantes, debido a que diversas especies de peces, crustáceos y moluscos son primordiales para el consumo humano. Al incentivarse esta actividad se generan efectos positivos para el ambiente, de manera que se reduce la sobreexplotación de los mares ocasionada por la pesca no sostenible que cada vez va siendo sustituida por la actividad de la acuicultura (González, 2002).

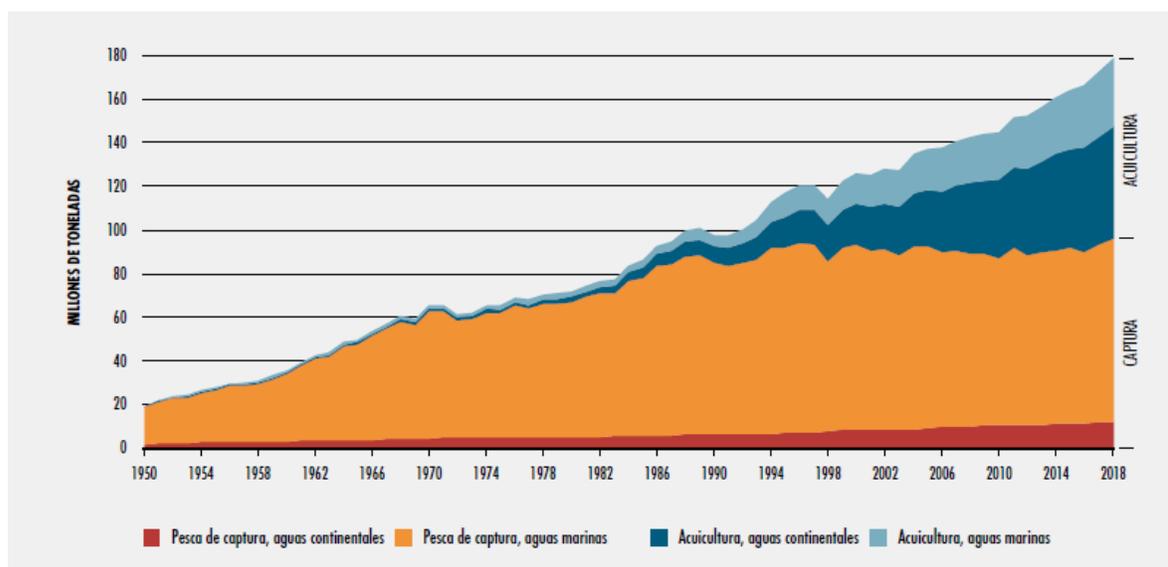


Figura 1. Producción mundial de la pesca de captura y la acuicultura (FAO, 2020).

Dentro de las especies que generan un aporte a la producción de alimento por medio de la acuicultura está la trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*), un pez eurihalino, que pertenece a la familia Salmonidae, cuyo valor es muy importante desde el punto de vista ecológico y socioeconómico (FAO, 2006a). También es una especie utilizada en la pesca deportiva, por lo que ha sido introducida en diversos países de América Central y Sudamérica como Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Costa Rica, Ecuador, Panamá, Perú y Venezuela (Welcomme, 1988). En el año 2018, esta especie representó una producción de 848,100 toneladas, el equivalente al 1.6% de producción a nivel de peces de aleta por acuicultura continental (FAO, 2020).

La trucha arcoíris es un pez de agua dulce, que puede tolerar la salinidad, por ejemplo, existe la variedad de esta especie denominada “cabeza de acero” (steelhead) que es capaz de realizar migraciones de los ríos de agua dulce hacia el océano, lugar en donde llevan a cabo la madurez sexual, gracias a un proceso conocido como esmoltificación, que ha sido estudiado en salmones, y que se caracteriza por una serie de cambios y adaptaciones morfológicas, fisiológicas y hormonales (Stearley, 1992). La adaptación al agua de mar es la característica principal que diferencia a la trucha “cabeza de acero” de la trucha arcoíris tradicional, la cual se tiene la teoría que permanece en los ríos de agua dulce durante todo su ciclo de vida (Robins *et al.*, 1991).

La tolerancia a la salinidad en algunas especies de peces, muestra una ventaja que actualmente se aprovecha por el hombre, ya que permite realizar sus granjas de cultivo en medios con mayores concentraciones salinas e incluso realizar cultivos en jaulas dentro del mar (FAO, 2006a). Esta característica favorece utilizar cantidades reducidas de agua dulce, un recurso que se encuentra en escasez hoy día en el planeta, por lo que es importante diversificar los cultivos si se consideran especies que tienen el potencial para transferirse al medio marino.

### **1.1.1 Taxonomía**

La trucha arcoíris (*O. mykiss*) es un pez perteneciente al orden de los Salmoniformes, este grupo cuenta con una gran cantidad de organismos cuya familia única es Salmonidae, formada por peces dulceacuícolas, aunque un gran número de especies suelen migrar al océano antes de regresar a los ríos para su reproducción en agua dulce. La mayoría de estas especies oscilan entre los 40 y 60 cm de longitud, suelen habitar aguas tanto frías como templadas con valores de temperatura de 10 a 22°C en el hemisferio norte (Nelson, 1994). Anteriormente la trucha arcoíris era conocida con el nombre científico de *Salmo gairdneri*,

ya que se tenía la creencia de que estaba relacionada con el salmón del Atlántico (*S. salar*), pero fue hasta el año de 1989, gracias a la evidencia fósil que se demostró que la trucha arcoíris está emparentada con el salmón del Pacífico (*O. kisutch*) (Stearley, 1992).

La trucha arcoíris se caracteriza por poseer un cuerpo fusiforme, con 60 a 66 vertebras, de 3 a 4 espinas dorsales, 3 – 4 espinas anales, 19 radios caudales y de 8 a 12 radios anales. Presentan una aleta adiposa, comúnmente con un borde negro. Su coloración puede variar de azul a verde olivo con una banda color rosa a lo largo de toda la línea lateral y un color plateado en la parte ventral. La parte posterior del cuerpo suele estar cubierta por pequeños puntos negros en los costados, la cabeza y las aletas. La coloración tendrá variaciones según el tamaño, hábitat y condición sexual. Las truchas que habitan en lagos tienden a tener coloraciones más brillantes y claras, a diferencia de las que suelen habitar en las corrientes, cuyas tonalidades son más oscuras con una gama de colores intensos (Behnke, 1992).

### **1.1.2 Biología**

La trucha arcoíris habita aguas claras, limpias y de bajas temperaturas, su composición genética poblacional y las condiciones del hábitat pueden influir para que pueda ocupar ríos de tamaño pequeño o grande, lagos, estuarios, manantiales y océanos (Behnke, 1992).

La trucha se considera un consumidor oportunista que basa su dieta en una amplia variedad de organismos, que pueden ser desde insectos de tamaño pequeño e incluso algunas especies de crustáceos. Las truchas que habitan en zonas con vegetación riparia suelen alimentarse en su mayoría de insectos terrestres, ya sean hormigas o chapulines que caen dentro de la corriente. Sin embargo, cuando viven en zonas que tienen poca vegetación tienden a alimentarse de invertebrados acuáticos, insectos y crustáceos, además cuando habitan zonas de mayor amplitud como grandes lagos, su dieta se basa en el consumo de invertebrados del zooplancton, caracoles, crustáceos y pequeños peces (Behnke, 1992).

La reproducción de la trucha se realiza en ríos grandes o corrientes que estén cercanas a los lagos durante la temporada de primavera o inicios del verano. En sus hábitats de reproducción requieren zonas con concentraciones de oxígeno mayor a 6 mg/l, y el tamaño de la grava que oscile entre 1 ½ y 3 pulgadas. La hembra cava un nido dentro de la grava utilizando su cola, ahí suele depositar la mitad de los huevos, estos a su vez son fertilizados inmediatamente por el macho y posteriormente la hembra tiende a cubrir los

huevo ya fertilizado, el resto de los huevos son depositados en otro nido (Willers, 1981). La hembra deposita los huevos a una profundidad donde existe una velocidad de corriente suficiente para minimizar el riesgo de desecación. Para la oxigenación de los huevos es necesario que las zonas estén libres de sedimentos, así el agua puede pasar entre la grava del nido, y a su vez retirar los desechos metabólicos. Los juveniles al nacer se mantienen en la grava hasta que se termina su reserva de vitelo, posteriormente emergen en la corriente en busca de alimento (Willers, 1981).

### 1.1.3 Distribución

La trucha arcoíris tiene una distribución nativa restringida solamente a la parte Noroeste de América del Norte y una pequeña porción del Este de Rusia. Se distribuye de forma costera desde el mar de Bering y la Bahía de Bristol en Alaska, hacia el Sur por el estado de Columbia Británica, Washington, Oregón, hasta California en Estados Unidos. La especie no migratoria es originaria de la parte suroeste de Alaska, así como de ríos de la Columbia Británica en Canadá, extendiéndose tierra adentro hasta el río Kootenay en Montana, Sacramento, San Joaquín y ríos del estado de California en EUA. También se cree que la trucha arcoíris pueda ser nativa de algunas corrientes de alta elevación en las montañas del Noroeste de México (figura 2) (Needham y Gard, 1959).



Figura 2. Distribución de trucha arcoíris (*O. mykiss*) a nivel mundial. Modificado con datos por (Needham y Gard, 1959). Mapa obtenido de: <https://sp.depositphotos.com/vector-images/mapamundi-nombres.html>

La trucha arcoíris es una de las especies con mayor éxito al ser introducida en otros lugares alrededor del mundo, está considerada como la especie más exitosa en establecerse en poblaciones fuera de su lugar de origen. Su amplia distribución es debida en parte a que es un pez muy utilizado en la pesca deportiva y a su valor como producto alimenticio, aunado a su capacidad de adaptación y de hibridación favoreciendo el que pueda ocupar distintos ecosistemas. La distribución global de esta especie se debe en gran parte a su capacidad fisiológica de alta adaptabilidad y comportamiento (Crawford y Muir, 2008).

#### 1.1.4 Producción de trucha arcoíris (*O. mykiss*) en México

En México, esta especie introducida se produce en diferentes estados de la república (figura 3) (CONAPESCA, 2018).



Figura 3.- Principales estados de producción de trucha arcoíris en México, marcados en negro (Datos tomados de Anuario estadístico acuicultura y pesca, CONAPESCA, 2018).

En México la trucha se encuentra en el lugar 21 a nivel de producción, sin embargo, por su valor en el año 2018 estaba en el lugar 10. La tasa media de producción en los últimos años fue de 5.99%; a través de los años, los cultivos de trucha arcoíris han estado entre las 7,969 toneladas (t) en el año 2009, hasta las 13,454 t en el año 2018, con un máximo de 19,123 t en el año 2014 (figura 4). Actualmente con la

información proporcionada hasta el año 2018, los estados con mayor producción de trucha arcoíris (*O. mykiss*) en México son: Estado de México, Puebla, Tamaulipas, Veracruz y Michoacán (Figura 5).

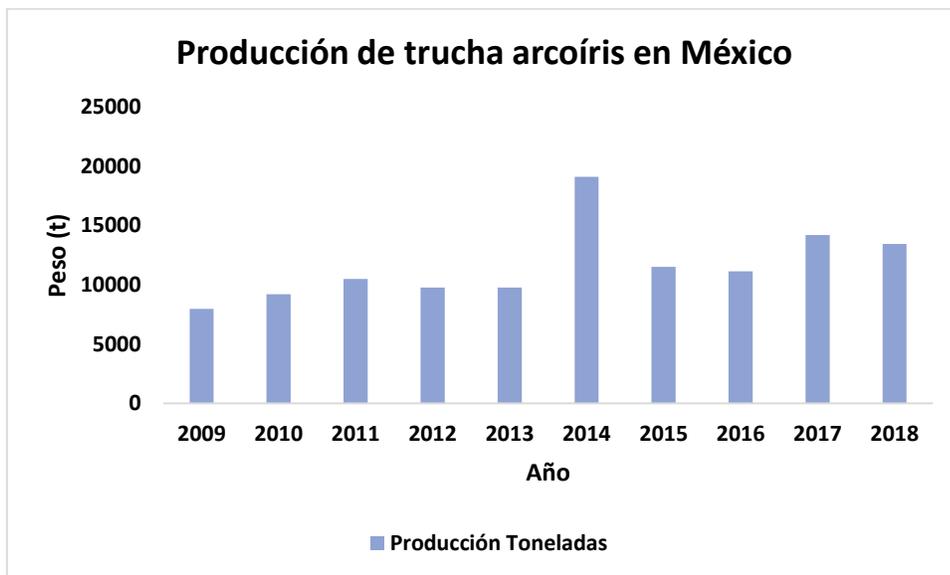


Figura 4.- Producción de trucha arcoíris en México en diferentes años. (Recuperado y modificado del Anuario estadístico de acuicultura y pesca, CONAPESCA, 2018).

**Participación porcentual de la producción de trucha arcoíris en las principales entidades**

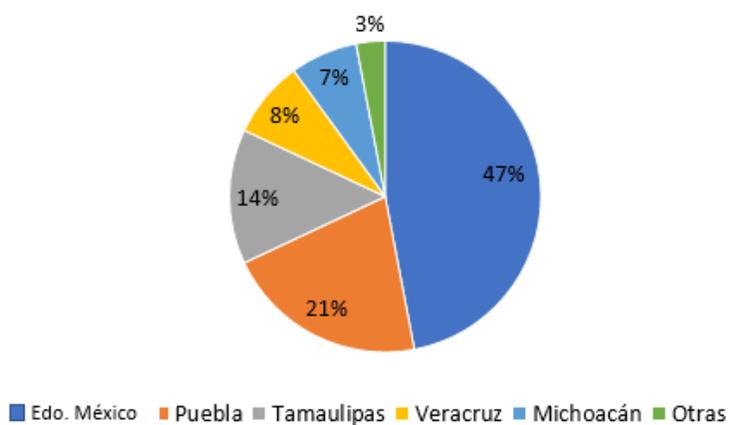


Figura 5.- Porcentaje de producción de trucha arcoíris en las principales entidades de México. (Recuperado y modificado del Anuario estadístico de acuicultura y pesca, CONAPESCA, 2018).

### **1.1.5 Estatus de riesgo de la trucha arcoíris (*O. mykiss*) en México**

La trucha arcoíris *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum, 1792), se encuentra actualmente en la lista de especies en riesgo en la norma oficial mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, "Protección ambiental-especies nativas de México de flora y fauna silvestres-categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-lista de especies en riesgo", publicada en el diario oficial de la federación el 30 de diciembre de 2010. El anexo informativo sobre la NOM-059-SEMARNAT-2010 fue aprobado como definitiva por el Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales en su sesión celebrada el 01 de agosto de 2019 (DOF/14/11/2019).

### **1.2 Respuestas fisiológicas para evaluar el efecto de la salinidad en los peces**

Una de las respuestas más comunes que se presentan en los organismos cuando se altera el ambiente, es el estrés. En peces de agua de dulce, el estrés puede ser ocasionado por la salinidad, de manera que, este ocurre una vez que la concentración de sal en el ambiente cambia rápidamente, lo que puede deberse al flujo de agua de las mareas, tormentas o la evaporación de pequeños cuerpos de agua, resultado de eventos climáticos que se prevé se presenten con mayor frecuencia y severidad (Nielsen *et al.*, 2012). A su vez, los cambios graduales de salinidad pueden ser un factor para que ocurra un estrés osmótico en los hábitats dulceacuícolas, siempre que estos niveles superen los umbrales que reducen la capacidad osmorreguladora de los organismos. El estrés por salinidad se puede ocasionar por el aumento en la concentración de sales, el cual genera un estrés hiperosmótico en los peces o hiposmótico si disminuye la concentración de sales en el medio (Nielsen *et al.*, 2012). Uno de los efectos ocasionados por el estrés en los organismos se puede reflejar en el índice de condición de Fulton, el cual es un factor biológico que integra la relación del peso y la longitud del organismo con la finalidad de determinar su estado fisiológico con relación a su bienestar, desde el punto de vista nutricional, puede ir relacionado a la acumulación de grasa y el desarrollo gonadal (Lizama y Ambrósio, 2002). El estrés en los peces también puede ocasionar un gasto energético que podría ser analizado con el índice hepatosomático, el cual se define como el porcentaje del peso del hígado en relación al peso total de los peces. Es un factor de condición corporal que se utiliza como una referencia para conocer la condición nutricional de los organismos, así como el estrés al que están expuestos (Castillo-Alvarado, 2019). La determinación de este índice permite ver la proporción de energía almacenada en el hígado durante cada período, excepto durante la época

reproductiva de los peces (Nunes & Hartz, 2001). Los peces almacenan energía en los músculos, pero cuando la energía está por encima de los límites requeridos, el cuerpo comienza a almacenarla como glucógeno en el hígado. Debido a esto, el tamaño proporcional del hígado se considera un índice del estado nutricional y la tasa de crecimiento (Halver & Hardy, 2002).

### 1.3 Respuesta a la salinidad en peces

Los peces habitan medios acuáticos en donde las concentraciones de iones inorgánicos y otros solutos en el medio, suelen ser diferentes de las concentraciones de los fluidos corporales. En el caso de los peces marinos, habitan ambientes en donde la concentración de sodio es mayor en el ambiente en comparación con sus fluidos intracelulares. En cambio, los peces de agua dulce están rodeados por una solución hiposmótica que contiene una menor cantidad de sales disueltas en comparación con el interior de sus células. Estos organismos para poder llevar a cabo un equilibrio y un mayor éxito de supervivencia en estos ambientes, requieren estrategias osmorreguladoras diferentes. Por ejemplo, los teleósteos marinos deben absorber el agua por medio de difusión y liberar el exceso de sales a través de la orina y las heces. En el caso de los teleósteos de agua dulce el proceso cambia, de manera que, estos organismos requieren absorber sales del medio a través de las branquias y liberan el exceso de agua produciendo una orina diluida (figuras 6 y 7) (Evans & Claiborne, 2009).

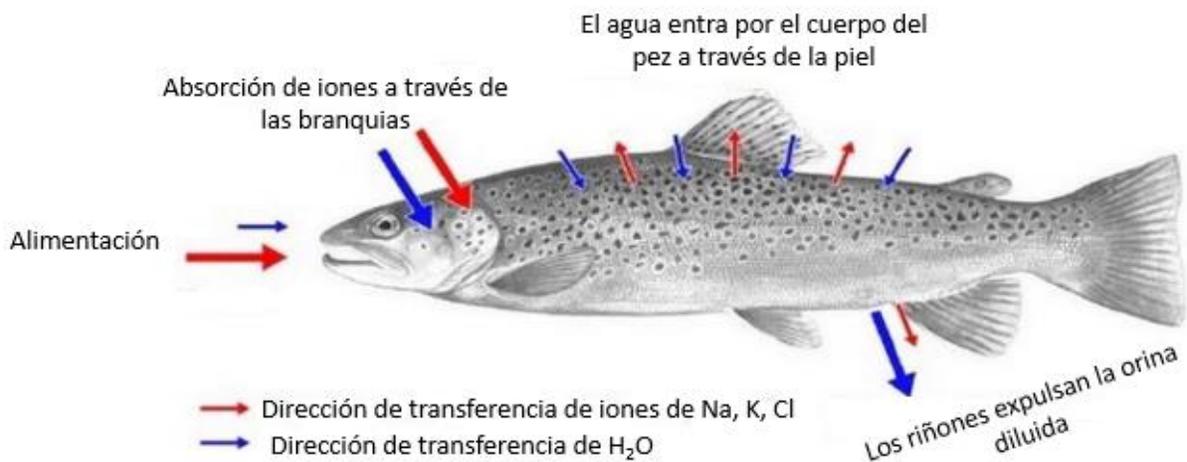


Figura 6.- Proceso de osmorregulación en peces de agua dulce. Recuperado y Modificado de: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0c/Osmoregulation\\_Bachforelle\\_Zeichnung\\_bw.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0c/Osmoregulation_Bachforelle_Zeichnung_bw.png)

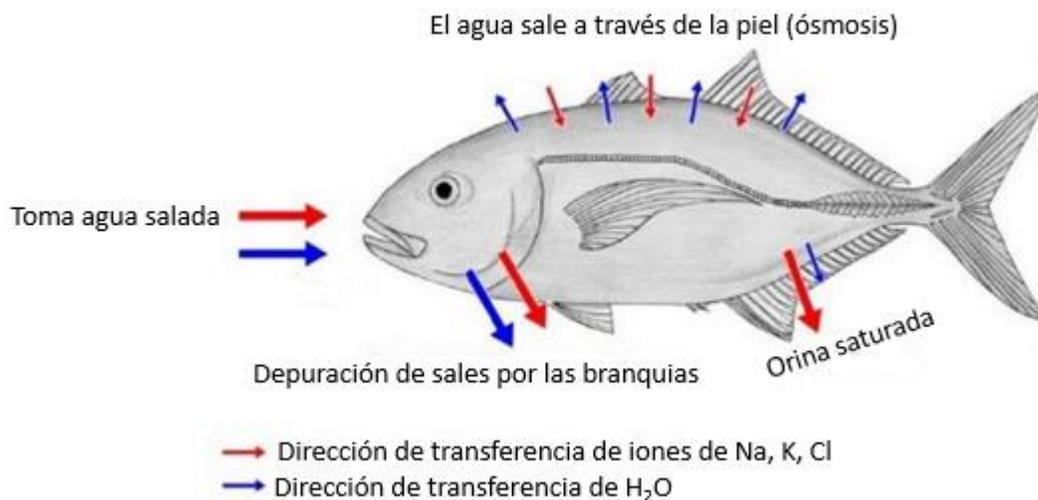


Figura 7.- Proceso de osmorregulación en peces de agua salada. Recuperado y modificado de: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/79/Osmoseragulation\\_Carangoides\\_bartholomae](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/79/Osmoseragulation_Carangoides_bartholomae)

Los estudios que se realizan para evaluar los cambios en la concentración del plasma de los peces que son expuestos a diferentes salinidades, incluyen las respuestas de presión osmótica y concentración iónica. La presión osmótica se refiere a la presión requerida para prevenir un flujo osmótico a través de una membrana semipermeable, la cual separa dos soluciones con una diferente concentración de solutos. Este mecanismo es utilizado por las células con la finalidad de mantener un equilibrio iónico, de manera que puede aumentar o disminuir con base en la concentración de sales que exista en el medio externo (Lignot *et al.*, 2000).

Diversos estudios sobre osmorregulación en peces, han revelado que las células son sometidas a varios procesos, como la restauración del volumen celular, el cambio en la arquitectura citoesquelética, la redistribución de pequeños osmolitos orgánicos, así como la activación de transportadores de iones y canales en respuesta al estrés osmótico (Foskett *et al.*, 1983; McCormick & Bradshaw, 2006).

Una de las especies más estudiadas en acuicultura es la tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*), un pez eurihalino, el cual tiene la capacidad para adaptarse a los desafíos osmóticos opuestos, desde entornos en agua dulce hasta medios en agua de mar. La tilapia del Nilo puede mantener la constancia osmótica del medio interno y sobrevivir en un medio hipotónico o hipertónico al utilizar mecanismos eficientes para la osmorregulación. Debido a su importancia en la acuicultura tropical y subtropical, además de su extrema

capacidad eurihalina, la tilapia es una especie de interés científico y es de los peces modelo para la investigación sobre los procesos de osmorregulación (Perry, 1997; Hwang *et al.*, 2011; Takei *et al.*, 2014).

El-Leith *et al.* (2019), evaluaron la concentración de salinidad óptima para *O. niloticus*, en función de su rendimiento en el crecimiento, la adaptación a la salinidad y el estado inmunológico a través de la expresión génica de genes de regulación iónica, en función del estrés, inflamación y genes relacionados con el sistema inmunológico en branquias, hígado y riñón. En un estudio preliminar con duración de seis meses, utilizaron concentraciones de 6 a 36 UPS, con un aumento diario de 0.5 UPS. Posteriormente con los menores porcentajes de mortalidad y la apariencia física de los peces del estudio preliminar, utilizaron tres concentraciones, las cuales fueron 6, 16 y 20 UPS. Los peces tenían una longitud de 10 a 12 cm y un peso de 25.5 a 26.1 g. Con relación a la ganancia de peso de los organismos, no obtuvieron diferencias significativas entre los grupos estudiados. El grupo criado con 16 UPS mostró un mejor rendimiento que el de 20 UPS, ya que tuvo un menor porcentaje de mortalidad, además de, una mayor expresión del gen regulado por iones ( $\text{Na}^+ / \text{K}^+$ -ATPasa  $\alpha$ 1-b), genes relacionados con el estrés de las branquias (GST, HSP27 y HSP70) y con la inflamación del tejido hepático (IL-1 $\beta$  e IL8). Los autores argumentan que una mayor expresión de genes relacionados con la inmunidad renal a 20 UPS, podría indicar que un aumento en la salinidad puede predisponer a los organismos a un mayor porcentaje de mortalidad. En este estudio, la concentración de 16 UPS fue la adecuada para el cultivo de *O. niloticus*, dado que los organismos se adaptaron mejor a esta condición de salinidad.

#### **1.4 Tolerancia a la salinidad en trucha arcoíris (*O. mykiss*)**

La tolerancia a la salinidad en trucha arcoíris ha sido estudiada desde el punto de vista fisiológico y morfológico, por lo que, estas adaptaciones la convierten en una especie con un alto potencial para realizar cultivos en el medio marino (Soengas *et al.*, 1993; Castillo-Alvarado, 2009; Kim *et al.*, 2016; Xiong *et al.*, 2019; 2020).

Soengas *et al.* (1993), evaluaron los cambios en el metabolismo de los carbohidratos del hígado cuando se transfiere la trucha arcoíris domesticada al medio marino. Este estudio se realizó en trucha arcoíris de pesos diferentes (80 y 140 g), para demostrar que la capacidad de adaptación al agua de mar era dependiente del tamaño de los peces. Durante su adaptación a la salinidad de 28 UPS por 21 días, los autores observaron cambios en el metabolismo de los carbohidratos del hígado. En una etapa observaron

glucogenólisis, la cual asociaron con un aumento en la actividad de la enzima glucógeno fosforilasa y una disminución en la actividad de la glucógeno sintetasa; además documentaron hiperglucemia en organismos pequeños (80 g) y grandes (140 g), con un mayor índice en los peces de menor tamaño. La activación de la enzima fructosa 1, 6 bisfosfatasa indicó un aparente aumento en el proceso de gluconeogénesis en los peces de 140 g. Estos resultados indicaron que la movilización de la reserva energética podría utilizarse para satisfacer la creciente demanda de energía por parte de los peces, principalmente en los órganos osmorreguladores que están involucrados en la adaptación al agua de mar. Además, al séptimo día del experimento observaron que los peces en agua de mar dejaron de alimentarse; por lo tanto, parece ser que no se alcanzó una aceptable adaptación al ambiente hiperosmótico, así como un reajuste en el metabolismo. Sin embargo, recomendaron realizar más estudios con peces de mayor tamaño o en condiciones de adaptación gradual, para poder evaluar los cambios que ocurren durante la adaptación de la trucha arcoíris al agua de mar.

Castillo-Alvarado (2009), evaluó el efecto de la salinidad en la preferencia térmica y la capacidad osmorreguladora de juveniles de trucha arcoíris. El estudio se enfocó al rango de temperatura en el cual los procesos fisiológicos de los organismos se llevan a cabo de una manera más eficiente, ya que podrían lograr un mejor desempeño en los cultivos. Los parámetros evaluados fueron la presión osmótica, la concentración de glucosa en plasma, y el índice hepatosomático en trucha arcoíris, al exponerlas directamente a distintos grados de salinidad con la finalidad de comprender qué mecanismos utiliza la especie para restablecer su homeostasis y su grado de adaptación a altas concentraciones salinas. Los organismos fueron aclimatados en estadio juvenil a salinidades de 0, 14 y 24 UPS durante un periodo de 14 días. El incremento en la salinidad fue gradual en 3 UPS por día, a una temperatura promedio de 19°C. Los resultados indicaron que los juveniles de trucha arcoíris al ser aclimatados a salinidades mayores, prefieren temperaturas significativamente más frías, esto dado que a menor temperatura la disponibilidad del oxígeno en el medio y la permeabilidad de la membrana celular aumentan, ya que estos factores facilitan el proceso de la osmorregulación. Los resultados obtenidos en la evaluación del intervalo de osmolaridad del plasma con valores de 259 a 379 mmol kg<sup>-1</sup> indicaron que a diferentes niveles de salinidad la trucha arcoíris puede mantener su homeostasis osmótica, y su condición isosmótica fue a 12 UPS. Con relación a los niveles de glucosa en plasma e índice hepatosomático, no presentaron un incremento significativo con el aumento de la salinidad, lo que podría indicar que después de 14 días de previa aclimatación los organismos ya se encontraban adaptados y no presentaron estrés osmótico.

Otro parámetro estudiado para comprender la transición del agua dulce al agua de mar en trucha arcoíris, es la respuesta al desafío hiperosmótico. Kim *et al.* (2016), determinaron los cambios fisiológicos que

ocurren en los juveniles de trucha arcoíris durante la transformación de “parr” (salmónidos en fase juvenil que aún no tolera el agua salada) a “smolt” (salmónidos que ya están preparados morfológica, fisiológica y conductualmente para migrar al agua de mar) y la adaptación al agua de mar. Los resultados indicaron que las proteínas conocidas como acuaporinas (AQP) se expresaron mayormente durante la fase “smolt” que durante la fase “parr”. Además, se registró un incremento en la osmolaridad del plasma y en la actividad branquial de la bomba sodio-potasio ( $\text{Na}^+/\text{K}^+\text{-ATPasa}$ ), cuando los organismos fueron expuestos a las diferentes salinidades, sin embargo, estos parámetros disminuyeron cuando los peces fueron expuestos al agua de mar después de agregar la dosis con AQP3 recombinante durante la transición a este medio. Los resultados de este estudio sugieren que varias isoformas de acuaporinas juegan un papel importante en los mecanismos de absorción de agua en un entorno hiperosmótico.

Xiong *et al.* (2019), evaluaron el rendimiento en crecimiento y el presupuesto de energía en juveniles de trucha arcoíris en comparación con la variedad steelhead. Además, examinaron el efecto de diferentes concentraciones de salinidad (0, 5, 10, 15, 20, 25 y 30 UPS) en la tasa de supervivencia y crecimiento, consumo de alimento y eficiencia de conversión alimenticia, composición bioquímica, y presupuesto energético, hasta cumplir 42 días. Con relación al crecimiento de ambas especies, encontraron que fue significativamente mayor en las concentraciones de salinidad menores (0 y 5 UPS). El contenido de lípidos, proteína y energía en ambas especies fue disminuyendo conforme aumentó la salinidad. En cuanto a los presupuestos de energía, en el crecimiento de ambas especies, el porcentaje de energía consumida fue significativamente mayor en las concentraciones de 5 y 10 UPS. En relación con los parámetros de supervivencia, tasa de crecimiento específico y eficiencia de conversión alimenticia, la trucha steelhead mostró estar más adaptada al aumento de salinidad. Estos resultados indicaron que la trucha steelhead en estadio juvenil fue mejor que la trucha arcoíris, sin embargo, las concentraciones salinas de 5 y 10 UPS fueron las más adecuadas para el crecimiento de ambas especies.

Finalmente, Xiong *et al.* (2020), evaluaron el crecimiento, la capacidad osmorreguladora y el presupuesto de energía en dos variedades de *O. mykiss*, la trucha arcoíris y la trucha arcoíris variedad “steelhead” bajo diferentes métodos de aclimatación a la salinidad y el mejor tamaño para transferir al medio marino a la trucha “steelhead”. El primer ensayo de transferencia consistió en identificar el método óptimo de aclimatación a la salinidad, en el cual compararon la tolerancia de ambas truchas en etapa juvenil con un peso promedio de  $99.44 \pm 0.26$  g para trucha arcoíris y de  $99.01 \pm 0.61$  g en truchas “steelhead”. Los tratamientos con diferentes tasas de aclimatación a la salinidad fueron: (a) un aumento de salinidad de 0 a 30 g / L (T30); (b) un aumento de salinidad de 0 a 14 g / L (punto isotónico de la especie), seguido de un aumento diario de 6 g / L hasta alcanzar 30 g / L (T6) o un aumento de salinidad de 0 a 14 g / L, seguido de

un incremento diario de 2 g / L hasta alcanzar 30 g / L (T2); y (c) tratamiento control que tenía solo agua dulce (T0). Los resultados mostraron que la tasa de crecimiento específico (TCE) en el tratamiento T0 fue significativamente mayor (60 % para trucha arcoíris y 80% para trucha “steelhead”) comparado con los otros tratamientos, mientras que la TCE en el tratamiento T30 fue menor a los otros tratamientos (10% para trucha arcoíris y 30% para trucha “steelhead”). En T30, T6 y T2, las tasas de crecimiento específico de la trucha “steelhead” fueron más altos, con valores por encima del 30, 50 y 80% respectivamente. La supervivencia más alta la obtuvieron en el tratamiento T2 para trucha arcoíris con el 85% y para la trucha “steelhead” fue del 95%. El consumo de alimento y la eficiencia de conversión alimenticia de la trucha “steelhead” fueron significativamente más altos, a excepción del grupo control, con valores del 55% para el tratamiento T30, 75% en el tratamiento T6 y 85% para T2.

Xiong *et al.* (2020), realizaron un segundo ensayo después de la aclimatación a la salinidad, 24 de las truchas “steelhead” de los tratamientos T0 y T2 mencionados anteriormente, fueron seleccionadas para cultivarlas durante 40 días, registrando el peso de los peces cada 10 días. El peso seco de las truchas se estimó de acuerdo con el contenido de humedad de las truchas que permanecieron en agua dulce y agua de mar, respectivamente. El segundo ensayo reveló que la capacidad de aclimatación a la salinidad de la trucha “steelhead” era más eficiente comparado con la trucha arcoíris. La transición gradual (T2) fue la forma más eficiente de aclimatación de salinidad para la trucha “steelhead” y la trucha arcoíris, al reducir el estrés por salinidad y mantener una tasa de supervivencia relativamente alta.

## 1.5 Justificación

La acuicultura es una de las industrias alimenticias que conllevan un mayor crecimiento hoy día, al reportar 179 millones de toneladas en el año 2018, representadas por diversas especies y entre la que destaca la trucha arcoíris. Esta especie representa un papel muy importante dentro de esta actividad, contribuyendo con el 1.6% del total de la producción de peces de aleta con fines de consumo (FAO, 2020).

Recientemente, la disponibilidad de agua dulce se ha visto severamente limitada en muchos países según el Instituto de Recursos Mundiales de las Naciones Unidas (WRI, por sus siglas en Inglés); aunado a esto, las crecientes salinidades costeras inducidas por el aumento del nivel del mar han hecho que sea mucho más importante tener especies tolerantes a la salinidad en los sitios de acuicultura de todo el mundo. Además, el uso de áreas de agua salobre puede llegar a presentar una oportunidad para expandir la

industria de la acuicultura de peces que son adaptados al medio marino (Yan *et al.*, 2013; de Azevedo *et al.*, 2015).

Los cultivos en un medio de agua salada muestran grandes ventajas, una y la más importante es reducir el consumo del agua dulce que cada vez está más escaso, y promover una mayor diversificación de especies de cultivo. Además, la alternativa de realizar cultivos con agua de mar en sistemas de recirculación acuícola permite tener un ambiente de cultivo con los parámetros de la calidad del agua bajo control. El cultivar organismos transferidos al agua de mar permite también alcanzar mayores tallas en las especies al ser trasladadas a cultivos en jaulas dentro del mar, lo que se verá reflejado en un ahorro significativo en los costos de producción. Esto explica por qué Noruega y Chile son los dos países con mayor producción de trucha a nivel mundial, siendo sus métodos de producción el uso de jaulas en mar abierto (FAO, 2006a). Por lo anterior, en el presente estudio se evaluaron dos métodos de transferencia a la salinidad en la trucha arcoíris *O. mykiss*, y en el cultivo en agua de mar recirculada se analizaron los parámetros productivos, supervivencia, indicadores biológicos (índice de condición de Fulton e índice hepatosomático) y la presión osmótica.

## 1.6 Hipótesis

- La trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) presenta la mejor supervivencia al ser transferida de agua dulce al agua de mar de forma gradual continua con respecto al método discontinuo y abrupto.
- La supervivencia, la presión osmótica y los parámetros productivos de la trucha arcoíris (*O. mykiss*) cultivada en sistemas de recirculación en agua dulce, serán diferentes al de los peces que se mantienen en un medio marino.

## 1.7 Objetivos

### 1.7.1 Objetivo general

- Evaluar el desempeño de los juveniles de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*), durante el proceso de transferencia del agua dulce al agua de mar, y en un cultivo piloto experimental en sistemas de recirculación.

### 1.7.2. Objetivos particulares

- Evaluar la supervivencia de juveniles de trucha arcoíris (*O. mykiss*) durante el proceso de transferencia gradual continuo y discontinuo abrupto al agua de mar.
- Evaluar el crecimiento, la tasa de conversión alimenticia y la supervivencia de los juveniles de trucha arcoíris cultivada en agua dulce y en agua de mar en sistemas de recirculación acuícola.
- Determinar el efecto de la salinidad en el índice de condición de Fulton, el índice hepatosomático y la presión osmótica de juveniles de trucha arcoíris.

## Capítulo 2. Metodología

---

### 2.1 Sistema de incubación

El sistema de incubación fue acondicionado previamente como un sistema de recirculación que anteriormente cumplía su funcionamiento en agua salobre en un tanque de fibra de vidrio con capacidad de 7000 litros (7m<sup>3</sup>). Inicialmente el sistema tenía una salinidad de 7.3 UPS, y requirió de 4 recambios del 70% sustituyendo el agua de mar por agua dulce hasta llegar a 1 UPS. A su vez, para la maduración del filtro biológico se añadieron 155 g de nitrato de amonio (NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>) diluido en agua dulce, con la finalidad de activar las bacterias nitrificantes que ayudan a mantener el control en los niveles de los compuestos nitrogenados. Se adaptó a un filtro biológico de cuentas de plástico con la finalidad de remover los compuestos nitrogenados generados por los restos de alimentos y las heces de los organismos. De igual manera se incluyeron en el sistema propulsores de aire (airlift) para una mejor oxigenación y calidad del agua. Se adaptaron dos jarras incubadoras tipo Mc Donald para la recepción de los huevos y su desarrollo hasta la eclosión. Se incluyó también, un filtro de luz ultravioleta (Lifegard de 25 watts) con la finalidad de que no hubiera un crecimiento bacteriano que pudiera perjudicar el desarrollo de los huevos antes de la eclosión. Por último, se agregó al sistema un fraccionador de proteína, el cual cumplió con la filtración de espuma generada a base de partículas suspendidas, compuestos orgánicos disueltos y derivados de los restos de alimento y heces de los organismos. La temperatura estuvo controlada con una bomba de calor marca "Aqualogic" de 2 Hp, programada a 15 ± 1°C.

### 2.2 Mantenimiento y aclimatación de los organismos

Los huevos de trucha arcoíris fueron adquiridos en la empresa Truchas valle del Estado de México, importados de la empresa Troutlodge Inc. en Estados Unidos. Se adquirieron un total de 10, 000 huevos oculados, los cuales fueron transferidos directamente a las dos jarras incubadoras tipo Mc Donald, con cinco mil ovas cada una y 6 litros de agua dulce. Las jarras estaban adaptadas al tanque de 7m<sup>3</sup> el cual proporcionaba de agua a las mismas, teniendo una ruta por el sistema de filtración de cuentas de plástico y por el filtro de luz ultravioleta descrito anteriormente. Los huevos fueron monitoreados diariamente (figura 8), se retiraron los huevos en donde se detuvo el desarrollo, además se llevó un registro de los parámetros fisicoquímicos del agua que incluye el oxígeno disuelto, porcentaje de saturación de oxígeno,

salinidad y temperatura, los cuales fueron monitoreados con un medidor multiparámetro (YSI 2030). El Nitrógeno amoniacal total, nitritos, nitratos y alcalinidad fueron registrados con un kit colorimétrico API. El pH se registró esporádicamente con un potenciómetro de pH.



Figura 8. Huevo oculado de trucha arcoíris.

Una vez que eclosionaron los alevines (figura 9), se observaron diariamente hasta que consumieron el saco vitelino, posteriormente se trasladaron a dos jaulas elaboradas con tubería pvc de  $\frac{3}{4}$  cuyas medidas eran 95 cm<sup>2</sup> de área con 56 cm de profundidad; las jaulas se adaptaron dentro del tanque de 7m<sup>3</sup> para continuar con el desarrollo de los alevines. Una vez que los organismos se trasladaron a las jaulas, se les proporcionó alimento formulado para peces. Para poder suministrar el tamaño de partícula de alimento adecuado al tamaño de la boca de los peces, el pellet se tuvo que triturar con ayuda de una licuadora doméstica para después ser filtrado en un tamiz de 60 micras. El mantenimiento de las jaulas y tanque donde se encontraban los peces consistió en retirar por sifoneo las heces fecales y restos de materia orgánica generada por el alimento, esta actividad se realizó con ayuda de una manguera de silicón adaptada a un tubo pvc de  $\frac{1}{4}$  de pulgada, esto con el fin de evitar que se elevarán los compuestos nitrogenados por la descomposición de la materia orgánica.

Una vez que los alevines pesaron 2g, se les proporcionó alimento inmunopotenciador para trucha arcoíris formulado por “Silvercup el Pedregal alimentos para acuicultura”. Este alimento cuenta con una composición proximal de 40% de proteína, 12% grasa, 2.5% fibra, 12.5% ceniza y 12% de humedad. Las dosis de alimentación fueron proporcionadas con base en la tabla de alimentación propuesta por el fabricante del alimento. Los organismos comenzaron con un consumo de 8 dosis diarias de pellet 1.5 mm y una tasa de alimentación del 10% de su peso corporal por día. Cada semana se realizó una biometría de 30 organismos por jaula para determinar la ganancia en peso y ajustar así la ración alimenticia, cuando los

organismos alcanzaron los 10 g de peso, el consumo de alimento se ajustó a 6 raciones diarias de alimentación con un pellet de 3.5 mm.



Figura 9. Organismo eclosionado de trucha arcoíris con saco vitelino.

### 2.3 Adaptación de sistemas para la transferencia de juveniles al agua de mar

Cada uno de los tres sistemas experimentales estuvieron constituidos por lo siguiente: cuatro tanques circulares de plásticos con una capacidad de 550 litros; un tanque de compensación de 550 litros; una bomba de agua marca Sweetwater modelo SHE1.7; tubería de suministro de agua de PVC Ced 40 de 3 pulgadas; un filtro biológico de cuentas de plástico "Polygeyser" de 6 pies cúbicos marca Aquaculture Systems Technologies, EUA; línea de tubería de drenaje de PVC clase 100 de 4 pulgadas con retorno al tanque de compensación; línea de tubería de PVC ced 40 de 2 pulgadas para el suministro de aire al sistema y 2 líneas de aire a cada tanque experimental en donde se colocaron de 2 piedras de aireación (1.5" X 3.0" X 1/4"), con el fin de mantener la concentración de oxígeno disuelto en el agua por arriba de  $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . Para registrar la temperatura del agua, en el tanque de compensación de cada sistema se colocó un registrador de temperatura y niveles de luz marca HOBO modelo Pendant® UA-002-64. El agua de mar para ambos tratamientos se obtuvo de un tanque reservorio de geomembrana con capacidad de 30,000 litros (30 m<sup>3</sup>). Este tanque a su vez cuenta con un bio-filtro de cuentas de plástico tipo artesanal de 11 ft<sup>3</sup>, 3 propulsores de aire para la filtración y movimiento del agua de mar, y una manguera porosa perimetral, ubicada al fondo de tanque para el suministro de aire.

Se utilizaron dos metodologías para la transferencia de los organismos al agua de mar, un tratamiento gradual/continuo (TGC) y un tratamiento discontinuo/abrupto (TDA), además se mantuvo un grupo control en agua dulce.

## **2.4 Traslado de truchas al área experimental**

Antes de trasladar a los peces a los tanques experimentales de 550 L, se registró su peso y se colocaron por separado en tinas con una capacidad de 170 litros con agua dulce, con la finalidad de tener un control sobre la cantidad de organismos que entraron a los tanques. Posteriormente, 200 peces se colocaron en cuatro tambos de plástico de 200 litros (50 truchas por tampo), y se transportaron a los sistemas experimentales ubicados en los invernaderos del Departamento de Acuicultura.

En el área experimental, los organismos en grupos de 50 peces se aclimataron en cubetas de 20 litros para disminuir el estrés por temperatura, ya que los sistemas experimentales tenían 4°C más baja la temperatura que en la que se encontraban los peces (15°C) en los tanques de 7 m<sup>3</sup>. Un total de 600 organismos fueron trasladados a la zona experimental de los cuales se usaron un total de 200 juveniles para el sistema gradual/continuo (TGC), 200 para el sistema discontinuo/abrupto (TDA), y 200 peces del sistema grupo control en agua dulce. Las truchas permanecieron en estas condiciones seis días antes del inicio de la transferencia al agua de mar para disminuir el estrés por transporte.

## **2.5 Transferencia al agua de mar tratamiento gradual continuo (TGC)**

Al sistema experimental del tratamiento gradual continuo de agua dulce a marina, se le adaptó una línea de PVC ced 40 de ¾ de pulgada que permitía el envío de agua de mar del estanque reservorio de geomembrana (30 m<sup>3</sup>) a cada uno de los tanques en el sistema. Esto por medio de una bomba de agua marca MagDrive modelo 5, la cual presentaba un flujo máximo de 32 GPM (galones por minuto) y por un distribuidor de agua provisto con cuatro salidas, cada una con una válvula bola de PVC de 1/2" conectadas a una manguera de silicón sumergida en cada uno de los tanques experimentales. El excedente de agua que ingresaba al sistema era eliminado a través de un tubo de desagüe ubicado en el tanque de

compensación a una altura del volumen de 500 litros y que a su vez descargaba por una tubería de PVC ced 40 de 1 pulgada a una poza de desagüe conectada al desagüe principal del área experimental (figura 10).



Figura 10. Vista lateral sistema de recirculación tratamiento gradual continuo.

La densidad inicial del sistema fue de 200 organismos con un peso total de 3,270g, los cuales fueron repartidos aleatoriamente en 4 tanques colocando 50 organismos por tanque, con un peso promedio de  $817.5 \pm 6.4$  g por tanque. El peso promedio de cada organismo fue de  $16.35 \pm 0.13$  g en cada tanque experimental.

La tasa de sustitución de agua dulce por agua de mar se calculó con la siguiente fórmula.

$$V_1C_1 = V_2C_2$$

Donde:

$V_1$ = Volumen inicial

$C_1$ = Concentración inicial

$V_2$ = Volumen final

$C_2$ = Concentración final

Para conocer el valor del volumen de agua de mar que se tuvo que agregar cada 24 horas, se realizó el siguiente despeje:

$$V_2 = \frac{C_1 V_1}{C_2} \quad (1)$$

Partiendo con un volumen total de 2300 litros para todo el sistema y un ajuste en el volumen de recambio requerido, la tasa de recambio fue de  $0.048 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$  para cada tanque, la cual se ajustó en función del incremento en salinidad cada 24 horas (Tabla 1).

Tabla 1. Tasa de sustitución de agua dulce por agua de mar en el tratamiento gradual continuo durante 7 días.

Días	Salinidad (UPS)	Sustitución (L)	Flujo de agua ( $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ )	Tasa de recambio por tanque ( $\text{L} \times \text{min}$ )
1	5	269	0.19	0.048
2	10	383	0.27	0.068
3	15	515	0.36	0.09
4	20	630	0.44	0.11
5	25	905	0.61	0.15
6	30	1526	1.05	0.262
7	34.6	2300	1.6	0.4

## 2.6 Transferencia al agua de mar tratamiento discontinuo abrupto (TDA)

El tratamiento discontinuo abrupto se llevó a cabo en un sistema similar al del tratamiento gradual continuo, sin embargo, la adaptación al agua de mar en este tratamiento fue diferente. El recambio en este tratamiento se realizó manualmente, al sustituir el agua dulce por agua de mar, utilizando un recipiente graduado de 20 litros, una vez llegando a la cantidad de litros indicada por tanque, se esperó una hora a que recirculara el agua dentro de los tanques para proceder a medir el aumento de salinidad, la cual se ajustó cada 24 horas (Tabla 2).

La densidad inicial del sistema fue de 200 organismos con un peso total 3255 g, los cuales se dividieron en cuatro tanques con 50 organismos por tanque, con un peso total promedio de  $813.75 \pm 5.63$  g por tanque. El peso promedio de cada organismo fue de  $16.28 \pm 0.11$  g para cada tanque experimental.

Tabla 2. Tasa de sustitución de agua dulce por agua de mar en el tratamiento discontinuo abrupto durante 7 días.

Días	Salinidad (UPS)	Sustitución total (l)	Sustitución por tanque (l)
1	4.6	269	54
2	10.1	383	82
3	15	515	103
4	20.1	630	126
5	24.9	905	181
6	31.1	1526	381.5
7	34.5	2300	460

## 2.7 Grupo control

El grupo control constó del mismo número de peces que los tratamientos experimentales, la densidad inicial del sistema fue de 200 organismos con un peso total 3254 g, los cuales fueron repartidos de manera aleatoria en cuatro tanques experimentales un total de 50 organismos por tanque con un peso promedio de  $813.5 \pm 4.12$  g por tanque. El peso promedio de cada organismo fue de  $16.27 \pm 0.08$  g para cada tanque experimental. Las truchas del grupo control se mantuvieron en un sistema similar al de los tratamientos, solo que este grupo permaneció en agua dulce durante todo el periodo experimental. La alimentación se proporcionó 3 veces al día administrando el 3% del peso total por pez al igual que en los tratamientos experimentales.

## 2.8 Cultivo piloto experimental

El cultivo piloto experimental se llevó a cabo en los mismos sistemas de recirculación utilizados para la transferencia al agua de mar y el grupo control. El objetivo de este proceso fue evaluar el rendimiento del sistema de recirculación, así como la capacidad de carga, de manera que, la densidad y el peso de los

organismos no sobrepasarán los límites que el sistema de recirculación podía soportar. La tasa de alimentación durante el cultivo piloto experimental se administraba tres veces al día, sin embargo, se realizó una modificación en las cantidades por toma, de manera que, los peces ya no eran alimentados con el 3% de su peso, sino que fueron alimentados a saciedad.

## 2.9 Parámetros fisicoquímicos del agua

Los parámetros fisicoquímicos evaluados para conocer la calidad del agua en cada uno de los tratamientos fueron: 1) Salinidad (UPS), temperatura ( °C) y oxígeno disuelto (mg/l y % de saturación) los cuales se registraron con un multiparámetro marca YSI modelo Pro-2030; 2) el potencial del ion hidrogeno (pH), por medio de un potenciómetro marca Mettler Toledo; 3) la concentración del nitrógeno amoniacal total (NAT en mg/l), nitritos ( $\text{NO}_2^-$  en mg/l), nitratos ( $\text{NO}_3^-$  en mg/l) y la alcalinidad (KH en mg/l) se evaluaron mediante kit's colorimétrico marca API®. El registro de todos los parámetros fisicoquímicos fue diario a excepción del pH.

## 2.10 Supervivencia

La supervivencia se evaluó en ambos tratamientos y en el grupo control durante la transferencia al agua de mar, así como en el transcurso del cultivo experimental, para ello se utilizó la siguiente fórmula:

$$S = \frac{\text{número final de organismos}}{\text{número inicial de organismos}} * 100 \quad (2)$$

## 2.11 Tasa de conversión alimenticia (TCA)

La tasa de conversión alimenticia fue evaluada en ambos tratamientos durante la fase del cultivo en agua de mar y en el grupo control (agua dulce), para ello se utilizó el peso ganado en los peces y el alimento consumido en la siguiente fórmula:

$$TCA = \frac{\text{Alimento consumido}}{\text{Peso ganado}} \quad (3)$$

## 2.12 Desempeño de los organismos en agua de mar y en agua dulce

Durante el desarrollo del experimento, se realizaron un total de cinco biometrías que consistieron en registrar el peso de los organismos por cada tratamiento y el grupo control con ayuda de una balanza Scout Pro®, con la finalidad de conocer el incremento en peso.

Los índices de desempeño de los organismos se estimaron con las siguientes fórmulas:

- Crecimiento absoluto (G) =  $\frac{\text{Peso final (g)}}{\text{Peso inicial (g)}}$
- Incremento en peso (IP%) =  $\frac{[(\text{peso final (g)} - \text{peso inicial (g)})]}{\text{peso inicial (g)}} * 100$
- Tasa de crecimiento específico (TCA %) =  $100 * \frac{[\text{Ln}(\text{peso final (g)}) - \text{Ln}(\text{peso inicial (g)})]}{\text{Tiempo (días)}}$

### 2.12.1 Índice de condición de Fulton

Este índice fue evaluado durante el cultivo experimental a los 74 días y se tomaron cuatro organismos de cada tanque para su evaluación en cada tratamiento.

Para realizar el cálculo de este índice se utilizó la siguiente fórmula:

$$K = 100 * \frac{W}{L^3}$$

Donde:

K = Índice de condición de Fulton

W = Peso húmedo (g)

L = Longitud

### 2.12.2 Índice hepatosomático (IH)

Una vez que terminó el cultivo piloto experimental, se tomaron cuatro organismos de cada tanque para la evaluación del índice hepatosomático. Se utilizó el anestésico metanosulfonato de tricaína (MS-222) a una concentración de 60 mg/L para anestesiarse a los organismos, posteriormente se procedió a sacrificar a los peces por medio de una punción en el cerebro (Guzman y Zarate, 2008) con ayuda de una aguja procedente de una jeringa de 3ml. De cada organismo se procedió a tomar el peso húmedo con ayuda de una balanza Adventurer Pro®, después se realizó un corte longitudinal con un bisturí para poder disectar el hígado y registrar su peso con una balanza analítica AND® con la finalidad de poder realizar el cálculo del índice con la siguiente fórmula:

$$\text{IH (\%)} = 100 * \text{peso total del pez (g)} / \text{peso del hígado (g)}$$

### 2.12.3 Presión osmótica

Para la evaluación de la presión osmótica en el suero sanguíneo, se utilizaron cuatro organismos de cada tratamiento a los 74 días del experimento. Los organismos fueron anestesiados con metanosulfonato de tricaína (MS-222) a una concentración de 60 mg/L. Para poder extraer la muestra de sangre se realizó una punción en la vena caudal del pez con una jeringa de plástico "BD Plastipak" de 3 ml. La sangre de cada pez fue colocada en viales Eppendorf de 1.5 mL para ser centrifugados en una microcentrífuga (VWR Galaxy 7D) a 7000 rpm por 10 minutos, esto con el fin de separar el suero sanguíneo del paquete celular. Se tomaron 10 µl del suero con una micropipeta y se colocó en un osmómetro de vapor (Wescor 5500) previamente calibrado; los valores de presión osmótica se expresaron en mmol·kg<sup>-1</sup>.

## 2.13 Análisis estadístico

Se aplicaron las pruebas Shapiro Wilk y Levene para probar los supuestos de normalidad y varianza homogénea de los datos en la prueba paramétrica correspondiente. Posteriormente se realizaron análisis de varianza (anova) de una vía para probar las diferencias significativas, así como una prueba *post hoc* de Tuckey para identificar las diferencias significativas entre los tratamientos con respecto al grupo control. Para los datos que no cumplieron con los supuestos de normalidad y varianza homogénea, se evaluaron mediante la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis, seguida de una prueba de Dunn para encontrar las diferencias significativas entre grupos. Los análisis se realizaron con un nivel de confianza del 95%. Todos los análisis estadísticos se efectuaron con el software Rstudio versión 3.6.1.

## Capítulo 3. Resultados

---

### 3.1 Calidad del agua durante la transferencia al agua de mar

La Tabla 3 muestra los promedios de los parámetros fisicoquímicos del agua durante la transferencia al agua de mar para ambos tratamientos y el grupo control, desde el primer día de aclimatación hasta el día 13 antes del inicio del cultivo.

En los diferentes tratamientos, la temperatura se mantuvo entre 15.6 y 16.6 °C, no hubo diferencias significativas ( $p = 0.2475$ ). Con relación a la concentración de oxígeno, los valores más altos se registraron en el tratamiento control (agua dulce) con 9.92 mg/L, se encontraron diferencias significativas solamente con los tratamientos experimentales ( $p < 0.05$ ). El porcentaje de saturación de oxígeno fue mayor en el tratamiento gradual continuo y menor en el tratamiento discontinuo abrupto; entre los tratamientos experimentales y el grupo control no existieron diferencias significativas ( $p = 0.26$ ).

El grupo control y el tratamiento gradual continuo, tuvieron una mayor concentración de nitrógeno amoniacal total (NAT; 2.13 y 1.63 mg/L, respectivamente) en comparación al tratamiento discontinuo abrupto (1.44 mg/L), sin embargo, no se encontraron diferencias significativas ( $p = 0.1665$ ). Con relación a las concentraciones de nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ) y nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), los valores que se registraron estuvieron cercanos a 0.0 mg/L en los tratamientos experimentales y en el grupo control. Esto probablemente debido a que el filtro biológico no había alcanzado su etapa de maduración para la producción y activación de bacterias nitrificantes y/o a que el método utilizado no es tan sensible para concentraciones tan bajas de esos nutrientes (<0.25 mg/l).

Los valores de pH se mantuvieron en un intervalo entre 7.92 y 7.93 para todos los tratamientos, no observándose diferencias significativas entre ellos. Los valores de alcalinidad fueron de 161.1 mg/L durante la transferencia al agua de mar para los tratamientos experimentales, mientras que el grupo control tuvo una alcalinidad promedio de 149.91 mg/L; no observándose diferencias significativas entre ellos (Tabla 3).

Tabla 3. Parámetros fisicoquímicos de la calidad del agua durante la transferencia al agua de mar. Media  $\pm$  desviación estándar. Las letras indican las diferencias significativas entre los tratamientos.

Parámetro	Control	Discontinuo (TDA)	Continuo (TGC)
Temperatura (°C)	16.60 $\pm$ 1.43	15.61 $\pm$ 0.99	16.35 $\pm$ 1.09
Salinidad (UPS)	1.0	34.60	34.30
Oxígeno Disuelto (mg/L)	9.92 $\pm$ 0.24 <sup>b</sup>	8.74 $\pm$ 1.26 <sup>a</sup>	8.90 $\pm$ 0.76 <sup>a</sup>
OD (%L)	97.34 $\pm$ 2.25	96.01 $\pm$ 3.78	99.20 $\pm$ 1.96
NH <sub>3</sub> /NH <sub>4</sub> ( mg/L)	2.13 $\pm$ 0.83	1.44 $\pm$ 0.62	1.63 $\pm$ 0.52
NO <sub>2</sub> (mg/L)	0.0	0.0	0.0
NO <sub>3</sub> (mg/L)	0.0	0.0	0.0
pH	7.93 $\pm$ 0.45	7.92 $\pm$ 0.04	7.93 $\pm$ 0.06
Alcalinidad (mg/L)	149.91 $\pm$ 9.26	161.1	161.1

### 3.2 Supervivencia durante la transferencia al agua de mar

La supervivencia durante la transferencia de los peces al agua de mar (primeros 13 días de experimentación) fue del 99% en ambos tratamientos experimentales y el grupo control, no registrándose diferencias significativas (Tabla 4).

Tabla 4. Valores de supervivencia durante la transferencia de la trucha arcoíris al agua de mar. Media  $\pm$  desviación estándar. TDA, transferencia discontinuo abrupto; TGC, transferencia gradual continua.

Supervivencia del grupo control	Supervivencia del grupo TDA	Supervivencia del grupo TGC
99 $\pm$ 1.15	99 $\pm$ 1.15	99 $\pm$ 1.15

Cabe mencionar que los dos organismos que murieron del grupo control fueron por un accidente a la hora de realizar el mantenimiento del sistema.

### 3.3 Supervivencia durante el cultivo piloto experimental

La supervivencia registrada durante el cultivo piloto experimental (días 14 al 74), nos indica el porcentaje de organismos que sobrevivieron a lo largo del experimento después de haber sido transferidos al agua de mar (primeros 13 días de experimentación). El grupo control tuvo la mayor supervivencia registrada (94 %), a diferencia de los tratamientos discontinuo abrupto (34%) y gradual continuo (26%) (figura 11)). Se encontraron diferencias significativas entre el grupo control y los tratamientos experimentales en agua de mar ( $p = 0.006$ ).

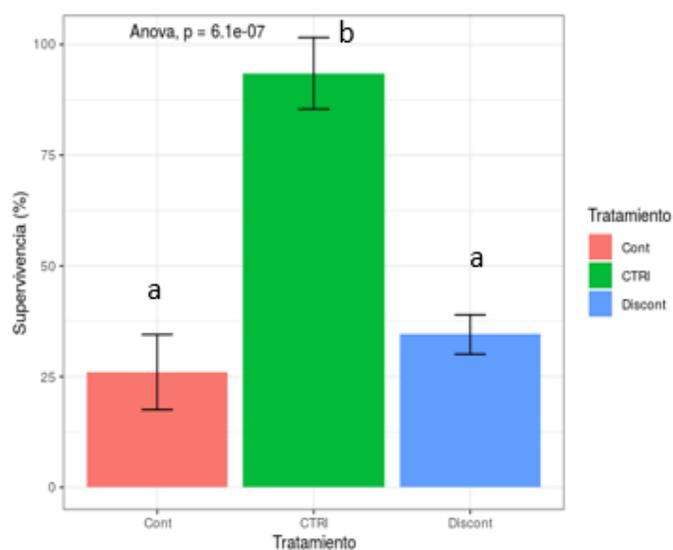


Figura 11. Supervivencia de la trucha arcoíris *O. mykiss* durante el cultivo piloto experimental. Media  $\pm$  desviación estándar.  $p < 0.001$ . Las letras indican las diferencias significativas entre los tratamientos.

### 3.4 Calidad del agua durante el cultivo piloto experimental

Los parámetros fisicoquímicos del agua se siguieron evaluando una vez que inició a la fase de cultivo piloto experimental en agua de mar (Días 14 a 74), en la Tabla 5 podemos observar los resultados de las concentraciones promedio más desviación estándar de los parámetros fisicoquímicos del agua durante el cultivo piloto experimental para ambos tratamientos y el grupo control. El grupo control presentó valores de temperatura más altos ( $18.42 \pm 1.57$  °C) durante el cultivo piloto experimental a diferencia de los tratamientos experimentales ( $16.57 \pm 1.23$  y  $16.95 \pm 1.33$  °C, respectivamente), observándose diferencias significativas entre estos tratamientos ( $p < 0.0001$ ). Los valores de salinidad no tuvieron diferencias

significativas entre los tratamientos experimentales ( $p = 0.5461$ ). El oxígeno disuelto tuvo valores mayores en los tratamientos experimentales, y fueron diferentes significativamente con el grupo control ( $p < 0.001$ ). El porcentaje de saturación de oxígeno tuvo un promedio mayor en el tratamiento discontinuo abrupto que en el tratamiento gradual continuo y el grupo control, con diferencias significativas con ambos grupos ( $p < 0.001$ ).

Los valores del nitrógeno amoniacal total (NAT) del agua donde se mantuvo el grupo control fueron diferentes significativamente con los tratamientos experimentales ( $p < 0.001$ ). Las concentraciones de nitritos incrementaron y las diferencias significativas se encontraron únicamente entre el grupo control y el tratamiento discontinuo abrupto ( $p < 0.05$ ). La concentración de nitratos también aumentó, sin embargo, no se encontraron diferencias significativas entre los grupos ( $p = 0.1126$ ). Los valores de alcalinidad se mantuvieron en un rango de 150.83 para el grupo control y 152.88 para los tratamientos experimentales, y no se encontraron diferencias significativas ( $p = 0.3447$ ). El pH se mantuvo en un intervalo de 7.64 a 7.92 en los tratamientos experimentales y el grupo control (Tabla 5).

Tabla 5. Parámetros fisicoquímicos de la calidad del agua durante el cultivo piloto experimental.

Parámetro	Control	Discontinuo (TDA)	Continuo (TGC)
Temperatura (°C)	18.42 ± 1.57 <sup>b</sup>	16.57 ± 1.23 <sup>a</sup>	16.95 ± 1.33 <sup>a</sup>
Salinidad (UPS)	1.0	35.43 ± 0.89	35.47 ± 0.72
Oxígeno Disuelto (mg/L)	6.92 ± 1.32 <sup>b</sup>	7.17 ± 0.36 <sup>a</sup>	7.15 ± 0.33 <sup>a</sup>
Porcentaje de saturación (%L)	72.91 ± 14.73 <sup>a</sup>	86.75 ± 3.06 <sup>b</sup>	83.39 ± 3.92 <sup>c</sup>
NH <sub>3</sub> /NH <sub>4</sub> (mg/L)	1.75 ± 1.23 <sup>b</sup>	0.94 ± 0.74 <sup>a</sup>	1.03 ± 0.78 <sup>a</sup>
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	0.127 ± 0.16 <sup>b</sup>	0.06 ± 0.11 <sup>a</sup>	0.08 ± 0.12 <sup>a</sup>
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	32.30 ± 13.71	27.38 ± 15.37	27.38 ± 15.37
pH	7.92 ± 0.09	7.76 ± 0.08	7.64 ± 0.04
Alcalinidad (mg/L)	150.83 ± 8.93	152.78 ± 8.99	152.88 ± 8.99

Las letras indican las diferencias significativas entre los tratamientos.

### 3.5 Crecimiento de la trucha arcoíris durante el cultivo en agua de mar

Posterior a la transferencia al agua de mar, se realizaron cuatro biometrías tomando el peso de los organismos para registrar la ganancia a través del tiempo. Los peces del grupo control tuvieron el mejor incremento en peso y fue diferente significativamente ( $p < 0.001$ ) al de las truchas que fueron transferidas al agua de mar (figura. 12). El peso final para el grupo control fue de  $74.25 \pm 3.07$  g, mientras que para el tratamiento discontinuo abrupto se registró un peso de  $35.23 \pm 2.89$  g; representando un 52% menos crecimiento. Para el caso del tratamiento gradual continuo se registró un 50% menos de crecimiento con respecto al tratamiento control. El peso promedio final de los peces del tratamiento gradual continuo a los 74 días de cultivo fue de  $37.1 \pm 4.77$  g. El registro del peso de los peces que estuvieron en agua de mar tuvo dos puntos de incremento, sin embargo, a partir de la 5ta biometría los organismos comenzaron a perder peso, a diferencia del grupo control donde se observó el aumento de peso a lo largo de todo el experimento.

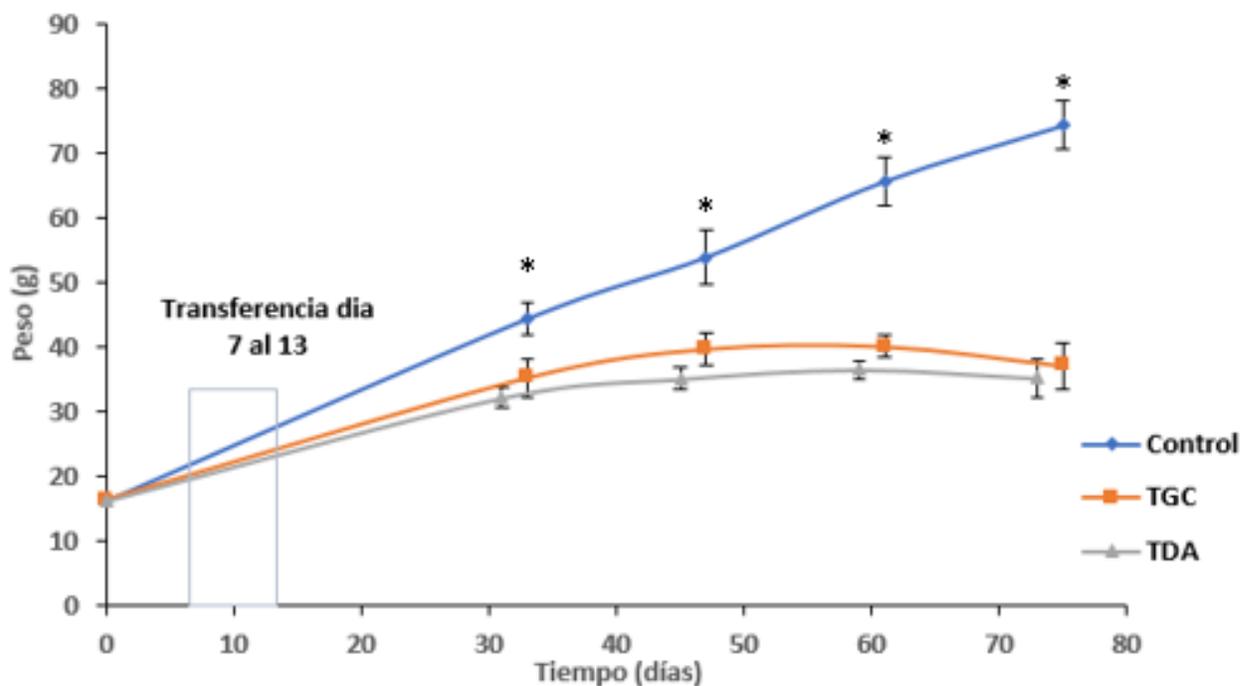


Figura 12. Peso promedio de trucha arcoíris *O. mykiss* desde el día 1 hasta finalizar el cultivo piloto experimental al día 74. Los asteriscos indican las diferencias significativas del control con respecto a los tratamientos en cada biometría.

### 3.6 Parámetros productivos

El crecimiento absoluto en los peces del grupo control fue mayor ( $57.99 \pm 3.68$  g) con respecto a los tratamientos experimentales ( $p < 0.0001$ ), mientras que entre los tratamientos con agua de mar discontinuo ( $18.95 \pm 2.88$ ) y continuo ( $20.75 \pm 3.51$ ) no se encontraron diferencias (Tabla 6). La ganancia en peso fue superior significativamente también en el grupo control ( $p < 0.001$ ) obteniendo un 356% de ganancia en peso a diferencia de los tratamientos experimentales que obtuvieron solamente un 116 y 127%, respectivamente; no encontrándose diferencias significativas. La tasa de crecimiento específico fue significativamente mayor en el grupo control ( $p < 0.001$ ) con un valor de 2.05 g/día. Los tratamientos discontinuo abrupto (1.04 g/día) y gradual continuo (1.10 g/día) no mostraron diferencias significativas ( $p = 0.6945$ ). Con relación a la tasa de conversión alimenticia, el grupo control tuvo diferencias significativas con los tratamientos experimentales ( $p < 0.001$ ), la TCA fue más alta en el tratamiento gradual continuo (3.57%) y la menor se obtuvo en el grupo control (0.95%) Tabla 6.

Tabla 6. Parámetros productivos de la trucha arcoíris *O. mykiss* evaluados al día 74 del experimento.

Parámetro	Control	Discontinuo	Continuo
Crecimiento absoluto (g)	$57.99 \pm 3.68^b$	$18.95 \pm 2.88^a$	$20.75 \pm 3.51^a$
Ganancia en peso (%)	$356 \pm 21.68^b$	$116 \pm 17.37^a$	$127 \pm 21.97^a$
Tasa de crecimiento específico (g/día)	$2.05 \pm 0.06^b$	$1.04 \pm 0.11^a$	$1.10 \pm 0.13^a$
Tasa de conversión alimenticia (%)	$0.95 \pm 0.11^b$	$1.68 \pm 0.09^a$	$3.57 \pm 0.48^a$

Las letras indican las diferencias significativas entre los tratamientos.

### 3.7 Índice hepatosomático

Los valores del índice hepatosomático no cumplieron el supuesto de normalidad, por lo que se realizó una prueba de Kruskal – Wallis para la comparación de los datos, en los cuales no se encontraron diferencias significativas  $p = 0.3$  (figura 13).

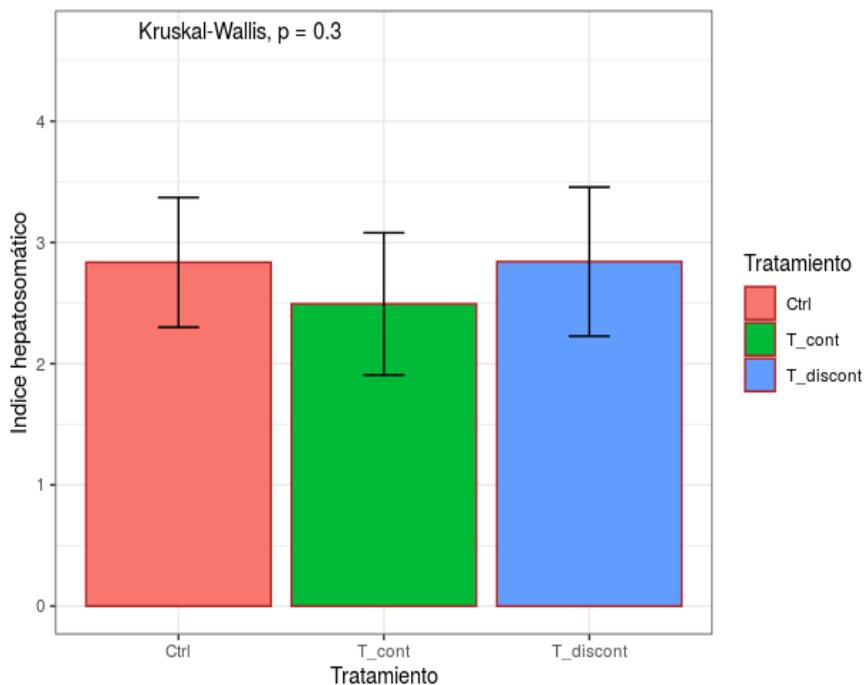


Figura 13. Valores de índice hepatosomático de la trucha arcoíris *O. mykiss* para el grupo control y los tratamientos experimentales. Media  $\pm$  desviación estándar.

### 3.8 Índice de condición de Fulton (K)

El grupo control tuvo un mayor índice de condición (K) con valores de  $1.18 \pm 0.08$  %, seguido del tratamiento discontinuo abrupto con un índice de  $0.97 \pm 0.07$ % y el tratamiento gradual continuo con valores de  $0.95 \pm 0.11$ % (figura 14). No hubo diferencias significativas dentro de los tratamientos experimentales, sin embargo, el grupo control presentó diferencias significativas con los tratamientos ( $p < 0.001$ ).

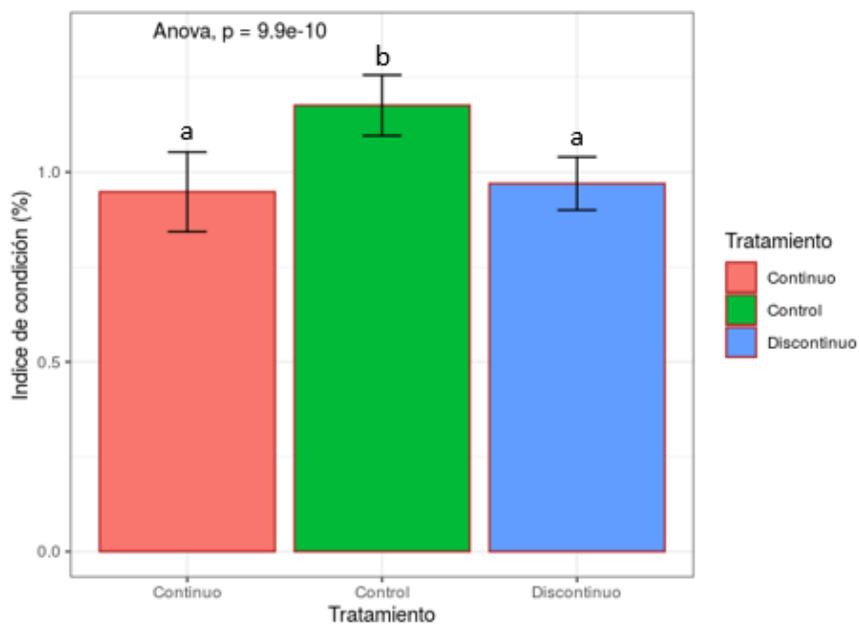


Figura 14. Índice de condición de Fulton de trucha arcoíris *O. mykiss* para los tratamientos experimentales y el grupo control. Las letras indican las diferencias significativas.

### 3.9 Presión osmótica del suero sanguíneo

La presión osmótica del suero sanguíneo en trucha arcoíris fue mayor en el tratamiento discontinuo abrupto ( $377 \pm 11.57 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) a diferencia del tratamiento gradual continuo ( $368 \pm 20.77 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) y el grupo control ( $319 \pm 8.18 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). Las diferencias significativas fueron evaluadas por medio de un anova de una vía ( $p = 2.4e^{-15}$ ), seguido por la prueba *post hoc* de *Tuckey* para observar las diferencias entre los tratamientos experimentales y el grupo control (figura 15). Las diferencias únicamente fueron observadas en el grupo control en relación con los tratamientos experimentales.

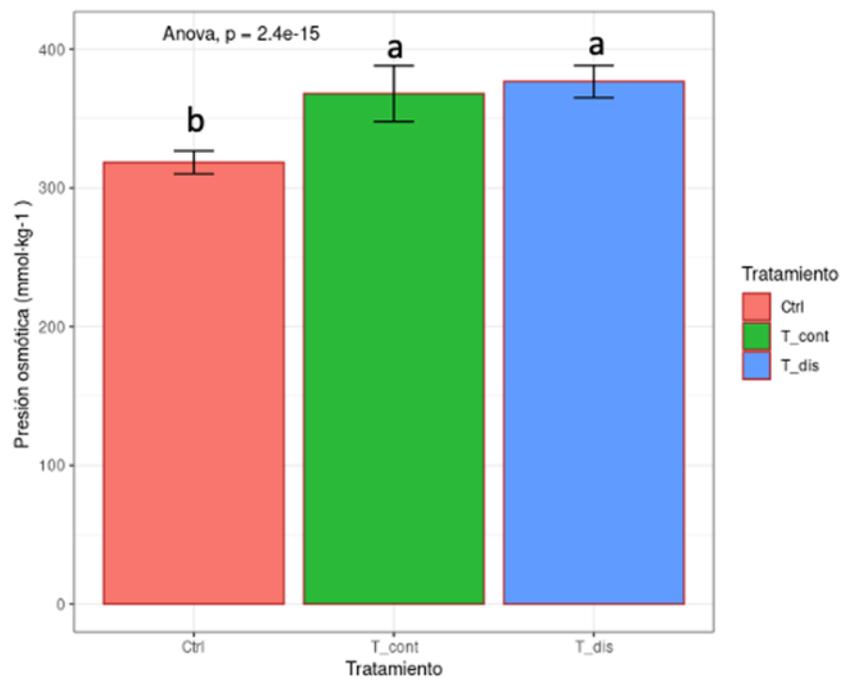


Figura 15. Presión osmótica en el suero sanguíneo de trucha arcoíris *O. mykiss* de los tratamientos experimentales y el grupo control. \*Diferencias significativas se expresan con "a" y "b" ( $p < 0.001$ ).

## Capítulo 4. Discusión

---

El cultivo de trucha arcoíris (*O. mykiss*) en agua de mar, ha logrado convertirse en una fuente de ingresos en países que lideran la producción de salmón del Atlántico, como Noruega, Chile y Escocia, lo que demuestra el rápido aumento en la producción de este fenotipo de trucha arcoíris en los últimos años (FAO, 2019). Debido a su capacidad de adaptación al agua de mar, los productores pueden realizar estos cultivos sin la necesidad de sobreexplotar áreas de hábitat natural para trucha arcoíris como pueden ser ríos, lagos o fiordos. A su vez, los protocolos para la transferencia de trucha arcoíris al agua de mar, han sido importados de las metodologías que se utilizan para el salmón del Atlántico (*Salmo salar*), por lo que se requiere de mayor evidencia que respalde que estos protocolos son realmente adecuados para trucha arcoíris (Morro-Cortés, 2019).

En el presente estudio, se evaluó la adaptación de juveniles de trucha arcoíris al agua de mar en la supervivencia, variables productivas, presión osmótica, índice hepatosomático e índice de condición de Fulton (K), bajo dos tratamientos experimentales para la transferencia al agua de mar y un grupo control en agua dulce. Uno de los principales retos para trabajar con el agua de mar en trucha arcoíris, es conocer la tolerancia de la especie al agua de mar. En este trabajo se acondicionó la trucha arcoíris a concentraciones de 35.4 UPS utilizando dos formas de transferencia, el tratamiento discontinuo abrupto y el tratamiento gradual continuo. La trucha se pudo transferir hasta la salinidad de 35.4 UPS, lo que se diferencia de otros estudios como el de Soengas *et al.* (1993), donde reportaron una salinidad máxima de 28 UPS, Castillo (2014), utilizando concentraciones de 0, 14 y 24 UPS, y Xiong *et al.* (2019), evaluando aumentos bruscos de salinidad a 5, 10, 15, 20, 25 y 30 UPS.

La fisiología juega un papel muy importante en la adaptación de especies dulceacuícolas que son transferidas al agua de mar. El epitelio branquial de los peces, está constituido por tres tipos de células diferenciadas: células de moco o neuroepiteliales, células del pavimento (PVCs) o células epiteliales y células ricas en mitocondrias (MRCs), o ionocitos o células de cloruro (Perry, 1997). De estos tipos de células las más representativas son las PVCs y las MRCs, y comprenden respectivamente entre el 90 y el 15% del área de superficie epitelial. Existe una falta de certeza sobre el papel de estas células en los peces de agua dulce, debido a la ausencia de sistemas modelo adecuados equivalentes a la membrana opercular rica en células de cloruro y otras preparaciones de la piel de numerosas especies que son adaptadas al agua de mar (Marshall, 1995). Sin embargo, Evans *et al.* (2005), mencionan que, en las branquias de teleósteos de agua dulce, la evidencia sugiere que algunas PVC pueden desempeñar un papel activo en la absorción de iones y el transporte ácido-base por las branquias.

En el medio de agua dulce, los peces continuamente están perdiendo iones a través de las superficies permeables de su cuerpo, sin embargo, en las branquias es más significativa debido a su gran superficie. No obstante, el equilibrio iónico se logra como resultado de una absorción más o menos equivalente de iones de Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), Cloro ( $\text{Cl}^-$ ) y Sodio ( $\text{Na}^+$ ) del agua. Aunque se ha asumido ampliamente que la célula de cloruro es responsable de la absorción de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$  del agua, esta suposición se basa en gran medida en evidencia indirecta y probablemente sea una simplificación excesiva de la situación real (Perry, 1997). Sin embargo, existe evidencia indirecta que apoya la idea de un canal de sodio vinculado a una V-ATPasa. Quizás la evidencia más convincente es la observación de que la captación de  $\text{Na}^+$  *in vivo* en especies como tilapia (*Oreochromis mossambicus*), carpa (*Cyprinus carpio*) e incluso trucha arcoíris (*O. mykiss*) se reduce al agregar un inhibidor específico de V-ATPasa (bafilomicina A) en el agua donde se encuentran los organismos (Bury y Wood, 1999; Fenwick *et al.*, 1999; Citado por Perry *et al.*, 2003).

Las hormonas tienen un papel importante en la regulación fisiológica de los peces para su tolerancia al medio marino. La fase de smolt se ha descrito como un estado pan-hiperendocrino (Bern, 1978, citado por: McCormick, 2012), en el que diversas hormonas tienen diferentes acciones fisiológicas que van en aumento durante el desarrollo de los salmónidos, aunque no necesariamente al mismo tiempo o velocidad. Esto hace que el desarrollo de los peces en la fase de smolt sea diferente de los eventos metamórficos, donde la mayoría del desarrollo está controlado por una hormona estimulante y posiblemente una hormona inhibidora. Se puede argumentar que esto permite flexibilidad entre los diversos aspectos del desarrollo (fisiología, morfología y comportamiento) que ocurren durante la esmoltificación. Esta flexibilidad puede ser particularmente importante para las poblaciones y los individuos, ya que los cambios de comportamiento, como el inicio de la migración, pueden estar ocurriendo en diferentes momentos en relación con otros eventos del desarrollo, como la entrada de agua de mar. Sin embargo, aún no se ha establecido el grado de variabilidad de la población en varios aspectos del desarrollo de los smolts (McCormick, 2012).

El eje de la hormona del crecimiento (GH por sus siglas en inglés) y el factor de crecimiento de la insulina (IGF-I por sus siglas en inglés) ha demostrado cambios en la localización de receptores y producción de IGF – I por los tejidos osmorreguladores (Sakamoto *et al.*, 1993; Mancera y McCormick, 1998). En el salmón del atlántico se documentó que el tratamiento con la hormona del crecimiento a largo plazo ocasionó un aumento en el crecimiento de los peces y en su tolerancia a la salinidad (Komourdjan *et al.*, 1976). Bolton *et al.* (1987), comprobaron en trucha arcoíris que la administración de una sola dosis de la hormona del crecimiento dos días después de ser expuesta al agua de mar, resultó en una mayor tolerancia a la salinidad. Se ha reportado que los salmónidos de mayor tamaño tienen inherentemente una mayor

tolerancia a la salinidad, no obstante, no estaba claro si estos efectos de la hormona del crecimiento eran específicos de la osmorregulación o indirectos a través de los efectos de crecimiento que proporciona la hormona antes mencionada (McCormick, 2010).

En salmónidos y especies de tilapia se ha evaluado cómo la hormona del crecimiento y el factor de crecimiento de la insulina promueven su tolerancia a la salinidad, de manera que, actúan estimulando el número y tamaño de las células de cloruro en las branquias (Sakamoto *et al.*, 1993; Xu *et al.*, 1997). Estos mecanismos de regulación fisiológica y endocrina son respuestas que se ven reflejadas en la adaptación al medio marino en los salmónidos, así como en su supervivencia.

En el presente estudio, la supervivencia de juveniles de trucha arcoíris para el grupo control fue de 99%, al igual que durante el proceso de transferencia al agua de mar gradual continuo y discontinuo abrupto. Sin embargo, durante la fase de cultivo en agua de mar en los tratamientos experimentales, la supervivencia disminuyó a 34% en el tratamiento discontinuo – abrupto y 26% en el gradual – continuo, mientras que el grupo control en agua dulce tuvo una supervivencia del 94%. Johnsson y Clarke (1988), argumentaron que los hábitos de vida, determinan la tasa de supervivencia de los peces en diferentes concentraciones de salinidad, debido a que, conforme van cambiando de un medio de agua dulce al medio marino, los organismos realizan cambios a nivel fisiológico y morfológico, derivado de las migraciones que suelen realizar de los ríos al océano, esto a su vez, modifica la dieta de los salmónidos.

Estudios previos relacionados con la adaptación de los peces al agua de mar, han demostrado que la concentración de 30 UPS puede ser el límite superior para la supervivencia en alevines de 1 g de la especie de salmón Chinook transferidos de forma gradual (Wagner *et al.*, 1969). De acuerdo con Landless (1976), la salinidad a 22 UPS es el límite superior para la supervivencia de trucha arcoíris con un peso de 15g, teniendo una mortalidad del 1 al 8%. En el presente trabajo y con base en las diferentes respuestas evaluadas, se podría asumir que en 12 y 15 UPS (punto isosmótico de la especie) la trucha arcoíris puede mantener su homeostasis osmótica de manera estable (Castillo, 2009), que le genera una ventaja para su cultivo a estas salinidades. Por otra parte, Xiong *et al.* (2019) pudieron tener problemas con la homeostasis osmótica a 25 UPS, ya que es en esta concentración cuando su supervivencia disminuye hasta el 58% y posteriormente al llegar a 30 UPS la supervivencia continuó disminuyendo. En el presente estudio no hubo problemas de mortalidad durante los cambios graduales y abruptos de 5 UPS por día hasta llegar a las 35 UPS, después de llegar a esta concentración comenzaron los eventos de mortalidad y posteriormente la pérdida de peso de los organismos. Xiong *et al.*, (2019), compararon la tasa de supervivencia de trucha arcoíris con la variedad “Steelhead”, y no encontraron diferencias significativas llegando a una máxima

concentración de salinidad de 30 UPS, con una tasa de supervivencia inferior al 40% para ambas especies. Sin embargo, a una concentración de 25 UPS, la variedad “Steelhead” tuvo una tasa de supervivencia del 87.5%, a diferencia de la trucha arcoíris doméstica con el 58.33%. En el presente estudio se observó que la mortalidad incrementó a partir del día 13 del experimento (35.4 UPS) cuando los organismos ya se encontraban en agua de mar, lo cual puede deberse al estrés ocasionado por los cambios de temperatura que se presentaban durante el día en relación con el gasto energético producido para la tolerancia a los aumentos de salinidad de 5 UPS por día. Otro factor que determinó la mortalidad en unos de los tratamientos fue que, en el tratamiento gradual continuo, no se hizo un retiro completo de la materia orgánica acumulada durante los días de transferencia al agua de mar para evitar la alteración de la tasa de sustitución de agua dulce por agua de mar; sin embargo, esto ocasionó que se elevaran los niveles de nitrógeno amoniacal total (NAT) a valores de 2mg/L, el cual se redujo hasta 0.5 mg/L por medio de recambios diarios de agua de mar.

El crecimiento es una variable que también se modifica en relación con el entorno del organismo, en este caso las truchas pasaron de un ambiente de 1 UPS a valores de 35.4 para el tratamiento discontinuo - abrupto y gradual - continuo. En estas condiciones, la ganancia en peso fue de 116% para el tratamiento discontinuo – abrupto y 127% para el tratamiento gradual – continuo al finalizar el cultivo al día 74. Con respecto a la tasa de crecimiento específico para ambos tratamientos experimentales, esta estuvo alrededor de 1.07g/día. Xiong *et al.*, (2019), reportan que el peso de truchas arcoíris y trucha arcoíris variedad “Steelhead”, se vio afectado por la salinidad y la interacción de la salinidad con las especies. La ganancia en peso para la trucha arcoíris doméstica con un peso inicial de 3.57g y de 3.59g para la variedad “Steelhead”, fue de 63% a 30 UPS durante 40 días para trucha arcoíris, y de 106% a la misma salinidad y tiempo de cultivo para la variedad “Steelhead”. Los autores también documentaron la tasa de crecimiento específico para trucha arcoíris (1.23g/día) y la variedad “Steelhead” (1.81g/día).

En comparación con el presente estudio, ambos tratamientos experimentales tuvieron una mayor ganancia en peso a salinidades superiores que las utilizadas por Xiong *et al.* (2019); lo anterior se puede deber a que el sistema utilizado albergó 50 organismos por tanque, cada uno con capacidad de 550 litros, lo que disminuye la interacción entre peces, mientras que Xiong y colaboradores utilizaron acuarios de 55 x 29 x 36 cm con capacidad para albergar a ocho organismos de 3.5 g, siendo un espacio pequeño para que los peces puedan crecer de manera rápida. Otro factor involucrado en la ganancia en peso de los organismos puede ser el tipo de alimento proporcionado. Xiong *et al.* (2019) utilizaron un alimento comercial (no se menciona marca, ni si era específico para trucha arcoíris), cuyo porcentaje de proteína fue de 48.86%, 13.15% de grasa, 8.29% de ceniza y 4.34% de humedad, mientras que el alimento que se

utilizó en la presente investigación, contenía los componentes nutricionales específicos para la producción de trucha arcoíris, con una composición de 40% de proteína, 12% de grasa, 2.5% de fibra, 12.5% de ceniza y 12% de humedad. Sin embargo, en la tasa de crecimiento específico, los resultados de Xiong y colaboradores fueron superiores a los del presente estudio, lo que se explica por la mortalidad que se presentó una vez que los peces se encontraban en agua de mar, siendo los organismos de mayor tamaño y peso los que murieron, lo que afectó la tasa de ganancia de gramos por día.

Morgan e Iwama (1991), sugieren que juveniles más pequeños (0.5 – 1g) de trucha arcoíris (“steelhead”) cuando son adaptados gradualmente al medio marino, su tolerancia es más efectiva que una transferencia abrupta. Quizás se deba considerar en estudios futuros realizar ensayos de transferencia al agua de mar en un amplio intervalo de tallas para demostrar donde se encuentra su mejor tolerancia.

Es importante complementar este tipo de estudios con otras respuestas fisiológicas que ayuden a entender de forma integrada la tolerancia a la salinidad de las especies que tienen este potencial. En el estudio de Castillo (2009), con trucha arcoíris aclimatada a 14 UPS, se documentó que la concentración de glucosa en el plasma permanecía estable ( $51.62 \pm 14.72$  mg/L), lo que constituye un menor gasto energético y por consecuencia debería expresarse en un mayor crecimiento. Sin embargo, fue en esta concentración salina, en donde sus organismos tuvieron el menor crecimiento, aunque no fue estadísticamente significativo con relación a los tratamientos (0, 14 y 24 UPS). Debido a que en distintas especies de salmónidos se ha reportado un mayor crecimiento cuando se adaptan a condiciones isosmóticas, el autor sugiere evaluar el cultivo de trucha arcoíris bajo estas condiciones (salinidad de 12 UPS) con la finalidad de poder observar si los organismos expuestos a esta condición exhiben un mayor crecimiento.

A su vez es importante mencionar que hay factores externos a la fisiología del organismo y su punto isosmótico que actúan con relación al crecimiento. Freire y Prodocimo (2007), mencionan que la temperatura, la dieta, el sexo, entre otros factores están involucrados en el crecimiento de los organismos. En el presente estudio, estos factores se vieron afectados durante todo el experimento, principalmente la temperatura y la calidad del agua, debido a que el área experimental estaba al aire libre, lo que dificultó tener el control de la temperatura, la cual cambiaba durante todo el día y la noche llegando días en los que aumentó 4 °C en menos de 24 horas, lo que podría generar estrés en los organismos. Adicionalmente, también la falta de maduración del filtro biológico, el cual no permitía tener una concentración de compuestos nitrogenados por debajo de los 2 mg/L; pudo ser otro factor que en conjunto influyeron en el crecimiento de los peces.

En estudios con otras especies que son transferidas del agua dulce al agua de mar, como en la tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*), también se ha documentado que la tasa de crecimiento, así como su eficiencia de conversión alimenticia disminuye significativamente cuando la salinidad sobrepasa las 16 UPS (Likongwe *et al.*, 1996). El cultivo del híbrido de tilapia ha dado mejores resultados cuando se transfieren al agua de mar, por ejemplo, utilizando el híbrido de *Oreochromis mossambicus* x *O. niloticus* en un sistema de recirculación en agua de mar, se demostró que la supervivencia fue mayor al 90% en las tres densidades evaluadas (31.8, 61.2 y 101 peces m<sup>-3</sup>) con tasas de conversión alimenticia de 1.5, destacando la mejor eficiencia de producción en la menor densidad de carga (Bückle *et al.*, 2017).

La tasa de conversión alimenticia es un indicador clave al mostrar la proporción entre la cantidad de alimento consumido por los organismos y la ganancia en peso de estos, durante un período de tiempo. En el presente estudio, la mejor tasa de conversión alimenticia fue para el grupo control ( $0.95 \pm 0.11$ ) a diferencia de los tratamientos experimentales donde se obtuvieron valores de  $1.68 \pm 0.09$  para el tratamiento discontinuo – abrupto y  $3.57 \pm 0.48$  en el gradual – continuo. En otros estudios con la misma especie, se ha obtenido mayor tasa de conversión alimenticia en truchas adaptadas a salinidades de 5 y 10 UPS, a diferencia de las truchas acondicionadas a 30 UPS (Xiong *et al.*, 2019).

En un estudio posterior, Xiong *et al.* (2020) utilizaron peces de mayor peso (99.44 y 99.01 g) en trucha arcoíris y la variedad “Steelhead”, y obtuvieron una mayor tasa de conversión alimenticia en ambas especies en agua dulce. En los tratamientos adaptados a 30 UPS la trucha “steelhead” tuvo significativamente una mayor conversión alimenticia que la trucha arcoíris tradicional, argumentando que la variedad “steelhead” puede desarrollar mejor estas ventajas debido a su migración al medio marino (Xiong *et al.*, 2020). En el estudio de Otto (1971), en el cual se utilizó la especie de salmón coho (*Oncorhynchus kisutch*), tanto el consumo de alimento como la tasa de conversión, fueron más altos en agua con concentraciones de 5 a 10 UPS que en agua dulce. En especies como *Perca fluviatilis* y *Esox reicherti* se han documentado resultados similares, al observar un aumento en su consumo de alimento y en la eficiencia de conversión de alimentos a concentraciones mayores a las 3 UPS (Wootton, 1990).

Halver y Hardy, (2002) resaltan que un factor importante que puede indicar la relación del estado nutricional y la tasa de crecimiento en los organismos, es el índice hepatosomático (IH). Los resultados en el presente estudio con juveniles de trucha arcoíris, muestran que el IH no fue afectado por la transferencia al agua de mar y los valores estuvieron en el intervalo de 2.49 a 2.84 % para el grupo control y los tratamientos. Estos resultados al igual que los obtenidos por Castillo (2009) no mostraron diferencias significativas; sin embargo, los resultados de Castillo (2009), con organismos acondicionados a una

salinidad de 0 ( $1.99 \pm 0.36\%$ ), 14 ( $2.01 \pm 0.27\%$ ) y 24 ( $1.86 \pm 0.27\%$ ) UPS, tuvieron un índice hepatosomático menor comparado con los del presente estudio. El autor, menciona que los valores del índice hepatosomático pueden indicar que el peso total del hígado disminuye por la utilización de los lípidos que fueron almacenados en el hígado y su relación con otros factores como podrían ser la hormona del crecimiento y la dieta de los organismos, entre otros. Por lo anterior, resaltó que entre menor sea el índice hepatosomático, mayor es el estrés al que estuvieron expuestos los organismos. El estudio de Castillo (2009) tuvo una duración de 14 días, por lo que probablemente este lapso no permitió que los organismos se adaptaran completamente a la concentración de salinidad de 24 UPS que fue donde obtuvo el menor valor del índice hepatosomático. A su vez los peces de Castillo (2009) alcanzaron una talla de 10.95 g a 24 UPS, mientras que en el presente estudio en donde los organismos alcanzaron una talla de 35.23 y 37.1 g a 35 UPS. Por lo anterior, es posible que el tamaño de los organismos influyó directamente en el IH.

En algunos estudios se ha evaluado el efecto de otros factores en el IH, por ejemplo, Brauge y Medale (1994) en trucha arcoíris con un peso promedio de 230 g, evaluaron el efecto de tres dietas con diferentes concentraciones de carbohidratos (alta, media y baja) a la salinidad de 36.5 UPS. En estos peces obtuvieron un menor índice hepatosomático ( $1.3 \pm 0.0\%$ ) con la dieta que contenía bajo nivel de carbohidratos con relación a las dietas con alto ( $2.8 \pm 0.2\%$ ) y medio ( $2.5 \pm 0.1\%$ ) nivel de carbohidratos. Además, el peso final, la tasa de crecimiento específico y la eficiencia alimenticia de las truchas no fueron diferentes, y con base en la composición del hígado, los autores sugieren que una alta proporción de carbohidratos y lípidos en la dieta, mejora la síntesis y deposición de lípidos en el hígado.

Es probable que una dieta rica en carbohidratos pudiera ser aprovechada para que la trucha arcoíris en tallas superiores a los 200 g pueda desarrollarse en agua de mar (Brauge y Medale, 1994), sin embargo, tomando en cuenta que este tipo de estudios se pretenden desarrollar en un medio marino, es necesario generar más conocimiento desde el punto de vista fisiológico que permita establecer su desempeño bajo estas condiciones y la constitución de las dietas. En relación con el presente estudio, la etiqueta nutricional del alimento utilizado no mencionaba el porcentaje de carbohidratos en la dieta, y es probable que su contenido sea suficiente para que cubra las necesidades del organismo, dado que, la inclusión de carbohidratos en la dieta aumenta la retención de proteínas y lípidos en los organismos, además de, reducir la descarga de nitrógeno en los efluentes del cultivo. También se conoce que ayudan en la estabilidad y flotabilidad del pellet, reduciendo la lixiviación de nutrientes y el desperdicio de alimento (Mira, 2018).

Otro variable que podría considerarse en la evaluación de la adaptación al medio marino en la trucha arcoíris, es el índice de condición de Fulton, el cual se utiliza para determinar el estado fisiológico del organismo integrando la relación de peso-longitud. En el presente estudio se encontró un mayor índice de condición en los organismos de agua dulce con valores de 1.18 % a diferencia de los tratamientos experimentales, donde los valores fueron de 0.97 % para el tratamiento discontinuo abrupto y de 0.95 % para el gradual continuo. Estos valores indican que el grupo control tuvo una mejor relación de peso-longitud a diferencia de los tratamientos experimentales, en este caso, se podría asumir que los peces de los tratamientos experimentales se encontraban estresados probablemente por el efecto interactivo de la salinidad, las variaciones de temperatura y la alta concentración de nitrógeno amoniacal total, a diferencia del grupo control.

Otros estudios han reportado que este índice cambia conforme va aumentando la salinidad del medio (Johnsson y Clarke 1988; Staurnes *et al.*, 1990). Johnsson y Clarke (1988), evaluaron el factor de condición en juveniles de trucha arcoíris doméstica y trucha arcoíris variedad "steelhead" con la finalidad de probar la influencia de la temperatura y el fotoperiodo durante la adaptación de ambas especies al agua de mar. En la variedad "steelhead" encontraron que, durante el proceso de adaptación al agua de mar, la especie adquiere una tonalidad más plateada y su factor de condición disminuye durante el proceso de esmoltificación. Además, la tasa de crecimiento en agua dulce y agua de mar no se vio afectada por el fotoperiodo. En la trucha arcoíris doméstica, no hubo un efecto significativo con relación al fotoperiodo en el cambio de tonalidad, tolerancia a la salinidad y el crecimiento en agua de mar. Sin embargo, en ambas especies el factor de condición aumentó hasta la transferencia al agua de mar, pero después disminuyó.

En el estudio de Staurnes *et al.* (1990), se evaluó el factor de condición en trucha arcoíris cultivadas en agua de mar y en un grupo de peces que además padecían de una anomalía que les ocasionaba una distensión abdominal. A pesar de que los organismos afectados con esta anomalía tenían una osmolalidad plasmática y una concentración de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  más alta que los peces normales, no tuvieron diferencias significativas en el índice de condición. Los autores antes mencionados, no encontraron diferencias en el índice de condición con base en los incrementos de salinidad, temperatura o fotoperiodo. A diferencia de los trabajos antes mencionados, en el presente estudio el grupo control tuvo el índice de condición más alto con respecto a los peces de los tratamientos expuestos a la transferencia al agua de mar lo que podría indicar que los aumentos de salinidad a los que fueron expuestos los peces, afectaron el factor de condición. Además, no se presentaron alteraciones morfológicas en los organismos de los tratamientos experimentales; sin embargo, conforme se fueron realizando los registros del peso de los peces, fue evidente la disminución de esta respuesta en los organismos que fueron transferidos al medio marino.

En diferentes estudios con trucha expuesta a diferentes salinidades, también se han evaluado los efectos en la presión osmótica en el suero sanguíneo de los peces (Freire y Prodocimo, 2007; Castillo, 2009). El cambio de las truchas de un entorno de agua dulce por agua de mar, muestra que a mayor salinidad la osmolalidad del plasma aumenta de  $319 \pm 8.18 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  (agua dulce) a  $368 \pm 20.77 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  (tratamiento gradual continuo) y  $377 \pm 11.57 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  (tratamiento discontinuo abrupto). Estos resultados en agua de mar muestran similitud a los obtenidos por Castillo (2009) en la mayor concentración salina, al obtener valores de  $259.09 \pm 28.55 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  (agua dulce) a  $379.83 \pm 74.07 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  (24 UPS), lo que es considerado como valores dentro del intervalo para peces y organismos acuáticos que experimentan cambios de salinidad. En la trucha arcoíris variedad "Steelhead", la cual se caracteriza por ser un pez diádromo (migra entre agua dulce y salada), se ha reportado una osmolalidad plasmática con una gran estabilidad con valores en el intervalo de 322 hasta los  $377 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ , lo que les permite habitar tanto el agua dulce como el agua de mar (Freire y Prodocimo, 2007).

La presión osmótica ha sido estudiada también en otras especies como el róbalo común (*Centropomus undecimalis*), un pez eurihalino migratorio (Hernández *et al.*, 2014). López *et al.* (2006), analizaron los efectos de aumentos en la salinidad del medio en esta especie para estudiar diferentes respuestas fisiológicas. Los resultados de la presión osmótica de esta especie fueron  $322.9 \pm 17.7 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}/\text{L}$  en los peces de agua dulce y de  $376.9 \pm 22.5 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  en 35 UPS, valores que fueron similares a los del presente estudio y que están dentro de los intervalos reportados en especies de salmónidos. Estos resultados demuestran que esta especie cambia las concentraciones plasmáticas cuando se expone a concentraciones salinas extremas. Además de la presión osmótica, la salinidad tuvo un efecto directo sobre la fisiología del robalo común, induciendo cambios en su consumo de oxígeno, excreción de nitrógeno y cambios en el sustrato energético. Este tipo de respuestas documentadas en el robalo común, sería importante que se consideren en estudios futuros en trucha arcoíris para conocer de forma integrada su capacidad respuesta a la salinidad.

Nordlie *et al.* (1992), obtuvieron valores de presión osmótica similares en la especie *Poecilia latippina*, en agua dulce fue de  $320 \pm 2 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  y de  $418 \pm 31 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  en un medio con 75% agua de mar, de manera que conforme aumentó la salinidad, incrementó la presión osmótica en el plasma sanguíneo de esta especie; esta tendencia también se presentó en la trucha arcoíris en este estudio, así como en los trabajos de Castillo (2009) y López *et al.* (2006) en la misma especie.

Aunque por el momento no se ha revelado que la trucha arcoíris utilizada en este estudio sea capaz de considerarse como un pez diádromo (que viaja entre agua dulce y agua de mar), los valores obtenidos en

la presión osmótica del suero sanguíneo podrían comprobar su capacidad osmorreguladora para habitar ambientes con altas concentraciones de salinidad.

La calidad del agua es uno de los factores más importantes que hay que tomar en cuenta para un cultivo exitoso. Dado que las interacciones de los parámetros fisicoquímicos influyen en el desempeño biológico, la fisiología, y la supervivencia de los organismos, un factor clave es el manejo de la temperatura, ya que esta es importante en los procesos de aclimatación y adaptación al medio marino en la trucha arcoíris. La temperatura es ampliamente reconocida como un factor que desencadena y controla una serie de cambios fisiológicos en el proceso de la esmoltificación de los salmónidos (Fjellidal *et al.*, 2011; Handeland *et al.*, 2013).

En el presente estudio, la temperatura de los tratamientos experimentales con relación al grupo control ( $18.42 \pm 1.57^{\circ}\text{C}$ ) fueron diferentes, teniendo una temperatura promedio de  $16.5^{\circ}\text{C}$  para el tratamiento discontinuo-abrupto y de  $16.9^{\circ}\text{C}$  para el gradual-continuo. Sin embargo, la mortalidad fue significativamente más en los tratamientos experimentales con respecto al grupo control. Esto puede ser debido, a que las temperaturas de los tratamientos experimentales no son aptas para realizar un cultivo de trucha arcoíris en agua de mar, ya que se consideran altas para su desarrollo en este medio, y su interacción con los aumentos de salinidad y de nitrógeno amoniacal total contribuyeron negativamente, lo que se vio reflejado en la mortalidad en los tratamientos gradual continuo y discontinuo abrupto.

Jian Ge *et al.* (2021) aclimataron a  $9$ ,  $12.5$  y  $16^{\circ}\text{C}$  a trucha arcoíris con un peso promedio de  $94\text{g}$ , logrando una adaptación a concentraciones de salinidad de  $30$  UPS. En todas las temperaturas tuvieron el  $100\%$  de supervivencia en agua de mar. La aclimatación a  $12.5^{\circ}\text{C}$  tuvo mejores resultados en cuanto a peso final, porcentaje de aumento de peso y tasa de crecimiento específica. Sus resultados sugieren que la aclimatación al agua de mar en trucha arcoíris tradicional con mejores resultados es en  $12.5^{\circ}\text{C}$ , de manera que los organismos tendrán ventajas en el crecimiento, mantenimiento de la estructura de la membrana y la homeostasis estable en los parámetros osmóticos, respuestas que son fundamentales durante la aclimatación al medio marino. Además, se ha considerado que una temperatura de  $16^{\circ}\text{C}$ , podría indicar que los peces consumen más energía para mantener la actividad metabólica a las altas temperaturas, lo que da como resultado una menor acumulación de nutrientes (Farkas *et al.*, 2001).

La temperatura no solo influye en el equilibrio de la energía perdida y ganada a través del consumo y la asimilación del metabolismo (Myrick y Cech, 2000), también incide en las vías por las cuales los organismos asignan la energía asimilada a funciones como el crecimiento, el almacenamiento y la maduración (Berg

*et al.*, 2011). Un ejemplo en lo mencionado por McMillan *et al.* (2012), quienes argumentan que los salmónidos en etapa juvenil y expuestos a temperaturas más bajas, tienden a destinar más energía al almacenamiento a costa del crecimiento somático. Sin embargo, Sloath y Reeves (2014), mencionan que el efecto de la temperatura en organismos anádromos o salmónidos que son migratorios de manera parcial ha recibido poca atención hasta la fecha; por lo tanto, se necesita una mejor comprensión de la influencia de la temperatura en estos organismos para poder pronosticar efectos potenciales de regímenes térmicos alterados en poblaciones de salmónidos parcialmente migratorios.

Si bien la temperatura es un factor que influye en la calidad del agua y en el desarrollo de los organismos, existe otro parámetro que está involucrado con el buen desempeño de los peces en cultivo. El nitrógeno amoniacal total (NAT,  $\text{NH}_3 + \text{NH}_4$ ), constituye uno de los principales problemas que se presentan en los sistemas de recirculación utilizados en la acuicultura, por lo que se recomienda mantener este parámetro en la concentración más baja posible. El NAT es excretado por los peces a través de sus branquias y la orina (Forster y Goldstein, 1969; Lagler *et al.*, 1984), este compuesto también es producido por medio de la descomposición microbiana producto del alimento no consumido y de las heces de los organismos (De la mora *et al.*, 2003). Los valores de nitrógeno amoniacal total en el presente estudio fueron inicialmente de  $2.14 \pm 0.83$  mg/L para el grupo control (agua dulce), de  $1.44 \pm 0.62$  mg/L para el tratamiento discontinuo abrupto y de  $1.63 \pm 0.52$  mg/L para el tratamiento gradual continuo, estos valores fueron obtenidos durante la transferencia de los peces al agua de mar. Después, partiendo con las concentraciones ya mencionadas, se inició la fase de cultivo piloto experimental para los tratamientos experimentales y el grupo control en agua dulce, hasta la finalización del experimento. Durante la fase de cultivo, los promedios para el nitrógeno amoniacal disminuyeron, en el grupo control fue de  $1.75 \pm 1.23$  mg/L, en el tratamiento discontinuo abrupto de  $0.94 \pm 0.74$  mg/L y  $1.03 \pm 0.78$  mg/L para el tratamiento gradual continuo. Uno de los factores que influyeron en los valores del nitrógeno amoniacal total, fue la maduración tardía del filtro biológico, dado que, según varios autores, esta se logra cuando la concentración de NAT en el efluente se estabiliza por debajo de 0.7 mg/l (Timmons *et al.*, 2009).

De la mora *et al.* (2003), mencionan que, si los filtros biológicos no funcionan de manera adecuada, esto puede influir en el incremento de las concentraciones de amoniac y nitritos, lo cual puede ocasionar la muerte de los peces, debido a que estos parámetros en concentraciones elevadas, causan daño en los órganos internos de los peces, así como laceraciones en las branquias y la piel de los organismos. En cultivos de trucha arcoíris, se ha reportado que, para mantener un ambiente funcional para el crecimiento y desarrollo de las bacterias nitrificantes, la temperatura del agua debe estar entre 11 y 15 °C, el pH ligeramente alcalino, un 80% en la saturación del oxígeno disuelto y una dureza por arriba de los 100 mg/L

(Klontz, 1991). De igual manera, el autor encontró que la trucha arcoíris es de las especies con mayor sensibilidad a la presencia de amoníaco en el medio y que sólo puede tolerar pequeñas concentraciones de este compuesto (0.03 a 0.05 mg/L), de manera que, si esta concentración persiste por varios días, ocasionará daños en los órganos de los peces e incluso la muerte por toxicidad.

En el presente estudio, la temperatura estuvo por encima (16 a 18°C) de los valores mencionados por Klontz (1991), por lo que el ambiente del sistema probablemente no era del todo funcional para el desarrollo de las bacterias nitrificantes. Otro aspecto importante a considerar es que no se observaron laceraciones en branquias y piel que indicaran algún grado de toxicidad, sin embargo, en cuanto a daño en órganos internos no se podría concluir ya que no se realizaron análisis histológicos y las disecciones no mostraban daño u alteraciones en los órganos.

La relación con el amoníaco también ha sido estudiada en otras especies como la Tilapia del Nilo (*O. niloticus*), la cual puede tolerar niveles altos de amoníaco que van desde 1.1 a 4.1 mg/L durante mayores períodos (hasta 96 horas), obteniendo una mortalidad del 50% de la población, además de que la tolerancia a este compuesto depende del tamaño de los organismos y la temperatura del agua (Abdalla *et al.*, 1996).

Los compuestos nitrogenados pueden ocasionar mortalidad de peces, por ejemplo, altas concentraciones de amoníaco (superior a 0.03 mg NH<sub>3</sub> /L) puede causar daños en los órganos osmorreguladores de salmónidos, como las branquias, ya que son estructuras involucradas en el proceso de respiración en peces. Estas mismas estructuras son las encargadas de realizar el intercambio gaseoso, de manera que son consideradas como las más susceptibles del cuerpo de los teleósteos, debido a su externa localización corporal y su cercano contacto con el medio, por lo que están expuestas a diferentes tipos de daño por parte de algún agente irritante, disuelto o en suspensión dentro del agua. Los agentes externos, como sólidos suspendidos y metales pesados, entre otros, son la causa más frecuente de los efectos patológicos en salmónidos (González y Valladolid, 1998). Otro de los efectos negativos del amoníaco en salmónidos ha sido estudiado por Vosylienė y Kazlauskienė (2012), quienes reportaron que las concentraciones de amoníaco de 0.045 a 0.18 mg/L en larvas, pueden ocasionar lesiones y alteraciones en su desarrollo, además de, hemorragias, circulación sanguínea del saco vitelino no desarrollada, acumulación de eritrocitos (coágulo de sangre) fuera de los canales vasculares y deformación corporal.

Por otra parte, mencionan que, en los peces juveniles disminuye el porcentaje de eritrocitos al ser expuestos a concentraciones de 0.024 mg/L de amoníaco. En otros estudios se ha demostrado que la

exposición al amoníaco ocasiona un aumento en el consumo de oxígeno y disminución del crecimiento en diferentes especies en estadio juvenil como son *Sparus auratus* (Wajsbrot *et al.*, 1993) e *Hippocampus abdominalis* (Adams *et al.*, 2001).

En general los juveniles de trucha arcoíris (*O. mykiss*) del presente estudio, fueron capaces de adaptarse a salinidades de 35.4 UPS donde permanecieron del día 14 al 74 del experimento. La supervivencia en fase de adaptación fue mayor al 98% para el grupo control, así como para los tratamientos experimentales. En la fase de cultivo en agua de mar, la supervivencia fue afectada solo en los tratamientos experimentales obteniendo el 34% para el tratamiento discontinuo abrupto (TDA) y 26% para el tratamiento gradual continuo (TGC). Con relación a los parámetros productivos, las diferencias fueron registradas en los tratamientos experimentales con respecto al grupo control. El crecimiento absoluto ( $57.99 \pm 3.68$  g) fue mejor en el grupo control, al igual que la ganancia en peso ( $356 \pm 21.68$  %), la tasa de crecimiento específico y la tasa de conversión alimenticia (0.95%).

En general los parámetros productivos tuvieron diferencias significativas del grupo control con relación a los tratamientos experimentales, esto puede suceder debido a que el grupo control se mantuvo todo el tiempo en agua dulce, condición que favorece el desempeño de la trucha arcoíris. La respuesta relacionada con el índice hepatosomático en los peces del grupo control y los tratamientos fue similar, mientras que el índice de condición de Fulton, la supervivencia, el crecimiento y la presión osmótica de los tratamientos gradual continuo y discontinuo abrupto fueron afectados al parecer por la interacción de diferentes factores como variaciones de temperatura, salinidad y concentraciones de nitrógeno amoniacal total.

Es importante hacer varias consideraciones en cuanto a los resultados obtenidos en este estudio, como mantener la temperatura menor a 15°C, sobre todo al momento de iniciar con los aumentos de salinidad en el medio, dado que si se realizan con una temperatura mayor a 15°C, la energía que consumen los organismos será destinada para mantener su actividad metabólica, lo cual da como resultado una menor acumulación de nutrientes, dejando a los peces más débiles e incapaces de tolerar los aumentos de salinidad. En relación a los valores de presión osmótica del suero sanguíneo, el índice hepatosomático y la ganancia en peso de los tratamientos experimentales, se abre la posibilidad de argumentar que la trucha arcoíris podría ser cultivada en sistemas de recirculación acuícola, siempre y cuando se mantengan estables los parámetros fisicoquímicos de la calidad del agua que son clave como: temperatura por debajo de los 15°C y concentraciones de nitrógeno amoniacal total (NAT) por debajo de los 0.50 mg/L. De esta manera el cultivo tendría un potencial mayor de tener éxito.

## Capítulo 5. Conclusiones

- La supervivencia no fue afectada durante la transferencia al agua de mar en los tratamientos discontinuo abrupto y gradual continuo, la cual fue del 99%.
- La supervivencia durante el cultivo piloto experimental fue mayor para el grupo control en agua dulce con un 94%, mientras que en los tratamientos discontinuo-abrupto y gradual-continuo fueron del 34 y 26 % respectivamente.
- El crecimiento absoluto, ganancia en peso y la tasa de crecimiento específico fue significativamente mayor en el grupo control que en los tratamientos experimentales.
- Los tratamientos experimentales no presentaron diferencias significativas en el crecimiento absoluto, ganancia en peso y la tasa de crecimiento específico.
- El grupo control tuvo una menor tasa de conversión alimenticia (0.95%) a diferencia del tratamiento discontinuo abrupto (1.68%) y el tratamiento gradual continuo (3.57%).
- El índice hepatosomático de los peces en los tratamientos experimentales con relación al grupo control no fueron diferentes significativamente. El índice tuvo un intervalo de 2.84% (control y tratamiento discontinuo abrupto) a 2.49% (Tratamiento gradual continua).
- El grupo control tuvo un mayor índice de condición (K) con relación a los tratamientos discontinuo abrupto (0.97%) y gradual continuo (0.95%), lo que podría indicar que estos organismos estaban estresados quizás ocasionado por factores internos o externos.
- Los valores de presión osmótica en el grupo control ( $319 \pm 8.18 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) fueron menores a los registrados en los peces del tratamiento discontinuo abrupto ( $377 \pm 11.57 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) y el gradual continuo ( $368 \pm 20.77 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ).

## Capítulo 6. Recomendaciones

---

- Continuar con las investigaciones enfocadas a transferir especies de agua dulce al medio marino con la finalidad de evitar el uso del agua dulce que hoy en día es limitada en algunas regiones de México.
- Mantener bajo condiciones controladas todos los parámetros fisicoquímicos del agua, en especial la temperatura y los niveles de nitrógeno amoniacal total, nitritos y nitratos, para poder iniciar los experimentos una vez que el filtro biológico se encuentre maduro y activo.
- Evaluar los compuestos nitrogenados, así como la alcalinidad por medio de curvas de calibración y metodologías de titulación de manera que se puedan tener resultados más específicos de estos parámetros.
- Estandarizar nuevas técnicas para la transferencia al agua de mar, de manera, que se pueda modificar el aumento de unidades prácticas de salinidad por día, así como los lapsos en que se realicen estos incrementos.
- Trabajar con organismos de menor tamaño como lo mencionan los autores citados en este trabajo, con la finalidad de tener un mayor éxito en una adaptación al agua de mar en estadios más tempranos.
- Realizar la transferencia al agua de mar y mantener el cultivo en una temperatura menor a los 15°C como lo reportan diversos autores mencionados en esta investigación.
- Agregar más pruebas fisiológicas que determinen el gasto energético de los peces en agua de mar, así como el estrés de los mismos.
- Realizar pruebas moleculares, así como un análisis de expresión de genes, con la finalidad de conocer el comportamiento de ciertos genes expresados en procesos de osmorregulación, muerte celular programada, estrés fisiológico, entre otros factores que influyen en la transferencia del agua dulce al agua de mar.

## Literatura citada

---

- Adams, M.B., Powell, M.D. and Purser, G.J. 2001. Effect of acute and chronic ammonia and nitrite exposure on oxygen consumption and growth of juvenile big-bellied seahorse. *Journal of Fish Biology* 58: 848 - 860.
- Ahmed A. A. El-Leithy; Shaaban A. Hemedat; Walaa S. H. Abd El Naby; Abeer F. El Nahas; Seham A. H. Hassan; Simone T. Awad; Safaa I. El-Deeb & Zeinab A. Helmy. (2019). Optimum salinity for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) growth and mRNA transcripts of ion-regulation, inflammatory, stress-and immune-related genes. *Fish physiology and biochemistry*, 45(4), 1217-1232.
- Behnke, R.J. 1992 Native trout of western North America. American Fisheries Society Monograph 6 xx + 275 pp
- Berg, O.K., Rød, G., Solem, Ø., and Finstad, A.G. 2011. Pre-winter lipid stores in brown trout *Salmo trutta* along altitudinal and latitudinal gradients. *J. Fish Biol.* 79: 1156–1166
- Brauge, C., Medale, F., and Corraze, G. 1994. Effect of dietary carbohydrate levels on growth, body composition and glycaemia in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*, reared in seawater. *Aquaculture*, 123(1-2), 109-120.
- Bückle-Ramirez, L.F., Hernández-Rodríguez. M., Murillo-Valenzuela, L.A. 2017. Cultivo de la Tilapia híbrida *Oreochromis mossambicus* (Peters, 1852) x *O. niloticus* (Linnaeus, 1758) (Pisces: *Cichlidae*) en agua de mar recirculada. Reporte Técnico, CICESE, 35 pp.
- Bury NR, Wood CM. 1999. Mechanism of branchial apical silver uptake by rainbow trout is via the proton-coupled Na<sup>+</sup> channel. *Am J Physiol.* 277:R1385–R1391.
- Castillo-Alvarado, S.A. 2009. Efecto de la salinidad sobre la preferencia térmica y la capacidad osmorreguladora de juveniles de trucha arcoíris *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum, 1792) (Tesis de licenciatura). Universidad Autónoma de Nuevo León.
- CONAPESCA.2018. Anuario estadístico. Recuperado el febrero 178 de 2021 de: <https://www.gob.mx/inapesca/acciones-y-programas/acuacultura-trucha-arcoiris>
- Crawford, S.S. and A.M. Muir. 2008. Global introductions of salmon and trout in the genus *Oncorhynchus*: 1870-2007. *Rev. Fish Biol. Fisheries*, 18: 313-344.
- de Azevedo RV, de dos Santos-Costa K, de Oliveira FK, Flores-Lopes F, Arruda TE and Tavares-Braga GL. 2015. Nile tilapia in saline water 1 responses of Nile tilapia to different levels of water salinity. *Lat Am J Aquat Res* 43(5):828–835
- Evans, D. H., Piermarini, P. M., and Choe, K. P. 2005. The multifunctional fish gill: dominant site of gas exchange, osmoregulation, acid-base regulation, and excretion of nitrogenous waste. *Physiological reviews*, 85(1), 97-177.

- FAO. 2005-2020 Programa de información de especies acuáticas. *Oncorhynchus mykiss*. Programa de información de especies acuáticas. Texto de Cowx, I. G. In: Departamento de Pesca y Acuicultura de la FAO [en línea]. Roma. Actualizado 15 June 2005. Recuperado el 31 marzo de 2020 de: [https://www.fao.org/fishery/docs/DOCUMENT/aquaculture/CulturedSpecies/file/es/es\\_rainbow\\_trout.htm](https://www.fao.org/fishery/docs/DOCUMENT/aquaculture/CulturedSpecies/file/es/es_rainbow_trout.htm)
- Farkas T, Fodor E, Kitajka K, and Halver JE. 2001. Response of fish membranes to environmental temperature. *Aquac Res* 32(8):645–655.
- Fenwick JC, Wendelaar Bonga SE, and Flik G. 1999. In vivo bafilomycin-sensitive Na<sup>+</sup> uptake in young freshwater fish. *J Exp Biol* 202:3659–3666.
- Fjellidal PG, Hansen T, and Huang T-s. 2011. Continuous light and elevated temperature can trigger maturation both during and immediately after smoltification in male Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Aquaculture* 321(1–2):93–100.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2019. FishStatJ - software for fishery statistical time series.
- Forster, R. P. and L. Goldstein. 1969. Formation of excretory products. In: Hoar, W. S. & D. J. Randall (Eds). *Fish Physiology*. Academic Press, New York. Vol. I, pp. 313-345.
- Foskett, J. K., Bern, H. A., Machen, T. E., and Conner, M. 1983. Chloride cells and the hormonal control of teleost fish osmoregulation. *Journal of experimental Biology*, 106(1), 255-281.
- Freire, C. A., and Prodocimo, V. 2007. Special challenges to teleost fish osmoregulation in environmentally extreme or unstable habitats. In *Fish osmoregulation* (pp. 249-276). CRC Press.
- Gall, G. A., and Crandell, P. A. 1992. The rainbow trout. *Aquaculture*, 100(1-3), 1-10.
- Ge, J., Huang, M., Zhou, Y., Liu, C., Han, C., Gao, Q., Dong, Y, and Dong, S. (2021). Effects of different temperatures on seawater acclimation in rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*: osmoregulation and branchial phospholipid fatty acid composition. *Journal of Comparative Physiology B*, 1-11.
- Gerber, L., Jensen, F. B., and Madsen, S. S. 2018. Dynamic changes in nitric oxide synthase expression are involved in seawater acclimation of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 314(4), R552-R562.
- González, G. G., and Martín, M. V. 1998. Aspectos Biológicos, anatomía microscópica y enfermedades infecciosas de los salmónidos. Museo Nacional de Ciencias Naturales.
- Gracia-Lopez, V., Rosas-Vazquez, C., and Brito-Perez, R. 2006. Effects of salinity on physiological conditions in juvenile common snook (*Centropomus undecimalis*). *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 145(3), 340-345.

- Guzmán Beltrán, L., and Zárate Rodríguez, W. C. 2008. Efectos patológicos de las infestaciones branquiales por el copépodo (*Pseudochondracanthus* sp.), parásito del pez botete Diana (*Sphaeroides annulatus*) (Jenyns, 1842).
- Halver, J., and W.R., Hardy. 2002. Fish Nutrition. 3th Edition, Academic Press, 417-23, USA.
- Handeland SO, Imsland AK, Bjornsson BT, and Stefansson SO. 2013. Long-term effects of photoperiod, temperature and their interaction on growth, gill Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>-ATPase activity, seawater tolerance and plasma growth-hormone levels in Atlantic salmon (*Salmo salar*). J Fish Biol 83(5):1197–1209
- Harris, J.O., Maquire, G.B., Edwards, S. and Hindrum, S.M. 1998. Effects of ammonia on the growth rate and oxygen consumption of juvenile greenlip abalone, *Haliotis laevis*. Donovan. Aquaculture 160: 159 - 272.
- Hutchison, V. H. 1976. Factors influencing thermal tolerance of individual organisms. P. 10-26. In G. W. Esch & W. W MacFarlane (eds.). Thermal Ecology II. Department of Energy Symposium Series (CONF-750425), National Technical Information Service, Springfield, Maryland.
- Hwang, P. P., Lee, T. H., and Lin, L. Y. 2011. Ion regulation in fish gills: recent progress in the cellular and molecular mechanisms. American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology, 301(1), R28-R47.
- Johnsson, J., and Clarke, W. C. 1988. Development of seawater adaptation in juvenile steelhead trout (*Salmo gairdneri*) and domesticated rainbow trout (*Salmo gairdneri*)—effects of size, temperature and photoperiod. Aquaculture, 71(3), 247-263.
- Kim, N. N., Choi, Y. J., Lim, S. G., Kim, B. S., and Choi, C. Y. 2016. Effects of Recombinant Aquaporin 3 and Seawater Acclimation on the Expression of Aquaporin 3 and 8 mRNAs in the Parr and Smolt Stages of Rainbow Trout, *Oncorhynchus mykiss*. Ocean and Polar Research, 38(2), 103-113.
- Klontz, G. W. 1991. Fish for the future: concepts and methods of intensive aquaculture. Idaho Forest, Wildlife and Range Experiment Station, University of Idaho, Idaho, USA, 192 p.
- Komourdjian, M. P., R. L. Saunders, and J. C. Fenwick. 1976. The effect of porcine somatotropin on growth and survival in seawater of Atlantic salmon (*Salmo salar*) parr. Can. J. Zool, 54:531-535.
- Landless, P. J. 1976. Acclimation of rainbow trout to sea water. Aquaculture, 7(2), 173-179.
- Lignot, J. H., Spanings-Pierrot, C., and Charmantier, G. 2000. Osmoregulatory capacity as a tool in monitoring the physiological condition and the effect of stress in crustaceans. *Aquaculture*, 191(1-3), 209-245.
- Likongwe, J. S., Stecko, T. D., Stauffer Jr, J. R., and Carline, R. F. 1996. Combined effects of water temperature and salinity on growth and feed utilization of juvenile Nile tilapia *Oreochromis niloticus* (Linnaeus). Aquaculture, 146(1-2), 37-46.

- Lizama, M. D. L. A. P., and Ambrosio, A. M. 2002. Condition factor in nine species of fish of the Characidae family in the upper Paraná river floodplain, Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, 62, 113-124.
- Mancera, J. M., and S. D. McCormick. 1998. Osmoregulatory actions of the GH/IGF axis in non-salmonid teleosts. *Comp. Biochem. Physiol. B—Biochemistry & Molecular Biology*, 121:43-48.
- Marshall, W. S. 1995. Transport Processes in Isolated Teleost Epithelia: Opercular Epithelium and Urinary Bladder. In *Fish physiology* (Vol. 14, pp. 1-23). Academic Press.
- McCormick, Stephen D., and Don Bradshaw. 2006. "Hormonal control of salt and water balance in vertebrates." *General and comparative endocrinology* 147.1: 3-8.
- McMillan, J.R., Dunham, J.B., Reeves, G.H., Mills, J.S., and Jordan, C.E. 2012. Individual condition and stream temperature influence early maturation of rainbow and steelhead trout, *Oncorhynchus mykiss*. *Environ. Biol. Fish.* 93: 343–355.
- Mira, M. B. 2018. Nuevas perspectivas sobre el metabolismo de los lípidos y los carbohidratos en los peces teleósteos: caracterización transcripcional y funcional de los adipocitos. *Revista AquaTIC*, (48), 13-14.
- Morgan, J. D., and Iwama, G. K. 1991. Effects of salinity on growth, metabolism, and ion regulation in juvenile rainbow and steelhead trout (*Oncorhynchus mykiss*) and fall chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*). *Canadian journal of fisheries and aquatic sciences*, 48(11), 2083-2094.
- Morro-Cortès, B. 2019. *The Physiology of Smoltification and Seawater Adaptation in Rainbow Trout*.
- Myrick, C.A., and Cech, J.J., Jr. 2000. Temperature influences on California rainbow trout physiological performance. *Fish Physiol. Biochem.* 22: 245–254
- Needham, P.R. and R. Gard. 1959. *Rainbow trout in Mexico and California with notes on the cutthroat series*. University of California Press, Berkeley, 124 pp
- Nordlie, F.G., Haney, D.C., and Walsh, S.J. 1992. Comparisons of salinity tolerances and osmotic regulatory capabilities in populations of sailfin molly (*Poecilia latipinna*) from brackish and fresh waters. *Copeia* 3, 741–746.
- Nunes, D.M., and M.S. Hartz. 2001. Feeding Dynamics and Ecomorphology of *Oligosarcus jenynsii* (Gunther, 1864) and *Oligosarcus robustus* (Menezes, 1969) in the Lagoa Fortaleza, Southern Brazil, *Brazilian Journal of Biology*, 66(1A), 121-32.
- Otto, R. G. 1971. Effects of salinity on the survival and growth of pre-smolt coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*). *Journal of the Fisheries Board of Canada*, 28(3), 343-349.
- Perry, S. F. 1997. The chloride cell: structure and function in the gills of freshwater fishes. *Annual review of physiology*, 59(1), 325-347.

- Perry, S. F., Shahsavarani, A., Georgalis, T., Bayaa, M., Furimsky, M., and Thomas, S. L. Y. 2003. Channels, pumps, and exchangers in the gill and kidney of freshwater fishes: their role in ionic and acid-base regulation. *Journal of Experimental Zoology Part A: Comparative Experimental Biology*, 300(1), 53-62.
- Robins, C.R., R.M. Bailey, C.E. Bond, J.R. Brooker, E.A. Lachner, R.N. Lea, and W.B. Scott. 1991. Common and scientific names of fishes from the United States and Canada. American Fisheries Society, Special Publishing, 20, 183 pp.
- Sakamoto, T., S. D. McCormick, and T. Hirano. 1993. Osmoregulatory actions of growth hormone and its mode of action in salmonids: A review. *Fish. Physiol. Biochem*, 11155-164.
- Segnini de B., M.I. and K. S. Chung. 1989. Influencia de la salinidad sobre el preferendum final de la mojarra de río (*Petenia kraussii*) Steindachner 1878 (*Perciformes, Cichlidae*). *Bol. Inst. Oceanogr. Venezuela* 28:145-150.
- Sloat, M. R., and Reeves, G. H. 2014. Individual condition, standard metabolic rate, and rearing temperature influence steelhead and rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) life histories. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 71(4), 491-501.
- Soengas, J. L., Barciela, P., Fuentes, J., Otero, J., Andrés, M. D., and Aldegunde, M. 1993. The effect of seawater transfer in liver carbohydrate metabolism of domesticated rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Comparative Biochemistry*, 105(2), 337-343.
- Soengas, J.L., S. Sangiao-Alvarellos, R. Laiz-Carrión and J.M. Mancera. 2007. Energy Metabolism and Osmotic Acclimation in Teleost Fish, en Baldisserotto, B., J.M. Mancera y B.G. Kapoor (ed.) *Fish Osmoregulation*, USA: Science Publishers.
- Staurnes, M., Andorsdottir, G., and Sundby, A. 1990. Distended, water-filled stomach in sea-farmed rainbow trout. *Aquaculture*, 90(3-4), 333-343.
- Stearley, R.F. 1992. Historical ecology of *Salmoninae*, with special reference to *Oncorhynchus*, en R. L. Mayden (ed.) *Systematics, historical ecology, and North American freshwater fishes*, Stanford Univ. Press.
- Takei, Y., Hiroi, J., Takahashi, H., and Sakamoto, T. 2014. Diverse mechanisms for body fluid regulation in teleost fishes. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 307(7), R778-R792.
- Wagner, H. H., Conte, F. P., and Fessler, J. L. 1969. Development of osmotic and ionic regulation in two races of chinook salmon *Oncorhynchus tshawytscha*. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 29(1), 325-341.

- Wajsbrodt, N., Gasith, A., Diamant, A. and Popper, D.M. 1993. Chronic toxicity of ammonia to juvenile gilthead sea bream *Sparus aurata* and related histopathological effects. *Journal of Fish Biology* 42: 321 - 328.
- Welcomme, R.L. 1988. International introductions of inland aquatic species. *FAO Fish. Tech. Pap.*, 294: 318p
- Willers, W.B. 1981. *Trout biology – An angler’s guide*. University of Wisconsin Press. Madison, WI.
- Wootton, R. J., 1990. *Ecology of Teleost Fishes*. Chapman and Hall Ltd., New York, 282-307.
- Xiong, Y., Wang, X., Dong, S., Wang, F., Yang, J., and Zhou, Y. 2019. Comparisons of Salinity Adaptation in Terms of Growth, Body Composition, and Energy Budget in Juveniles of Rainbow and Steelhead Trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Journal of Ocean University of China*, 18(2), 509-518.
- Xiong, Y., Huang, M., Zhou, Y., Chen, X., Yang, J., Wang, F., and Dong, S. 2020. Growth, osmoregulation and energy budget of rainbow and steelhead trout under different salinity acclimation methods and the best transition size of steelhead trout. *Aquaculture Research*, 51(6), 2369-2378.
- Xu, B., H. Miao, P. Zhang, and D. Li. 1997. Osmoregulatory actions of growth hormone in juvenile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Fish. Physiol. Biochem*, 17:295-301.
- Yan B, Wang ZH, and Zhao JL. 2013. Mechanism of osmoregulatory adaptation in tilapia. *Mol Biol Rep* 40(2):925–931.