



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

VARIACIÓN MORFOLÓGICA DE *ONCORHYNCHUS MYKISS* (WALBAUM,
1792) A DOS ALTITUDES DIFERENTES.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

B I Ó L O G O

P R E S E N T A:

ANA KAREN LÓPEZ FONSECA



ASESORES DE TESIS:
DRA. MÓNICA VANESSA GARDUÑO PAZ
DR. JOSÉ FERNANDO MÉNDEZ SÁNCHEZ

Índice

Agradecimientos	1
Dedicatoria	3
Índice	4
Índice de figuras	6
Índice de Cuadros	8
Resumen	10
Abstract	12
1. Introducción	14
2. Marco teórico	16
2.1 <i>Oncorhynchus mykiss</i>	16
2.2 Diagnósis de la especie	20
2.3 <i>Introducción a México</i>	23
2.4 Plasticidad fenotípica en truchas	27
2.5 Trabajos realizados sobre la morfología de las truchas	30
2.6 Morfometría	33
2.7 Variación: causas y efectos.....	35
3. Justificación	37
4. Hipótesis	38
5. Objetivos	39
5.1 Objetivo General	39
5.2 Objetivo Específicos	39
6. Materiales y método	40

6.1 Área de estudio	40
6.1.1 Laguna del Sol (LS) en el Nevado de Toluca.....	40
6.1.2 La granja de truchas "La Ciénega" (GC).....	43
6.2 Tamaño de muestra	43
6.3 Digitalización de imágenes	43
6.4 Elección de puntos (landmarks).....	44
6.5 Métodos morfométricos.....	45
6.5.1 Morfometría geométrica	45
6.5.2 Morfología branquial	45
6.6 Factor de condición y relación longitud-peso (L-P)	46
6.7 Análisis estadístico	47
7. Resultados.....	48
7.1. Morfometría geométrica de región corporal	48
7.1.1. Lado izquierdo.....	48
7.1.2. Lado derecho	52
7.2. Región cefálica.....	55
7.2.1. Lado izquierdo	55
7.2.2 Lado derecho	58
7.3 Morfología branquial	61
7.4 Factor de Condición de Fulton y Relación L-P (longitud-peso).....	66
8. Discusión	67
8.1. Región corporal.	67
8.2. Región cefálica	68
8.3 Morfología branquial	69
9. Conclusión	70
10. Bibliografía.....	71
11. Anexos	81

Índice de figuras

Figura 1: <i>Oncorhynchus mykiss</i> (A.H.P.L, 2012).....	16
Figura 2. A) distribución de <i>Oncorhynchus mykiss</i> mencionada por Miller et al. (2009) encerrado en azul, B) distribución de <i>Oncorhynchus mykiss</i> en el mundo (OBIS, s.f.) marcado en amarillo, C) distribución nativa de <i>Oncorhynchus mykiss</i> (Aquamaps, s.f.) encerrado en naranja.....	17
Figura 3: Caracteres de identificación: n: narina, oj: ojo, op: opérculo, ll: línea lateral, ad: aleta dorsal, aad: aleta adiposa, ac: aleta caudal, pc: pedúnculo caudal, aan: aleta anal, ou: orificio urogenital, a: ano, av: aleta pélvica, ap: aleta pectoral, ab: apertura branquial.	22
Figura 4: Entidades con cultivo de <i>Oncorhynchus mykiss</i> (INAPESCA, 2012).....	23
Figura 5: Línea del tiempo	25
Figura 6: Línea del tiempo: segunda y última parte de la Introducción de <i>Oncorhynchus mykiss</i> a México.	26
Figura 7: Morfometría geométrica, A) digitalización landmarks, B) análisis de Procrustes, C) análisis estadísticos y gráficos de la descripción de los resultados (Adams et al., 2004)	34
Figura 8: Mapa de localización del Nevado de Toluca.....	40
Figura 9: 17 landmarks en <i>Oncorhynchus mykiss</i> para todo el cuerpo, A) lado izquierdo, B) lado derecho.....	44
Figura 10: 14 landmarks en <i>Oncorhynchus mykiss</i> para la región cefálica, A) lado izquierdo, B) lado derecho.....	44
Figura 11: Cuadrícula del lado izquierdo de <i>Oncorhynchus mykiss</i> . A) movimientos de los landmarks para LS, B) movimientos de los landmarks para GC	49
Figura 12: RW de <i>Oncorhynchus mykiss</i> lado izquierdo.	51
Figura 13: Cuadrícula del lado derecho de <i>Oncorhynchus mykiss</i> . A) movimientos de los landmarks para la localidad de la LS, B) movimientos de los landmarks para la localidad del GC.....	52
Figura 14: RW de <i>Oncorhynchus mykiss</i> lado derecho.	54
Figura 15: Cuadrícula del lado izquierdo de <i>Oncorhynchus mykiss</i> . A) movimientos de los landmarks para la localidad de la LS, B) movimientos de los landmarks para la localidad del GC	55

Figura 16: PCA de <i>Oncorhynchus mykiss</i> lado izquierdo.....	57
Figura 17: Cuadrícula del lado derecho de <i>Oncorhynchus mykiss</i> . A) movimientos de los landmarks para la localidad de la LS, B) movimientos de los landmarks para la localidad del GC.....	58
Figura 18: PCA de <i>Oncorhynchus mykiss</i> lado derecho.	60
Figura 19: Grafica de Tukey's Post-Hoc para la comparación entre sexos y por sitios.	64
Figura 20: Grafica de Tukey's Post-Hoc para la comparación entre sexos y por sitios.	65

Índice de Cuadros

Cuadro 1: Parámetros fisicoquímicos óptimos para la crianza y mantenimiento de organismos adultos y adultos reproductores de <i>Oncorhynchus mykiss</i> (modificado de Hardy, 2021)	20
Cuadro 2: Resumen de plasticidad propuesta para salomes y truchas.	29
Cuadro 3. Resumen de morfometría geométrica en truchas a diferentes altitudes y por aislamiento geográfico.	32
Cuadro 4: Parámetros morfométricos de la Laguna de Sol retomado de (García-Miranda <i>et al.</i> , 2018).	41
Cuadro 5: Parámetros fisicoquímicos y tróficos en la Laguna del Sol (Alcocer <i>et al.</i> , 2004; Dimas-Flores <i>et al.</i> , 2008; Cuna, 2015).....	42
Cuadro 6: Concentración de nutrientes ($\mu\text{mol L}^{-1}$) en la Laguna del Sol (Alcocer <i>et al.</i> , 2004; Dimas-Flores <i>et al.</i> , 2008)	42
Cuadro 7: Parámetros fisicoquímicos para centros acuícolas de trucha (De Pesca, 2018)	43
Cuadro 8: Longitud total (LT), peso (P), edad (donde D es desconocido), sexo para ambas poblaciones, 1= Granja, 2=Laguna del Sol.....	48
Cuadro 9: Media y desviación estándar obtenida para diferentes aspectos de la morfología branquial en ambas poblaciones ($\bar{X} \pm \text{E.E}$)	61
Cuadro 10: Muestra los valores obtenidos por ANOVAS de dos vías y prueba de Tukey´s donde se compara por sexo y sitio.....	63
Cuadro 11: Eigenvalores presentes región corporal lado izquierdo para RW	81
Cuadro 12: Eigenvalores presentes región corporal lado derecho para RW	82
Cuadro 13: Eigenvalores presentes región cefálica lado izquierdo para RW	83

Cuadro 14: Eigenvalores presentes región cefálica lado derecho para RW84

Cuadro 15: Resultados obtenidos para K de Fulton en ambos sitios.....84

Resumen

Oncorhynchus mykiss (trucha arcoíris) es un pez de amplia distribución, se puede encontrar tanto en agua salada como en agua dulce. En México las especies nativas se distribuyen en las zonas montañosas de los estados Durango, Chihuahua, Baja California, Sinaloa y Sonora. Las entidades con cultivo: Baja California, Chihuahua, Ciudad de México, Durango, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Estado de México, Michoacán, Morelos, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, Querétaro, Tlaxcala, Veracruz (De Pesca, 2018).

Para el Estado de México los principales municipios con cultivo son Amanalco, Donato Guerra, Jiquipilco, Malinalco, Valle de Bravo y en Ocoyoacac se encuentra el centro acuícola “El Zarco” (Secretaría del Campo, 2023). En Toluca, la especie también la encontramos en la Laguna del Sol, en el Nevado de Toluca. Es la única especie de vertebrado acuático presente en la laguna, probablemente se deba a la alta plasticidad presente el grupo de los salmónidos.

En este estudio se realizó una comparación morfométrica entre 18 organismos totales de diferentes altitudes: 1) Laguna del Sol y 2) Granja la Ciénega, debido a que se observaba a simple vista una diferencia en cuanto al tamaño de las cabezas, el cuerpo y su forma. Para el análisis morfométrico se digitalizaron 17 landmarks para la región corporal y 14 landmarks para la región cefálica y así evaluar si hay una variación morfológica entre poblaciones, además de aportar información sobre la especie poco estudiada en la Laguna del Sol.

Se encontró que existen diferencias significativas entre la morfometría geométrica de la región corporal y la región cefálica, demostrando que los organismos pertenecientes a la Laguna del Sol son más alargado y delgados, con cabezas de menor proporción y ojos grandes, mientras que, la Granja “La Ciénega” muestra una estructura contraria. Probablemente, estos cambios observados en los organismos

presentes en la Laguna del Sol, sean el resultado de la plasticidad característica del grupo que permite su adaptación al sitio.

Abstract

Oncorhynchus mykiss (rainbow trout) is a widely distributed fish, it can be found in both saltwater and freshwater. In Mexico, native species are distributed in the mountainous areas of the states of Durango, Chihuahua, Baja California, Sinaloa and Sonora. The states with cultivation: Baja California, Chihuahua, Mexico City, Durango, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, State of Mexico, Michoacán, Morelos, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, Querétaro, Tlaxcala, Veracruz (De Pesca, 2018).

For the State of Mexico, the main municipalities with cultivation are Amanalco, Donato Guerra, Jiquipilco, Malinalco, Valle de Bravo and in Ocoyoacac is the aquaculture center "El Zarco" (Secretaría del Campo, 2023). In Toluca, the species is also found in the Laguna del Sol, in the Nevado de Toluca. It is the only species of aquatic vertebrate present in the lagoon, probably due to the high plasticity present in the salmonid group.

In this study, a morphometric comparison was made between 18 total organisms from different altitudes: 1) Laguna del Sol and 2) Granja la Ciénega, due to the fact that a difference in the size of the heads, body and shape was observed. For the morphometric analysis, 17 landmarks for the body region and 14 landmarks for the cephalic region were digitized to evaluate whether there is a morphological variation between populations, in addition to providing information on the little-studied species in the Laguna del Sol.

It was found that there are significant differences between the geometric morphometry of the body region and the cephalic region, demonstrating that the organisms belonging to the Laguna del Sol are more elongated and thinner, with smaller heads and large eyes, while the Granja "La Ciénega" shows an opposite structure. Probably, these changes observed in the organisms present in the Laguna

del Sol are the result of the characteristic plasticity of the group that allows its adaptation to the site.

1. Introducción

Oncorhynchus mykiss (Walbaum, 1792) pertenece a la familia Salmonidae, esta familia se caracteriza por su alta plasticidad (Ferriz, Iwaszkiw, 2016) lo que hace posible su sobrevivencia en una amplia variedad de condiciones ambientales (Wernicke von Siebenthal et al., 2018). Se ha registrado plasticidad fenotípica en *O. mykiss* como respuesta a estrés ambiental ocasionado por: I) hipoxia, II) disponibilidad de alimento, III) infección por patógenos, IV) exposición a un contaminante artificial, V) cambios climáticos, entre otros (Wernicke von Siebenthal et al., 2018, Williams et al., 2019).

La plasticidad fenotípica es la capacidad de un genotipo dado para modular su fenotipo en respuesta a cambios ambientales, lo que permite la persistencia en una variedad de condiciones ambientales (Wernicke von Siebenthal et al., 2018) o la expresión de múltiples alternativas fenotípicas resultantes a la exposición a diferentes ambientes internos y externos (Garduño Paz, 2009).

En la actualidad *O. mykiss* ha sido introducida en todos los continentes, excepto la antártica (Gallego et al., 2007), este éxito se asocia principalmente a su capacidad de adaptación. Se estima que la introducción de *O. mykiss* a México inicio en 1888 (Hernández-Hernández, 2018) y tuvo un gran apogeo en el Estado de México.

El Nevado de Toluca, se conforma de dos lagunas, en este estudio es de interés la Laguna del Sol, ya que es la única en tener un vertebrado acuático *O. mykiss*. Se estima que su introducción a este lugar data de los años 70's y 80's (Gutiérrez, 2016). Se sabe que la Laguna del Sol se ubica a 4 200 msnm, la temperatura del agua es <10°C, con un régimen de mezcla polimíctico cálido, agua ácida, poco mineralizada y de muy baja reserva alcalina, además de riqueza y abundancia de diatomeas (Cuna et al., 2015).

Hasta donde se conoce la Laguna del Sol es un hábitat poco favorable para esta especie, ya que no existen corrientes equiparables a su hábitat natural, están expuestas a una intensa radiación ultravioleta, se desconoce de qué se alimenta y el efecto que tienen sus deyecciones en la calidad del agua (Gutiérrez, 2016). Y la altitud de la laguna podría considerarse como un factor de riesgo, ya que a mayor altitud hay menor disposición de oxígeno, además, la demanda de oxígeno aumenta significativamente durante la alimentación y digestión (Arregui, 2013).

Debido a la plasticidad que está presente en la especie, puede que fenotípicamente se esté expresando una variación morfológica permitiendo su permanencia en la laguna, para determinar si esto es correcto, se realizó un estudio de morfometría geométrica comparando dos poblaciones pertenecientes a altitudes diferentes, y así evaluar la variación morfológica de *O. mykiss*

Bajjaliya y colaboradores (2014) mencionan que los métodos morfométricos pueden ser utilizados cuando es necesario describir y comparar formas de organismos individuales dentro de y entre poblaciones conespecíficas. Por lo cual uso de la morfometría geométrica es adecuado para los cambios que se están haciendo presentes y visibles en *O. mykiss*.

Como ya se mencionó se realizará una comparación de dos poblaciones pertenecientes a altitudes diferentes, a cada población se les tomaron dos fotografías, una del lado izquierdo y otra del lado derecho, esto se realizará en dos regiones, la región cefálica y en otra de todo el cuerpo, una vez todas las fotos se procederá al uso de programas de TPS, MorphoJ, Statgraphics. Para así evaluar la variación morfológica presente en la población de *O. mykiss* de la Laguna del Sol.

¿Existirá diferencia en la morfología y factor de condición de *O. mykiss* en dos poblaciones, la Laguna del Sol una población aislada a 4200 msnm y la granja La Ciénega a 3500 msnm manejada por humanos?

2. Marco teórico

2.1 *Oncorhynchus mykiss*

Oncorhynchus mykiss (Walbaum, 1792), pertenece a la clase Actinopterygii, al orden Salmoniformes y la familia Salmonidae (Miller et al., 2009). En 1989 el nombre de género y el nombre específico de la trucha arcoíris fueron cambiados, *Oncorhynchus* reemplazó el nombre del género *Salmo*, el nombre de la especie “*gairdneri*” se reemplazó por “*mykiss*” al demostrarse que la especie “*mykiss*” originaria de Rusia era la misma que “*gairdneri*” (Arregui, 2013).

Está cubierto de escamas delgadas iridiscentes que con el agua y el sol dan origen a su nombre común trucha "arcoíris" (Fig. 1; Gallego et al., 2007). Su coloración varía en función del medio, talla, sexo, alimentación y grado de la maduración sexual (De la Oliva, 2011). Es una de las especies más cultivadas e introducidas en todo el mundo (Doadrio, 2002).



Figura 1: *Oncorhynchus mykiss* (A.H.P.L, 2012)

En los primeros estadios de *O. mykiss* son depredados por peces de mayor tamaño, aves, entre otros, cuando llegan a estado adulto son consumidos por las aves, el hombre, entre otros (De la Oliva, 2011). Su principal competidor en estadio alevín

son peces nativos, a medida que se desarrolla los peces nativos se vuelven su presa (De la Oliva, 2011). *O. mykiss* es territorial y desplaza a peces más pequeños. Vive en el espacio que defiende desde que es alevín y comienza a comer, el sitio se ubica contrario a la corriente del río (De la Oliva, 2011).

Su distribución natural abarca desde Armenia, Rusia hasta el noreste de China, asimismo, se encuentran en los ríos de la vertiente del Pacífico de América del Norte desde el río Kuskokwim en Alaska, hasta el río Santo Domingo en la vertiente occidental de la Sierra San Pedro Mártir, Baja California (Fig. 2.A, Fig. 2.B; Miller et al., 2009).

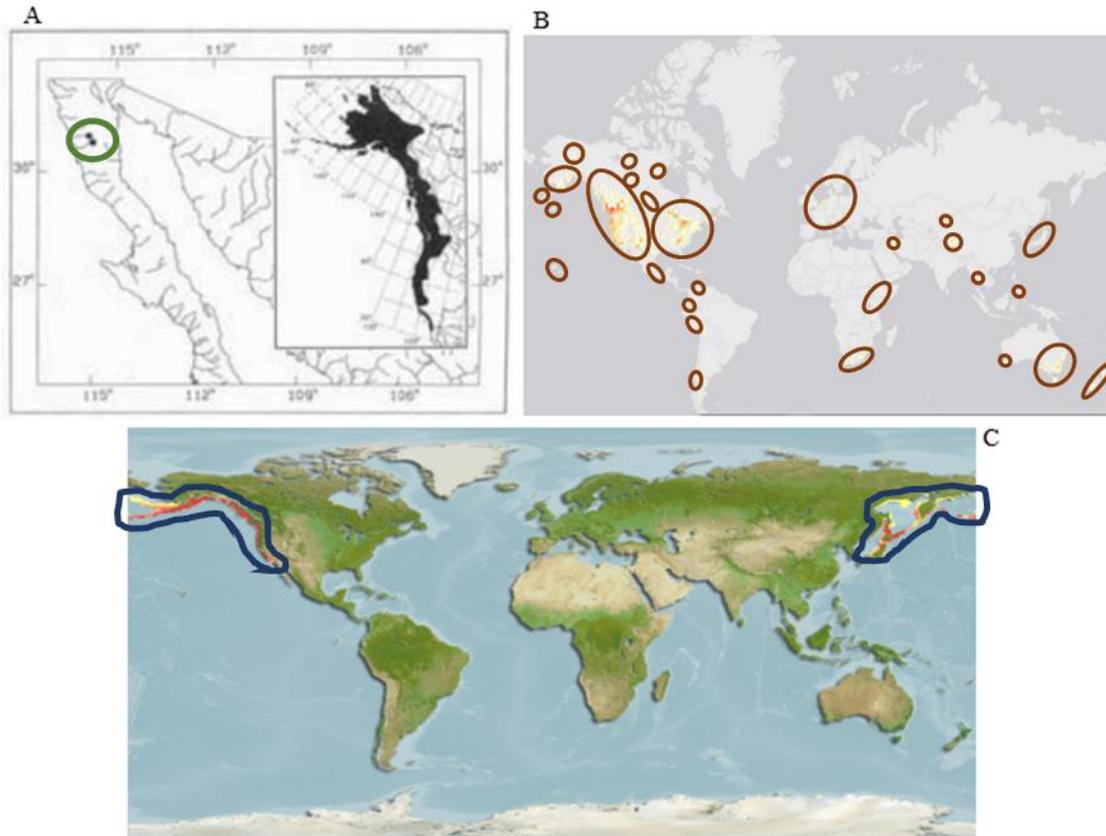


Figura 2. A) distribución de *Oncorhynchus mykiss* mencionada por Miller et al. (2009) encerrado en verde, B) distribución de *Oncorhynchus mykiss* en el mundo (OBIS, s.f.) encerrado en naranja oscuro, C) distribución nativa de *Oncorhynchus mykiss* (Aquamaps, s.f.) encerrado en azul.

Esta distribución se asocia a la teoría de sobrevivencia de esta especie a la glaciación en dos regiones: la costa del Pacífico al sur de los glaciares de la edad de hielo y en el área de Bering al norte de la península de Alaska, desde allí se restableció en el oeste de América del Norte y la región del Pacífico Occidental cuando los glaciares retrocedieron, lo que sugiere un origen post-glacial común (Fig. 2C; Hardy, 2021).

En México esta especie presenta poblaciones tanto nativas como introducidas, su distribución natural abarca las zonas montañosas, valles y algunas depresiones de los estados de Durango, Chihuahua, Baja California, Sinaloa y Sonora, principalmente a una altitud mayor a los 1500 msnm. Para las poblaciones introducidas se estima que se comenzaron a crear granjas para su cultivo durante los años 70's y 80's con fines de pesca deportiva y acuicultura (Gallego et al., 2007).

O. mykiss mayormente habita regiones de alta montaña, los cuales pueden tener ambientes lénticos o lóticos. Los ríos que se ubican en estas regiones presentan cauces con desniveles topográficos que originan rápidos, saltos y cascadas (De la Oliva, 2011). Gallego y colaboradores (2007) y De la Oliva (2011) mencionan que *O. mykiss* principalmente se encuentra en corrientes de aguas cristalinas y con temperaturas entre los 11 a 18° C, con elevadas concentraciones de oxígeno superiores a los 6 mg/L, estas aguas son de carácter turbulento o con cierto movimiento de agua.

De la Oliva (2011) complementa que las truchas frecuentan los ríos de alta montaña, por la pronunciada velocidad de las corrientes y el suelo pedregoso. Mientras que Caballero-Javierre (2013) determina que las truchas prefieren ambientes lénticos, crecen más lentamente en el mar y tiene una mayor propensión por la residencia en el río.

De la Oliva (2011) y Arregui (2013) indican que dentro de los parámetros fisicoquímicos del agua del hábitat de *O. mykiss*, el más importante es el oxígeno disuelto (OD), aunque la temperatura del agua también es un factor clave en los

procesos físicos, químicos y biológicos en los ríos y arroyos, además de que ejerce una gran influencia sobre el éxito biológico de los peces y otros organismos acuáticos (Santiago et al. 2018).

El límite de OD en el agua donde se encuentra *O. mykiss* puede encontrarse en los 4-5 mg/L, aunque conviene mantenerlo en niveles superiores de 6 mg/L, a concentraciones inferiores presentan dificultades para respirar (De la Oliva, 2011, Arregui, 2013). Sin embargo, Hardy (2021) menciona que el OD en *O. mykiss* a concentraciones <5 mg/L es dañino para los estadios adulto y reproductor.

En cuanto a la temperatura del agua se menciona que a 17°C es dañino para los estadios reproductores (desove) y los huevos, la caída de la temperatura estimula el desarrollo gonadal y provoca el desarrollo de los caracteres sexuales secundarios, pero el aumento de la temperatura reduce la supervivencia del material reproductivo, de los huevos y alevines (Arregui, 2013, Santiago et al. 2018, Hardy, 2021).

Cuando la temperatura está a 18°C es dañino para los alevines y juveniles, la digestión a esta temperatura no es muy eficaz, al superar los 18 °C el apetito decae (Arregui, 2013, Hardy, 2021), a 25°C daña a adultos, a temperaturas altas las concentraciones de oxígeno en el agua son muy bajas y aumenta la tasa de mortalidad (De la Oliva, 2011, Hardy, 2021).

Y la salinidad es dañina para los adultos cuando es >35 ppt (partes por mil), debido a que los organismos presentan pérdida de peso, el crecimiento se ve disminuido, estrés hiperosmótico (Estrada, 2016, Hardy, 2021). A continuación, se muestra el Cuadro 1 que contiene los parámetros fisicoquímicos del agua más óptimos para la estancia de *O. mykiss* ya sea en su ambiente natural o en un cultivo.

Cuadro 1: Parámetros fisicoquímicos óptimos para la crianza y mantenimiento de organismos adultos y adultos reproductores de *Oncorhynchus mykiss* (modificado de Hardy, 2021)

Parámetro	Unidades	Valor
Amonio (no ionizado)	(mg L ⁻¹)	0.02-0.03
Cadmio	(mg L ⁻¹)	<0.0004
Dióxido de carbono	(mg L ⁻¹)	<10
Cloruro	(mg L ⁻¹)	<5
Cloro	(mg L ⁻¹)	<0.03
Cromo	(mg L ⁻¹)	<0.001
Cobre	(mg L ⁻¹)	<0.006
Oxígeno disuelto	(mg L ⁻¹)	>6
Dureza	(mg L ⁻¹ CaCO ₃)	10 a 400
Sulfuro de hidrógeno	(mg L ⁻¹)	<0.001
Hierro	(mg L ⁻¹)	<0.15
Plomo	(mg L ⁻¹)	<0.03
Manganeso	(mg L ⁻¹)	<0.01
Mercurio	(mg L ⁻¹)	<0.002
Níquel	(mg L ⁻¹)	<0.01
Ozono	(mg L ⁻¹)	<0.005
Bifenilos policlorados	(mg L ⁻¹)	<0.002
Salinidad	Ppt	32
	Ppt	0
Temperatura de desove	°C	12
Nitrógeno total	(mg L ⁻¹)	<110
Fósforo total	(mg L ⁻¹)	0.01 a 0.03
pH	H ⁺	6.5 a 8.0
Temperatura del agua	°C	12
	°C	15
Zinc	(mg L ⁻¹)	<0.05

2.2 Diagnósis de la especie

Oncorhynchus mykiss pertenece a la familia Salmonidae, la cual presenta migraciones que ocurren entre el agua dulce y la salada (patrón diadromía), a su vez este patrón se divide en otras formas, respecto a esto *O. mykiss* se clasifica como un salmónido de agua dulce y de mar, es decir, es un pez anádromo y a su vez es un pez eurihalino que se reproduce en agua dulce (Gallego et al., 2007, Al-Jandal, Wilson, 2011, De la Oliva, 2011, Arregui, 2013, Caballero Javierre, 2013).

Este proceso de ser anádromos y diádromos se debe a un carácter ancestral que indica un origen de agua dulce, debido a que presentan glomérulo renal (se pierde en los peces marinos), además de, tener mecanismos que permiten la capacidad de osmoregular en ambientes que imponen diversas condiciones ionoregulatorias; todo esto es un proceso de esmoltificación presentes en esta familia (Orrego, 2018).

Aunque también se mencionan diferentes migraciones para *O. mykiss*, organismos que completan todo su ciclo de vida dentro del agua dulce (residencia), algunos realizan migraciones no reproductivas a agua dulce durante varios meses después de su entrada inicial al océano, hibernan allí y luego regresan al océano la primavera siguiente (media maza), otros que entran en los estuarios repetidamente durante años sucesivos antes de la maduración (estuarino) o años alternos entre estuarios y ríos a lo largo de su vida (río-estuarino) y la migración parcial donde algunos individuos sufren migraciones marinas antes de regresar al agua dulce para reproducirse (Kendall et al., 2015)

Como ya se mencionó *O. mykiss* presenta individuos anádromos y residentes, ambos grupos difieren en la expresión de genes relacionados con el crecimiento, la esmoltificación y el metabolismo, además las historias de vida de los salmónidos son en parte influencias genéticas y maternas, es decir, las historias de vida son heredables si la hembra es de forma anádroma su progenie tendrá principalmente forma anádroma (Kendall et al., 2015).

Las formas anádromas y residentes son a menudo simpátricas, comúnmente entrecruzadas, la descendencia puede adoptar cualquier forma. Los peces anádromos experimentan una esmoltificación para el medio marino, por lo general, deben retrasar la reproducción para migrar a las zonas de alimentación de los mares templados, se benefician de un tamaño mayor en la maduración, esta etapa de migración disminuye la supervivencia, los peces residentes típicamente tienen una mayor probabilidad de sobrevivir para reproducirse múltiples veces (iteroparidad)

(Garduño-Paz, 2006), pero se reproducen en tamaños más pequeños y por lo tanto con menor fecundidad (Kendall et al., 2015).

O. mykiss presenta un cuerpo alargado y fusiforme que semeja una forma de torpedo, dando un aspecto hidrodinámico (Gallego et al., 2007, Arregui, 2013), tiene el cuerpo cubierto de escamas muy pequeñas, presenta ocho aletas, de las cuales 4 son pareadas: dos pélvicas y dos pectorales; dos dorsales, una de ellas adiposa, una anal y una caudal (Gallego et al., 2007)

Los caracteres distintivos en *O. mykiss* son: 115-130 pequeñas escamas cicloides en la fila media lateral; 16-17 branquiespinas, 10 radios pélvicos, 60-66 vértebras, 35-70 ciegos pilóricos, 3-4 espinas dorsales, 10-12 radios blandos dorsales, 3-4 espinas anales, 8-12 radios blandos anales y 19 radios caudales. El cuerpo, la aleta adiposa y la aleta caudal están moteados con pequeñas manchas negras, asimismo, presenta una banda irisada rosácea longitudinal le marca los flancos y por encima de ella presenta una pigmentación color azul y/o verde, por debajo del vientre predomina el color gris plateado o blanquecino (Fig. 3, Doadrio, 2002, Miller et al., 2009, Arregui, 2013, Hardy, 2021).

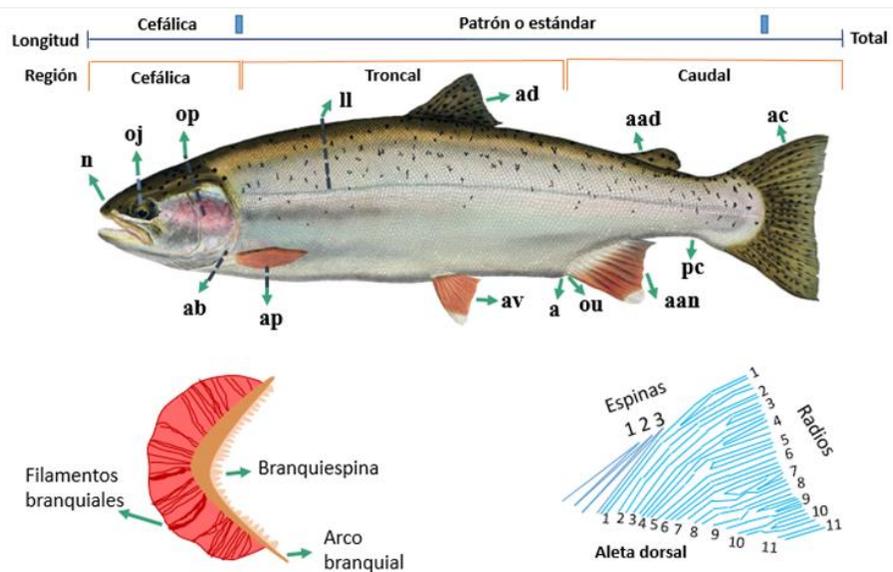


Figura 3: Caracteres de identificación: n: narina, oj: ojo, op: opérculo, ll: línea lateral, ad: aleta dorsal, aad: aleta adiposa, ac: aleta caudal, pc: pedúnculo caudal, aan: aleta anal, ou: orificio urogenital, a: ano, av: aleta pélvica, ap: aleta pectoral, ab: apertura branquial.

2.3 Introducción a México

En 1936 se construyó la estación acuícola “El Zarco” (García-Mondragón et al., 2016). En 1937 se crea la Estación Trutícola de Almoloya del Río debido a la necesidad de establecer un Centro Piscícola para su reproducción y propagación, en esta Estación se recibieron grandes cantidades de trucha y posteriormente se diseminaron en el interior de la República (Arredondo-Figueroa, 1983). En este mismo año se realizaron importaciones repetidas de huevos y a su vez se formalizó la reproducción de la especie.

En 1943 por decreto se creó el centro piscícola “El Zarco”, fue la primera entidad federativa productora de crías con fines de repoblación, en este centro se apoyaron las primeras acciones de promoción del cultivo intensivo (Fig.4, Gallego et al., 2007, INAPESCA, 2012, García-Mondragón et al., 2016, Hernández-Hernández, 2018). En 1950 entró en funcionamiento el Centro Acuícola de Pátzcuaro, Michoacán (INAPESCA, 2012)



Figura 4: Entidades con cultivo de *Oncorhynchus mykiss* (INAPESCA, 2012)

En el Estado de México durante los años 70’s y 80’s *O. mykiss* fue introducida por primera vez en las lagunas del cráter del Nevado de Toluca. En esa coacción sólo sobrevivieron los organismos que se depositaron en la Laguna del Sol. Hasta donde se conoce es un hábitat poco favorable para esta especie ya que no existen corrientes equiparables al hábitat natural de esta especie, están expuestas a una intensa radiación ultravioleta, se desconoce de qué se alimenta y el efecto que tienen sus

deyecciones en la calidad del agua de esta (Gutiérrez, 2016). Ferriz y Iwaszkiw (2016) mencionan que las especies de salmónidos presentan una alta plasticidad e historia evolutiva.

El crecimiento de la actividad y producción trutícola se ve favorecida por cuatro factores: (I) la continuidad de los programas gubernamentales con apoyo a este sector, (II) las condiciones ambientales necesarias para el buen desarrollo del cultivo, (III) la construcción de Unidades de Producción Trutícola (UPT), (IV) la incursión de la trucha en un mercado nuevo con gran aceptación. El evidente el incremento de las UPT pasando de 7 en 1983 a 284 en 2009, principalmente en regiones donde las condiciones climáticas y de los ecosistemas contribuyen al desarrollo del sector (García-Mondragón et al., 2016).

García-Mondragón y colaboradores (2016) registraron que el Gobierno inicialmente promovió la producción de trucha como alternativa para detener la tala clandestina en pequeña escala y el deterioro de los bosques por la agricultura en las comunidades de montaña, posteriormente se promovió la construcción de unidades de producción intensiva con presupuesto federal y/o estatal.

En un principio el cultivo de *O. mykiss* era una alternativa para la alimentación de las familias productoras, al ser reconocida como una fuente de ingresos complementaria a la agricultura y ganadería (García-Mondragón et al, 2016). La figura 5 y la figura 6 muestran una línea del tiempo, la cual presenta un resumen del apartado 2.3 Introducción a México de la especie *Oncorhynchus mykiss* ésta comienza en el año 1839 al año de 1980

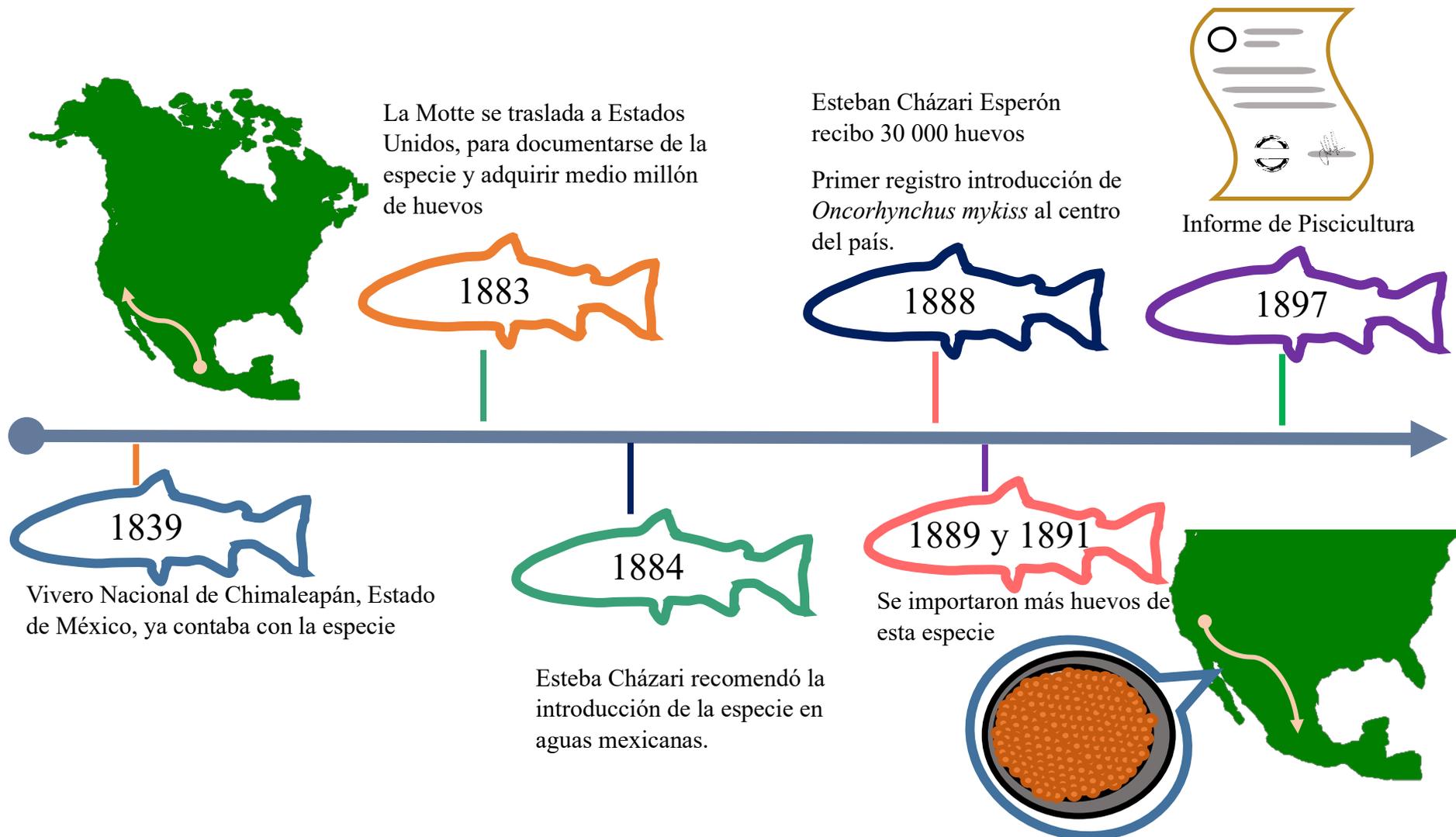


Figura 5: Línea del tiempo: primera parte de la Introducción de *Oncorhynchus mykiss* a México.

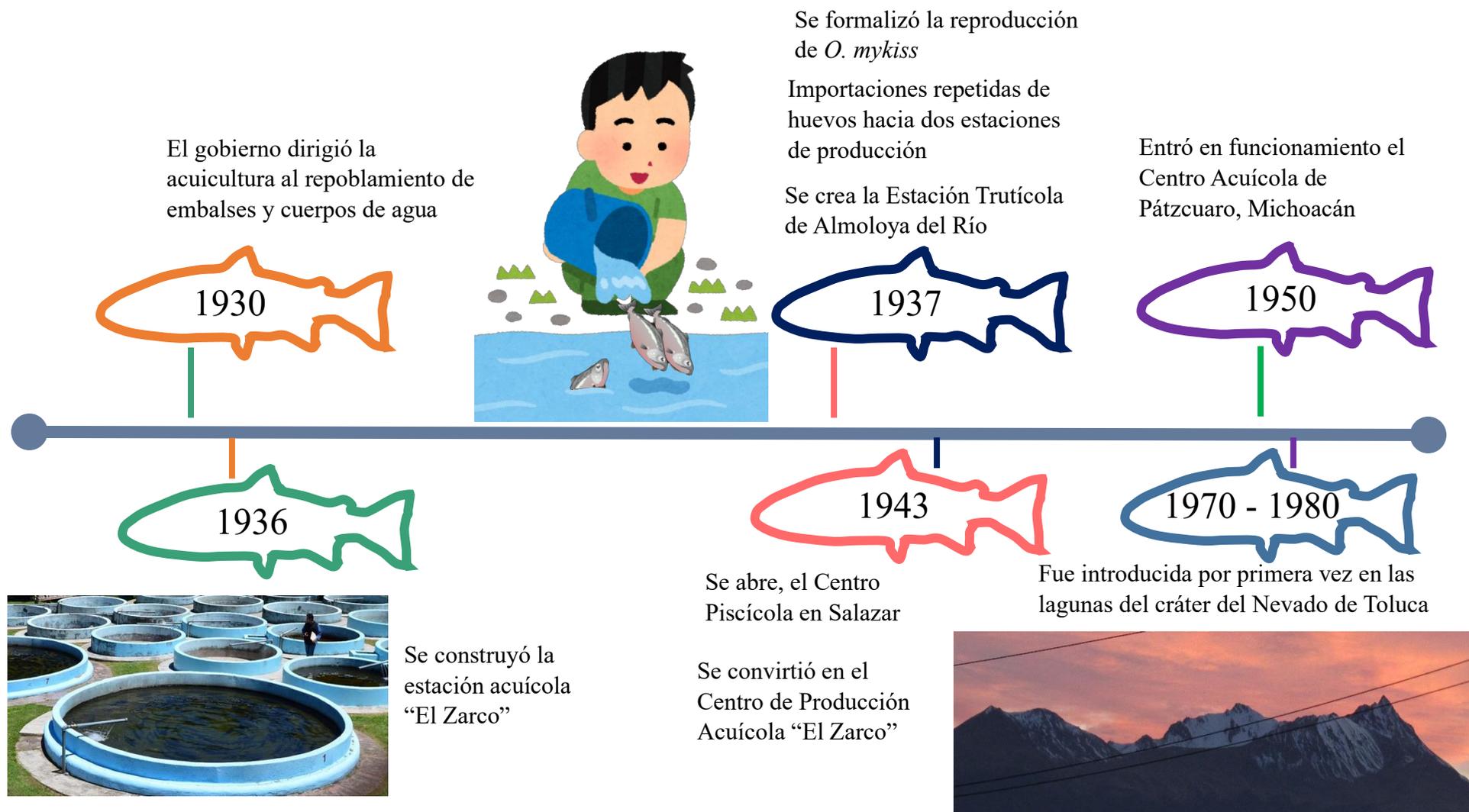


Figura 6: Línea del tiempo: segunda y última parte de la Introducción de *Oncorhynchus mykiss* a México.

2.4 Plasticidad fenotípica en truchas

La plasticidad fenotípica es la capacidad de un genotipo dado para modular su fenotipo en respuesta a cambios ambientales, lo que permite la persistencia en una variedad de condiciones ambientales (Wernicke von Siebenthal et al., 2018), es decir, los organismos pueden adaptarse a la variación ambiental por plasticidad fenotípica, además, éste es un fenómeno común y ocurre en todos los organismos desde microbios hasta mamíferos (Zhang et al., 2016).

La plasticidad fenotípica juega un papel importante en el origen de alternativas de fenotipos, esto es definido como la expresión de múltiples alternativas fenotípicas resultantes de la exposición a diferentes ambientes internos y externos (Garduño Paz, 2009).

Román-Valencia y colaboradores (2009) mencionan que la plasticidad fenotípica es inducida por heterogeneidad del ambiente o el estrés causado por el mismo tales como: cambios en la temperatura, humedad o concentración de oxígeno, también los cambios en la plasticidad podrían profundizar nuestra comprensión de la evolución de la resistencia al estrés (Zhang et al., 2016).

La plasticidad fenotípica como rasgo confiere una ventaja para los organismos que invaden nuevos hábitats, que viven en zonas muy heterogéneas o que los entornos fluctúan rápidamente (Garduño Paz, 2009). La plasticidad podría permitir que una población sobreviva mucho tiempo en un nuevo entorno, la variación genética en combinación con mutaciones y / o recombinaciones, para responder a las condiciones de selección locales (Zhang et al., 2016).

Zhang y colaboradores (2016) mencionan que los organismos nativos con adaptación a largo plazo a entornos con gran altitud han desarrollado un conjunto de fenotipos específicos para sobrevivir a este entorno. Los caracteres morfológicos externos de los salmónidos son altamente plásticos, esta alta

plasticidad influye positivamente en la colonización exitosa de la especie (Duran, 2015).

Para organismos anádromos y residentes los efectos del tamaño corporal y el crecimiento son inconsistentes, por lo tanto, los individuos pueden mostrar plasticidad en entornos variables (Kendall et al., 2015). Las poblaciones de *O. mykiss* de regiones templadas de latitudes medias que viven en ambientes que cambian estacionalmente, pueden haber desarrollado un alto nivel de plasticidad fenotípica para hacer frente a esta variación (Wernicke von Siebenthal et al., 2018).

A continuación, se muestra el Cuadro 2 que menciona estudios realizados sobre plasticidad en: la familia Salmonidae, el género *Oncorhynchus*, *Salmo trutta*, *Oncorhynchus mykiss*. La mayoría de estos estudios indican una alta plasticidad en los ciclos biológicos de las truchas, presencia de organismos híbridos, gran diversidad genética, controversias en la taxonomía y la clasificación de las especies, esto debido a un constante debate ya que algunos sugieren considerar nuevas especies, subespecies o variedades (Almodóvar, 2002, Abadía-Cardoso et al., 2016, Santiago et al. 2018).

Cuadro 2: Resumen de plasticidad propuesta para salomes y truchas.

Autor	Especie	Causas de la plasticidad	Efectos de la plasticidad
Almodóvar, 2002	<i>Salmo trutta</i>	Fisiología, ecología, heterogeneidad, genética, complejo mosaico de formas geográficas.	Plasticidad en ciclos de vida, al adoptar diferentes patrones de crecimiento y reproductivos, pequeñas diferencias en su morfología: forma anádroma, lacustre, residente.
Pellón et al., 2015	<i>Salmo salar</i>	Cambios de las demandas visuales.	Plasticidad neuronal y la neurogénesis, optimización del sistema visual, retina.
Abadía-Cardoso et al., 2016	Género: <i>Oncorhynchus</i> perteneciente a Sierra Madre Occidental (SMO)	Actividad geológica, cambios climáticos, aislamiento geográfico, actividad volcánica, glaciaciones.	Constante debate en la taxonomía y clasificación.
Santiago et al. 2018	<i>Salmo trutta</i>	Cambio climático.	Plasticidad ciclo biológico, colonizar nuevas zonas de reproducción, amplia distribución.
Wernicke von Siebenthal et al. 2018	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	Estrés por: disponibilidad de alimento, infección por patógenos, exposición a un contaminante artificial.	Crecimiento corporal, sistema inmunológico, transcripción de vitelogenina hepática.
Yoshizaki et al. 2018	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	Microambiente somático	Plasticidad sexual en las gónadas, disminuye en el periodo de diferenciación sexual, plasticidad en células germinales premeiotica.
Williams et al. 2019	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	Plasticidad fisiológica en respuesta a la hipoxia, plasticidad metabólica, sensibilidad al estrés ambiental.	Pre-acondicionamiento en el corazón y cardiomiocito aislado, capaces de mantener la función bajo tensiones hipóxicas.

La complejidad de las historias evolutivas y la plasticidad fenotípica en la Familia Salmonidae ocasiona estas discrepancias, por lo cual se menciona que hay estudios de rasgos morfológicos y datos moleculares que han servido para reclasificar al grupo (Almodóvar, 2002, Abadía-Cardoso et al., 2016, Santiago et al. 2018). Otro estudio describe el desarrollo ontogénico de la retina y así establecer características morfológicas de la misma (Pellón et al., 2015).

En general la mayoría de los estudios demuestran la plasticidad fenotípica como efecto asociado al estrés debido a cambios ambientales o del medio, como menciona Wernicke von Siebenthal y colaboradores (2018), la plasticidad fenotípica para aclimatarse a las condiciones ambientales cambiantes y como respuesta a factores de estrés, debido a la alta flexibilidad fenotípica en la trucha. Y también un alto nivel de plasticidad sexual en células germinales y gónadas (Yoshizaki et al. 2018)

2.5 Trabajos realizados sobre la morfología de las truchas

Las características morfológicas son el enfoque principal utilizado para describir la plasticidad (Garduño-Paz, 2009). Las pequeñas diferencias en la morfología y los ciclos de vida son mayormente reflejo de su gran plasticidad ambiental y fenotípica (Almodóvar, 2002). Las especies del género *Oncorhynchus* han evolucionado en ambientes extremadamente dinámicos en América Noroccidental, el género está dividido en dos subgrupos: los salmones del Pacífico y las truchas del Pacífico, estas últimas que incluye *O. mykiss* (Abadía-Cardoso, García De León, Garza, 2016).

Los peces pos-glaciales muestran especializaciones tróficas funcionales, las formas limnéticas mejor adaptados al consumo de zooplancton, tienen un cuerpo alargado, delgado, las branquiespinas numerosas y densamente espaciadas, para las formas bentónicas consumo de alimentos más grandes, tienen un cuerpo robusto, branquiespinas menos numerosas, más cortas y más espaciadas (Garduño Paz, 2009).

Morfológicamente las truchas se diferencian de los salmones por tener una boca más grande o prominente, aletas pectorales más cortas y mayor presencia de pintas negras bajo la línea lateral y algunas presentan en el borde de la aleta adiposa coloración rojiza, además, los salmones están mejor adaptados para atravesar el océano, ya que la trucha ocupa principalmente hábitats costeros y estuarios (Caballero Javierre, 2013).

El Cuadro 3 presenta estudios de morfometría geometría realizados para: evaluar el estado taxonómico y detectar caracteres diagnósticos útiles para la separación de taxones e identificación de poblaciones (Ruizcampos et al., 2003, Meng et al., 2018, Rashidabadi et al., 2020), comparar la morfometría y caracterizar la variación dentro y entre poblaciones (Ruizcampos et al., 2003, Bajjaliya et al., 2015, Fenkes et al., 2018, Panda et al., 2019, Koene et al., 2020)

Cuadro 3. Resumen de morfometría geométrica en truchas a diferentes altitudes y por aislamiento geográfico.

Autor	No. Sitios	TIPO DE SITIOS	Especie	Diferencias morfológicas que presenta
Ruiz Campos et al. 2003	2	Drenajes	<i>Oncorhynchus</i> (truchas nativas de SMO)	Diferencias: en la región cefálica, distancia entre el origen de la aleta pélvica al origen de la aleta adiposa y en las profundidades corporales inferiores.
Bajjaliya et al. 2015	11	2 costeros, 9 continentales	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	Poblaciones costeras migran cortas distancias, son significativamente más grandes y más robusta, tienen mayores profundidades corporales, pesos y longitudes que las truchas de continentales.
Fenkes et al., 2018	1	2 tratamientos en 2 estanques circulares: uno con mayor flujo y otro es control (agua sin gas)	<i>Salmo trutta</i>	La altura de la cabeza disminuyó, se volvió más delgada, cambios en la robustez, pequeños cambios en la profundidad corporal, trayectoria más pronunciada de la masa-longitud.
Meng et al. 2018	3	Ríos	<i>Brachymystax</i>	Variación en el cuerpo, la cabeza puede ser ancha y alargada, cónica y estrecha o corta, el diámetro del ojo largo, medio o corto, hocico afilado o romo, orientación dorsoventral amplia o estrecha.
Panda et al. 2019	3	Ríos	<i>Barilius bendelisis</i>	Variación cabeza, porción media y en la profundidad del cuerpo, se puede asociar heterogeneidad fenotípica.
Koene et al. 2020	28	20 lagos, 8 embalses	<i>Salmo trutta</i>	Variación entre los lagos, los lagos más grandes y profundos: las cabezas son profundas y cortas, los ojos pequeños, lagos con mayor altitud: cabezas y mandíbulas cortas, los del embalse tienen ojos más grandes y mandíbulas cortas.
Rashidabadi et al. 2020	6	1 lago, 5 ríos	<i>Salmo trutta</i>	Morfometría de escamas y otolitos, la forma del otolito y escamas se pueden ver afectados por factores ambientales y genéticos, las escamas pueden cambiar su forma por condiciones hidrológicas, condiciones y calidad del agua.

2.6 Morfometría

La morfología es el estudio de las formas (Propp, 1998), mientras que la forma de un organismo se define como la variación del mismo que se obtiene después de que se resta el efecto tamaño (Moreno-Barajas et al., 2014). La morfometría, es el estudio cuantitativo de la variación de las formas biológicas, los métodos morfométricos utilizados para describir y comparar las diferentes formas que presenta un organismo dentro de y entre poblaciones conespecíficas (Bajjaliya et al., 2015).

La morfología se centra en la descripción de una estructura observada, tal como son los tejidos, células, órganos. Las comparaciones entre grupos o poblaciones se basan en el análisis de las diferencias entre sus dimensiones lineales y la forma se considerada una cualidad de la estructura, la cual, podía ser detalladamente descrita, pero no podía ser analizada cuantitativamente, actualmente el estudio de la forma puede ser descriptivo o analítico, este tipo de estudio se desarrolla en una disciplina cuantitativa en el campo de la morfometría donde no sólo se buscaba comparar parámetros entre grupos de estudio y control, se intenta buscar relaciones entre éstos y encontrar asociaciones que permitan explicar las diferencias observadas (Toro-Ibacache et al., 2010, Adams et al., 2013).

El método de la morfometría geométrica (MG) también se basa en el desarrollo y la aplicación de métodos geométricos basados en coordenadas de puntos anatómicos (Moreno-Barajas et al., 2014) y en este método la forma se define como cualquier información geométrica que queda cuando los efectos de la translación, la escala y la rotación se quitan de un objeto (De León et al., 2018).

La MG usa puntos de referencia homólogos, hitos o landmark, esta herramienta permite el estudio de la forma y tamaño del organismo, proporcionando un análisis gráfico para cuantificar y visualizar la variación morfométrica dentro y entre las muestras de organismos (De León et al., 2018). Los estudios morfométricos se realizan a través de lo que se puede llamar paradigma de Procrustes (Adams et al., 2013).

Para la MG, primero, de cada espécimen, se obtiene un conjunto de coordenadas de marca de referencia bidimensionales o tridimensionales que registran ubicaciones anatómicamente definibles (puntos fijos), luego se realiza un análisis de Procrustes generalizado para superponer las configuraciones de puntos de referencia en todos los especímenes a un sistema de coordenadas común y generar un conjunto de variables de forma. Se procede con mínimos cuadrados que traduce todos los especímenes al origen, los escala a la unidad de tamaño del centroide y los gira para minimizar las sumas de cuadrados totales (Fig. 7, Adams et al., 2013).

Después de la superposición de la forma alineada de Procrustes, las coordenadas describen la ubicación de cada espécimen en un espacio curvo relacionado con el espacio de forma de Kendall, luego se lleva a cabo el análisis multivariado de la variación de la forma. Otro paso de un estudio morfométrico es probar hipótesis biológicas utilizando métodos estadísticos multivariados, ya sea para probar las diferencias de forma entre los grupos o identificar patrones de covariación entre la forma y otras variables continuas. Por último, se utilizan métodos gráficos para visualizar patrones de variación de forma y facilitar las descripciones de los cambios de forma (Fig. 7, Adams et al., 2013)

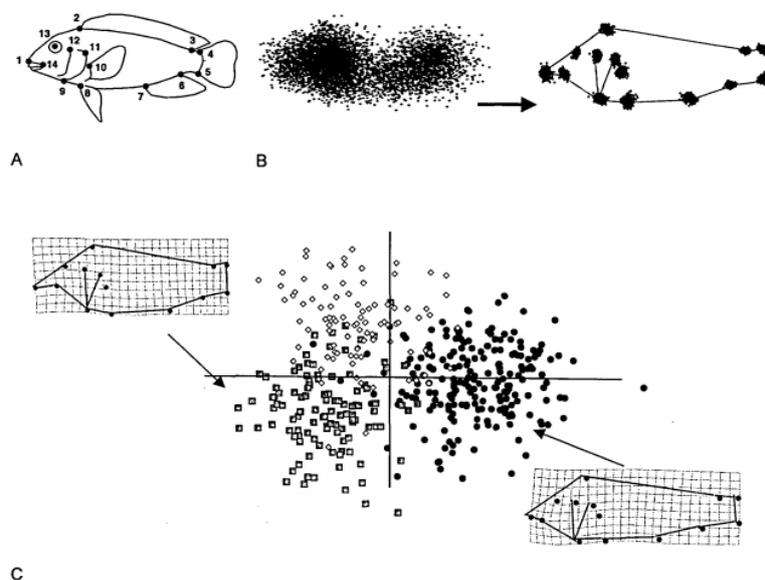


Figura 7: Morfometría geométrica, A) digitalización landmarks, B) análisis de Procrustes, C) análisis estadístico y gráficos de la descripción de los resultados (Adams et al., 2004)

2.7 Variación: causas y efectos

La variación de un organismo se puede dar en el genotipo o en el fenotipo, ya que la variabilidad genética presente en una especie es el resultado de años de evolución y representa también su legado evolutivo para el futuro y el mejor método de conservar esta diversidad es mantener poblaciones autosostenibles en hábitats naturales (Almodóvar, 2002).

Las diferencias morfológicas son el producto de la plasticidad fenotípica, la adaptación o la deriva genética, pero no siempre se requiere de poblaciones muy antiguas para conseguir adaptaciones locales si se presentan factores selectivos (Jiménez-Prado et al., 2021). Los patrones evolutivos de la diversidad de peces de agua dulce son el resultado de una gran actividad geológica, cambios climáticos, factores como el aislamiento geográfico (Abadía-Cardoso et al., 2016).

La variación en merística y osteología a nivel poblacional, constituye una evidencia de la plasticidad fenotípica producto de presiones selectivas, las diferencias entre poblaciones de una misma especie se deben a eventos de discrepancia filogenética o efectos directos de factores ambientales entre poblaciones (plasticidad fenotípica, Román-Valencia et al., 2009).

La morfología de los salmónidos puede variar debido a muchos factores, incluido el fenotipo, expresión en respuesta al entorno inmediato, influencias antropogénicas como: la propagación artificial, la dificultad y la distancia de la migración de desove, el recorrido reproductivo minimiza intercambio genético y promueve el mantenimiento de adaptaciones locales (Bajjaliya et al., 2015). El flujo del agua y el oxígeno pueden influir directamente en el tamaño de las branquias, la forma del cuerpo y la aleta caudal (Garduño-Paz, 2009).

La forma corporal de los peces varía mucho y las diferencias suelen reflejar funciones ecológicas divergentes en el uso del hábitat, como las que se dan entre los peces anádromos y los de agua dulce residentes, entre los arroyos y los lagos o incluso como respuesta a estresores ambientales (Jiménez-Prado et al., 2021), estos cambios se dan por la capacidad de adaptación que puede presentarse entre

poblaciones, dentro de la misma cuenca o entre cuencas cercanas geográficamente, además, debido a que suele haber un patrón de cambio entre las partes bajas y altas de los ríos, es posible que también existan patrones de variación morfológica similares entre ríos y especies (Jiménez-Prado et al., 2021).

Abadía-Cardoso y colaboradores (2016) retoman que la plasticidad en las truchas ha estado influenciada por factores geológicos y climáticos como la actividad volcánica, los movimientos de las capas tectónicas, glaciaciones, ciclos de sequías e inundaciones, aunque no se pueden descartar otros factores. Especies sensibles como *O. mykiss* tienen una capacidad considerable de plasticidad en su sensibilidad al estrés ambiental, al menos a corto plazo, un rasgo que puede facilitar su persistencia en hábitats impactados progresivamente por el cambio climático. Un claro ejemplo son los peces sensibles a la hipoxia, como los salmónidos que poseen una considerable plasticidad metabólica, lo que puede permitirles prosperar (o al menos sobrevivir) en hábitats cada vez más inhóspitos (Williams et al., 2019).

O. mykiss es una especie sensible a la hipoxia, especies encontradas en ríos y estuarios pueden experimentar rutinariamente eventos hipóxicos, los ciclos de hipoxia mejoraron la tolerancia a la hipoxia, la aclimatación a la hipoxia, las tasas metabólicas disminuyen (Williams et al. 2019). El cambio climático incrementará las afecciones a los ecosistemas acuáticos, afectar a las migraciones, la ontogenia, crecimiento y los rasgos del ciclo biológico (Santiago et al. 2018).

3. Justificación

No hay información suficiente sobre la población en la Laguna del Sol, así que este trabajo puede generar antecedentes de la especie en el Nevado de Toluca y de esta manera estableceríamos bases sobre cómo se está viendo afectada la especie debido a la altitud, y si tiene repercusiones en la forma del cuerpo, la cabeza y las branquias.

Este efecto lo verificaremos al hacer una comparación con la población de una granja. Y así delimitar que cambios se está observado en la población del Nevado y empezar a sugerir que estos cambios pueden ser resultado de la plasticidad característica de la familia.

Ya que simple vista se ha observado una posible variación entre ambas poblaciones: la Laguna del Sol del Nevado de Toluca (4 200 msnm) los organismos son más alargados anteroposteriormente, las branquias parecen ser más pronunciadas y la población de la granja ubicada en La Ciénega (3 500 msnm) los organismos son más alargados dorsoventralmente, las branquias se observan de un tamaño menor.

4. Hipótesis

Ha: La morfología y el factor de condición fisiológica serán diferentes entre la población de *O. mykiss* de la Laguna del Sol y la población de la granja La Ciénega debido a que están bajo condiciones diferentes.

5. Objetivos

5.1 Objetivo General

Evaluar la variación en la morfología de organismos de *Oncorhynchus mykiss* pertenecientes a dos poblaciones con altitudes diferentes.

5.2 Objetivo Específicos

- Describir de *Oncorhynchus mykiss* la morfología en la Laguna del Sol y la granja La Ciénega mediante el uso de la Morfometría Geométrica como herramienta para definir aspectos fenotípicos en la población.
- Comparar de *Oncorhynchus mykiss* la morfología entre la población de la granja La Ciénega y la población de la Laguna del Sol mediante análisis estadísticos para proponer hipótesis sobre su variación.
- Describir la morfología branquial de *Oncorhynchus mykiss* para la población de la Laguna del Sol y la población de La Granja la Ciénega.
- Comparar la morfología branquial de *Oncorhynchus mykiss* entre las poblaciones de la Laguna del Sol y de La Granja la Ciénega.
- Determinar la \overline{LT} , \overline{P} y K fulton así como el tipo de crecimiento para la población de la Laguna del Sol y la población de La Granja la Ciénega.

6. Materiales y método

6.1 Área de estudio

Para el presente estudio se colectaron los organismos de dos áreas de estudio, el primero fue la cuenca endorreica de la Laguna del Sol (LS) en el Nevado de Toluca y la segunda fue la Granja de truchas "La Ciénega" (GC) ubicado en la localidad Raíces, en el municipio de Zinacantepec perteneciente a la cuenca del Balsas (Ver mapa en la Fig. 8).

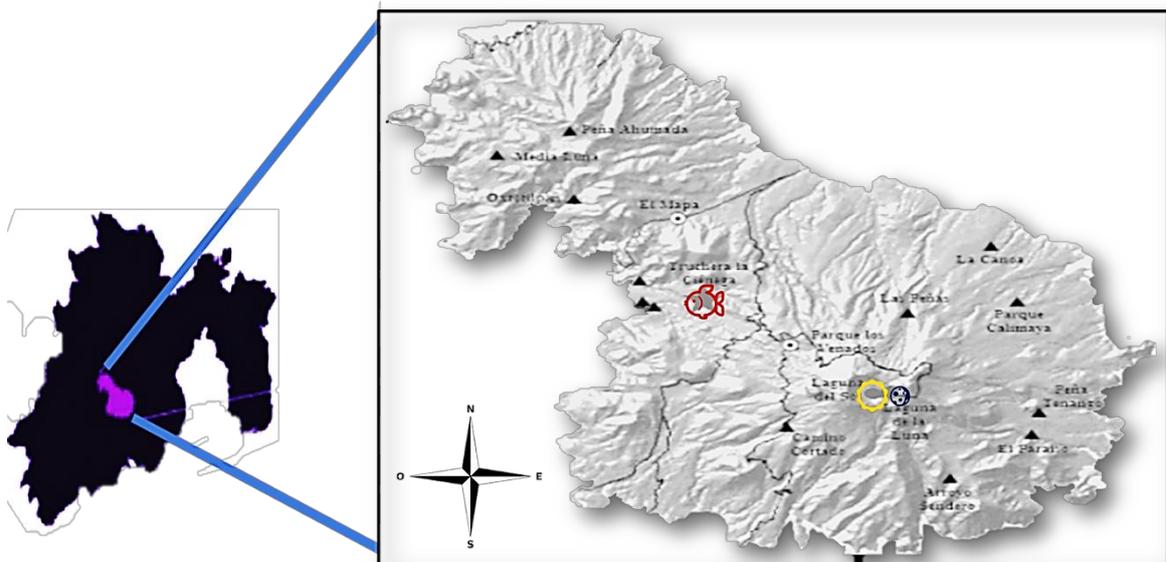


Figura 8: Mapa de localización del Nevado de Toluca; donde  es la ubicación de la granja de truchas "La Ciénega",  indica de la Laguna del Sol y  muestra la ubicación de la Laguna de la Luna (Modificado de Franco-Maass *et al.*, 2009; Sánchez-Jasso, J., Abellán, F. , 2015).

6.1.1 Laguna del Sol (LS) en el Nevado de Toluca

Es un lago alpino tropical que no tiene ríos, se trata de una cuenca endorreica (CONABIO, s.f.). Es una cuenca endorreica, ya que el lago reúne las aguas captadas por todas las vertientes, las cuales terminan su flujo superficial justamente en ese cuerpo de agua. Las únicas salidas para el agua captada pueden ser la infiltración en el subsuelo o la evaporación (Maldonado Patiño, 2018). Se

forma por la acumulación del agua de lluvia o de deshielo (Gutiérrez-Carbonell, 2016)

La Laguna del Sol se ubica a 4 200 msnm (Fig. 8), con un área de 23.7 ha, es frío y la temperatura del agua es de $<10^{\circ}\text{C}$, es permanente y relativamente somero $<15\text{m}$, con un régimen de mezcla polimíctico cálido y agua clara, ácida, poco mineralizada y de muy baja reserva alcalina, la Laguna del Sol es menos ácida y más mineralizada que la laguna de la Luna, además de tener una mayor riqueza y abundancia de diatomeas (Cuna et al., 2015).

Es considerados un lago astático, lo que significa que cambia su forma a lo largo del año y de un año a otro, debido al balance entre la precipitación y la evaporación, se menciona que tiene una profundidad entre 10 y 15 m, las temperaturas más elevadas ($\approx 11^{\circ}\text{C}$) se dan en la época cálida de lluvias, y las más bajas en el seco invierno ($\approx 4^{\circ}\text{C}$) (García-Miranda *et al.*, 2018). A continuación, se muestra el Cuadro 4 que muestra los parámetros morfométricos que tiene la Laguna del Sol.

Cuadro 4: Parámetros morfométricos de la Laguna de Sol retomado de (García-Miranda *et al.*, 2018).

Parámetro	Laguna del Sol
Longitud máxima (m)	795 NNE-SSW
Ancho máximo (m)	482
Volumen (m^3)	1 436 100
Área superficial (m^2)	237 321
Perímetro (km)	3.68
Profundidad máxima (m)	15
Profundidad media (m)	6

La Laguna del Sol presenta agua limpia y de baja mineralización, $\text{pH} < 7$, temperatura $< 14^{\circ}\text{C}$ y una estratificación ligera que desaparece completamente desde el otoño hasta la primavera del siguiente año, así como nutrientes escasos, alcalinidad baja y demanda biológica de oxígeno (DBO)-demanda química de oxígeno (DQO) baja. Las sales predominantes son los sulfatos, sin llegar a ser tóxicos (Gutiérrez-Carbonell, 2016). A continuación, el Cuadro 5 y el Cuadro 6

mencionan los parámetros fisicoquímicos y tróficos del agua presentes en la Laguna del Sol, como la concentración de nutrientes de la misma.

Cuadro 5: Parámetros fisicoquímicos y tróficos en la Laguna del Sol (Alcocer *et al.*, 2004; Dimas-Flores *et al.*, 2008; Cuna, 2015)

Parámetros	Alcocer y colaboradores (2004)		Dimas-Flores y colaboradores (2008) Anual 2000-2001	Cuna (2015) mayo, agosto y noviembre 2010
	Valor	Mes		
Temperatura media (°C)	8.5.	Anual	8.5	9.8 ±1.4
Temperatura máx (°C)	11	Septiembre	-----	-----
Temperatura mín. (°C)	5	Enero	-----	-----
OD media (mg L ⁻¹)	6.8	Anual	5.37	7.2 ±1.2
OD mín. (mg L ⁻¹)	5.57	Agosto	-----	
OD máx. (mg L ⁻¹)	7.82	Noviembre	-----	
pH	5.5	-----	5.4	7.3±0.8
pH máx.	7.0	Enero	-----	-----
pH mín.	5.0	Febrero	-----	-----
Conductividad media (µS cm ⁻¹)	16	-----	16	60.6±1.5
Conductividad (µS cm ⁻¹)	15-18	Enero-Marzo	-----	-----
Concentración media de Clorofila a (µg L ⁻¹)	0.51	-----	0.58	1.6±1.1
Concentración de Clorofila a (µg L ⁻¹) mínima-máxima	0.14-1.62	-----	-----	-----
Transparencia (m)	4.6±1.1	Septiembre-Marzo	4.6	5.2±4.9

Cuadro 6: Concentración de nutrientes (µmol L⁻¹) en la Laguna del Sol (Alcocer *et al.*, 2004; Dimas-Flores *et al.*, 2008)

Nutriente	Alcocer y colaboradores (2004)			Dimas-Flores y colaboradores (2008) Anual 2000-2001
	Media	Mínima	Máxima	Media
N-NH ₄ (µM L ⁻¹)	2.89	0.98	5.95	2.89
N-NO ₂ (µM L ⁻¹)	0.20	0.03	1.15	0.19
N-NO ₃ (µM L ⁻¹)	4.70	0.08	10.26	4.71
DIN (µM L ⁻¹)	7.60	0.94	13.48	7.61
P-PO ₄ (µM L ⁻¹)	0.2	0.01	0.50	0.15
Si-SiO ₄ (µM L ⁻¹)	2.50	0.45	8.51	2.45

6.1.2 La granja de truchas "La Ciénega" (GC)

Se encuentra en el ejido de Raíces a 99° 48' 29" de longitud este, y a 19° 09' 43" de latitud norte (Fig. 8); a una altitud de 3500 msnm (Abasolo, 2006). En el Cuadro 7 se muestran los parámetros fisicoquímicos que deben estar presentes en un centro acuícola de truchas.

Cuadro 7: Parámetros fisicoquímicos para centros acuícolas de trucha (De Pesca, 2018)

Parámetro	Mín.	Máx.
Temperatura °C	9	17
Oxígeno disuelto (mg/l)	5 (juveniles y adultos) 6 (huevos y alevines)	
Ph	4.5	10
Dureza (ppm)	25	
Nitrito (mg/l)	<0.55	
Nitrato (mg/l)	<100	
Amonio (mg/l) (NH ₃)	<0.012	
Alcalinidad (mg/l)	20	200
Sólidos en suspensión (ppm)	75	

6.2 Tamaño de muestra

Se colectaron un total de 18 organismos totales, 10 organismos en la LS y 8 organismos en la GC, mediante redes de cuchara y cañas de pesca deportiva; la captura de los organismos está bajo permiso de CONAPESCA. Los organismos se preservaron por congelación en el Laboratorio de Ecofisiología Animal, Facultad de Ciencias, UAEMex.

6.3 Digitalización de imágenes

La toma de fotografías se realizó con una cámara SONY Cyber-shot DSC-F828 y un Stand Fotográfico Kaiser, cada organismo se colocó a una distancia de 20 cm del objetivo de la cámara y sobre una base cuadrículada de 1 cm². De cada individuo se tomaron fotografías de ambos lados, es decir lado izquierdo y lado derecho. Se realizó una copia de las imágenes digitalizadas, las cuales se

procesaron en el programa tpsUtil y así se creó un nuevo archivo que permitió la visualización de las imágenes en los diferentes programas.

6.4 Elección de puntos (landmarks)

Los landmarks (LM) se seleccionaron en base a lo que mencionaba Toro-Ibacache (2010) la selección de landmarks idealmente debe hacerse bajo los siguientes criterios: I) homología, II) consistencia en la posición relativa, III) cobertura adecuada de la forma, IV) repetibilidad y V) coplanaridad. Se realizaron dos análisis uno que abarca a todo el organismo con 17 landmark (Fig. 9A, 9B) y el otro que es la región cefálica con 14 landmarks (Fig. 10A, 10B).

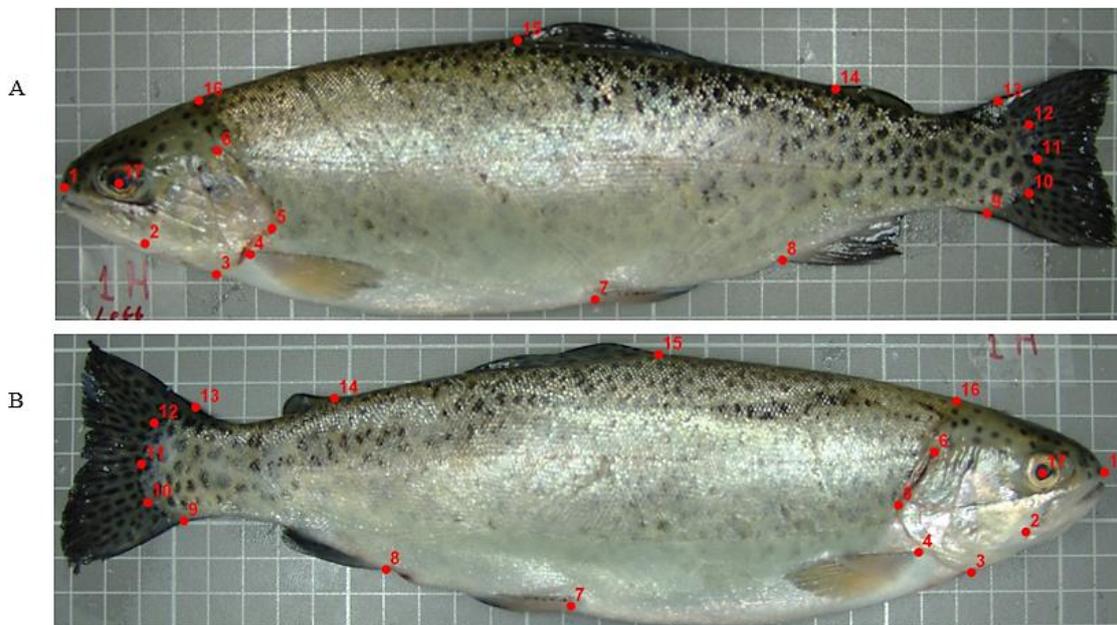


Figura 9: 17 landmarks en *Oncorhynchus mykiss* para todo el cuerpo, A) lado izquierdo, B) lado derecho.

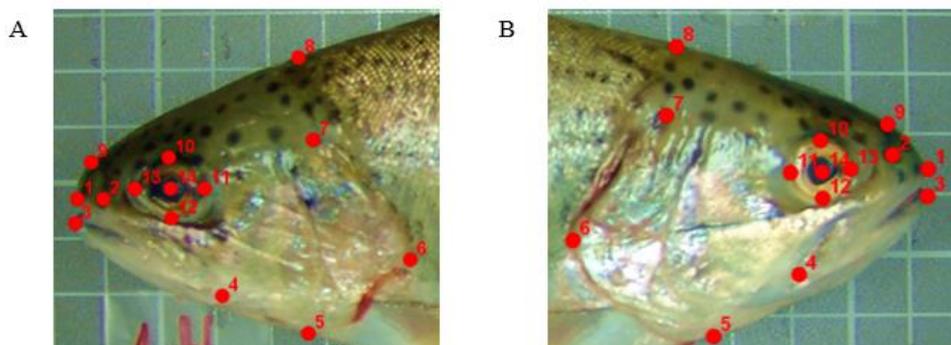


Figura 10: 14 landmarks en *Oncorhynchus mykiss* para la región cefálica, A) lado izquierdo, B) lado derecho.

6.5 Métodos morfométricos

6.5.1 Morfometría geométrica

Para describir la forma y su variación se digitalizaron landmarks, sobre las fotografías de las truchas, en el programa TPSDig2 y posteriormente la información sobre sus coordenadas fue trasladada al programa MorphoJ para llevar a cabo un superimposición procrustes (que incluye alineación, traslación y rotación) y la obtención de nuevas variables llamadas Deformaciones Parciales (PW por sus siglas en inglés) y Deformaciones Relativas (RW por sus siglas en inglés). El tamaño se describió de manera independiente a la forma considerando el cálculo del tamaño del centroide (CS por sus siglas en inglés). Además, se midió la LT con una cinta métrica y el peso de cada organismo con una balanza digital OHAUS.

6.5.2 Morfología branquial

Los valores estadísticos para la morfología branquial se obtuvieron de tres secciones: la zona medial (M), proximales (C), distales (L), una vez ubicadas estas secciones se procedió a obtener la longitud del arco branquial, se contó el número de filamentos por arco branquial.

Con el uso de ImageJ se obtuvo la longitud de los filamentos branquiales (L_{fil}) en tres diferentes secciones del arco branquial, que luego se multiplicó por el número de filamentos para obtener la longitud total del filamento

Para obtener la frecuencia lamelar ($2n_{lam}$) fue necesario contar cuantas lamelas hay por sección de filamento y multiplicarlo por 2. El área lamelar (A_{lam}) se obtuvo mediante el área de la superficie bilateral media, es decir, se obtuvo la longitud de la lamela y el radio lamelar en las diferentes secciones del arco branquial, el último dato se utilizó para sacar el área de un semicírculo, el cual se multiplicó por la longitud lamelar y todo el resultado por dos, por último, se realizaron las sumas correspondientes. Una vez obtenidos estos datos se procedió a obtener el área total de la superficie branquial ($A=L_{fil} \times 2n_{lam} \times A_{lam}$).

6.6 Factor de condición y relación longitud-peso (L-P)

Indicadores como la relación longitud-peso y el factor de condición de Fulton (K) permite obtener información sobre las estrategias de crecimiento, el estado nutricional y la reproducción, además de analizar cómo las condiciones ambientales de los ecosistemas acuáticos afectan a las poblaciones de peces (Leyton-Flor, 2015).

El Factor de condición de Fulton o K, es utilizado para comparar la "condición" o "bienestar" de un pez o población, basándose en que los peces de mayor peso, a una determinada longitud, presentan una mejor condición (Cifuentes *et al.*, 2012). El factor de condición de Fulton (K) se calculó en base a la formula:

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

Donde:

K es factor de condición de Fulton

W es peso

LT es longitud total.

La Relación longitud peso (L-P) es utilizada con frecuencia para modelar las tendencias de la biomasa basados en la talla, es decir, obtener información de la condición de crecimiento de los peces y así determinar si el crecimiento somático es isométrico (el peso y longitud crecen en la misma proporción con el tiempo) o alométrico (el peso y la longitud no se incrementa en proporción al tiempo) (Cifuentes *et al.*, 2012, Ubilla *et al.*, 2016, De La Hoz, 2018).

Está relación se estimó mediante la ecuación de alometría de Ricker (1975): $W=a(LT^b)$

Donde:

W es el peso total en gramos

LT la longitud total del pez en centímetros

a es la ordenada de origen

La pendiente **b** se utiliza para describir el tipo de crecimiento que exhibe el individuo.

Se considera crecimiento isométrico si $b=3$, si $b>3$; el crecimiento se considera alométrico positivo que es un aumento progresivo de la robustez desde formas tempranas más elongadas o delgadas, hay una mayor ganancia proporcional en peso que en longitud, y será alométrico negativo si $b<3$ son especies en la que individuos de mayor talla son más elongados que los pequeños (Ubilla *et al.*, 2016, De La Hoz, 2018).

6.7 Análisis estadístico

Las nuevas variables fueron analizadas en dos programas MorphoJ y Statgraphics. En MorphoJ se realizó el análisis de Procrustes, se generó una matriz de covarianza y un Análisis de Componentes Principales (por sus siglas en inglés PCA) que representa a las Deformaciones Relativas (RW por sus siglas en inglés), posteriormente se realizó un Análisis de Variables Canónicas (CVA). En Statgraphics los scores de PCA o RWA se utilizaron para comparar la morfología entre las dos poblaciones de truchas aplicando un ANOVA simple.

Se realizó un análisis de cuadrados Mínimos Parciales para dos bloques (Partial Least squares, PLS por sus siglas en inglés) para analizar covariación entre dos juegos de variables (bloques), en este caso de variables de forma, para ver si hay casos de simetría en la variación de la cabeza (ambos lados) y el cuerpo (ambos lados). Además, se ejecutaron 10000 pruebas de permutación para obtener más precisión en el cálculo de los niveles de significancia de la hipótesis nula de completa independencia para el coeficiente RV, una medida global de asociación para los valores singulares asociados con cada par de ejes PLS.

Por último, se realizó un análisis de regresión lineal simple para determinar los parámetros α/a y b/β entre las variables L y P para determinar el tipo de crecimiento isométrico o alométrico y un ANOVA para comparar pendientes de líneas de regresión entre sitios.

7. Resultados

Se colectaron en total 10 organismos de la LS y 8 organismos de la GC. Se tomaron fotografías de todos los organismos en su región corporal lado izquierdo, región corporal lado derecho, región cefálica lado izquierdo y región cefálica lado derecho. Y se tomaron las medidas correspondientes (ver Cuadro 8)

Cuadro 8: Longitud total (LT), Peso (P), Edad (donde D es desconocido), Sexo para ambas poblaciones, 1= Granja, 2=Laguna del Sol

ID	Sitio	Sexo	Peso (gr)	Número de filamentos	Edad años	Longitud Total (cm)
GC_01	1	M	312.7	143	1	28.2
GC_02	1	M	284	178	1	29
GC_03	1	M	362	168	1	29.9
GC_04	1	M	252.5	159	1	27.8
GC_05	1	H	278.9	150	1	26.7
GC_06	1	M	259.9	168	1	28
GC_07	1	H	294.3	158	1	26.8
GC_08	1	M	313.9	149	<1	28
LS_01	2	H	266.3	181	1	32.0
LS_02	2	M	322	152	2	29.9
LS_03	2	H	255.1	171	2	28.5
LS_04	2	H	239.9	174	1	27
LS_05	2	M	526.4	161	3	33.7
LS_06	2	H	357.9	169	3	33.5
LS_07	2	H	296.8	177	3	29.5
LS_08	2	H	256.8	187	3	26.5
LS_09	2	M	298.4	184	1	31.8
LS_10	2	M	371.8	186	4	31.6

7.1. Morfometría geométrica de región corporal

7.1.1. Lado izquierdo

Se obtuvieron 17 RW (Para más detalle sobre el análisis de RW ver anexo 1), la RW 1 representó el 31.733% de variación y para el RW 2 representó 24.845% de la variación, sobre esto se realizó un ANOVA simple para el RW1, se encontró que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las dos poblaciones ($F=27.20$, $t=5.2158$, $gl=1$, $P=0.00008$).

La mayoría de los cambios del cuerpo se encuentran en la aleta dorsal (LM 15) muy marcado, en la aleta anal, y un ligero cambio en la aleta pélvica y la aleta adiposa. En la cabeza los cambios son principalmente en el opérculo (ver Fig. 11).

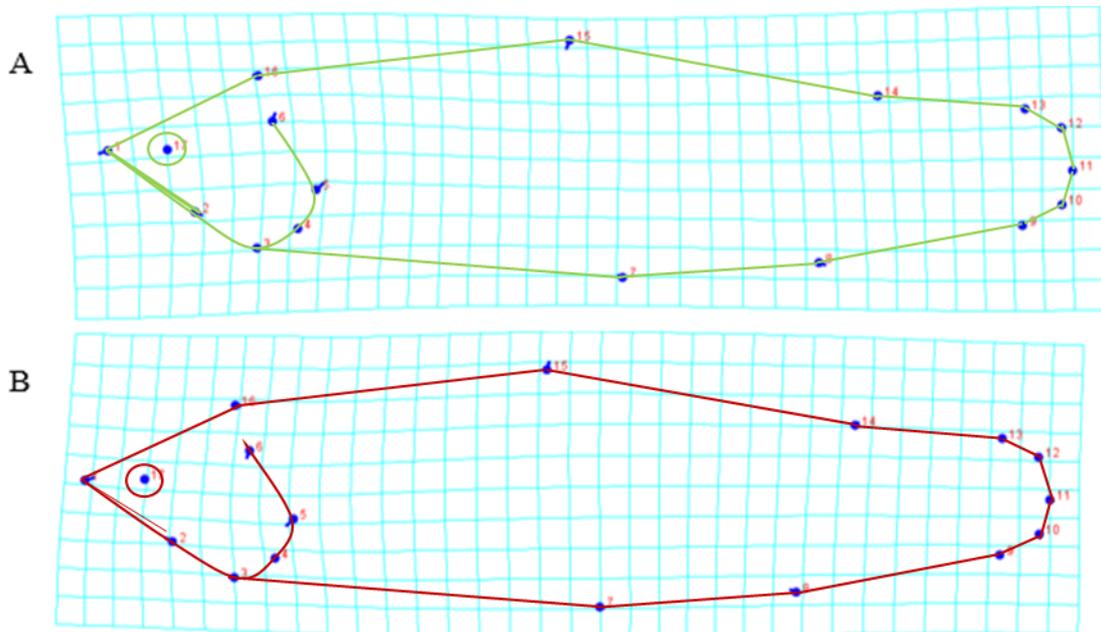


Figura 11: Cuadrícula del lado izquierdo de *Oncorhynchus mykiss*. A) movimientos de los landmarks para LS, B) movimientos de los landmarks para GC

En cuanto a la forma consenso para los peces pertenecientes a la LS se muestra un cuerpo elongado anteroposteriormente, el opérculo se observa angular, el vector de la boca es más pronunciado dando a la cabeza una forma triangular, esta sección la podemos ver como un cono oblicuo y por último hay una mayor distancia entre el hocico y el ojo. Con respecto a la forma consenso el LM 15 se recorrió ventralmente, mayor distancia entre el LM 7 y LM 8, el LM 1 está más alejado del LM 17 (Fig. 11A).

En cuanto a la forma consenso para los peces pertenecientes a la GC se muestra un cuerpo elongado dorsoventralmente, la cabeza presenta una forma más trapezoide y hay una menor distancia entre el ojo y el hocico. Con respecto a la forma consenso el LM 15 se recorre dorsalmente, el LM 8 se recorre anteriormente, el LM 6 y el LM 5 se encuentran más próximos (ver Fig. 11B).

El cuerpo del individuo para RW1 es un ovalo horizontal, presenta una elongación del opérculo, el hocico es antero-distal y la cabeza triangular. Para el RW2 el cuerpo es ovoide, el opérculo se presenta más antero-proximal, la cabeza es trapezoide y el hocico se observa dorso-proximal. Se puede observar que la forma de la LS tiende más al RW1 y la forma de la GC tiende más al RW2 (ver Fig. 12).

Se utilizó el tamaño del centroide, como el valor que indica la medida real del tamaño de los individuos. Existen diferencias significativas en las medias del tamaño de las truchas ($t=2.38$, $P=0.029$) pero no en las varianzas ($F=1.27$, $P=0.77$) siendo más grandes las de LS.

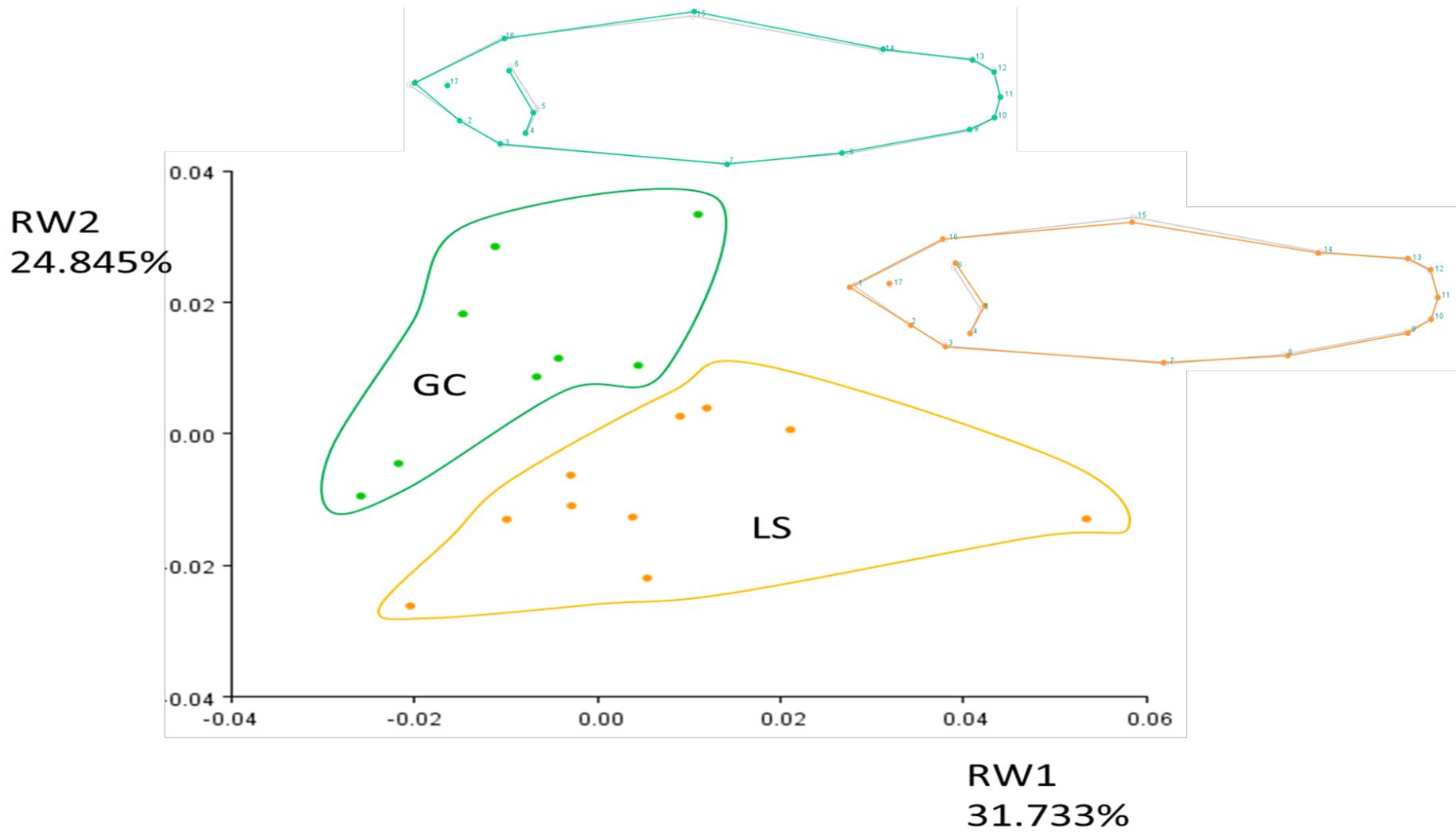


Figura 12: RW de *Oncorhynchus mykiss* lado izquierdo.

7.1.2. Lado derecho

Se obtuvieron 17 RW (Para más detalle sobre el análisis de RW ver anexo 2), la RW 1 represento el 33.008% de variación y para el RW 2 representó 21.618% de la variación sobre, esto se realizó un ANOVA simple para el RW1 y se encontró que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las dos poblaciones ($F= 25.06$, $t = 5.00553$, $gl= 1$, $P < 0.001$).

La mayoría de los cambios del cuerpo se encuentran en la aleta dorsal (LM 15), hay ligeros cambios en la aleta anal. En la cabeza los principales cambios son en el opérculo, en el hocico y un ligero movimiento en el ojo (ver Fig. 13).

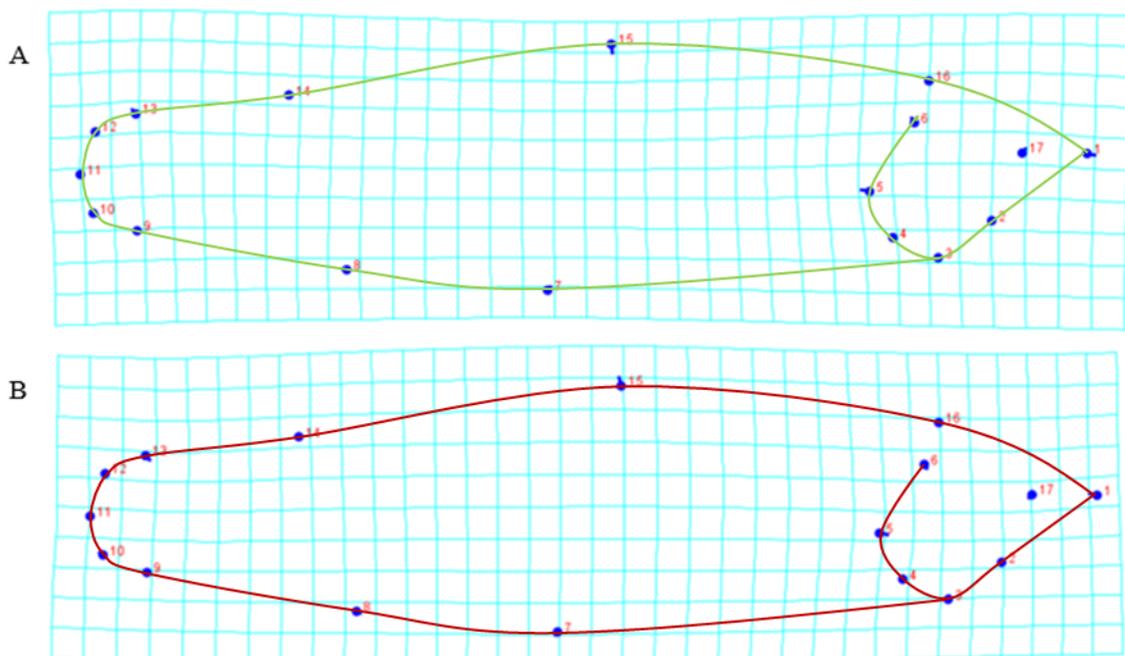


Figura 13: Cuadrícula del lado derecho de *Oncorhynchus mykiss*. A) movimientos de los landmarks para la localidad de la LS, B) movimientos de los landmarks para la localidad del GC

En cuanto a la forma consenso para los peces pertenecientes a la LS se muestra un cuerpo elongado anteroposteriormente, el opérculo se observa angular, el vector del hocico es más pronunciado dando a la cabeza una forma de un triángulo isósceles, en conjunto con el opérculo se puede ver como un trapecoide simétrico, por último, hay una mayor distancia entre el hocico y el ojo. Con

respecto a la forma consenso el LM 15 se recorrió ventralmente, encontramos mayor distancia entre el LM 7 y LM 8, el LM 1 está más alejado del LM 17 (ver Fig. 13A).

En cuanto a la forma consenso para los peces pertenecientes a la GC se muestra un cuerpo elongado dorsoventralmente, la cabeza presenta una forma de triángulo, el opérculo antero-proximal, por último, hay una menor distancia entre el ojo y la boca. Con respecto a la forma consenso el LM 15 se recorre dorsalmente, el LM 6 y LM 5 se encuentran más próximos (ver Fig. 13B).

El cuerpo del pez para el RW 1 es un ovalo horizontal elongado, se presenta elongación en el opérculo, el ojo tiene una dirección dorso-proximal y la cabeza es triangular. El cuerpo del pez para el RW 2 es un ovalo horizontal, el opérculo se encuentra antero-proximal, la cabeza es triangular y se observa que el ojo se ubica ventral-proximal. Se puede observar que la forma LS tiende más al RW1 y la forma GC tiende al RW2 (Fig. 14).

En cuanto al tamaño del centroide la comparación de medias ($t=0.11$, $P=0.91$) nos indica que no existen diferencias significativas en el tamaño medio, pero, si en las varianzas ($F=6.09$, $P=0.03$) entre ambas poblaciones de truchas para el lado derecho.

El análisis de PLS indicó que la hipótesis nula de completa independencia de las configuraciones de forma de ambos lados del cuerpo, se debe rechazar ($RV=0.79$, $P < 0.0001$), lo que significa que existe simetría en la variación de ambos lados del cuerpo. Coeficiente de asociación RV indica una correlación relativamente alta.

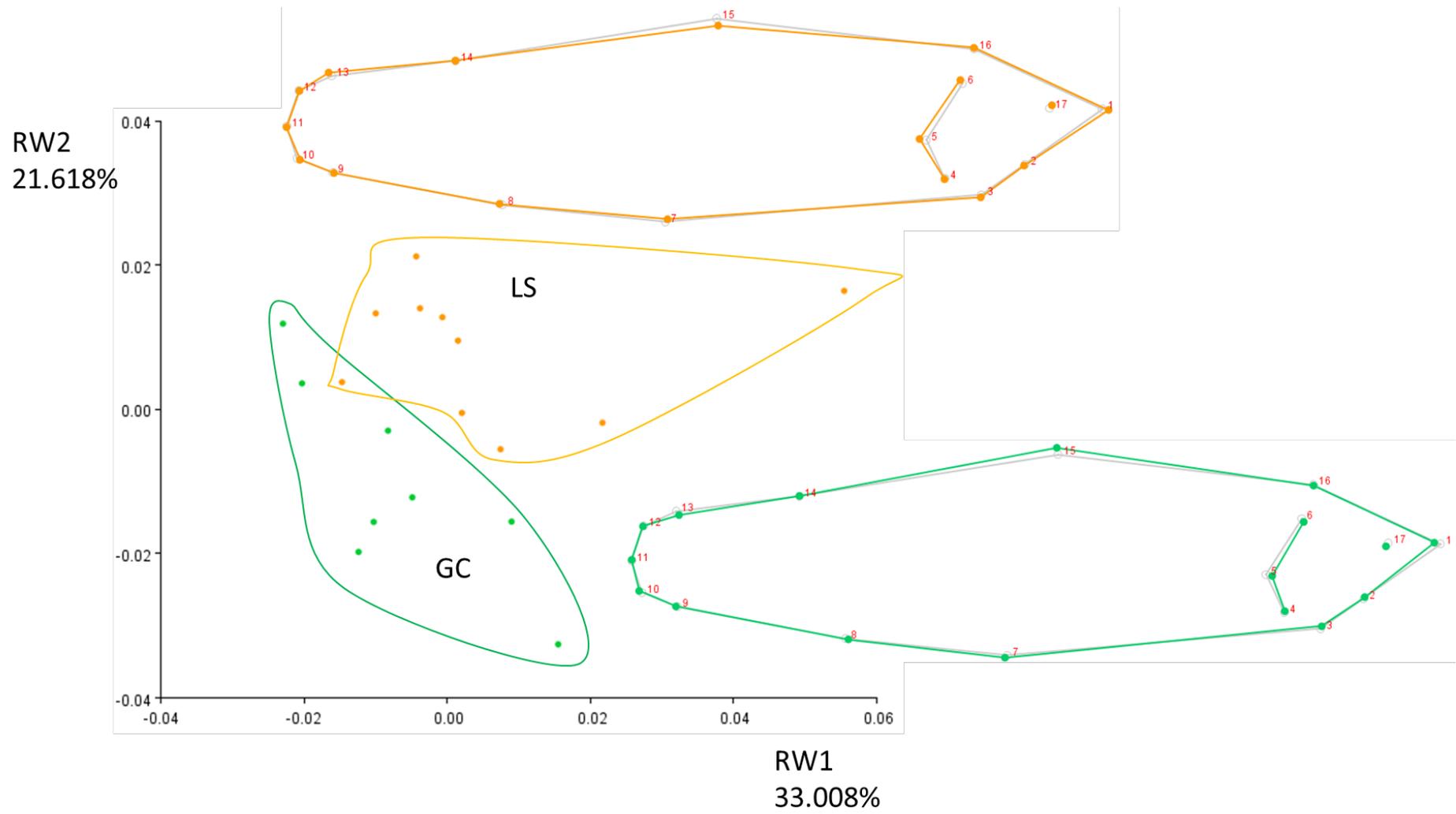


Figura 14: RW de *Oncorhynchus mykiss* lado derecho.

7.2. Región cefálica

7.2.1. Lado izquierdo

Se obtuvieron 17 RW (para más detalle sobre el análisis de RW ver anexo 3), la RW 1 representó el 44.776 % de variación y para el RW 2 representó 17.401 % de la variación, se realizó un ANOVA simple para el RW1y se encontró que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las dos poblaciones ($F= 10.70$, $t= -3.2717$, $gl= 1$, $P < 0.01$).

La mayoría de los cambios se encuentran en la LM8, en el opérculo (LM 6 y LM 5), en la maxila (LM4), por último, hay ligeros cambios en el ojo (ver Fig. 15).

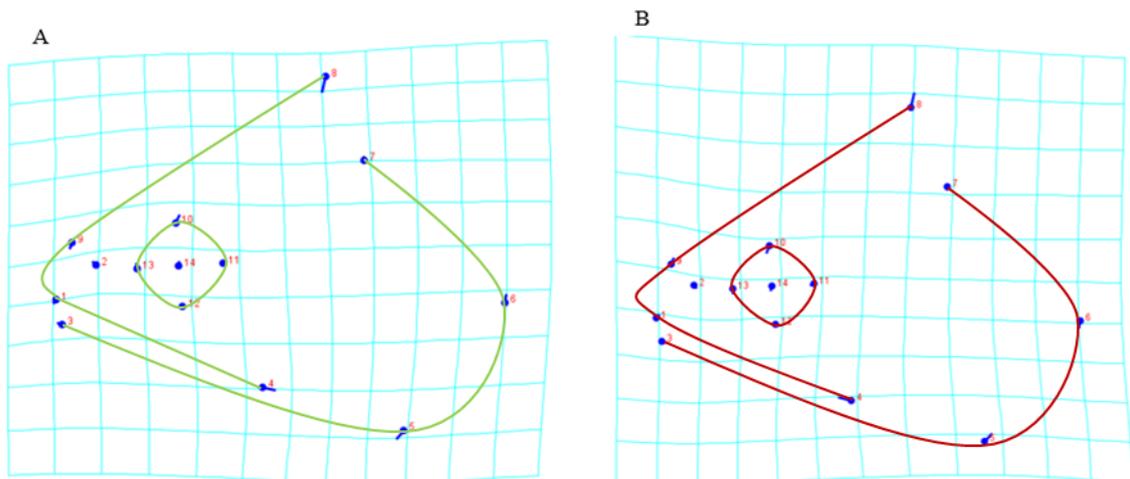


Figura 15: Cuadrícula del lado izquierdo de *Oncorhynchus mykiss*. A) movimientos de los landmarks para la localidad de la LS, B) movimientos de los landmarks para la localidad del GC

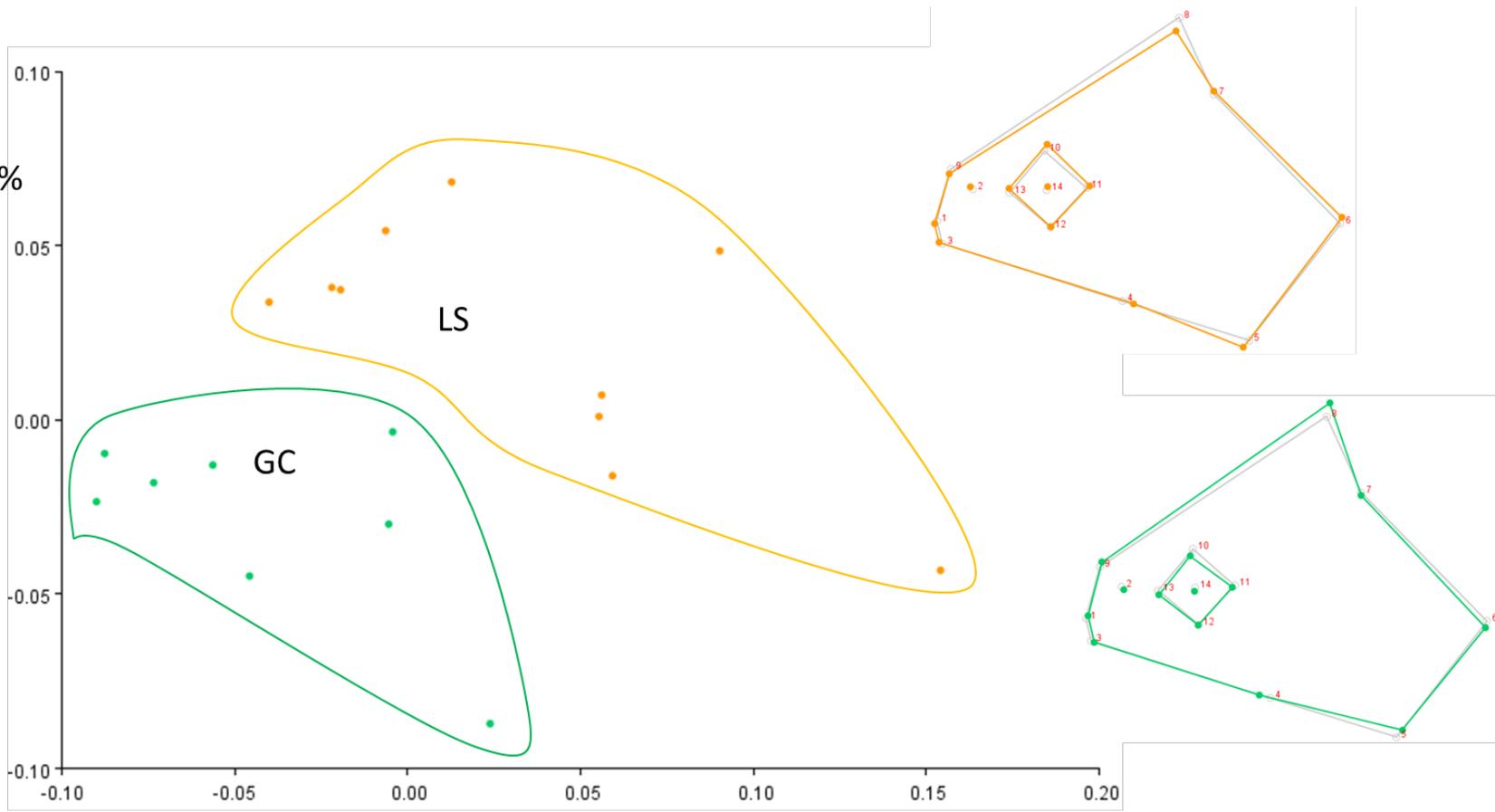
En cuanto a la forma consenso para los peces pertenecientes a la LS se muestra una cabeza elongada horizontalmente, el ojo es dorso-proximal, la maxila es elongada, por último, el opérculo presenta una mayor curvatura (Fig. 15A).

En cuanto a la forma consenso para los peces pertenecientes a la GC se muestra una cabeza elongada verticalmente, el ojo se encuentra en dirección ventral-proximal, la maxila más próxima al hocico y el opérculo se muestra con una menor cobertura (Fig. 15B).

La región cefálica para el RW1 se presenta elongada horizontalmente igual que el ojo, el hocico y la maxila son más distales entre ellos, la posición de la narina se ubica antero-dorsalmente, por último, el opérculo muestra una mayor proporción. Para el RW2 presenta una elongación vertical, mientras que el ojo muestra una cobertura menor, el hocico y la maxila son más próximos, la narina se recorre a una posición más ventral. Se puede observar que la forma LS tiende más al RW1 y la forma GC tiende al RW2 (Fig. 16).

En cuanto al tamaño del centroide la comparación de medias nos indica que sí existen diferencias significativas en el tamaño medio ($t=2.64$, $P=0.017$) y en las varianzas ($F=5.38$, $P=0.02$), siendo mayores las truchas de LS.

RW2
17.401 %



RW1
44.776%

Figura 16: PCA de *Oncorhynchus mykiss* lado izquierdo.

7.2.2 Lado derecho

Se obtuvieron 17 RW (Para más detalle sobre el análisis de RW ver anexo 4), la RW 1 representó el 35.104 % de variación y para el RW 2 representó 18.548 % de la variación, sobre esto se realizó un ANOVA simple para RW1 y se encontró que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las dos poblaciones ($F=10.99$, $t = -3.31451$, $gl= 1$, $P < 0.01$).

La mayoría de los cambios se encuentran en la altura de la cabeza LM 8, en el opérculo (LM 6 y LM 5), la maxila (LM 4) y hay ligeros cambios en el ojo (ver Fig. 17).

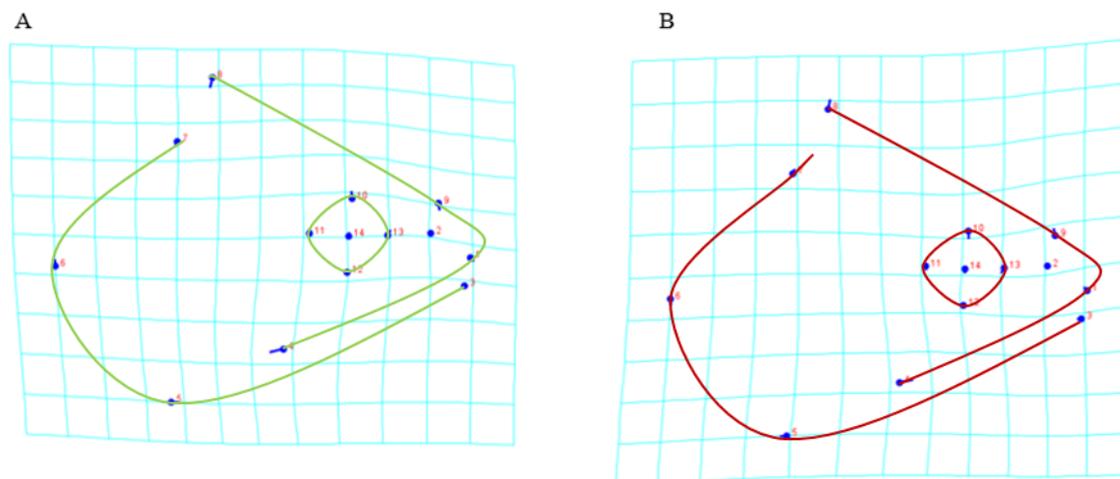


Figura 17: Cuadrícula del lado derecho de *Oncorhynchus mykiss*. A) movimientos de los landmarks para la localidad de la LS, B) movimientos de los landmarks para la localidad del GC

Al igual que el lado izquierdo la forma consenso para los peces pertenecientes a la LS presenta una cabeza elongada horizontalmente, el ojo es dorso-proximal, la maxila es elongada, por último, el opérculo presenta una mayor curvatura (Fig. 17A).

La población de la GC repite los mismos resultados que el lado izquierdo, es decir, se muestra una cabeza elongada verticalmente, el ojo se encuentra en dirección

ventral-proximal, la maxila más próxima al hocico y el opérculo se muestra con una menor cobertura (Fig. 17B).

La región cefálica para el RW1 muestra una cabeza prominente y menos extensa, el ojo se encuentra más elevado, igual que la narina, hay una mayor distancia entre la punta de la boca (LM 1 y LM 3) y la maxila (LM 4). El RW2 son cabezas altas y menos extensas, el ojo es más amplio, hay una menor distancia entre la punta de la boca (LM 1 y LM 3) y la maxila (LM 4), el opérculo es de mayor extensión. Se puede observar que la forma LS tiende más al RW1 y la forma GC tiende al RW2 (Fig. 18).

Lo mismo ocurre con los RW. La región cefálica para el RW1 se presenta elongada horizontalmente igual que el ojo, el hocico y la maxila son más distales entre ellos, la posición de la narina se ubica antero-dorsalmente, por último, el opérculo muestra una mayor proporción. Para el RW2 presenta una elongación vertical, mientras que el ojo muestra una cobertura menor, el hocico y la maxila son más próximos, la narina se recorre a una posición más ventral. Se puede observar que la forma LS tiende más al RW1 y la forma GC tiende al RW2 (Fig. 18).

En cuanto al tamaño del centroide la comparación de medias nos indica que si existen diferencias significativas en el tamaño medio de las truchas de este lado ($t=3.09$, $P=0.007$) y también existen diferencias entre las varianzas del tamaño entre poblaciones ($F=5.6$, $P=0.003$) siendo mayores las truchas de LS.

El análisis de PLS indicó que la hipótesis nula de completa independencia de las configuraciones de forma de ambos lados de la cabeza, se debe rechazar ($RV=0.55$, $P=0.0007$), lo que significa que existe simetría en la variación de ambos lados de la cabeza. Aunque el coeficiente de asociación RV indica una correlación baja.

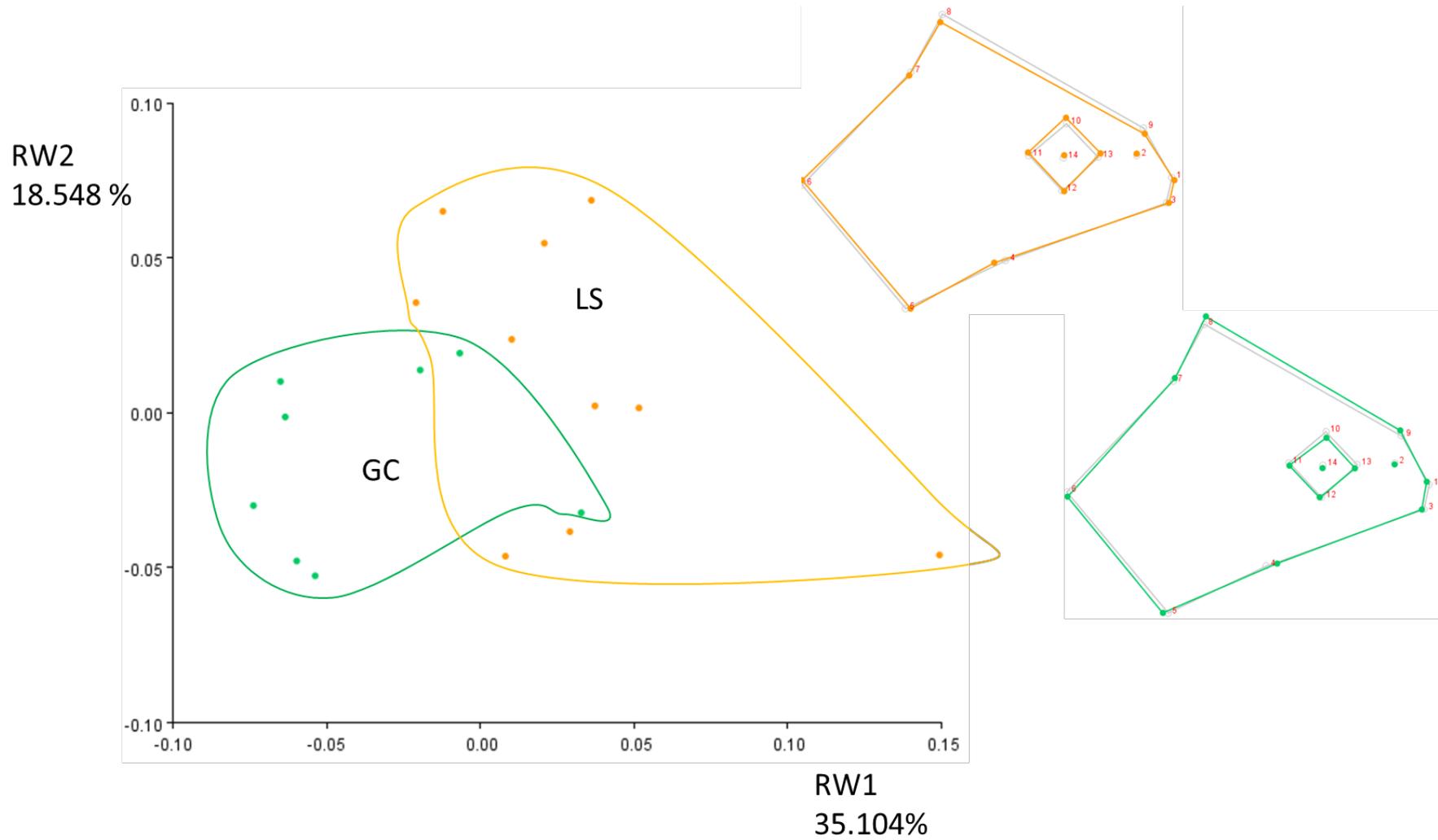


Figura 18: PCA de *Oncorhynchus mykiss* lado derecho.

7.3 Morfología branquial

En el Cuadro 9 se registraron los valores obtenidos para longitud total, número de filamentos, longitud total del filamento, número total de lamelas por filamento, área de la superficie branquial, entre otras. De cada uno de estos parámetros se obtuvo su media aritmética total y la desviación estándar por cada sitio.

Como podemos observar los resultados con mayor valor los encontramos en la LS, en este sitio se presentan organismos con mayor número de filamentos, por ende, presentan un arco branquial más grande, además podemos observar que la longitud total de los filamentos presentan un mayor valor a comparación de la GC.

Cuadro 9: Media y desviación estándar obtenida para diferentes aspectos de la morfología branquial en ambas poblaciones ($\bar{X} \pm E.E$).

Sitio	Peso (gr)	LT*cm	Número total de filamentos	LTF* cm	Distancia del arco branquial cm	LR* sección posterior cm
LS	319.14 ± 85.13	30.4 ± 2.53	174.2 ± 11.34	236.715 ± 33.86	1.5993 ± 0.24	0.2171 ± 0.16
GC	294.775 ± 35.00	28.05 ± 1.05	159.125 ± 11.71	189.998 ± 19.88	1.36813 ± 0.29	0.100875 ± 0.038

Sitio	LR* sección anterior cm	LR* sección media cm	2nlam*	Alam*	A*	Longitud del arco branquial cm
LS	0.126 ± 0.08	0.5319 ± 0.05	1374.6 ± 201.28	2.72031E-06 ± 2.16176E-6	82.0264 ± 76.7073	4.6726 ± 0.639671
GC	0.146875 ± 0.06	0.4695 ± 0.07	1155.88 ± 245.57	3.72044E-06 ± 2.32307E-06	73.5074 ± 60.6592	4.1065 ± 0.327997

*LT (longitud total), *LTF (longitud total del filamento), *LR (longitud del raker), *2nlam (frecuencia lamelar), *Alam (área lamelar), *A (área de la superficie branquial)

A los datos obtenidos se les aplicó; ANOVAS de dos vías. Se obtuvo tres diferentes comparaciones: por sexo, por sitio, por interacción. En el Cuadro 10 podemos observar que para los valores de NTF, NoF, LTF, FqL, LAB, Edad, $W=aL^b$, K de Fulton si existe una diferencia estadísticamente significativa solamente en la comparación por sitio. Para el valor de LT (cm) se encontró que existe una diferencia estadísticamente significativa tanto en la comparación de sexo como sitio. Para el valor de Peso (gr) se encontró que existe una diferencia estadísticamente significativa en la comparación de sexo. Mientras que los valores DAB, Alam y ATSB no existe diferencia estadísticamente significativa.

Podemos observar que para NTF, NoF, FqL, y K existe una diferencia estadísticamente significativa entre las hembras de ambos sitios (Cuadro 10), en las gráficas podemos observar que las hembras de cada sitio se encuentran separadas entre ellas (ver Fig. 19).

Para LTF, LAB, LT y Edad se encontró que existe una diferencia estadísticamente significativa entre los machos de ambos sitios (Cuadro 10), en las gráficas podemos observar que los machos se encuentran más distantes entre ellos (ver Fig. 19).

Para la variable de Peso se encontró que existen diferencias estadísticamente significativas entre los machos y las hembras de sitio de la laguna del sol (Cuadro 10, Fig. 19). Para la variable W se encontró que existen diferencias estadísticamente significativas entre los machos de los diferentes sitios y entre las hembras de los diferentes sitios (Cuadro 10, Fig. 19).

Para DAB, Alam y ATSB no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los sexos de los diferentes sitios.

Cuadro 10: Muestra los valores obtenidos por ANOVAS de dos vías y prueba de Tukey's donde se compara por sexo y sitio.

Variable	Comparación	F	P	G.L.	Tukey's Post-Hoc Comparación		P
Número Total de filamentos (NTF)	Sexo	0.02298	0.8817				
	Sitio	6.038	0.02766	1, 17	H-G	H-LS*	0.06238
	Interacción	1.039	0.3253				
Número de Filamentos por Sección (NoF)	Sexo	0.02298	0.8817				
	Sitio	6.038	0.02766	1, 17	H-G	H-LS*	0.06238
	Interacción	1.039	0.3253				
Longitud Total de Filamento LTF (mm)	Sexo	2.875	0.1121				
	Sitio	17.66	0.0008855	1, 17	M-G	M-LS*	0.005289
	Interacción	0.5364	0.476				
Frecuencia Lamelar (FqL)	Sexo	2.506	0.1357				
	Sitio	20.11	0.0005146	1, 17	H-G	H-LS*	0.04154
	Interacción	0.1036	0.7523				
Longitud del Arco Branquial (LAB)	Sexo	3.348	0.08865				
	Sitio	8.282	0.01216	1, 17	M-G	M-LS*	0.04401
	Interacción	0.4182	0.5283				
Peso (gr)	Sexo	4.87	0.04454		M-LS	H-LS*	0.04601
	Sitio	2.509	0.1355	1, 17			
	Interacción	2.124	0.167				
LT (cm)	Sexo	4.685	0.04821				
	Sitio	10.48	0.005964	1, 17	M-G	M-LS*	0.04041
	Interacción	0.07034	0.7947				
Edad	Sexo	0.02454	0.8778				
	Sitio	10.31	0.006279	1, 17	M-G	M-LS*	0.02631
	Interacción	0.4362	0.5197				
W=aL^b	Sexo	2.153	0.1644				
	Sitio	277	1.28E-10	1, 17	M-G*	M-LS	3.85E-09
	Interacción	1.382	0.2594		H-G*	H-LS	2.35E-07
K de Fultón	Sexo	0.2336	0.6363				
	Sitio	7.003	0.01917	1, 17	H-G*	H-LS	0.01827
	Interacción	2.702	0.1225				

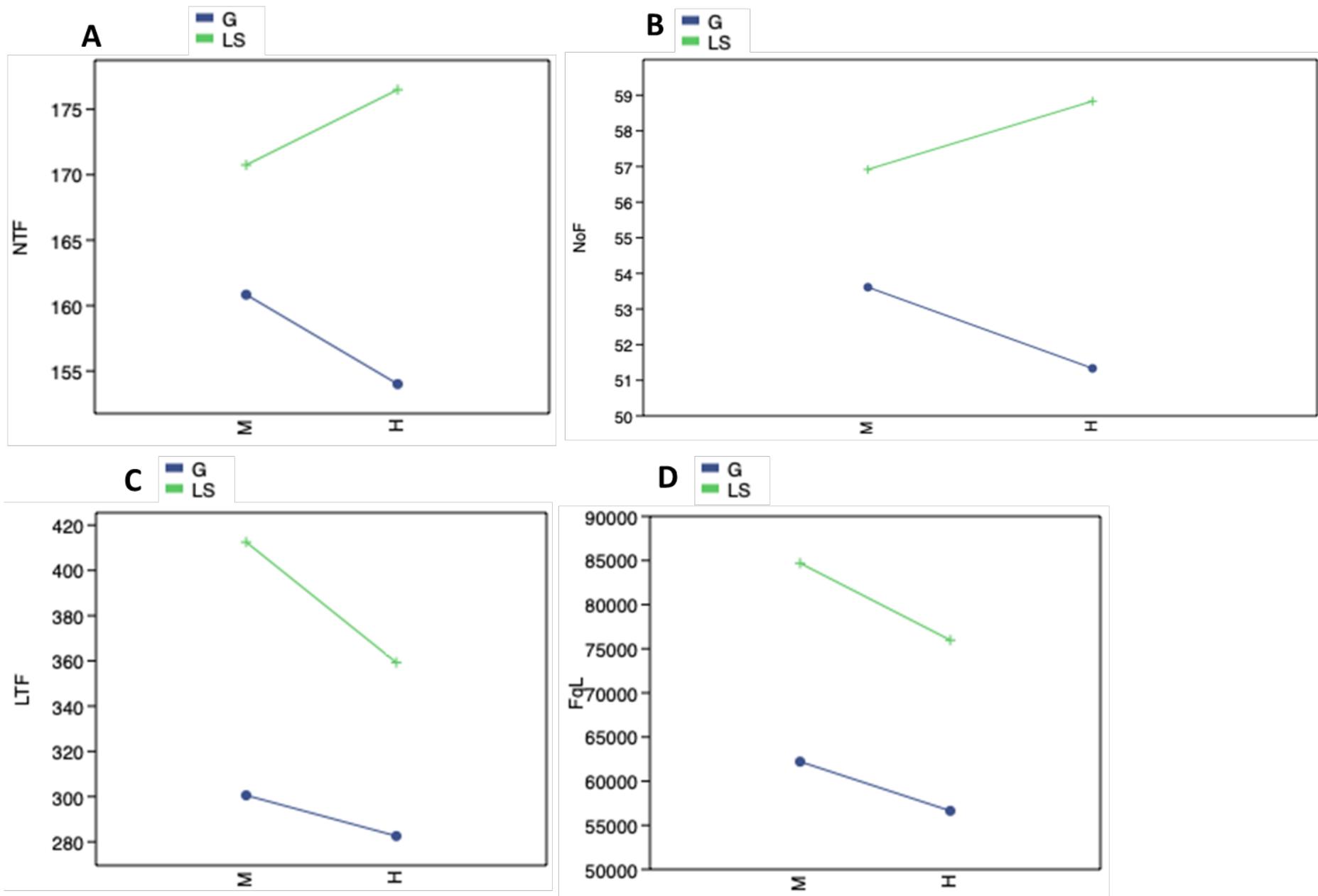


Figura 19: Grafica de Tukey's Post-Hoc para la comparación entre sexos y por sitios.

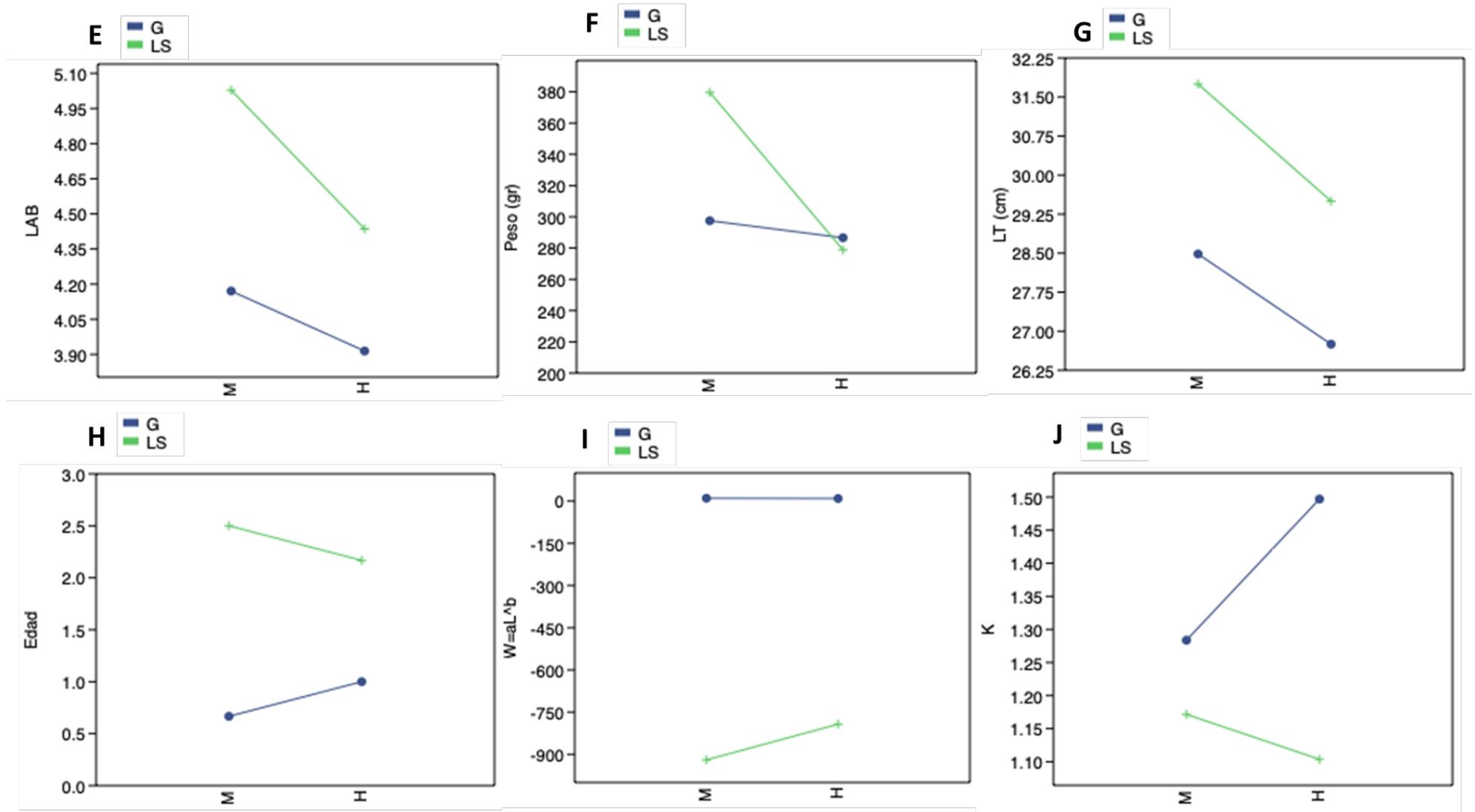


Figura 20: Grafica de Tukey's Post-Hoc para la comparación entre sexos y por sitios.

7.4 Factor de Condición de Fulton y Relación L-P (longitud-peso)

Mediante el uso de Past4 se obtuvo la relación longitud-peso, para la LS se obtuvo $\alpha = -0.629$ y $\beta = 2.107$ y para la GC se obtuvo $\alpha = 0.037$ y $\beta = 1.6785$, en ambos casos se tiene un crecimiento alométrico negativo ya que $b < 3$. También se realizó una comparación lineal y regresión, entre la GC y LS se obtuvo que no hay diferencia significativa en la relación longitud-peso ($F = 0.066$, $gl = 1$, $P = 0.80$).

Para la condición de Fulton o K se obtuvo en LS $K = 1.1307$ y para GC fue una $K = 1.3370$, además de que si existe diferencia significativa en el factor de condición de Fulton entre ambas poblaciones ($t = 2.5703$, $gl = 1$, $P = 0.020$) (Ver Anexo 5).

8. Discusión

Los peces de agua dulce, principalmente agua dulce templada han demostrado ser excelentes taxones para estudiar el proceso de radiación adaptativa (Keeley *et al.*, 2007), además, la identificación de poblaciones es un campo interdisciplinario que implica el reconocimiento de componentes autosostenibles dentro de las poblaciones y es un tema central en la ciencia y la gestión pesqueras (Faccenda *et al.*, 2011).

La forma del cuerpo es un rasgo difícil, pero importante, de cuantificar. Los patrones de variación morfométrica en la trucha arco iris, y en general en los peces, indican diferencias en las tasas de crecimiento y maduración porque la forma del cuerpo es producto de la ontogenia (Faccenda *et al.*, 2011).

8.1. Región corporal.

Con la morfometría geométrica se demostró que las poblaciones son diferentes. La población de LS muestra peces más alargados, con una mandíbula más grande y un opérculo de mayor tamaño. Mientras que en GC son peces más robustos y con una mandíbula más reducida al igual que el opérculo. Como si estos últimos se enfocaran más en la acumulación de masa corporal, lo cual se puede explicar, ya que están en una granja para su cultivo y su posterior consumo.

Keeley y compañía (2007) indican que los salmónidos de aguas corrientes o ambientes de arroyos normalmente tienen características morfológicas más grandes que aquéllos de hábitats con agua en movimiento más lento, lo que explicaría la diferenciación en cuanto a tamaños y formas.

Al igual que en el estudio de Faccenda y colaboradores (2011) la trucha arco iris parece más corta y rechoncha, al igual que en la GC, la población de la LS muestra la forma más hidrodinámica, Jiménez-Prado y Aguirre (2021) mencionan que la forma corporal de los peces varía mucho y las diferencias suelen reflejar funciones

ecológicas divergentes en el uso del hábitat, o como respuesta a estresores ambientales.

8.2. Región cefálica

Con respecto a la cabeza también se observan diferencias, para la LS se muestran menos cabezonas y alargadas, una mandíbula alargada, la posición de la boca se encuentra más central, mientras que en la GC se muestran más cabezonas, una mandíbula más pequeña, la boca tiene una dirección más dorsal, dando a entender que comen de la superficie. El tamaño máximo de la presa (alimento), está limitado por tamaño del hocico de los peces (Keeley *et al.*, 2007)

Un gran número de especies de peces de agua dulce no tienen un régimen alimentario estricto, dado que los recursos tróficos disponibles pueden variar a lo largo del año, dando como resultado que éstos presenten versatilidad funcional en las estructuras utilizadas en la adquisición de energía, de acuerdo al hábito que han adquirido (Sánchez *et al.*, 2003).

La forma y estructura del hocico está cercanamente relacionada con los modos de alimentación y hábitos de los peces, siendo altamente variable. Peces con hocico pequeño, muestran preferencia por tipos de alimento pequeño (Zárate-Hernández *et al.*, 2007). Cuando el hocico es ligeramente dorsal indica que se alimentan de organismos cerca de la superficie del agua (Salinas-Torres, 2011).

Se puede asumir que los hábitos alimenticios de los peces de la CG limnéticos con preferencia a la superficie, debido a que son alimentados con pellets lo que explica la posición del hocico (superior) y el tamaño de la mandíbula, mientras que los peces de la LS al no ser alimentados tienden a buscar su alimento sobre la columna de agua, mostrando una posición terminal en el hocico. Retomando a Garduño-Paz (2009), Torres (2018), registran que los peces pos-glaciales muestran especializaciones tróficas: 1) Boca superior, cuando la apertura de la boca de los peces está orientada hacia el plano superior, se alimentan de ítems que están sobre ellos en la columna de agua o en la superficie, 2) Boca terminal, alimentarse tanto de ítems que estén por encima como por debajo de ellos,

algunas formas limnéticas mejor adaptados al consumo de zooplancton, tienen un cuerpo alargado, delgado.

8.3 Morfología branquial

Cuando las áreas branquiales son más grandes en peces de agua dulce a menudo se asocian con la vida en hipoxia o diadromía (Wegner, 2011), lo que podría explicar porque los organismos de la LS presentan un mayor tamaño, ya que la cantidad de oxígeno en LS es de 5 mg/L; mientras que el rango óptimo es de 8-10 mg/L en organismos adultos.

Como ya sabemos las poblaciones se encuentran a diferentes altitudes, siendo la población de la LS la que está a mayor altitud, así mismo esta población presente la morfología branquial con los mayores valores, al no ser una población que presente diadromía, debido a que en su habitan no hay salidas que permitan la migración, podemos suponer que esta característica de que presenten un aumento en la morfología branquial se debe a la hipoxia en la que se ven sometidas.

9. Conclusión

Con todo lo anterior se establece que, si se cumple la hipótesis alterna de que existe una diferencia entre las poblaciones morfológicamente, Keeley y colaboradores (2007) indican que las diferencias morfológicas entre las poblaciones de trucha arco iris tienen una base genética y pueden representar características adaptativas localmente, con lo anterior podemos decir que se está haciendo presente la plasticidad fenotípica de la especie, al permitir su supervivencia en la LS, manifestándose en la forma del cuerpo y las branquias.

Por otra parte, los peces pertenecientes a la población de la GC presentan características evidentes de peces de una granja acuícola, es decir, la posición del hocico y la forma del cuerpo, ya que principalmente este último cumple un fin la engorda para su consumo. Con respecto a la población de la LS hay varios aspectos que se desconocen, por ejemplo: de que se alimentan, disponibilidad de oxígeno presente en diferentes horarios, entre otros.

En este estudio se puede considerar como la base para un posterior proyecto de ecomorfología de esta especie para la Laguna del Sol, ya que logramos discernir hay plasticidad haciéndose presente.

10. Bibliografía

- Abadía-Cardoso, A., García-De-León, F., Garza, J. (2016). Historia evolutiva y biodiversidad genética de las truchas de la Sierra Madre Occidental. In (pp. 29).
- Adams, D. C., Rohlf, F. J., Slice, D. (2013). A field comes of age: geometric morphometrics in the 21st century. 24(1), 7.
- Adams, D. C., Rohlf, F. J., Slice, D. (2004). Geometric morphometrics: ten years of progress following the 'revolution'. 71(1), 5-16.
- Agrotendencia.tv (2019) Cultivo de trucha. Recuperado de <https://agrotendencia.tv/agropedia/cultivo-de-la-trucha/>
- Al-Jandal, N. J., Wilson, R. W. (2011). A comparison of osmoregulatory responses in plasma and tissues of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) following acute salinity challenges. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 159(2), 175-181. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2011.02.016>
- Alcocer, J., Oseguera, L., Escobar, E., Peralta, L., Lugo, A. (2004). Phytoplankton Biomass and Water Chemistry in Two High-Mountain Tropical Lakes in Central Mexico. *Arctic Antarctic and Alpine Research - arct antarct alp res.* 36. 342-346.
- Almodóvar, A., Dirección General de Conservación de la Naturaleza, Museo Nacional de Ciencias Naturales, 2nd Ed. Madrid. (2002). La trucha común hacia una nueva estrategia de conservación. 303-311.
- Aquamaps (s.f.) Native Range Map for *Oncorhynchus mykiss*. Recuperado de: http://www.obis.org.au/cgi-bin/cs_map.pl

- Arredondo-Figueroa, J. (1983). Especies animales acuáticas de importancia nutricional introducidas en México. *Biótica*, 8, 175-199.
- Arregui, L. (2013). El cultivo de la trucha “arco iris” (*Oncorhynchus mykiss*). In: Fundación Observatorio Español de Acuicultura. Madrid-España.
- A.H.P.L (2012) カレンダー. Recuperado de: <https://ameblo.jp/ahpl/entry-11397146425.html>
- Bajjaliya, F., Titus, R., Ferreira, J. R., Coleman, R. (2015). Morphometric variation among four distinct population segments of California steelhead trout. *California Fish and Game*, 100, 703-726.
- Caballero Javierre, P. (2013). Biología y ecología del salmón atlántico (*Salmo salar*) y el reo o trucha de mar (*Salmo trutta*) en Galicia. *Mol* (Science Society of Galicia), 12.
- Cifuentes, R., González, J., Montoya, G., Jara, A., Ortíz, N., Piedra, P., Habit, E. (2012). Relación longitud-peso y factor de condición de los peces nativos del río San Pedro (cuenca del río Valdivia, Chile). *Gayana* (Concepción), 76(Supl. 1), 86-100.
- CONABIO (s.f.) 66. Lagos cráter del nevado de Toluca. Recuperado de http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/rhp_066.html
- Contreras Alvarado, M. (2012). Los inicios de la piscicultura en México: actores y redes (1883-1892).
- Cuna, E., (2015) Registro de cambios ambientales en dos lagos de alta montaña en México con base en sus algas modernas y fósiles. Posgrado en Ciencias Biológicas. Tesis Doctoral, Posgrado en Ciencias Biológicas, Universidad Nacional Autónoma de México.

- Cuna, E., Caballero, M., Zawisza, E., Ruiz, C. (2015). Historia ambiental de un lago alpino en el centro de México. 106.
- De-La-Oliva, G. (2011). Manual de buenas prácticas de producción acuícola en el cultivo de trucha arco iris. 20.
- De-La-Hoz-Maestre, J. (2018) Relación Longitud peso en peces. Recuperado de: https://rstudio-pubs-static.s3.amazonaws.com/366409_95783282afc44aa0b0453a031666e2d8.html#modelo_longitud-peso
- De-León, F. J. G., Mamet, L. N. G., Jaramillo, M. D. C. R., Márquez, F., Luna, A. R. (2018). Dimorfismo sexual y periodo reproductivo de la trucha dorada mexicana, *Oncorhynchus chrysogaster* en los ríos Fuerte, Sinaloa y Culiacán.
- De Pesca, I. N. (2018). Acuicultura Trucha arcoíris. gob.mx. Recuperado de <https://www.gob.mx/inapesca/acciones-y-programas/acuicultura-trucha-arcoiris>
- Dimas-Flores, N., Alcocer, J., Ciro, J. (2008). The Structure of the Zooplankton Assemblages from Two Neighboring Tropical High Mountain Lakes. *Journal of Freshwater Ecology*. 23. 21-31.
- Doadrio, I. (Ed.). (2002) Atlas y Libro Rojo de los Peces Continentales de España. Dirección General de Conservación de la Naturaleza.
- Duque, D. A. S., Holguín, J. P., Estrella, A., Martínez, G. L. J. C. (2019). Mejoramiento de la calidad en la carne de la trucha arcoíris mediante la técnica de sacrificio Ikejime: caso Ecuador. 26(1), 11.
- Duran, J. A. P. (2015). Variación fenotípica entre ensamblajes de linajes del salmón Chinook en la Patagonia. Universidad Austral de Chile

- Escalante, M., García-De-León, F., Dillman, C., Camarillo, A., George, A., Barriga, I. (2016). Introgresión genética de la trucha arcoíris exótica en poblaciones de trucha dorada mexicana. In (pp. 125-136).
- Estrada, L. (2016). Efecto de la salinidad en el crecimiento de crías de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*).
- Faccenda, F., Riccardo, B., Parisi, G., Lunelli, F. (2011). Geometric morphometrics: a method for Rainbow trout stocks identification in aquaculture. 10.13140/RG.2.2.34738.61121.
- Fenkes, M., Shiels, H. A., Nudds, R. (2018). Body shape and robustness response to water flow during development of brown trout *Salmo trutta parr.* 93(2), 360-369.
- Ferriz, R. A., Iwaszkiw, J. M. (2016). Alimentación de *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum, 1792) en el Arroyo Sacanana, Chubut, Argentina.
- Flores-Toledo, M. A. (2018). La plasticidad fenotípica no explica diferencias inter-cuencas en las respuestas conductuales de *Smicridea annulicornis* a la conductividad eléctrica del agua.
- Franco-Maass, S., Osorio-García, M., Nava-Bernal, G., Regil-García, H. (2009). Evaluación multicriterio de los recursos turísticos: Parque Nacional Nevado de Toluca-México. 18 (2), 208-226.
- Gallego, A., Carrillo, R., García, D., Sasso, L., Guerrero, J., Carrillo, R., Burrola, C. (2007). Programa maestro, Sistema producto trucha del estado de México. 135.
- García-Mondragón, D., Gallego-Alarcón, I., Espinoza-Ortega, A., García-Martínez, A., Arriaga-Jordán, C. (2016). Desarrollo de la producción de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) en el Centro de México. (38).

- Garduño-Paz, M. V. (2009). The origin of alternative phenotypes in fishes. University of Glasgow
- Garduño-Paz, M. V. (2006). Demografía de *Girardinichthys multiradiatus* (Meek, 1904) (Pisces: Goodeidae): una especie semélpara de la Laguna de Zempoala, Morelos. [Tesis de licenciatura no publicada]. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Gutiérrez-Carbonell, D. (2016) Programa de Manejo Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca, SEMARNAT, CONANP.
- Hardy, R. (2021) *Oncorhynchus mykiss* (rainbow trout). CABI. Recuperado de: <https://www.cabi.org/isc/datasheet/71813#tosummaryOfInvasiveness>
- Hernández-Hernández, L. H., Carrillo-Longoria, J. A. (2018) Cultivo de trucha arcoíris en México: retos que enfrenta la producción sustentable. Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/512920/06_Ciencia_Pesquera_26-2.pdf
- Hernández, M., Aquino-Martínez, G. (2008). Manual básico para el cultivo de trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*). GEM, TIES Cuencas Sanas y Modos de Vida Sustentable Series de Manuales de Capacitación.
- INAPESCA (2012) Carta-Nacional-Acuicola-6-junio-2012-.pdf. Recuperado de: <https://www.inapesca.gob.mx/portal/documentos/transparencia/transparenciafocalizada/cna-06062012/?fbclid=IwAR3hkR7yfipfiEr4N42u6Px-5SsP3ds6qKJ1sKkmWMCni13czBvIFoNsS-w>

- Innovabiología (2016) Anatomía de un vertebrado. Trucha arcoíris. Recuperado de: <https://www.innovabiologia.com/biodiversidad/diversidad-animal/anatomia-oncorhynchus-mykiss/>
- Jaramillo-Ocampo, N. (2011). Morfometría geométrica: principios teóricos y métodos de empleo. In (pp. 69-87).
- Jiménez-Prado, P., Aguirre, W. J. (2021). Variación corporal paralela en peces de dos ríos costeros del Chocó ecuatoriano. 69(1), 45-59.
- Keeley, E., Parkinson, E., Taylor, E. (2007). The origins of ecotypic variation of rainbow trout: A test of environmental vs. genetically based differences in morphology. *Journal of evolutionary biology*. 20. 725-36. DOI: 10.1111/j.1420-9101.2006.01240.x.
- Kendall, N. W., McMillan, J. R., Sloat, M. R., Buehrens, T. W., Quinn, T. P., Pess, G. R., Bradford, M. (2015). Anadromy and residency in steelhead and rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): a review of the processes and patterns. 72(3), 319-342. doi:10.1139/cjfas-2014-0192
- Koene, J. P., Elmer, K. R., Adams, C. (2020). Intraspecific variation and structuring of phenotype in a lake-dwelling species are driven by lake size and elevation. 131(3), 585-599.
- Leyton-Flor, S. (2015). Estimación del factor de condición de Fulton (K) y la relación longitud-peso en tres especies ícticas presentes en un sector sometido a factores de estrés ambiental en la cuenca alta del río Cauca. *Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas*. 1. 21-28.
- Maldonado-Patiño, D. K. (2018). Determinación del estado trófico de la Laguna de San Miguel Almaya. Capulhuac, Estado de México.

- Meng, Y., Wang, G., Xiong, D., Liu, H., Liu, X., Wang, L., Zhang, J. (2018). Geometric Morphometric Analysis of the Morphological Variation among Three Lenoks of Genus *Brachymystax* in China. *Pakistan Journal of Zoology*, 50. doi:10.17582/journal.pjz/2018.50.3.885.895
- Miller, R. R., Minckley, W., Soto, S., Jacobotr, J. (2009). Peces dulceacuícolas de México.
- Moreno-Barajas, R., Rodríguez-Romero, F. D. J., Velázquez-Rodríguez, A. S., Sánchez-Nava, P. (2014). Análisis ecomorfológicos y estudios de caso en México. In: Universidad Autónoma del Estado de México.
- Nevado de Toluca, México. (s/f). Nevado de Toluca. Recuperado de: <https://www.google.com.mx/maps/place/Nevado+de+Toluca/@19.1085649,-99.7547691,15z/data=!3m1!4b1!4m6!3m5!1sox85cd9ace04cfadb7:ox4ef4a7e849ba4509!8m2!3d19.1085652!4d-99.7547691!16zL2ovMDZfeF9q!5m1!1e4>
- OBIS (s.f.) *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum, 1792). Recuperado de: <https://obis.org/taxon/127185>
- Orrego, R. (2018) Evolución de la anadromía y bases biológicas de la esmoltificación. Recuperado de: <https://www.salmonexpert.cl/evolucion-de-la-anadroma-y-bases-biolgicas-de-la-esmoltificacin/1245554>
- Overcominganxiet (s.f.) Los peces de agua dulce de la trucha arco iris Animal - los peces Imagen de Png. Recuperado de: <https://www.freepng.es/png-3kzrv9/?fbclid=IwAR1yzXFMSblXpZB7FmG6ontj3kWghbhpOz1glsAtlhUM-BkevPKcEHH-07E>
- Panda, A., Jena, D., Datta, M. K., Parhi, J., Kizhakke-Veetil, R., Pandey, P. K. (2019). Morphological and molecular divergence of Indian hill trout,

Barilius bendelisis (Hamilton, 1822) poblaciones from different Rivers in Indo-Burma biodiversity hotspot: Does river altitude and Dam play a role?, 35(6), 1242-1248.

- Pellón, M., Rojas, M., Yaikin, P., Del-Sol, M. (2015). Estudio morfológico de la retina de salmones (*Salmo salar*). 33(2), 788-793.
- Propp, V. (1998). Morfología del cuento: Ediciones Akal.
- Rashidabadi, F., Abdoli, A., Tajbakhsh, F., Nejat, F., Avigliano, E. J. (2020). Unravelling the población structure of the Persian brown trout by otolith and scale shape. 96(2), 307-315.
- Román-Valencia, C., Arcila-Mesa, D. K., Hurtado, T, H. (2009). Variación morfológica de los peces *Hemibrycon boquiae* y *Hemibrycon rafaelse* (Characiformes: Characidae) en el Río Cauca, Colombia. Revista de Biología Tropical. 57, 541-556.
- Rosell-Puig, W., Dovale-Borjas, C., Álvares-Torres, I. (2001). Morfología Humana I. Generalidades y Sistemas Somáticos. La Habana: Editorial Ciencias Médicas. In.
- Ruizcampos, G., Camarena-Rosales, F., Varela-Romero, A., Sanchez, S., Rosa-Vélez, J. (2003). Morphometric variation of wild trout populations from northwestern Mexico (Pisces: Salmonidae). Reviews in Fish Biology and Fisheries, 13, 91-110. doi:10.1023/A:1026367113735
- Salinas- Torres, D. (2011) El sistema digestivo de peces teleósteos. Tesis de Magíster. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Sánchez, R. M., Galvis, G., Victoriano, P. F. (2003). Relationship between digestive tract characteristics and diets of fishes from yuca river, meta river system (Colombia). Gayana (Concepción), 67(1), 75-86. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-65382003000100010>

- Sánchez-Jasso, J., Abellán, F. (2015). Turismo de Naturaleza en Áreas Protegidas de México; una propuesta de conservación, aprovechamiento y desarrollo local en el Nevado de Toluca. Cuadernos de Turismo. 36. 339-365.
- Santiago, J. M., De-Jalón, D. G. J. Q. (2018). Más ríos sin truchas en los tiempos del cambio climático. 390, 31.
- Secretaría del Campo. (2023). Consolida EDOMÉX su actividad acuícola Recuperado de: <https://secampo.edomex.gob.mx/eventos-comunicados/consolida-edomex-su-actividad-acuicola>
- Toro Ibacache, M. V., Manríquez-Soto, G., Suazo-Galdames, I. (2010). Morfometría geométrica y el estudio de las formas biológicas: de la morfología descriptiva a la morfología cuantitativa. 28(4), 977-990.
- Torres, D. A. (2018) Anatomía y fisiología de los peces. Boca de los peces: tipos en función de su especialización. Recuperado de: <https://animalesbiologia.com/peces/anatomia-fisiologia/boca-de-los-peces>
- Ubilla, B., Mendoza-Nieto, K., Moreira, R., Urdánigo, J., Ferrer-Sánchez, Y. (2016). Estructura de tallas de captura y relación longitud-peso de peces nativos en el humedal Abras de Mantequilla, Ecuador. Ciencia Tecnología. 9. 11-19.
- Velázquez-Velázquez, E., López, J., Velasco, J. (2010). Peces de la reserva ecológica El Canelar, Chiapas, México. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/46572603_Peces_de_la_reserva_ecologica_El_Canelar_Chiapas_Mexico_E_Velazquez-Velazquez_JM_Lopez_Vila_JC_Ruiz_Velasco
- Wegner, N. (2011). Gill Respiratory Morphometrics. 10.1016/B978-0-12-374553-8.00166-0.

- Von Siebenthal, E., Rehberger, K., Bailey, C., Ros, A., Herzog, E. L., Segner, H. (2018). Trade-Offs Underwater: Physiological Plasticity of Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*) Confronted by Multiple Stressors. 3(4), 49.
- Williams, K. J., Cassidy, A. A., Verhille, C. E., Lamarre, S. G., MacCormack, T. (2019). Diel cycling hypoxia enhances hypoxia tolerance in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): evidence of physiological and metabolic plasticity. 222(14), jeb206045.
- Yoshizaki, G., Okutsu, T., Ichikawa, M., Hayashi, M., Takeuchi, Y. J. (2018). Sexual plasticity of rainbow trout germ cells. 7(3), 187-187.
- Zárate-Hernández, R., Aguirre-León, A., Ortiz-Burgos, S., Castillo-Rivera, M. (2007). Eco morfología de peces estuarinos del Golfo de México.
- Zhang, Q., Han, X., Kraus, R. H., Yang, L., Fan, L., Ye, Y., Tao, Y. J. A. H. R. (2016). The expression plasticity of hypoxia related genes in high-altitude and plains *Nanorana parkeri* populations. 7(1), 21-27.

11. Anexos

Anexo 1 muestra el Cuadro de los RW presentes en la región corporal para el lado izquierdo.

Cuadro 11: Eigenvalores presentes región corporal lado izquierdo para RW

RW	Eigenvalor	% de Varianza	% Acumulado de varianza
1	0,00034079	31,733	31,733
2	0,00026682	24,845	56,579
3	0,00014979	13,948	70,526
4	0,00006163	5,738	76,264
5	0,00005387	5,016	81,28
6	0,00004995	4,651	85,932
7	0,00003558	3,313	89,245
8	0,00002769	2,578	91,823
9	0,0000224	2,086	93,909
10	0,00001789	1,666	95,575
11	0,00001297	1,208	96,782
12	0,00001154	1,075	97,857
13	0,00000718	0,668	98,526
14	0,00000668	0,622	99,148
15	0,00000454	0,423	99,571
16	0,00000277	0,258	99,829
17	0,00000184	0,171	100

Anexo 2 muestra el Cuadro de los RW presentes en la región corporal para el lado derecho

Cuadro 12: Eigenvalores presentes región corporal lado derecho para RW

RW	Eigenvalor	% de Varianza	% Acumulado de varianza
1	0,00032757	33,008	33,008
2	0,00021454	21,618	54,625
3	0,00012516	12,612	67,237
4	0,00006734	6,786	74,023
5	0,00006217	6,265	80,288
6	0,00005393	5,435	85,722
7	0,00003882	3,912	89,634
8	0,00002883	2,905	92,54
9	0,00001801	1,814	94,354
10	0,00001487	1,498	95,852
11	0,00001275	1,285	97,137
12	0,00000912	0,919	98,056
13	0,00000605	0,609	98,665
14	0,00000469	0,473	99,138
15	0,0000037	0,373	99,511
16	0,00000304	0,306	99,818
17	0,00000181	0,182	100

Anexo 3 muestra el Cuadro de los RW presentes en la región cefálica para el lado izquierdo

Cuadro 13: Eigenvalores presentes región cefálica lado izquierdo para RW

RW	Eigenvalor	% de Varianza	% Acumulado de varianza
1	0,00420321	44,776	44,776
2	0,00163343	17,401	62,177
3	0,00094472	10,064	72,241
4	0,00052468	5,589	77,83
5	0,00051165	5,451	83,281
6	0,00041417	4,412	87,693
7	0,00033865	3,608	91,301
8	0,00023017	2,452	93,752
9	0,00017572	1,872	95,624
10	0,00014916	1,589	97,213
11	0,00010638	1,133	98,347
12	0,00006265	0,667	99,014
13	0,00003816	0,406	99,421
14	0,00003128	0,333	99,754
15	0,00001453	0,155	99,909
16	0,00000572	0,061	99,97
17	0,00000285	0,03	100

Anexo 4 muestra el Cuadro 14 de los RW presentes en la región cefálica para el lado derecho

Cuadro 14: Eigenvalores presentes región cefálica lado derecho para RW

RW	Eigenvalor	% de Varianza	% Acumulado de varianza
1	0,0030223	35,104	35,104
2	0,00159684	18,548	53,652
3	0,00115504	13,416	67,068
4	0,00095699	11,116	78,183
5	0,00052035	6,044	84,227
6	0,00040374	4,689	88,917
7	0,00025648	2,979	91,896
8	0,00016645	1,933	93,829
9	0,00014505	1,685	95,514
10	0,00013229	1,537	97,051
11	0,00008867	1,03	98,081
12	0,00006361	0,739	98,819
13	0,00004465	0,519	99,338
14	0,00002992	0,347	99,686
15	0,00001528	0,178	99,863
16	0,00000781	0,091	99,954
17	0,00000398	0,046	100

Anexo 5 muestra los resultados obtenidos en Past al obtener la K de Fulton.

Cuadro 15: Resultados obtenidos para K de Fulton en ambos sitios.

RESULTADOS DE PAST				
Prueba de t para medias iguales				
K Fulton G		K Fulton SL		
N:	8	N:	10	
Media:	1.337	Media:	1.1308	
95% conf.:	(1.2168 1.4573)	95% conf.:	(0.99734 1.2642)	
Variance:	0.020696	Variance:	0.034793	
Diferencia entre medias:		0.20628		
95% conf. intervalo (parametrico):		(0.036145 0.37641)		
95% conf. intervalo (bootstrap):		(0.058434 0.34435)		