



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA
CARRERA DE BIOLOGÍA
LABORATORIO DE BIOLOGÍA ACUÁTICA

Estimación de dimensiones corporales de
***Lutjanus synagris* mediante Morfometría**
Geométrica 3D

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Licenciado en Biología

P E S E N T A N:

SALGADO MUÑOZ SAMUEL

SÁNCHEZ GONZÁLEZ DIANA ISABEL

Director de tesis: **Dr. VALENCIA HERNÁNDEZ ANTONIO**

JURADO DE EXAMEN:

Presidente: Dr. MONROY ATA ARCADIO

Vocal: Dr. VALENCIA HERNÁNDEZ ANTONIO

Secretario: M en C. CERVANTEZ SANDOVAL ARMANDO

Suplente: Dr. BLANCAS ARROYO GUILLERMO

Suplente: Dra. RIVERA GARCÍA PATRICIA



CDMX, MÉXICO - ABRIL 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

Diana Isabel Sánchez González:

A la UNAM y a la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza por abrirme sus puertas y brindarme la oportunidad de formarme como Bióloga.

A la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) y en particular al Parque Nacional Lobos-Tuxpan, Veracruz, por su apoyo y permitirnos trabajar en el arrecife Tuxpan bajo el oficio (Oficio No. F.007. DRPCGM.APFF SALT/033/2020) para llevar a cabo este estudio.

A la Dra. Patricia Rivera García, al M. en C. Armando Cervantes, al Dr. Arcadio Monroy Ata y al Dr. Guillermo Blancas por su tiempo, sus observaciones y apoyo brindado durante la carrera y en la elaboración de esta tesis.

Al Dr. Antonio Valencia Hernández, por acompañarme e instruirme durante este proceso, por sus enseñanzas no sólo académicas sino también personales, por el tiempo y conocimiento compartido, por su paciencia, amistad y dedicación, por enseñarme siempre a ser mejor, por su apoyo incondicional en todos los aspectos de la vida, por siempre mostrarme las herramientas necesarias para avanzar y enseñarme a utilizarlas. Por estar siempre ahí.

A mi papá, Antonio Sánchez, por cuidarme, protegerme y acompañarme en cada paso que doy, por creer siempre en mí, por guiarme y apoyarme en cada decisión tomada. Por enseñarme desde el amor, por ser mi compañero de vida.

A mi mamá, Edith González, por ser mi ejemplo a seguir, por todo el amor, las palabras, por escucharme y alentarme siempre a ser mejor, por tu apoyo, por las experiencias, por sostenerme siempre que lo necesito.

A mi abuelito José, por sus palabras, sus historias, los consejos, por todo el amor.

A mis hermanas, por hacerme tan feliz y motivarme siempre.

A Marijose y Karla, por su amistad, amor, por sus consejos, su compañía, por estar siempre.

A Samuel, por todo lo compartido, gracias.

A Pepin, por su compañía, amor y lealtad. Por ser mi incondicional y el amor de mi vida.

Samuel Salgado Muñoz:

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza por la gran oportunidad de ser parte de su comunidad estudiantil y por ser mi segunda casa todos estos años.

A la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) del Sistema Arrecifal Lobos-Tuxpan y al Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano, por la gran labor que hacen día con día y por permitirnos trabajar en el arrecife en un principio bajo el oficio No.F.007DRPGM.APFFSALT/003/2020, es una lástima que no se haya podido concretar el trabajo ahí.

A mis sinodales y a los profesores con los que tuve la fortuna de coincidir en clases. Aunque digan que es parte de su trabajo, su dedicación, conocimientos, experiencia y pasión, son invaluableles.

Al Laboratorio de Biología Acuática y al Dr. Antonio Valencia Hernández. Doc, gracias por aceptar en el laboratorio y plantarle los pies en la tierra a aquel chico que tenía la cabeza en el espacio. Gracias por sus consejos, sus anécdotas y por transmitir toda la pasión que tiene por su trabajo y todo lo que hace. Gracias por todas las horas de trabajo, los jalones de orejas y los buenos momentos. Gracias por su amistad y ser una gran referencia de profesionalismo. Gracias por todo.

A mis padres Bernabé y Flor y a mis hermanos Diego, Darío y Manuel, gracias por su apoyo incondicional, su amor, su comprensión, por confiar en mí, por levantarme el ánimo, por no dejarme rendir, por ser mi motor para continuar hasta el final, a ellos les debó todo lo que soy y lo que seré. Infinitas gracias.

A mi abuelita, por su apoyo y amor, sus palabras siempre estarán presentes en mi vida.

A mis tíos y tías, no hay palabras para expresar lo agradecido que estoy con ustedes, gracias por ser parte de mi vida.

A mis primas y primos, sobrinos y sobrinas, por estar siempre conmigo y por su gran apoyo.

INDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE TABLAS	8
RESUMEN	11
INTRODUCCIÓN	12
MARCO TEÓRICO	16
Muestreo no invasivo	16
Antecedentes de la morfometría geométrica (desde la morfometría tradicional) .	17
Procesamiento de datos (obtención de coordenadas cartesianas)	18
Corrección de imágenes	18
Método de calibración 3D.....	19
Importancia <i>Lutjanus synagris</i>	20
Zona de estudio	21
OBJETIVOS	22
Objetivo general.....	22
Objetivos particulares	22
HIPÓTESIS	23
MATERIAL Y MÉTODO	24
Muestreo de organismos.....	24
Procesamiento de imágenes.....	25
Criterios de procesamiento de datos	27
Variabilidad	28
Morfometría Geométrica 2D	29
Morfometría Geométrica 3D	32

RESULTADOS.....	35
Muestreo de organismos.....	35
Procesamiento de imágenes.....	40
Criterios de procesamiento de datos	43
Variabilidad	46
Morfometría Geométrica 2D	47
Morfometría Geométrica 3D	65
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	73
Muestreo de organismos.....	73
Procesamiento de imágenes.....	75
Criterios de procesamiento de datos	77
Variabilidad	77
Morfometría Geométrica 2D	78
Morfometría Geométrica 3D	86
CONCLUSIONES	89
Muestreo de organismos.....	89
Procesamiento de imágenes.....	90
Criterios de procesamiento de datos	90
Variabilidad	90
Morfometría Geométrica 2D	91
Morfometría Geométrica 3D	91
General	92
SUGERENCIAS Y PERSPECTIVAS.....	92
REFERENCIAS.....	94

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Calibración mediante la triangulación de landmarks desde dos puntos de referencia ubicados sobre un plano en imágenes corregidas. Se observan los planos conocidos (cercano = near, légado = far), la triangulación entre los puntos capturados en cada plano (DL1 y DL2, DR1 y DR2) con respecto al ángulo de visión (AVL y AVR).....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2. Cuadrícula de landmarks a intervalos de 5 cm.</i>	<i>26</i>
<i>Figura 3. Interfaz del software Coordinator. Este software esta destinado para obtención de coordenadas de landmarks de interés a partir de imágenes de referencia, de esta manera es posible hacer matrices de datos de coordenadas de landmarks de diferentes organismos.</i>	<i>27</i>
<i>Figura 4. Alineación ortogonal de los ejes 3D de las cámaras izquierda y derecha. Angulo de rotación del plano X-Y: giro del eje Z = "roll"; ángulo de rotación del plano Z-Y: giro del eje X = "pitch"; ángulo de rotación del plano X-Z: giro del eje Y = "yaw".....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 5. Intervalos de longitud. Se representan en el pez las longitudes de las 8 clases de talla consideradas.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 6. Plataforma de medición. a) Las cámaras se dispusieron a 60 cm de la plancha b) con una separación entre ellas de 13 cm c) se añadieron tornillos sin cabeza en los vértices para nivelar la plataforma.</i>	<i>39</i>
<i>Figura 7. Posicionamiento estándar del pez sobre la plataforma de fotografiado. Se pueden apreciar las estructuras blandas del pez sostenidas por alfileres.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 8. Gráficas de distancias entre landmarks. Se muestra la precisión en la corrección de imágenes izquierdas y derechas corregidas y sin corregir. Gráfica a) imagen izquierda sin corregir, b) imagen derecha sin corregir, c) imagen izquierda corregida, d) imagen derecha corregida.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 9. Resultados de la corrección en cámara Izquierda. A) Imagen sin corregir B) Imagen corregida. Se comparan las líneas del enmallado con las líneas del papel milimétrico en la imagen.</i>	<i>42</i>
<i>Figura 10. Disposición de los 24 landmarks. Ubicación de landmarks sobre el plano lateral derecho de un ejemplar de la especie Lutjanus synagris.</i>	<i>43</i>
<i>Figura 11 .Ubicación de puntos de control (landmarks) para la estimación de longitudes.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 12. Patrón básico de landmarks y división en secciones anterior - posterior</i>	<i>47</i>
<i>Figura 13. Gráficas de residuos sección anterior: a) Le; b) Lt; c) Lf.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 14. Gráficas de residuos Pe para la sección anterior de cada ecuación: a) Llave (2 Lmks); b) 3 Lmks; c) 4 Lmks.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 15. Gráficas de residuos sección posterior: a) Le; b) Lt, c) Lf.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 16. Gráficas de residuos Pe para la sección posterior de cada ecuación: a) Llave (2 Lmks); b) 3 Lmks; c) 4 Lmks.....</i>	<i>59</i>

<i>Figura 17. Imágenes corregidas en estereoscopia de los organismos.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 18. Grafica de regresión lineal Le observada vs Le 3D MS-PMP calculada mediante la ecuación de distancias entre puntos 3D.</i>	<i>66</i>
<i>Figura 19. Gráficas de regresión lineal Le Observada vs Le 3D.</i>	<i>67</i>
<i>Figura 20. Residuos longitud estándar 3D corregida (Nivel individual).....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 21. Gráfica del modelo ajustado. Aparecen dos líneas de regresión (Azul; Le 2D y Rojo; Le 3D corr)...</i>	<i>70</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Centros de clase por intervalo de tallas. Se ordenaron los datos conforme a las variables categóricas: clase de talla y centro de clase.</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 2. Dimensiones medidas directamente.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 3. Precisión de corrección de imágenes cámaras izquierda y derecha.</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 4. Parámetros de corrección de cámara Adobe Photoshop.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 5. Descripción de los Landmarks elegidos.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 6. Landmarks con menor variabilidad en la zona anterior y posterior del cuerpo (región de la cabeza).</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 7. Ecuaciones de Lf y Lt obtenidas mediante la relación Le (obs) – Lf y Lt (obs).....</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 8. Ecuaciones llave obtenidas con 4 y 3 landmarks en la sección anterior del pez (OAPEC-PSO).</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 9. Ecuación de la sección anterior para calcular Le de Lutjanus synagris:.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 10. Ecuaciones de Lf y Lt sustituyendo Le(obs) por Le (calculado con la llave OAPEC-PSO).</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 11 Ecuaciones de la sección anterior para calcular Pe.</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 12 Promedio de los valores observados y calculados de los parámetros Lt, Lf, Le.</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 13 Residuos máximos y mínimos de los residuos de los parámetros Lt, Lf, Le mediante landmarks llave (OAPEC-PSO) sección anterior</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 14. Comparación de promedios y residuos entre Pe obtenido y Pe calculados con las diferentes ecuaciones de Pe obtenidas a partir de la llave, con 3 y 4 landmarks de la sección anterior.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 15. Residuos máximos y mínimos de Pe mediante landmarks llave (OAPEC-PSO) sección anterior.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 16. Ecuaciones llave sección posterior del pez. (IAC-IAA)</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 17. Ecuaciones de la sección posterior para calcular Le de Lutjanus synagris:.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 18. Ecuaciones de Lf y Lt sustituyendo Le(obs) por Le (calculado con la llave OAC-IAA).</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 19 Ecuaciones de la sección posterior para calcular el Pe.</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 20. Promedio de los valores observados y calculados de los parámetros Lt, Lf, Le.</i>	<i>55</i>

<i>Tabla 21 Residuos máximos y mínimos de los parámetros Lt, Lf, Le mediante landmarks llave (OAC – IAA) sección posterior.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 22. Comparación de promedios y residuos entre Pe obtenido y Pe calculados con las diferentes ecuaciones de Pe obtenidas a partir de la llave, con 3 y 4 landmarks de la sección posterior.</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 23. Residuos máximos y mínimos de Pe mediante landmarks llave (OAC – IAA) sección posterior.</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 24. Nivel de probabilidad p de la existencia de diferencia estadística significativa entre estimaciones obtenidas mediante ecuaciones y los valores medidos directamente (observados) para los landmarks seleccionados en la parte anterior del cuerpo.</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 25. Nivel de probabilidad p de la existencia de diferencia estadística significativa entre estimaciones obtenidas mediante ecuaciones y los valores medidos directamente (observados) para los landmarks seleccionados en la parte posterior del cuerpo.</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 26 Nivel de probabilidad p de la existencia de diferencia estadística significativa entre estimaciones de peso eviscerado obtenidos mediante tres ecuaciones (llave, 3 y 4 landmarks) y los valores medidos directamente (observados) para los landmarks seleccionados en la parte anterior y posterior del cuerpo del pez.</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 27 Nivel de probabilidad p de la existencia de diferencia estadística significativa entre estimaciones de peso eviscerado obtenidos mediante tres ecuaciones (llave, 3 y 4 landmarks) y los valores medidos directamente (observados) para los landmarks seleccionados en la parte posterior del cuerpo del pez.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 28. Relaciones entre landmarks. Las marcas indican que la variable en la columna está considerada en la ecuación de cada renglón.</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 29. Ecuaciones para diferenciar entre especies. Se observan las ecuaciones, el grado de ajuste y la p-Value.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 30. Comprobación de la eficiencia de las ecuaciones para discriminación entre especies. Se observan las imágenes utilizadas para la captura de landmarks, la especie y los resultados de la ecuación 3.</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 31. Parámetros de calibración 3D cámaras izquierda y derecha. AV: Ángulo de visión, ACAM: Ángulo de la cámara con respecto al eje óptico; ZPIX: Profundidad calculada en píxeles.</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 32. Resultados de la regresión Le Obs vs Le 3D mediante el método 3D.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 33. Residuos Le 3D corregida (nivel poblacional)</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 34. Tabla de ANOVA</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 35. Prueba de Levene para varianzas.</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 36. Prueba de Medianas</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 37. Resultados de ANOVA para intercepto y pendiente de Le 2D y Le 3D Corregido.</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 38. Ecuaciones 3D para diferenciar entre especies. Se observan las ecuaciones, el grado de ajuste y la p-Value.</i>	<i>71</i>

Tabla 39. Comprobación de la eficiencia de las ecuaciones para la identificación de Lutjanus synagris con el método 3D. Se observan las imágenes utilizadas para la captura de landmarks, la especie y los resultados de las ecuaciones: (LS = L. synagris), (D = Desconocido). 72

RESUMEN

Las comunidades de organismos acuáticos reflejan las condiciones del medio ya que muchos de ellos son sensibles a cambios de una gran variedad de parámetros ambientales (Karr, 1981). Dentro de la gama tan diversa de organismos acuáticos, los peces han sido frecuentemente señalados como indicadores adecuados de la calidad del agua. Por esta razón, se han desarrollado métodos y técnicas para su muestreo con las que se pueden obtener datos tanto de sus hábitats como de sus ciclos de vida. No obstante, en la mayoría de los métodos o técnicas utilizadas para el estudio de peces se requiere la extracción de una gran cantidad de organismos, por lo que no resultan viables para su uso en ecosistemas arrecifales. Debido a lo anterior, en este proyecto se busca ampliar el panorama de los métodos de muestreo no invasivos, proponiendo un método de muestreo para estimar parámetros de interés biológico-pesquero (longitud estándar, longitud total, longitud furcal y peso eviscerado) a partir de un parámetro "Llave" (distancia entre landmarks con menor variabilidad), basado en los principios de Morfometría Geométrica (MG) en 2D y 3D, en el cual se utilizan imágenes *ex situ* de los organismos de interés. La estructura anatómica del pez se dividió en dos secciones (anterior y posterior) contemplando situaciones inherentes a su movilidad, por esta razón se obtuvieron resultados para cada una. Con MG 2D los residuos en centímetros de los promedios observados con respecto a los promedios calculados para Lt, Lf, Le y Pe fueron: a) sección anterior, Lt= 5.80281E-05, Lf= -4.354E-06, Le=-1.49201E-06 y Pe= -0.04628909; b) sección posterior, Lt= 0.0947, Lf= 0.0899, Le= 0.0782 y Pe= -0.23740081. Con MG 3D se calculó Le (parámetro más utilizado en estudios biológico-pesqueros) de la sección anterior, el residuo en centímetros entre Le observado y Le calculado con 3D es Le= 0, por lo que se concluye que, a nivel poblacional, las estimaciones en 2D se pueden realizar con un óptimo nivel de precisión, sin embargo, utilizando la metodología 3D, la precisión en la medición aumenta. A nivel individual, con MG 2D, los residuos máximos y mínimos indican que hay incertidumbre en la estimación de hasta ± 3 cm para las longitudes Lt, Lf, Le, en cuanto al Peso las estimaciones individuales tienen un margen de

incertidumbre de hasta ± 80 gramos. Para estudios futuros, se recomienda realizar las estimaciones mediante MG 3D de los parámetros restantes tanto de la sección anterior como de la posterior y obtener los organismos directamente de la zona de estudio.

INTRODUCCIÓN

Los métodos de muestreo para el estudio Biológico pesquero de especies ícticas arrecifales son extractivos e invasivos debido a la necesidad de colecta de organismos en cantidades estadísticamente representativas (p.e Coggins Jr, Gwinn, & Allen, 2013), lo cual implica en incurrir en depredación y alteración del hábitat estudiado, para ello, es necesario implementar métodos alternativos como la aplicación de Morfometría Geométrica 2D y 3D.

En este trabajo se desarrolló un método de muestreo para estimar parámetros de interés biológico-pesquero basado en los principios de Morfometría Geométrica 2D y 3D, aunque aquí lo enfocamos a la especie *Lutjanus synagris*, el método es aplicable a especies pisciformes. El método contempla el uso de un sistema estereoscópico de cámaras fotográficas digitales además de un método de corrección digital de distorsión geométrica inherente a las lentes de las cámaras. A partir de pares estereoscópicos de una muestra significativa de organismos es posible calcular datos morfométricos como longitudes y peso mediante ecuaciones generadas a partir de landmarks. Dichas ecuaciones pueden aplicarse a pares estereoscópicos integrados en fotomosaicos provenientes de transectos subacuáticos, a través de dos cámaras ajustadas ortogonalmente a una base metálica maniobrada por buzos. Las ventajas de este método son: su naturaleza no extractiva, que permite identificar y contar individuos dentro de un cardumen; obtener información del hábitat y los peces, registrar la información de forma permanente, la observación de los peces en su hábitat natural y la obtención de datos morfométricos (respecto a la forma del organismo) con alto nivel de precisión

y exactitud (p.e Cappo, Harvey, & Shortis, 2006; Harvey, Fletcher, & Shortis, 2001; Pelletier, Leleu, Mou-Tham, Guillemot, & Chabanet, 2011).

El concepto de “forma”, en Morfometría Geométrica, se ha modificado con el tiempo, haciéndose más específico y útil para esta disciplina. El estadístico y matemático inglés David G. Kendall, definió a la forma como: “toda la información geométrica que queda cuando la ubicación, la escala y los efectos de rotación se filtran de un objeto” (Kendall, 1977), es decir, las diferencias entre configuraciones que son atribuibles a diferencias en ubicación, escala y la orientación, son eliminadas, y solo deja las diferencias en la forma.

La Morfometría Geométrica representa la “forma” a partir de una configuración de puntos homólogos sobre una estructura anatómica, los cuáles se posicionan sobre fotografías de especímenes. Estos puntos son conocidos en inglés como “landmarks” y se definen como un sitio anatómico discreto que pueda ser reconocido en todos los especímenes a estudiar (Dean C Adams, Rohlf, & Slice, 2013).

Zelditch, Swiderski, and Sheets (2012), proponen que la selección de estos landmarks debe ser significativa y recomienda seguir los siguientes criterios: (1) las estructuras deberán ser homólogas, es decir, aquellas estructuras con semejanzas subyacentes (forma, función, entre otros) que se pueden identificar en los diferentes organismos de estudio, (2) no deben alterar sus posiciones topológicas en relación con otros landmarks, (3) deben proveer una cobertura adecuada de la morfología, (4) deberán ser encontradas repetidamente y con relativa facilidad, y (5) deberán encontrarse sobre el mismo plano.

En el conjunto de coordenadas obtenidas a partir de landmarks está la información de la variación de la conformación biológica; además, de las diferencias causadas por la escala, la orientación y la posición espacial. En este estado no es posible estimar los cambios de la conformación ni la dirección de tales cambios. Una vez se procesan las coordenadas mediante la morfometría geométrica se puede estudiar la variación de la conformación biológica y su covariación con otras variables, libre de efectos.

Los estudios de la forma a partir de métodos geométricos se fundamentan en el análisis multivariado de coordenadas de cada *landmark*. Los métodos de superposición tienen la finalidad de remover los factores ajenos a la forma a partir de la corrección matemática de coordenadas. (Dean C. Adams, Rohlf, & Slice, 2004; Bookstein, 1991; Bookstein et al., 1985; Dryden & Mardia, 1998; Rohlf & Bookstein, 1990; Zelditch et al., 2012). Existen varios métodos propuestos para ello, y sus diferencias radican en los criterios para la optimización de las coordenadas. Para fines de este trabajo se siguió el método de superposición de Bookstein, este se basa en la estandarización de las coordenadas de la línea de base, es decir, consiste en la elección de dos landmarks alejados (talla de los organismos), generalmente de extremo a extremo del organismo; y el método de Procrustes el cual es consistente con la teoría general de la forma planteada por Kendall (Rohlf, 1999; Slice, 2001), tiene como objetivo minimizar la suma de las distancias al cuadrado entre puntos de referencia de configuraciones similares al permitir que se ajuste el tamaño, la rotación y la traslación, esta suma se llama distancia Procrustes (Claude, 2008).

Para llevar a cabo estudios morfométricos 2D es necesario contar con infraestructura que facilite la captura de imágenes digitales y que permita conservar una configuración geométrica constante y conocida (Plaza Archundia, 2013). Este mismo principio se utiliza para la estimación de coordenadas 3D, ya que se basa en la obtención de coordenadas 2D, utilizando imágenes en estereoscopia. Para tal efecto, en este estudio se construyó una plataforma de fotografiado la cual permite ajustar los parámetros extrínsecos como perspectivas horizontal y vertical, para mantener la geometría de las cámaras con respecto al plano de las imágenes.

Ya se han propuesto prototipos de estructuras de fotografiado en estereoscopia, como el utilizado por García Rivero (2013), quien elabora una metodología para el conteo de especies coralinas basado en fotografía estereoscópica y utiliza una plataforma para calibrar sus cámaras; Perez Huesca (2015) obtiene la cobertura real de corales utilizando fotografías en estereoscopia, la estructura consiste en un par de cámaras montadas sobre una barra de metal; Hernández Osorio (2014), desarrolla un método de censo visual rápido basado en la toma de fotografías en

estereoscopia, la estructura que utiliza consiste en un par de cámaras montadas sobre una barra de aluminio a la cual se le adaptaron flotadores para optimizar su manejo bajo el agua; Plaza Archundia (2013), utiliza los principios de Morfometría Geométrica 3D para desarrollar un método de calibración para la metrología de dimensiones corporales de especies ícticas y utiliza una plataforma en la que se puede ajustar la distancia cámara-plano para calibrar tanto en tierra como bajo el agua.

En estudios de pesquerías se considera por diversas razones a la dimensión “cabeza – cola” como el mejor estimador del tamaño en peces teleósteos, asumiendo indirectamente que el patrón de crecimiento en dicho eje es lineal y que en caso de cambios de forma, las demás dimensiones cambiarían de proporción respecto a esta dimensión, sin embargo, no se toma en cuenta que el patrón de crecimiento en dicho eje pueda no ser lineal, con lo que el estudio morfométrico podría estar influenciado por la falta de proporción lineal relativa al eje cabeza-cola.

Debido a que los peces son organismos flexibles, la estimación de dimensiones “largas” entre landmarks apartados es difícil y en algunos casos imposible, por lo que es deseable trabajar únicamente con aquellos landmarks que en cualquier situación se vean menos influenciados por un enfoque divergente a la posición paralela al plano de la cámara, por lo cual en este trabajo procedimos a la obtención de ecuaciones en las partes anterior y posterior de los organismos.

Por lo anterior, en este estudio se tomará como referencia la distancia entre los landmarks cuyo centroide presente la menor variabilidad (menos desviación estándar) como indicador de crecimiento lineal, ya que no hay cambio de forma al existir una relación lineal después de corregir por posición, rotación y escala. A la distancia entre los dos landmarks con menor variabilidad se le denominará en este estudio como “Llave”, este parámetro se utilizará para la obtención de las longitudes y peso a partir de ecuaciones generadas por regresiones lineales.

El método de regresión es utilizado comúnmente en Morfometría Geométrica para modelar las variaciones en la forma como una función lineal de una variable

independiente o más, a través, de las representaciones gráficas (gráficas de distribución, gráficas de variación de forma, entre otros) (Aguirre & Prado, 2018).

Para fines de este estudio, la obtención de ecuaciones se fundamentó en la aplicación del modelo de regresión:

- Múltiple: para la obtención de ecuaciones que permitan calcular un parámetro “Llave”.
- Simple: para la obtención de las ecuaciones que permiten calcular longitudes (Longitud estándar, Longitud furcal y Longitud total).

La regresión simple se utiliza para modelar la variación de una variable dependiente (Y) con relación a una variable independiente (X) a partir de la creación de una función lineal para hacer las predicciones de los valores esperados para la variable (Y) en función de la variable (X) (Aguirre & Prado, 2018).

La regresión múltiple, a comparación de la regresión simple, permite modelar la variación en más de una variable dependiente (Granados, 2016; Rodríguez-Jaume & Mora Catalá, 2001; Rojo Abuín, 2007).

MARCO TEÓRICO

Muestreo no invasivo

Los métodos de muestreo menos invasivos y extractivos son los de preferencia para evaluar los arrecifes de coral. El método más convencional empleado en estos ecosistemas es el censo visual con sus distintas variantes (Lessios, 1996). Como alternativa al censo visual se ha incrementado durante los últimos años el uso de técnicas, con sus propias variantes (Mallet & Pelletier, 2014; Shortis, Harvey, & Seager, 2007); como la implementación de video y fototransectos (fotomosaicos).

Antecedentes de la morfometría geométrica (desde la morfometría tradicional)

En el ámbito de la biología, la morfometría se ha utilizado, desde los inicios del estudio científico, para estudiar la forma (Dean C Adams *et al.*, 2013) variaciones entre individuos y grupos de organismos como base importante para el análisis de la estructura, la función y la evolución (Elewa, 2004). Durante la mayor parte del siglo XX, en morfometría se realizaban análisis estadísticos que se basaban en la diferencia de medidas lineales y eran analizadas a través del uso de la estadística univariada y multivariada sobre conjuntos de variables cuantitativas como la longitud, el ancho y la altura; este enfoque se conoce como “Morfometría Tradicional” (Reyment, 1996; Toro Ibacache, Manriquez Soto, & Suazo Galdames, 2010). Sin embargo, a fines de los años ochenta y principios de los noventa, se produjo un cambio en la forma en que se cuantifican las estructuras morfológicas y en cómo se analizan los datos. Este cambio enfatizó los métodos que capturan la geometría de las estructuras morfológicas de interés y cómo se preserva esta información a lo largo de los análisis. En 1993, una revisión del campo de la morfometría llamó a este nuevo enfoque "morfometría geométrica" y se sugirió que este cambio de paradigma señaló una "revolución en la morfometría" (Rohlf, 1993).

El enfoque de la “morfometría geométrica”, definido por Bookstein, 1991 como “el análisis estadístico de la variación en la forma y su covarianza con otras variables”, tiene como ventaja, sobre la morfometría tradicional, una precisa y exacta descripción de la forma, sobre la que se pueden realizar análisis estadísticos rigurosos y que además permiten una fácil visualización, interpretación y divulgación de los resultados (Zelditch *et al.*, 2012). El objeto de estudio ya no se describiría con base en sus dimensiones sino en términos de la relación espacial entre sus partes (Toro Ibacache *et al.*, 2010).

Procesamiento de datos (obtención de coordenadas cartesianas)

La utilización de software para capturar coordenadas cartesianas en una imagen es recomendable para digitalizar landmarks en estudios de Morfometría Geométrica (Bookstein, 1991; Zelditch *et al.*, 2012). Para esto, se utilizó el software de uso libre “Coordinator” que permite tomar coordenadas 2D (X, Y) a través de imágenes digitales. Este resultado se puede obtener con otros softwares (Irfanview, entre otros), sin embargo, Coordinator permite: cargar una imagen de referencia, crear configuraciones de puntos que sirven como guía para la captura de coordenadas, permite trabajar imágenes por lotes y genera una base de datos con la información obtenida.

A partir de estas coordenadas, se pueden evaluar de manera visual las coberturas de estructuras de interés tomando como base la gráfica de landmarks (Plaza Archundia, 2013), esto nos permite tener una interpretación biológica completa y un panorama general del cambio de forma y de la presencia o ausencia de estructuras (en caso de existir).

Corrección de imágenes

El desarrollo de sistemas de procesamiento de imágenes amplía el potencial de la morfometría como herramienta para la identificación de organismos. El uso de lentes y dispositivos ópticos para la toma de imágenes genera aberración geométrica (Marzoa Domínguez 2020), la cual, de no ser corregida producirá patrones morfométricos distorsionados. En respuesta a este problema, para este estudio se utilizó el método de corrección de imágenes desarrollado por Sánchez G D I y por Salgado M S. en un proyecto precedente basado en un sistema para la captura de imágenes. El proceso de corrección consiste en la identificación en cada cámara, de aberraciones en patrones conocidos de landmarks, seguido de la corrección geométrica de pares estereoscópicos con software (p.e StereoPhoto Maker, Adobe Photoshop) de corrección geométrica interactiva respecto a una

cuadrícula perfecta. La corrección obtenida por este método proporciona mayor precisión en la medición de dimensiones de los objetos, optimizando el trabajo morfométrico.

Método de calibración 3D

Conocer la configuración geométrica del sistema de fotografiado (parámetros extrínsecos) y la de sus parámetros geométricos internos (parámetros intrínsecos) es necesario para la calcular coordenadas 3D (Plaza Archundia, 2013). Para esto existen varios métodos de calibración de cámaras, como el propuesto por Zhang (2000), donde asume configuraciones geométricas constantes, mismas que se usan para la detección de objetos desde cámaras fijas, o como el propuesto por Plaza Archundia (2013), que no requiere de calibración continua y que se puede utilizar sobre una plataforma móvil.

En este estudio se utilizó el método de calibración basado en triangulación de landmarks desde dos puntos de referencia ubicados sobre un plano en imágenes corregidas para estimar el eje Z (profundidad) y obtener coordenadas 3D. Para ello, es necesario conocer la distancia entre cámaras, la distancia teórica en píxeles entre el plano de las cámaras y el plano de la escena, el ángulo de visión de cada cámara para poder estimar la proporción entre píxeles y centímetros, y las diferencias en posición ortogonal de cada cámara. Este método se puede llevar a cabo siempre y cuando los pares estereoscópicos no tengan aberración geométrica por las lentes, los ejes 3D sean ortogonales, las coordenadas estén referenciadas respecto al centro de la imagen y se conozcan los parámetros: tamaño de la imagen (ancho y alto), ángulos de visión (vertical y horizontal), y distancia entre cámaras con la mayor precisión posible (Figura 1).

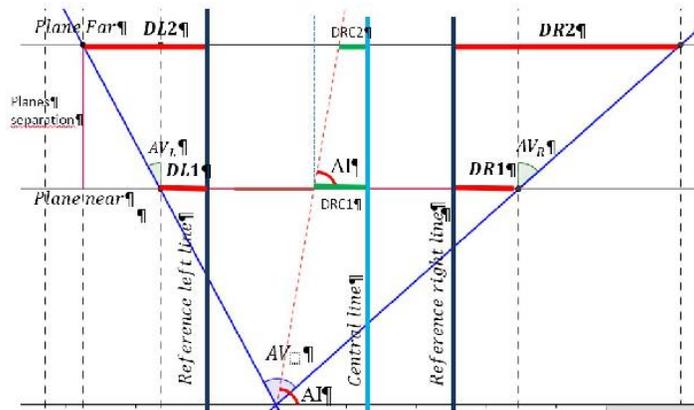


Figura 1. Calibración mediante la triangulación de landmarks desde dos puntos de referencia ubicados sobre un plano en imágenes corregidas. Se observan los planos conocidos (cercano = *near*, lejano = *far*), la triangulación entre los puntos capturados en cada plano (DL1 y DL2, DR1 y DR2) con respecto al ángulo de visión (AVL y AVR).

Este procedimiento y los algoritmos implicados se encuentran en proceso de publicación, por lo que aquí no abordamos sus detalles, únicamente en su eficiencia.

Importancia *Lutjanus synagris*

Los pargos constituyen un componente ecológico importante a nivel de las comunidades de peces de arrecife del Golfo de México (Bannerot, 1987) y representan un recurso económico importante en las zonas tropicales de todo el mundo, debido a su alto valor comercial y a la sobresaliente calidad de su carne (Arreguín-Sánchez & Manickchand-Heileman, 2005; Cervigón *et al.*, 1992), sin embargo, por estas mismas razones, están considerados como especies amenazadas.

Estos peces están asociados generalmente a hábitats de fondos duros y se les puede encontrar en profundidades intermedias de hasta 100 m (Allen, 1985). Los pargos son importantes en la preservación del equilibrio ecológico dentro de las comunidades de peces tropicales ya que juegan un papel de depredador en la cadena alimenticia de las comunidades de peces arrecifales (Allen, 1985; Heemstra & Randall, 1984; Parrish, 1987; Sluka, Chiappone, & Sealey, 2001).

El pargo rayado (*Lutjanus synagris*) se distribuye en el Atlántico occidental, desde Carolina del Norte en Estados Unidos hasta el sureste de Brasil, incluyendo el mar Caribe y el Golfo de México. Dentro de la familia *Lutjanidae*, el pargo rayado (*Lutjanus synagris*) es una especie que está sujeta a mayor explotación en las costas del Golfo de México (Torres-Lara, 1987)

Zona de estudio

Si bien, la intención inicial en este trabajo era la de obtener los organismos de estudio del Sistema Arrecifal Lobos – Tuxpan, esto no fue posible debido a las circunstancias propiciadas por la pandemia. Sin embargo, ante esta eventualidad, se optó por conseguir muestras en la central de abastos de la Ciudad de México, de las que se tuviera certeza de su procedencia, en este caso, los vendedores solo sabían que la mercancía provenía de la costa del estado de Veracruz, México.

El clima de región suroeste del Golfo de México es del tipo Am (cálido y húmedo) con lluvias abundantes en el verano y parte del otoño, y una estación seca corta (de abril a mayo), y precipitación promedio anual de 1100–2000mm. La temperatura media anual es de 26 °C, con una mínima de ~18 °C en enero-febrero (Salas-Pérez & Granados-Barba, 2008).

Como es bien sabido, las zonas costeras de climas tropicales son consideradas como zonas de alta productividad, ya que cuentan con una abundancia importante de especies ícticas, esto debido a la convergencia entre agua marina y dulce, lo que se traduce en una gran disponibilidad de hábitat para las especies de peces estenohalinas y eurihalinas (Abarca-Arenas, Franco-López, González-Gándara, & Silva-López, 2012).

De acuerdo con Abarca-Arenas *et al.* (2012), son más de 600 km los que conforman la costa veracruzana, y cuenta con 508 especies de peces a lo largo de sus lagunas costeras, esteros, estuarios y sistemas estuarinos. Sin embargo, las áreas con

mayor número de especies ícticas son los sistemas Arrecifales Lobos – Tuxpan (SALT) y Veracruzano (SAV).

OBJETIVOS

Objetivo general

Obtener información biológica-pesquera de organismos ícticos a partir de sus dimensiones morfométricas, con aplicabilidad al estudio biológico de especies ícticas sin tocarlos. Las fuentes de información son las relaciones longitud-longitud de organismos fotografiados en pares estereoscópicos.

Objetivos particulares

Estimar parámetros biológicos a partir de datos morfométricos sin necesidad de tener contacto con los organismos.

Encontrar relaciones matemáticas entre los parámetros: longitud-longitud, longitud-peso, edad-longitud, longitud-sexo, sexo-peso, mediante la implementación de métodos de morfometría geométrica 2D y 3D basada en “Landmarks” (puntos de referencia homólogos) específicos de esa especie.

Estimar valores de biomasa a través de relaciones biomasa-tamaño.

A partir de datos morfométricos obtener datos cuantitativos para discriminar de otras especies.

HIPÓTESIS

Es posible estimar dimensiones corporales de peces a través de ecuaciones lineales estimadas a partir de muestras de organismos, las cuales, al aplicarse a organismos capturados en pares estereoscópicos en un ambiente natural, permitirán estimar dimensiones no observables a partir de la combinación de otras dimensiones observables, caracterizadas por combinaciones de distancias entre puntos homólogos (p.e. Klingenberg, 2016).

En todos los organismos vivientes existen formas específicas para cada especie. La relación matemática entre distintos puntos homólogos puede ser isométrica si no hay cambio de forma a lo largo del ciclo de vida o alométricas si hay cambio. Las relaciones isométricas se pueden describir con sistemas de ecuaciones lineales, mientras que las alométricas son no-lineales y generalmente de tipo potencial. Mediante morfometría geométrica 3D se puede estimar la distancia entre puntos análogos sin importar la posición de estos en un espacio cartesiano 3D. Con todo lo anterior, será posible estimar dimensiones corporales sin importar la posición de los organismos en los pares estereoscópicos.

La biomasa se relaciona de manera potencial con respecto a dimensiones lineales corporales, por lo que es posible crear ecuaciones de la relación tamaño - biomasa para la estimación de esta última.

Al ser las relaciones longitud-longitud específicas para la especie, es factible discriminar de otras especies, según los valores observado-esperado (residuos); los valores esperados se derivarán de las ecuaciones, y los observados, del organismo a comparar.

MATERIAL Y MÉTODO

Muestreo de organismos

Obtención de organismos

Los organismos de la especie *Lutjanus synagris* utilizados en este estudio fueron comprados buscando que provinieran de Veracruz, México. Se trabajó con la mayor cantidad de organismos posible, donde se incluyeran tallas desde pequeñas hasta las más grandes reportadas en literatura (*FishBase*). Los organismos se agruparon, con respecto a la Longitud estándar, en 8 clases de talla a intervalos de 2 cm, con centro en centímetros pares ([19, 21], (21.1, 23] ... (33.1, 35]). Se buscó que cada grupo de talla estuviese integrado por 10 individuos.

Parámetros biológicos (dimensiones corporales)

Con el fin de tener un registro de datos reales y un punto de comparación con los obtenidos de cada organismo, se tomaron los siguientes parámetros: longitud estándar (Le), longitud total (Lt), longitud furcal (Lf) y peso eviscerado (Pe). Las longitudes se midieron desde la punta del maxilar superior sobre su plano lateral derecho hasta: el final de la aleta caudal (longitud total), el nacimiento de los rayos de la aleta caudal (longitud estándar), y la ubicación de la furca (longitud furcal). Debido a la dificultad para ubicar con precisión la posición de la furca, se consideró como referencia la altura a la cual terminaba la línea lateral. Estas mediciones se llevaron a cabo con una cinta métrica adherida a una lámina de unicel, emulando un ictiómetro.

Para el Pe los peces fueron pesados individualmente mediante una báscula digital con precisión de 01 g.

Creación de la plataforma de fotografiado

Para la obtención de imágenes se construyó una estructura metálica de fotografiado con geometría estática la cual consistió en una plancha cuadrada de 40cm x 40cm para el posicionamiento de especímenes a fotografiar: las medidas fueron elegidas tomando como referencia la longitud total máxima de la especie *Lutjanus synagris*.

Captura de imágenes

Para el fotografiado se empleó un par de cámaras Canon G12. En todos los casos se posicionaron los organismos sobre la plataforma de fotografiado buscando colocar los peces ortogonalmente al eje de las cámaras y fijarlos en una posición estándar de manera que todas sus estructuras resulten distinguibles, bien definidas y representadas. Se empleó una lámina de unicel con una concavidad para nivelar el volumen del organismo evitando su deformación. Se usaron alfileres de varios tamaños para hacer visibles los puntos de referencia.

Para disminuir al mínimo el contraste por sombras, se iluminó con una lámpara led en función de los siguientes criterios: evitar al máximo los brillos en ambas cámaras, favorecer el contraste de colores y estructuras con un mínimo de sombras, y posicionar las lámparas para resaltar las referencias de cada landmark (alfileres).

Las fotos se tomaron de manera simultánea para evitar factores que influenciaran la calidad de la imagen (luz y movimiento de la estructura).

Procesamiento de imágenes

La corrección se llevó a cabo enriqueciendo un método previamente presentado en el "Foro de Investigación Formativa de la FES Zaragoza 2020" por Sánchez D. I, G., Salgado S. M. El método original contempla las siguientes etapas: Identificación y corrección de aberración de la lente y estimación y corrección de errores de ortogonalidad. El enriquecimiento consistió en el uso de más recursos de software

(GIMP 2.10.10, PTLens 9.2, *StereoPhoto Maker* 6.30 y *Adobe Photoshop CS6* versión de prueba), para la corrección de distorsión de la lente, de perspectiva y de escala.

Corrección de distorsión

Con el fin de medir la precisión de la corrección, mediante el programa SLG (*Sequential Landmarks Gatherer*), se trazó una cuadrícula de landmarks de 8 filas por 7 columnas a intervalos de 5 cm sobre el papel milimétrico en las imágenes izquierda y derecha (Figura 2).

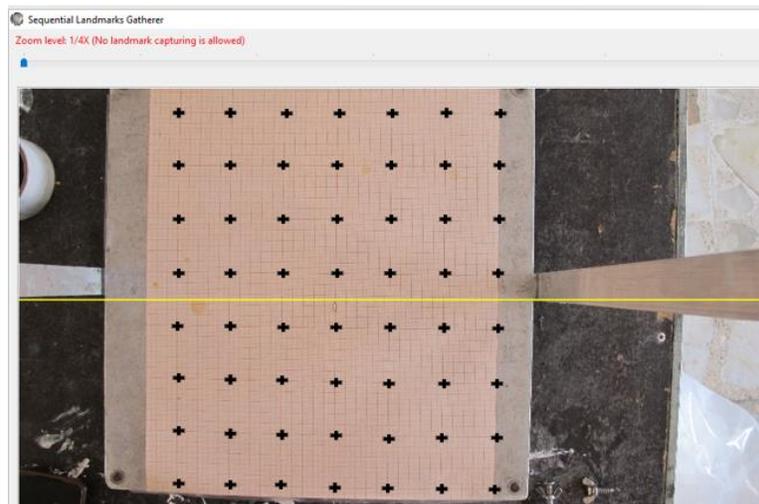


Figura 2. Cuadrícula de landmarks a intervalos de 5 cm.

De las coordenadas de los landmarks se calcularon las distancias en píxeles entre cada vértice y se obtuvieron las distancias promedio entre cada landmark. A partir de las distancias se calculó el error residual y la distancia promedio en centímetros; se compararon los promedios de residuos y de distancias sin corregir y corregidas.

Parámetros de corrección (Calibración 2D)

A partir de las imágenes cuadrículadas se estimaron los parámetros de corrección con los softwares Adobe Photoshop CS6 versión de prueba, StereoPhotoMaker 6.30 y PTLens 9.2, dichas correcciones se emplearon en las imágenes de los peces.

Criterios de procesamiento de datos

Se registraron un total de 24 landmarks bajo los criterios de Zelditch, 2012, que describen diferentes rasgos anatómicos y la totalidad de la superficie del pez. Alrededor del perímetro del cuerpo, en los límites o extremos de las estructuras, fueron ubicados 18 landmarks y 8 sobre en el cuerpo lateral poscraneal.

Se tomó el criterio de línea base propuesto por *Bookstein* para ordenar los landmarks (Furca-FURCA y Mandíbula Superior-MS), procurando seguir la forma del pez.

Los landmarks fueron digitalizados en las imágenes corregidas de los peces mediante el software de uso libre *Coordinator*, el cual nos proporcionó pares de coordenadas cartesianas 2D (Figura 3).



Figura 3. Interfaz del software *Coordinator*. Este software esta destinado para obtención de coordenadas de landmarks de interés a partir de imágenes de referencia, de esta manera es posible hacer matrices de datos de coordenadas de landmarks de diferentes organismos.

Se definió a la sección anterior como la asociada a estructuras duras de la cabeza y dimensiones cercanas sujetas a poca deformación por factores biológicos (crecimiento, hábitat, entre otros). La sección posterior está asociada a estructuras duras y blandas ubicadas en la cola.

Variabilidad

Para evitar la influencia de casos extraordinarios, se utiliza la mediana para estimar el centroide, que corresponde al promedio geométrico de cada landmark (Ecuación 1). Para la obtención de la variabilidad de cada landmark en torno a su centroide es necesario corregir primeramente sus coordenadas por posición, rotación y escala, para lo cual se aplica la transformación de Procrustes utilizando el programa Past 2.17.

$$XC = \sum_{i=1}^{i=n} xp_i$$

Donde:

XC: X del centroide

Xp: X corregida por Procrustes para cada landmark

Ecuación 1. Centroide a partir de coordenada X corregida por Procrustes.

$$YC = \sum_{i=1}^{i=n} yp_i$$

Donde:

YC: Y del centroide

Yp: Y corregida por Procrustes para cada landmark

Se seleccionarán como llave para la obtención de las ecuaciones (2D y 3D) los landmarks con menor valor obtenidos mediante la Ecuación 2

$$\text{Variabilidad} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\sqrt{(\mathbf{x}p_i - \mathbf{XC})^2 + (\mathbf{y}p_i - \mathbf{YC})^2}}{n} \right]$$

Ecuación 2.
Estimación de la
variabilidad a partir del
centroide corregido
por Procrustes.

Donde:

XC: X del centroide

Xp: X corregida por Procrustes para cada landmark

Morfometría Geométrica 2D

Llave

Para el estudio se procedió a encontrar la dimensión con menor variabilidad, dicha dimensión sirvió como referencia o variable dependiente para la asociación de diferentes dimensiones (Tabla 6) y posteriormente, estimar distancias entre los landmarks restantes y calcular parámetros tradicionales: Lt, Lf, Le, Pe. A la distancia entre landmarks con menor variabilidad se denominó como "llave". En nuestro estudio nos enfocamos a dos secciones corporales de los organismos, la anterior y posterior, para cada una de ellas se obtuvo su respectiva llave. De igual manera, se obtuvieron ecuaciones, relaciones y eficiencia para ambas secciones.

Obtención de ecuaciones 2D

Longitudes (Le, Lf y Lt)

Para estimar Le a partir de landmarks, se calculó Le con las llaves para la sección Anterior $\overrightarrow{\text{OAPEC-PSO}}$ y Posterior $\overrightarrow{\text{OAC-IAA}}$ mediante regresiones $\text{LeLmk}_A = a_A + m_A \overrightarrow{\text{OAPEC-PSO}}$ y $\text{LeLmk}_P = a_P + m_P \overrightarrow{\text{OAC-IAA}}$ (las flechas por encima de los pares de *landmarks* indican que estamos hablando de las distancias entre ellos).

En cuanto a la estimación de L_t y L_f a partir de $LeLmk$ calculada mediante Llaves a partir de landmarks ($LtLmk_A = a_{At} + m_{At}LeLmk_A$, $LtLmk_P = a_{Pt} + m_{Pt}LeLmk_P$, $LfLmk_A = a_{Af} + m_{Af}LeLmk_A$ y $LfLmk_P = a_{Pf} + m_{Pf}LeLmk_P$), se estimaron los parámetros de las ecuaciones mediante regresiones entre los siguientes pares de variables $Le(obs)-Lf(obs)$ y $Le(obs)-Lt(obs)$, sobre las cuales se sustituyeron las $LeLmk$.

Peso

La estimación de Pe se realizó a partir de las llaves Anterior $\overrightarrow{OAPEC-PSO}$ y Posterior $\overleftarrow{OAC-IAA}$, además, se consideraron ecuaciones compuestas de 3 y 4 landmarks, mediante regresiones $Log(Pe_A) = Log(a_A) + Log(m_A)\vec{X}$ y $Log(Pe_P) = Log(a_P) + Log(m_P)\vec{X}$.

Eficiencia de las ecuaciones

La evaluación de la capacidad de estimar adecuadamente los parámetros poblacionales Le , L_t y L_f se realizó comparando los promedios estimados mediante las llaves de las secciones anterior y posterior; $L_t(LlaveA)$, $L_f(LlaveA)$, $Le(LlaveA)$, $L_t(LlaveP)$, $L_f(LlaveP)$, $Le(LlaveP)$, respecto a los promedios observados $L_f(obs)$, $L_t(obs)$ y $Le(obs)$. El peso se evaluó de la misma forma; $Pe(LlaveA)$, $Pe(LlaveP)$, respecto al promedio observado $Pe(obs)$. De igual manera se procedió con los absolutos de sus residuos.

Para analizar estadísticamente la relación entre el Pe , Le , L_t y L_f observados con los calculados mediante las ecuaciones de la parte anterior y posterior del pez, se ejecutaron las pruebas de Kolmogórov-Smirnov, la prueba de Wilcoxon y la prueba t de medias.

Para evaluar la capacidad de las ecuaciones en la estimación de los parámetros L_t , L_f y Le a nivel individuo, se compararon los parámetros observados y los calculados

mediante los landmarks llave de las secciones anterior y posterior, y se obtuvieron los residuos.

Discriminación entre especies 2D

Se realizó una comparación empírica entre especies de la familia *Lutjanidae* con el fin de identificar diferencias morfométricas con *Lutjanus synagris*. Para ello se utilizaron imágenes tomadas de internet de las especies: *Lutjanus campechanus*, *Lutjanus griseus*, *Hoplopagrus guentherii* y *Ocyurus chrysurus*. Se eligió a las dos últimas especies por presentar apariencia muy similar a las del género *Lutjanus*.

El criterio cuantitativo para la diferenciación entre especies en 2D se basó en diferencias en distancias cartesianas entre landmarks Ecuación 3

$$\text{Dist2D} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

Ecuación 3.
Estimación de
la distancia 2D
a partir de
coordenadas
cartesianas 2D

X₁ y X₂: Coordenadas X de las cámaras izquierda y derecha

Y₁ y Y₂: Coordenadas Y de las cámaras izquierda y derecha

La selección de landmarks para la discriminación entre especies cercanas se basó en los siguientes criterios: landmarks fácilmente identificables en las fotografías, con menor variabilidad en torno a su centroide, combinación de landmarks con mayor poder discriminatorio entre los ejes anteroposterior y dorso-ventral, menor cantidad de landmarks para la combinación de dichos ejes mediante selección de 3 puntos (triangulación), y mejor grado de ajuste entre los landmarks correspondientes a diversas triangulaciones.

Con la versión de prueba de *Statgraphics Centurion XVI.I*, se realizaron las regresiones múltiples entre las distancias, probando el grado de ajuste de las diferentes triangulaciones respecto a la llave como variable dependiente.

Una vez obtenidas las diferentes ecuaciones, se eligieron aquellas que como máximo involucraran 4 landmarks diferentes. Finalmente, sólo se consideraron aquellas ecuaciones con menor redundancia de landmarks.

Eficiencia de ecuaciones 2D

El grado de similitud de un organismo fotografiado respecto a *L. synagris*, se midió conforme al porcentaje de diferencia medida en la foto para la llave y la distancia obtenida para la misma llave como producto de la combinación de landmarks en las ecuaciones. De acuerdo con lo anterior, para el grado de similitud se consideró como valor observado al calculado como llave a partir de la distancia en pixeles (Discriminación entre especies 2D) de los landmarks correspondientes para la creación de una llave en una imagen del organismo a comparar. Como valor esperado se tomó a la llave calculada por las ecuaciones a obtener. La pertenencia o no a la especie se determinó por el porcentaje de aproximación al valor esperado.

Morfometría Geométrica 3D

Geometría y calibración 3D de las cámaras

Con un par de cámaras se tomaron sincrónicamente estéreo-pares de individuos de *L. synagris* montados sobre una placa de unicel para mantener al mínimo las variables involucradas en los cálculos, en la medida de lo posible se alinearon ortogonalmente los ejes 3D de las cámaras conforme a la Figura 4.

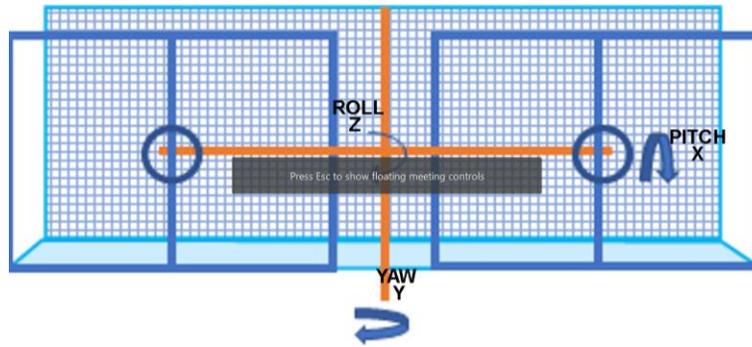


Figura 4. Alineación ortogonal de los ejes 3D de las cámaras izquierda y derecha. Angulo de rotación del plano X-Y: giro del eje Z = "roll"; ángulo de rotación del plano Z-Y: giro del eje X = "pitch"; ángulo de rotación del plano X-Z: giro del eje Y = "yaw".

Ya que los ejes ortogonales fueron corregidos en la etapa de procesamiento de imágenes (corrección de imágenes y parámetros de corrección (calibración 2D)), la profundidad se estima mediante triangulación desde la perspectiva del plano superior (sobre el plano Z-X), para lo anterior se utilizó el método de calibración basado en triangulación de landmarks en imágenes corregidas descrito en el marco teórico, en donde es necesario conocer la distancia entre cámaras, la distancia teórica en píxeles entre el plano de las cámaras y el plano de la escena, el ángulo de visión de cada cámara para poder estimar la proporción entre píxeles y centímetros, y las diferencias en posición ortogonal de cada cámara.

Este procedimiento y los algoritmos implicados se encuentran en proceso de publicación, por lo que aquí no abordamos en sus detalles, únicamente en su eficiencia.

Obtención de ecuaciones 3D (Le)

Se calcularon las coordenadas 3D a partir de los datos obtenidos en la calibración y las coordenadas 2D.

En el procedimiento 2D, la longitud estándar fue la que se estimó con mayor precisión, además de ser ésta la más utilizada en estudios de pesquería, por estar razón, el procedimiento 3D se hace únicamente con esta medida.

Le 3D se calculó mediante la Ecuación 4 con las coordenadas 3D de los landmarks correspondientes MS – PMP.

$$\text{Dist3D} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$$

X₁ y X₂: Coordenadas X de las cámaras izquierda y derecha

Y₁ y Y₂: Coordenadas Y de las cámaras izquierda y derecha

Z₁ y Z₂: Coordenadas Z de las cámaras izquierda y derecha

Ecuación 4.
Estimación de la distancia 3D a partir de coordenadas cartesianas 3D

Utilizando Le observada y Le 3D calculada, se realizó una regresión lineal, de ella se obtuvo la pendiente y el intercepto, los cuales fueron sustituidos en la ecuación de la regresión lineal entre MS y PMP para la estimación de Le corregida en 3D (Ecuación 5 Ecuación 1).

$$\text{Le} = \mathbf{a} + \mathbf{b} * \text{DIST3D } \overleftarrow{\text{MS} - \text{PMP}}$$

Le: Longitud estándar

a y b: Constantes

MS: Landmark correspondiente a maxila superior

PMP: Landmark correspondiente al nacimiento de la aleta caudal.

Ecuación 5.
Regresión lineal simple para estimar Le.

Eficiencia de ecuaciones

Con la versión de prueba de *Statgraphics Centurion XVI.1*, se ejecutaron las pruebas: comparación de varias muestras, para evaluar la eficiencia a nivel poblacional; y comparación de líneas, para evaluar la eficiencia a nivel individual. Adicionalmente se compararon los promedios, pendientes y r² ajustada, todo esto de Le obtenida mediante el proceso 2D, 3D y el observado.

Discriminación de Lutjanus synagris 3D

La discriminación respecto a otras formas morfométricas se llevó a cabo tomando como base los mismos criterios, principios y conjuntos de landmarks que conforman las ecuaciones para calcular la llave 2D, pero agregando la coordenada “Z” correspondiente a la profundidad, siguiendo los mismos criterios estadísticos para una relación lineal.

Eficiencia de ecuaciones 3D

En 3D solo se trabajó utilizando las imágenes de *L. synagris* muestreadas en un principio, debido a que, para los procedimientos 3D se debe calcular la coordenada Z y para ello es necesario contar con pares estereoscópicos, los cuales no pudieron obtenerse en campo ni encontrarse en internet.

El grado de similitud se obtuvo siguiendo los mismos criterios del apartado “Eficiencia de ecuaciones de la discriminación entre especies Morfometría Geométrica 2D”.

RESULTADOS

Muestreo de organismos

Obtención de organismos

Se obtuvieron 36 organismos de la especie *Lutjanus synagris* de entre 19 cm y 35 cm de longitud estándar (Figura 5)

Intervalos (Le)

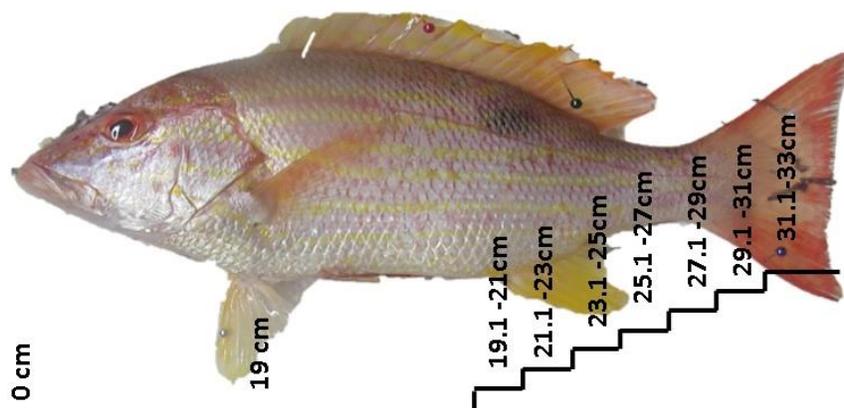


Figura 5. Intervalos de longitud. Se representan en el pez las longitudes de las 8 clases de talla consideradas.

Se consideraron 8 clases de talla (Tabla 1) a intervalos de longitud de $2 \text{ cm} \pm 1 \text{ cm}$.

Tabla 1. Centros de clase por intervalo de tallas. Se ordenaron los datos conforme a las variables categóricas: clase de talla y centro de clase.

Clase de talla	Centro de Clase	No. De organismos
1	(19< 20 <21]	4
2	(21.1< 22 <23]	4
3	(23.1< 24 <25]	8
4	(25.1< 26 <27]	4
5	(27.1< 28 <29]	8
6	(29.1< 30 <31]	1
7	(31.1< 32 <33]	1
8	(33.1< 34 <35]	1

Parámetros biológicos (dimensiones corporales)

Los parámetros Longitud total (Lt), Longitud estándar (Le), Longitud furcal (Lf) y Peso eviscerado (Pe) se muestran en la Tabla 2. Las longitudes se midieron en centímetros y el peso en gramos.

Tabla 2. Dimensiones medidas directamente.

N	Lt (cm)	Le (cm)	Lf (cm)	Pe (gr)	N	Lt (cm)	Le (cm)	Lf (cm)	Pe (gr)
1	34.1	29	33.5	539	20	28.7	22.2	26.5	296
2	34.6	28.6	33.9	554	21	35.5	28.5	33	658
3	32.7	27.8	31.2	480	22	34.2	28.3	32.7	545
4	35.8	28.4	33.2	570	23	30	24.4	27.5	360
5	25.1	20.5	23.5	220	24	29.2	23.1	27.2	326
6	30	24.3	27.9	345	25	41.4	33	38.2	893
7	23.4	19.2	22	184	26	30.3	25.9	28.1	370
8	27	22.5	25.3	265	27	31.9	25	28.4	408
9	29.1	24.4	27.4	335	28	32.5	26.4	30.3	483
10	28.3	23.2	26.7	309	29	32.6	27.7	30.5	490
11	27.6	23	25.6	279	30	30.2	25.7	28.1	359
12	40.3	33.5	38	888	31	34.3	27.9	31.4	519
13	37	30.6	34.7	677	32	37	30.2	34.5	669
14	23.6	19.2	22.1	178	33	47.4	38.9	44.6	1453
15	26.2	21.5	24.3	240	34	36.6	29.7	34.3	622
16	24.4	19.9	22.6	197	35	36.6	29.2	33.9	629
17	30.7	25	29.8	410	36	37.3	30.1	34.5	646
18	30.4	24.4	29	373					
19	32	26.3	29.5	443					

Plataforma de fotografiado

Los organismos se fotografiaron en la estructura mostrada en la Figura 6. La distancia entre cámaras fue de 13.0 cm, la distancia entre los planos de las cámaras y de la plataforma fue de 60 cm. Se usaron 2 cámaras situadas a 6.5 cm del centro de la plataforma para la toma sincrónica de pares estereoscópicos. Para el calibrado se tomaron fotos del campo cuadrículado a dos diferentes distancias por cada cámara para la estimación de su respectivo campo de visión (necesarios para la geometría 2D y 3D), y pares sincronizados del fondo cuadrículado para estimar el ángulo de inclinación y la profundidad equivalente en pixeles respecto al plano de fotografiado (necesario para la geometría 3D).

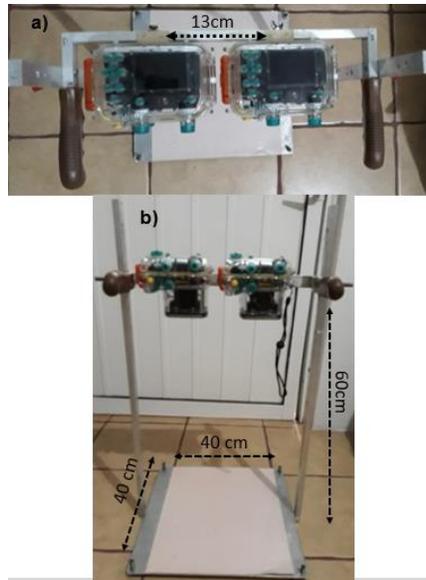


Figura 6. Plataforma de medición. a) Las cámaras se dispusieron a 60 cm de la plancha b) con una separación entre ellas de 13 cm c) se añadieron tornillos sin cabeza en los vértices para nivelar la plataforma.

Captura de imágenes

La concavidad en la lámina de unicel cumplió con el propósito de mantener un posicionamiento recto y alargado, nivelando el volumen del pez sobre la lámina.

Cada pez se fotografió por cuadruplicado, eligiendo la mejor toma para el estudio, para un total de 144 imágenes por cada cámara, de las que se trabajaron 36 estéreo pares equivalentes a 36 peces (Figura 7). Uno de los factores que afectaron fuertemente la calidad de las fotos fue la iluminación, por ello se optó por tomar 4 fotos de cada organismo.

De todas las posiciones de iluminación que se ensayaron el mejor resultado se obtuvo posicionando la lampara directamente en un ángulo de 75° tomando como referencia el centro de la plataforma. La distancia de la lampara a la plancha se modificaba dependiendo de la luz de la habitación y del tamaño del organismo, ya que a diferentes tamaños varían los ángulos de las sombras, afectando la calidad de la imagen.



Figura 7. Posicionamiento estándar del pez sobre la plataforma de fotografiado. Se pueden apreciar las estructuras blandas del pez sostenidas por alfileres.

Para los cálculos 2D se consideraron únicamente las fotos de la cámara derecha, y para el procesamiento 3D las fotos de ambas cámaras.

Procesamiento de imágenes

Corrección de distorsión

La cámara derecha mostró mayor distorsión geométrica que la izquierda. En la Figura 8 se muestra la distribución espacial de los landmarks en el enmallado en torno a cada vértice en un plano 2D. Por columnas se muestran las imágenes de cada cámara, y por renglón las versiones tanto sin corregir como las corregidas. En dicha gráfica se observa que hay bastante distorsión en las imágenes sin corregir, que dicha distorsión sigue patrones curvilíneos, que la distorsión es mayor en las orillas de la imagen, y que la distorsión es diferente entre cada cámara. Después de la corrección, la distorsión disminuye notablemente, aunque no se elimina del todo; la diferencia en posición entre ambas cámaras indica diferencias de escala entre las mismas (Tabla 3).

Tabla 3. Precisión de corrección de imágenes cámaras izquierda y derecha.

<i>Cam</i>	<i>PromD</i>	<i>ResMin</i>	<i>ResMax</i>	<i>RangoRes</i>	<i>PromRes</i>	<i>PromDistEst</i>
	(<i>pix</i>)	(<i>pix</i>)	(<i>pix</i>)	(<i>pix</i>)	(<i>pix</i>)	(<i>cm</i>)
Sin	Izq	256.2596	0.2283	10.2271	9.9987	3.2301
	Der	257.6990	-7.5711	5.3313	12.9024	2.7813
Corr	Izq	259.4215	0.4041	2.4215	2.0173	1.0173
	Der	264.0441	-2.0441	1.9576	4.0018	0.7709

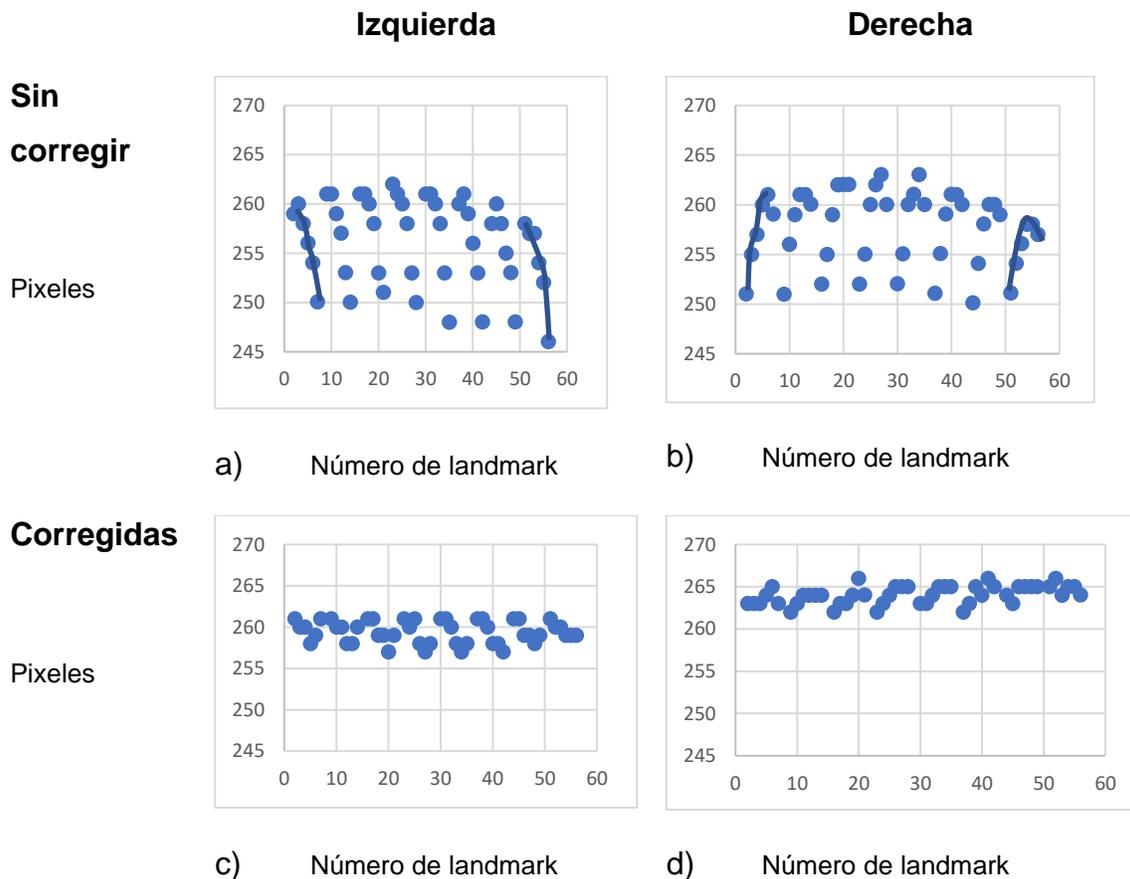


Figura 8. Gráficas de distancias entre landmarks. Se muestra la precisión en la corrección de imágenes izquierdas y derechas corregidas y sin corregir. Gráfica a) imagen izquierda sin corregir, b) imagen derecha sin corregir, c) imagen izquierda corregida, d) imagen derecha corregida.

La Tabla 3 es la versión numérica de la Figura 8 , donde se observa, por cada imagen corregida y sin corregir, la distancia promedio entre puntos, los residuos máximos y mínimos de las distancias calculadas (diferencia entre las distancias

calculadas y las distancias promedio), el rango residual (diferencia entre residuos máximos y mínimos), el residuo promedio y la distancia promedio estimada en centímetros. En esta tabla se confirma que la distorsión geométrica es diferente entre las cámaras de acuerdo con el rango residual en pixeles sin corregir ($i=9.9987>d=12.9024$) y que el promedio de distancia estimado es muy cercano al real (5.0 cm). Gracias a la corrección, el rango de distorsión disminuye notablemente, con un error de ± 2 pixeles, así mismo, el nivel de predicción promedio de la distancia real en centímetros alcanzaría un residual de 0.0049 cm y -0.0024 cm en cada cámara (Figura 9).

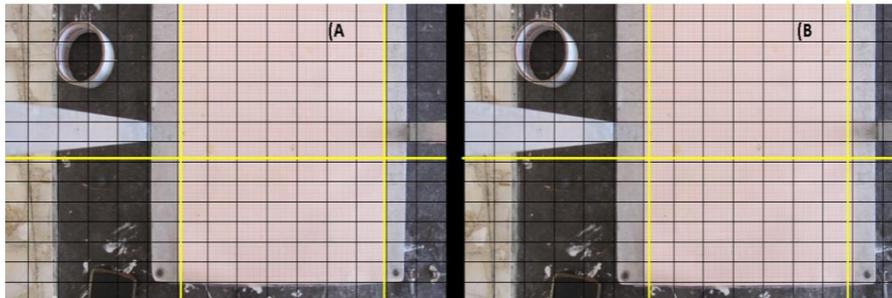


Figura 9. Resultados de la corrección en cámara izquierda. A) Imagen sin corregir B) Imagen corregida. Se comparan las líneas del enmallado con las líneas del papel milimétrico en la imagen.

Parámetros de Corrección (Calibración 2D)

Con relación a la estimación de los parámetros de corrección de la aberración geométrica respecto a la cuadrícula de referencia, los resultados de la corrección (Figura 9) se encuentran en la Tabla 4. En ésta se incluyen los parámetros para la distorsión de barril (primer renglón), corrección de rotación ortogonal (renglones 2, 3 y 4).

Tabla 4. Parámetros de corrección de cámara Adobe Photoshop

Parámetro	Cámara Derecha	Cámara Izquierda
Distorsión de Barril	+5.90	+6.10
Inclinación	-0.93	-0.32
Perspectiva H	0	-5
Perspectiva V	+2	+2

Criterios de procesamiento de datos

En la Figura 10 se presenta la disposición de los landmarks en el cuerpo del pez.

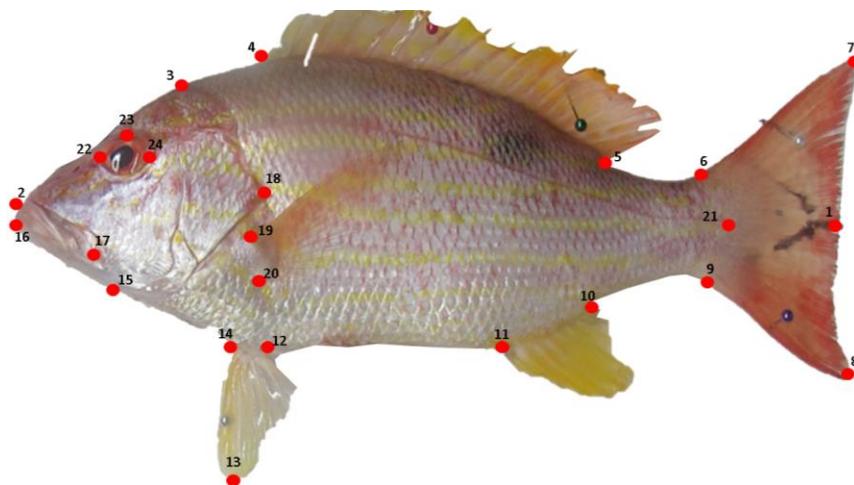


Figura 10. Disposición de los 24 landmarks. Ubicación de landmarks sobre el plano lateral derecho de un ejemplar de la especie *Lutjanus synagris*.

Las convenciones utilizadas para la nomenclatura de los landmarks, su ubicación, importancia y abreviatura se presentan en la Tabla 5

Tabla 5. Descripción de los Landmarks elegidos.

	Punto de referencia (landmarks)	Ubicación	Abreviatura
1	Furca	Es el ángulo que se forma en medio de la aleta caudal, en caso de que ésta sea cóncava	FURCA
2	Mandíbula superior	Al inicio de la mandíbula superior, en la parte frontal del pez.	MS
3	Foramen posterior del cráneo.	En la parte final de la cabeza del pez, como una prolongación de la línea del opérculo	FPC
4	Origen aleta dorsal espinosa.	En el origen de la aleta dorsal.	OADE
5	Inserción aleta dorsal blanda.	En el punto de inserción de la aleta dorsal blanda.	IADB
6	Origen aleta caudal	En el inicio de la aleta caudal, en la parte superior del pez.	OAC
7	Aleta caudal lóbulo dorsal	Es el fin dorsal de la aleta caudal.	ACL D
8	Aleta caudal lóbulo ventral	Es el fin ventral de la aleta caudal.	ACL V
9	Inserción aleta caudal	En la parte inferior, donde inicia la aleta caudal.	IAC
10	Inserción aleta anal	En la inserción de la aleta anal, en la parte posterior del pez	IAA
11	Origen aleta anal	En el origen de esta aleta; en la parte anterior.	OAA
12	Inserción aleta pélvica	En la inserción de la aleta; en la parte posterior	IAPEL
13	Fin aleta pélvica.	En el punto más alto de la aleta, con respecto a su base.	FAPEL
14	Origen aleta pélvica	Localizado en la parte superior en donde se origina la aleta	OAPEL
15	Margen inferior del opérculo	En la prolongación del opérculo, en la parte ventral del pez.	MIO
16	Mandíbula inferior	Al margen de la mandíbula inferior del pez.	MI
17	Apertura de la mandíbula	En donde comienza la mandíbula inferior, donde se une a la mandíbula superior.	AM
18	Opérculo	En el opérculo, a la altura del origen de la aleta pectoral.	O
19	Origen aleta pectoral	En la parte superior, donde se origina la aleta.	OAP E C
20	Inserción aleta pectoral	En la parte inferior, en donde se inserta la aleta	IAPE C
21	Punto medio del pedúnculo	Se localiza a la mitad de la distancia entre el origen y la inserción de la aleta caudal.	PMP
22	Punto lateral anterior del ojo	En la parte lateral del ojo que se encuentra del lado de la boca.	PLAO
23	Punto superior del ojo	En la cuenca del ojo, por encima de la membrana ocular.	PSO
24	Punto lateral posterior del ojo	En la parte posterior del ojo.	PLPO

En la Figura 11 se presentan las longitudes, con los respectivos landmarks que las representan, y la convencionalidad con la que fueron capturadas. Los landmarks MS-FURCA corresponden al inicio y fin de las dimensiones corporales, la distancia

entre ellos indica la longitud furcal (L_f), la longitud estándar es calculada mediante los landmarks MS-PMP los cuales indican la distancia entre el extremo anterior del organismo y el inicio de la aleta caudal o parte media del pedúnculo, y la longitud total es calculada mediante los landmarks MS-ACLD/ACLV (la elección de alguno de estos dos landmarks se asoció a la ubicación más lejana que represente el fin de las dimensiones del pez).



Figura 11 .Ubicación de puntos de control (landmarks) para la estimación de longitudes

Variabilidad

En la Tabla 6 se enlistan los landmarks con menor variabilidad en orden descendente. La dimensión significativa con menor variabilidad se encuentra entre los landmarks OAPEC – PSO por lo que se considera a esta distancia como variable “Llave” para el resto de los cálculos de dimensiones y biomasa a partir de landmarks. Los landmarks están ordenados de menor a mayor. No se eligieron algunos landmarks con menor variabilidad debido a que eran muy cercanos a otros con menor variabilidad, a que no eran fáciles de distinguir en fotografías y a que algunos se encuentran en estructuras que no siempre se pueden ubicar de manera perfecta ya que se localizan en estructuras móviles.

Tabla 6. Landmarks con menor variabilidad en la zona anterior y posterior del cuerpo (región de la cabeza).

Zona	Landmark	Desviación estándar del centroide (variabilidad)
A	OAPEC	0.002031416
A	PSO	0.002277553
A	AM	0.002759573
A	PLAO	0.002901772
A	IAPEL	0.003437535
A	PLPO	0.003489048
A	OAPEL	0.003654191
A	MI	0.003702052
A	MS	0.003887752
P	IAA	0.002226325
P	OAC	0.002526459
P	PMP	0.003369201
P	OAA	0.003409396
P	IAC	0.003676183
P	IADB	0.004640446

En la Figura 12 se muestran los landmarks que fueron elegidos para la creación de ecuaciones. A partir de estos landmarks (con menor variabilidad) se obtienen los

modelos para generar las ecuaciones que calculan la “Llave” y a su vez, los parámetros Lf, Lt, Le, Pe. Se señalan las distancias que conforman la llave.

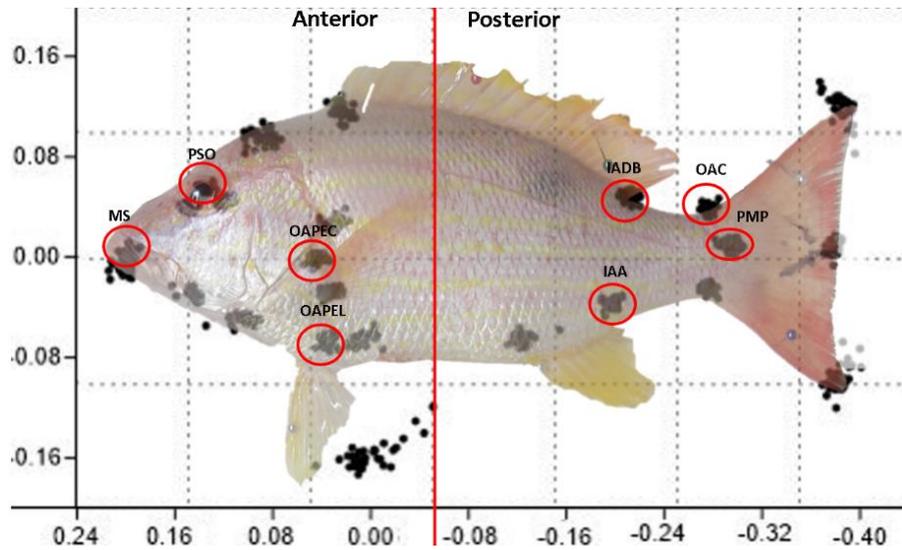


Figura 12. Patrón básico de landmarks y división en secciones anterior - posterior

Morfometría Geométrica 2D

Parte de los objetivos planteados se obtienen con geometría 2D, aquí se presentan dichos resultados.

Relaciones Longitud-Longitud con datos observados (Le, Lt, Lf)

Las relaciones matemáticas entre Le como variable independiente y Lf y Lt como variables dependientes a partir de la longitud estándar, se encuentran en la Tabla 7.

Tabla 7. Ecuaciones de Lf y Lt obtenidas mediante la relación Le (obs) – Lf y Lt (obs)

Parámetro	Ecuación	R² Ajustado (%)	p- value
Lf	$Lf = -0.146655 + 1.14953 * Le$	98.1661	0

Lt	$Lt = 0.322711 + 1.2099 * Le$	97.842	0
-----------	-------------------------------	--------	---

Cálculo de ecuaciones sección anterior (OAPEC - PSO, Le, Lt, Lf, Pe)

Llave

El cálculo de la llave en la sección anterior del pez ($\overrightarrow{OAPEC - PSO}$) se hizo a partir de la combinación de distancias entre los landmarks MS-OAPEL, MS-OAPEC, MS-PSO, OAPEL-OAPEC, OAPEL-PSO, OAPEC-PSO (Tabla 8). En todos los casos la *p* de la ANOVA indica diferencia significativa entre los residuos y el modelo. El mayor valor de R cuadrada ajustada se obtuvo en la ecuación con 4 landmarks.

Tabla 8. Ecuaciones llave obtenidas con 4 y 3 landmarks en la sección anterior del pez (OAPEC-PSO).

Landmarks	Ecuación	R²Ajustada (%)	p- Value
4	$\overrightarrow{OAPEC - PSO} = -1.12735 - 0.567548 * \overrightarrow{MS - OAPEL} + 0.745831 * \overrightarrow{MS - OAPEC} - 0.289439 * \overrightarrow{MS - PSO} + 0.537401 * \overrightarrow{OAPEL - OAPEC} + 0.96681 * \overrightarrow{OAPEL - PSO}$	99.9904	0.0000
3	$\overrightarrow{OAPEC - PSO} = -10.1319 + 0.264692 * \overrightarrow{MS - OAPEL} + 0.401943 * \overrightarrow{MS - OAPEC}$	97.1431	0.0000

Ecuación para estimación de Le a partir de la Llave

En la Tabla 9 se muestra la ecuación para el cálculo de Le a partir de la llave ($\overrightarrow{OAPEC - PSO}$) con mejor R²Ajustada:

Tabla 9. Ecuación de la sección anterior para calcular Le de *Lutjanus synagris*:

Parámetro	Ecuación	R²Ajustado (%)	p- Value
Le	$Le = 4.34429 + 0.0722003 * \overrightarrow{OAPEC - PSO}$	92.7883	0.000

Relaciones Longitud-Longitud

La estimación de Lt y Lf se obtuvo a partir de la sustitución del valor de Le (calculado) proveniente de la llave (OAPEC-PSO) con mejor R² Ajustada en las ecuaciones de la Tabla 10.

Tabla 10. Ecuaciones de Lf y Lt sustituyendo Le(obs) por Le (calculado con la llave OAPEC-PSO).

Parámetro	Ecuación	R ² Ajustado (%)	p-Value
Lf	$Lf = -0.146655 + 1.14953 * Le(cal)$	98.1661	0.000
Lt	$Lt = 0.322711 + 1.2099 * Le(cal)$	97.842	0.000

Ecuaciones Longitud-Peso

Se obtuvieron 3 ecuaciones con diferente número de landmarks para el cálculo de Pe: 1) a partir de OAPEC, PSO (llave); 2) considerando OAPEC, PSO, OAPEL; 3) considerando OAPEC, PSO, MS y OAPEL (Tabla 11).

Tabla 11 Ecuaciones de la sección anterior para calcular Pe.

Landmarks	Ecuación	R ² Ajustado (%)	p-Value
2	$Pe = \exp(-8.37548 + 2.53144 * \ln(\overline{OAPEC - PSO}))$	92.3957	0.000
3	$LOG(Pe) = -9.29323 + 0.482697 * LOG(\overline{OAPEL - OAPEC}) + 2.10081 * LOG(\overline{OAPEL - PSO})$	98.1911	0.000
4	$LOG(Pe) = -9.35442 + 0.338513 * LOG(\overline{MS - PSO}) +$	98.2818	0.000

$$0.4287 * \text{LOG}(\overline{\text{OAPEL}} - \text{OAPEC}) + \\ 1.8532 * \text{LOG}(\overline{\text{OAPEL}} - \text{PSO})$$

Eficiencia de las ecuaciones

Se obtuvieron los promedios de los datos observados y calculados mediante los landmarks llave (OAPEC-PSO) para cada uno de los parámetros Lt, Lf y Le, se obtuvieron los residuos para cada uno (Tabla 12).

Tabla 12 Promedio de los valores observados y calculados de los parámetros Lt, Lf, Le.

Parámetros	Prom obs (cm)	Prom calc (cm)	Res (cm)
LT	32.1666	32.1666	5.80281E-05
LF	30.1083	30.1083	-4.354E-06
LE	26.3194	26.3194	-1.49201E-06

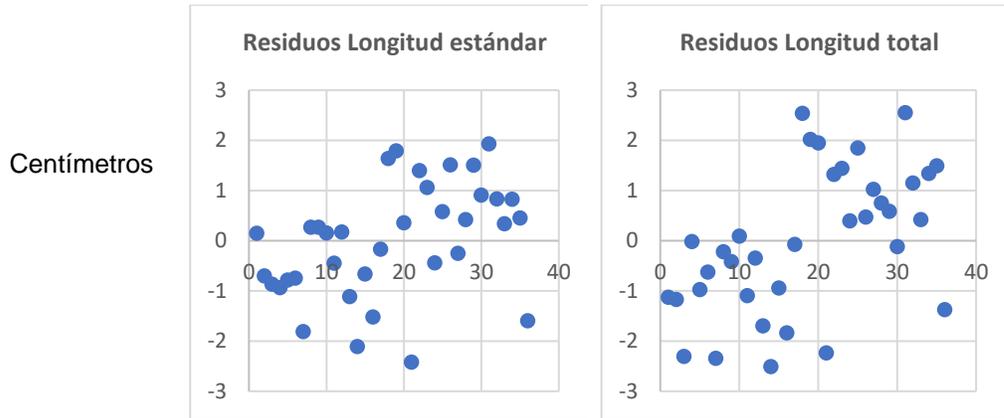
De cada parámetro Lt, Lf y Le, se obtuvieron los residuos máximos y mínimos (Tabla 13).

Tabla 13 Residuos máximos y mínimos de los residuos de los parámetros Lt, Lf, Le mediante landmarks llave (OAPEC-PSO) sección anterior

Parámetros	Res máx (cm)	Res mín (cm)
<i>LT</i>	2.5546	-2.5073
<i>LF</i>	2.9846	-2.3963
<i>LE</i>	1.9287	-2.4195

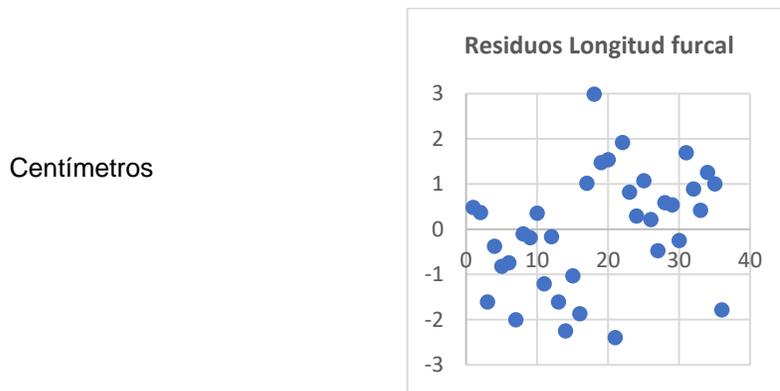
De cada parámetro Le, Lt y Lf, se graficaron los residuos por número de organismo (Figura 13).

Figura 13. Gráficas de residuos sección anterior: a) Le; b) Lt; c) Lf



a) Número de organismo

b) Número de organismo



c) Número de organismo

Del parámetro P_e se obtuvieron los promedios observados y calculados mediante las ecuaciones obtenidas a partir de 2 landmarks (llave), con 3 y 4 landmarks y los residuos de la comparación entre dichos promedios (Tabla 14).

Tabla 14. Comparación de promedios y residuos entre Pe obtenido y Pe calculados con las diferentes ecuaciones de Pe obtenidas a partir de la llave, con 3 y 4 landmarks de la sección anterior.

Parámetro	Prom obs (cm)	Prom calc (cm)	Res (cm)
PE (LLAVE)	478.111111	475.898143	2.21296773
PE (3 LANDMARKS)	478.111111	478.494021	-0.38290961
PE (4 LANDMARKS)	478.111111	478.1574	-0.04628909

Se obtuvieron los residuos máximos y mínimos en gramos del cálculo del Pe a través de las ecuaciones resultantes de la Llave, 3 y 4 landmarks.

Tabla 15. Residuos máximos y mínimos de Pe mediante landmarks llave (OAPEC-PSO) sección anterior

Parámetro	Res máx (g)	Res mín (g)
PE (LLAVE)	96.2212	-132.0002
PE (3 LANDMARKS)	58.6513	-67.0456
PE (4 LANDMARKS)	66.7123	-51.6507

Se obtuvieron los residuos absolutos del Pe para cada ecuación (2 landmarks, 3 landmarks y 4 landmarks) por número de organismo (Figura 14).

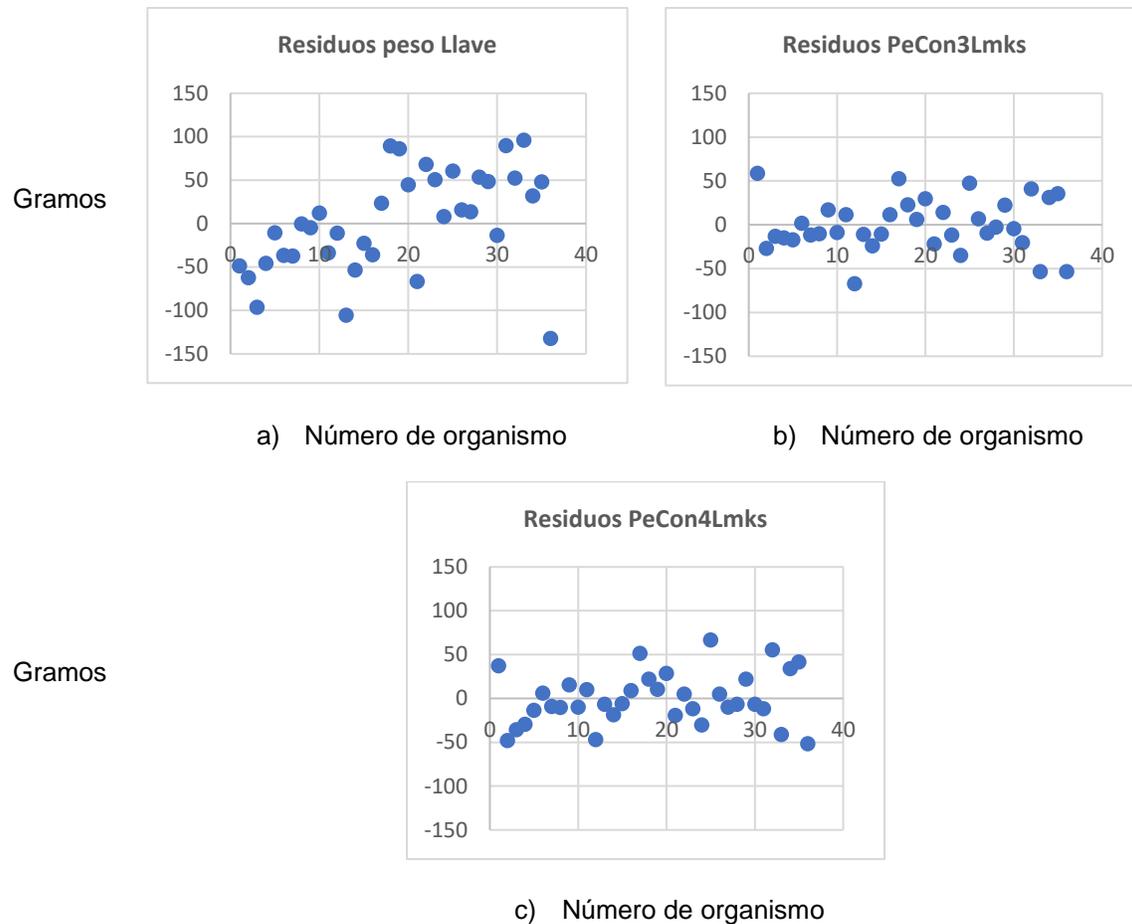


Figura 14. Gráficas de residuos Pe para la sección anterior de cada ecuación: a) Llave (2 Lmks); b) 3 Lmks; c) 4 Lmks.

Cálculo de ecuaciones sección posterior ($\overrightarrow{OAC - IAA}$, Lf , Le , Lt y Pe)

Llave

El cálculo de la llave en la sección posterior del pez ($\overrightarrow{OAC - IAA}$) se hizo a partir de la combinación de distancias entre los landmarks IADB-OAC, IADEB – IAA, IADB – PMP, OAC – PMP, IAA – PMP (Tabla 16). En todos los casos la p de la ANOVA indica diferencia significativa entre los residuos y el modelo. El mayor valor de r cuadrada ajustada se obtuvo en la ecuación con 4 landmarks.

Tabla 16. Ecuaciones llave sección posterior del pez. (IAC-IAA)

Landmarks	Ecuación	R ² Ajustada (%)	p- Value
4	$\overline{OAC - IAA} = 0.986461 + 1.63946*\overline{IADB - OAC} + 0.426787*\overline{IADB - IAA} - 1.64922*\overline{IADB - PMP} + 1.21876*\overline{OAC - PMP} + 0.695291*\overline{IAA - PMP}$	99.9472	0.0000
3	$\overline{OAC - IAA} = 19.733 - 1.10057*\overline{OAC - PMP} + 1.24068*\overline{IAA - PMP}$	97.2391	0.0000

Ecuaciones Le a partir de la Llave

Ecuaciones para calcular Le a partir de la llave ($\overline{OAC - IAA}$) con mejor R²Ajustada (Tabla 17):

Tabla 17. Ecuaciones de la sección posterior para calcular Le de *Lutjanus synagris*:

Parámetro	Ecuación	R ² Ajustado (%)	p- Value
Le	$Le = 3.65492 + 0.0695138*\overline{OAC - IAA}$	95.5182	0.000

Relaciones Longitud-Longitud

Se substituyó el valor de Le (calculado) a partir de la llave ($\overline{OAC - IAA}$) con mejor R²Ajustada en las ecuaciones de la Tabla 18 para la estimación de los parámetros Lt y Lf (Tabla 18).

Tabla 18. Ecuaciones de Lf y Lt substituyendo Le(obs) por Le (calculado con la llave OAC-IAA).

Parámetro	Ecuación	R ² Ajustado (%)	p- Value
Lf	$Lf = -0.146655 + 1.14953*Le(cal)$	98.1661	0
Lt	$Lt = 0.322711 + 1.2099*Le(cal)$	97.842	0

Ecuaciones Longitud-Peso

Se obtuvieron 3 ecuaciones con diferente número de landmarks para calcular Pe: 1) a partir de OAC, IAA (llave); 2) considerando IADB, PMP, IAA; 3) considerando IADB, PMP, IAA y OAC (Tabla 19).

Tabla 19 Ecuaciones de la sección posterior para calcular el Pe.

Landmarks	Ecuación	R ² Ajustado (%)	p-Value
2	$Pe = \exp(-9.02877 + 2.61559 \cdot \ln(\overline{OAC} - \overline{IAA}))$	93.705	0.000
3	$\text{LOG}(Pe) = -9.25961 + 1.83861 \cdot \text{LOG}(\overline{IAADB} - \overline{IAA}) + 0.429392 \cdot \text{LOG}(\overline{IAADB} - \overline{PMP}) + 0.463977 \cdot \text{LOG}(\overline{IAA} - \overline{PMP})$	97.9776	0.000
4	$\text{LOG}(Pe) = -8.81743 + 0.192707 \cdot \text{LOG}(\overline{IAADB} - \overline{OAC}) + 1.56152 \cdot \text{LOG}(\overline{IAADB} - \overline{IAA}) + 0.559046 \cdot \text{LOG}(\overline{OAC} - \overline{IAA}) + 0.420177 \cdot \text{LOG}(\overline{OAC} - \overline{PMP})$	98.1226	0.000

Eficiencia de las ecuaciones

Se obtuvieron los promedios de los parámetros Lt, Lf y Le observados y calculados mediante la llave, así como los residuos de la comparación entre los promedios observados y calculados de dichos parámetros (Tabla 20).

Tabla 20. Promedio de los valores observados y calculados de los parámetros Lt, Lf, Le.

Parámetros	Prom obs (cm)	Prom calc (cm)	Res (cm)
LT	32.1666	32.0719	0.0947
LF	30.1083	30.0184	0.0899
LE	26.3194	26.2412	0.0782

De los parámetros Lt, Lf y Le calculados mediante la llave de la sección posterior (OAC-IAA) se obtuvieron los residuos de los promedios y los residuos máximos y mínimos (Tabla 21).

Tabla 21 Residuos máximos y mínimos de los parámetros Lt, Lf, Le mediante landmarks llave (OAC – IAA) sección posterior.

Parámetros	Res máx (cm)	Res mí(cm)
LT	2.8535	-3.1063
LF	3.6254	-2.3664
LE	2.8167	-1.624834

De cada parámetro Le, Lt y Lf, se graficaron los residuos por número de organismo (Figura 15).

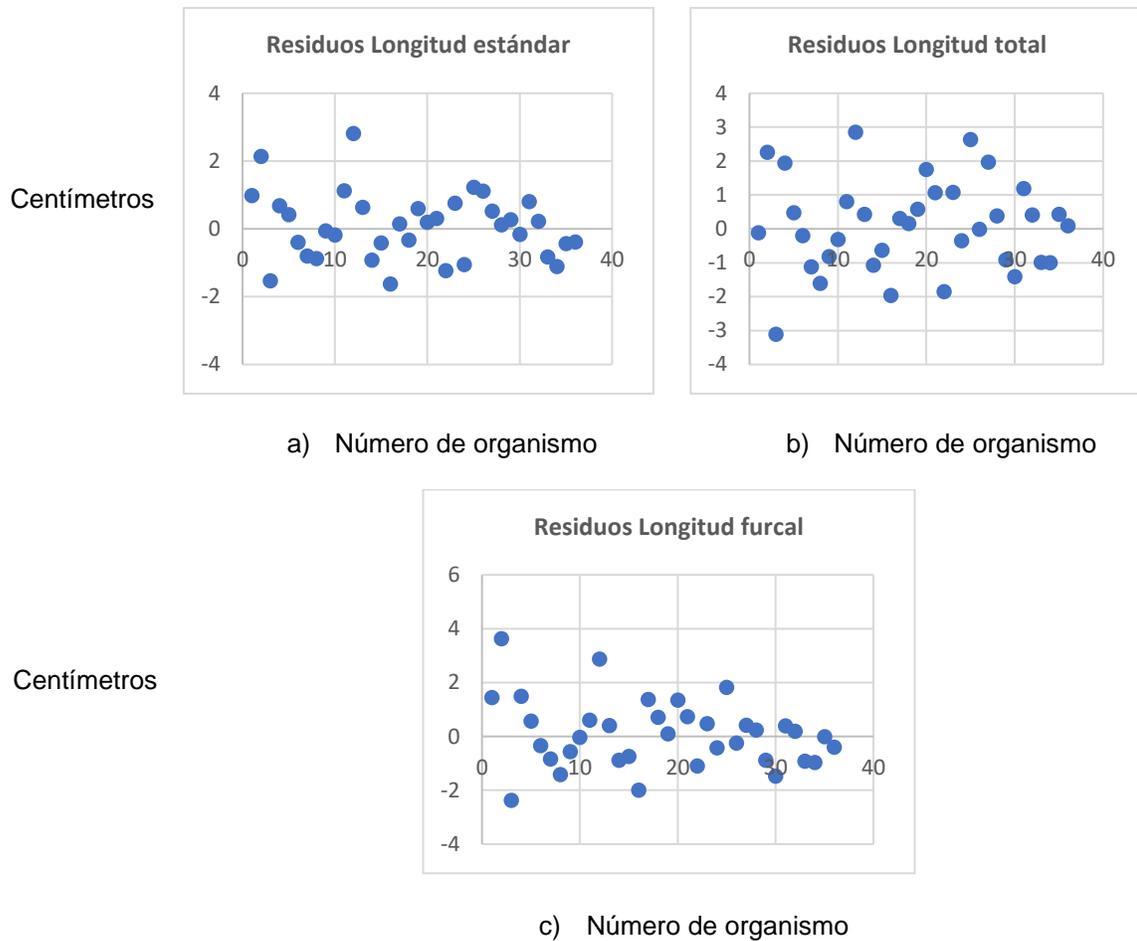


Figura 15. Gráficas de residuos sección posterior: a) Le; b) Lt, c) Lf

Del parámetro Pe se obtuvieron los promedios observados y calculados mediante las ecuaciones obtenidas a partir de 2 landmarks (llave), con 3 y 4 landmarks y los residuos de la comparación entre dichos promedios (Tabla 22).

Tabla 22. Comparación de promedios y residuos entre Pe obtenido y Pe calculados con las diferentes ecuaciones de Pe obtenidas a partir de la llave, con 3 y 4 landmarks de la sección posterior.

Parámetro	Prom obs (cm)	Prom calc (cm)	Res (cm)
PE (LLAVE)	478.111111	475.642944	2.46816737
PE (3 LANDMARKS)	478.111111	478.635665	-0.52455371
PE (4 LANDMARKS)	478.111111	478.348512	-0.23740081

Se obtuvieron los residuos máximos y mínimos en gramos del cálculo del Pe a través de las ecuaciones resultantes de la Llave, 3 y 4 landmarks.

Tabla 23. Residuos máximos y mínimos de Pe mediante landmarks llave (OAC – IAA) sección posterior.

Parámetro	Res máx (g)	Res mín (g)
PE (LLAVE)	168.4623	-142.2438
PE (3 LANDMARKS)	76.3746	-89.7694
PE (4 LANDMARKS)	80.0806	-81.3920

Se obtuvieron los residuos del Pe para cada ecuación (2 landmarks, 3 landmarks y 4 landmarks) por número de organismo (Figura 16).

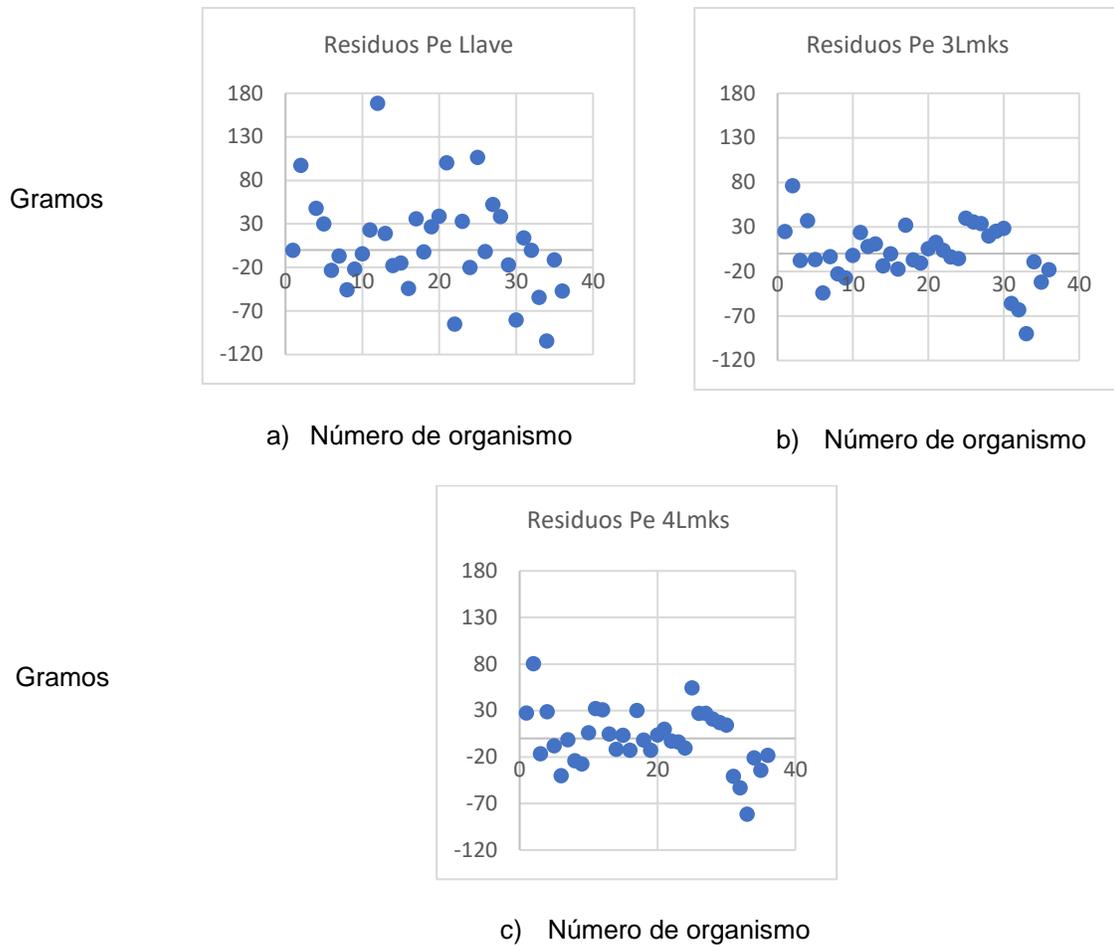


Figura 16. Gráficas de residuos Pe para la sección posterior de cada ecuación: a) Llave (2 Lmks); b) 3 Lmks; c) 4 Lmks

Relaciones Longitud-Longitud (estimación por ecuaciones, “calidad” o “confiabilidad” en las estimaciones a nivel distribución y población: porciones anterior y posterior)

Para los landmarks de corporales la parte anterior del cuerpo, según la Tabla 24, las pruebas de Kolmogorov-Smirnoff para la comparación entre valores medidos directamente (observados) y los estimados para las ecuaciones de la parte posterior del cuerpo no mostraron diferencia significativa para la Longitud Total ($p \approx 0.9793 > 0.05$), Longitud Furcal ($p \approx 0.9793 > 0.05$) y Longitud Estándar ($p \approx 0.9793 > 0.05$). Para la discriminación entre medias poblacionales, la prueba paramétrica de t-student para muestras no apareadas indicó la inexistencia de diferencia significativa

Longitud Total ($p = 0.9999 > 0.05$), Longitud Furcal ($p = 0.9999 > 0.05$), Longitud Estándar ($p = 0.9999 > 0.05$). Así mismo la prueba no paramétrica de Mann-Whitney (Wilcoxon) indica que no hay diferencia significativa entre las longitudes observadas y calculadas: Longitud Total $p = 0.8791 > 0.05$. Longitud Furcal ($p = 0.8614 > 0.05$) y Longitud Estándar ($p = 0.9685 > 0.05$).

Tabla 24. Nivel de probabilidad p de la existencia de diferencia estadística significativa entre estimaciones obtenidas mediante ecuaciones y los valores medidos directamente (observados) para los landmarks seleccionados en la parte anterior del cuerpo.

PRUEBA ESTADÍSTICA	p (LONGITUD TOTAL)	p (LONGITUD FURCAL)	p (LONGITUD ESTÁNDAR)
Kolmogorov-Smirnoff	0.9793	0.9793	0.9793
Prueba t de medias	0.9999	0.9999	0.9999
Prueba Wilcoxon de medianas	0.8791	0.8614	0.9685

Tabla 25. Nivel de probabilidad p de la existencia de diferencia estadística significativa entre estimaciones obtenidas mediante ecuaciones y los valores medidos directamente (observados) para los landmarks seleccionados en la parte posterior del cuerpo.

PRUEBA ESTADÍSTICA	p (LONGITUD TOTAL)	p (LONGITUD FURCAL)	p (LONGITUD ESTÁNDAR)
Kolmogorov-Smirnoff	0.8867	0.1082	0.8867
Prueba t de medias	0.3247	0.0690	0.3385
Prueba Wilcoxon de medianas	0.4358	0.0879	0.4764

Relaciones Tamaño-Biomasa= Longitud-Peso (estimación por ecuaciones, “calidad” o “confiabilidad” en las estimaciones a nivel distribución y población; anterior y posterior)

Anterior

De particular interés es el valor de p -Value, debido a que en los valores de probabilidad $p \approx 0.9793$, $p \approx 0.9996$, $p \approx 0.9996$ son $p \geq 0.05$ no hay diferencia

estadísticamente significativa entre las dos distribuciones. En cuanto a la prueba Wilcoxon, debido a que los valores de $p \approx 0.8969$, $p \approx 0.9955$ y $p \approx 0.9865$ son $p \geq 0.05$, no hay diferencia significativa entre las medianas. Para la diferencia entre las medias de las poblaciones de ambas muestras se utilizó la prueba t de medias la cual arrojó valores de $p \approx 0.9695 > 0.05$, $p \approx 0.9948 > 0.05$ y $p \approx 0.9993 > 0.05$, lo que indica que no hay diferencia significativa entre las medias de las dos muestras utilizadas. Se observan los resultados en la Tabla 26 (observado y estimado mediante las ecuaciones mostradas en la Tabla 11)

Tabla 26 Nivel de probabilidad p de la existencia de diferencia estadística significativa entre estimaciones de peso eviscerado obtenidos mediante tres ecuaciones (llave, 3 y 4 landmarks) y los valores medidos directamente (observados) para los landmarks seleccionados en la parte anterior y posterior del cuerpo del pez.

PRUEBA ESTADÍSTICA	p(PESO ANT=f(OAPEC-PSO))	p(PESO ANT=f(OAPEC, OAPEL, PSO))	p(PESO ANT=f(OAPEC, OAPEL, PSO, MS))
Kolmogorov-Smirnoff	0.9793	0.9996	0.9996
Prueba t de medias	0.9695	0.9948	0.9993
Prueba Wilcoxon de medianas	0.8969	0.9955	0.9865

Posterior

De particular interés es el valor *p-Value*, debido a que los valores de probabilidad $p \approx 1.0$, $p \approx 0.9996$, $p \approx 0.9996$ son $p \geq 0.05$, no hay diferencia estadísticamente significativa entre las dos distribuciones. En cuanto a la prueba Wilcoxon, debido a que los valores de $p \approx 0.9147$, $p \approx 0.9775$ y $p \approx 0.9865$ son $p \geq 0.05$, no hay diferencia significativa entre las medianas. Para la diferencia entre las medias de las poblaciones de ambas muestras se utilizó la prueba t de medias la cual arrojó valores de $p \approx 0.9661 > 0.05$, $p \approx 0.9929 > 0.05$ y $p \approx 0.9968 > 0.05$, lo que indica que no hay diferencia significativa entre las medias de las dos muestras utilizadas. Se

observan los resultados en la Tabla 27 (observado y estimado mediante las ecuaciones mostradas en la Tabla 19).

Tabla 27 Nivel de probabilidad p de la existencia de diferencia estadística significativa entre estimaciones de peso eviscerado obtenidos mediante tres ecuaciones (llave, 3 y 4 landmarks) y los valores medidos directamente (observados) para los landmarks seleccionados en la parte posterior del cuerpo del pez.

PRUEBA ESTADÍSTICA	$p(\text{PESO POS}=f(\text{OAC-IAA}))$	$p(\text{PESO POS}=f(\text{IADB, IAA, PMP}))$	$p(\text{PESO POS}=f(\text{IADB, IAA, OAC, PMP}))$
Kolmogorov-Smirnoff	1.0	0.9996	0.9996
Prueba t de medias	0.9661	0.9929	0.9968
Prueba Wilcoxon de medianas	0.9147	0.9775	0.9865

Discriminación entre especies 2D

Para el género *Lutjanus*, visualmente se observan diferencias morfométricas en los ejes anteroposterior y dorsoventral de la sección anterior (Tabla 30). Ante la dificultad de contar con imágenes donde los landmarks se pudieran ubicar de manera confiable sin el efecto de deformación por diferencias en la posición de los organismos, se eligió a los landmarks MS, OAPEC, PSO, AM como elementos para la creación de ecuaciones para la discriminación entre especies. Dichos landmarks cumplieron con los criterios señalados en la metodología. La combinación de landmarks seleccionados para las ecuaciones se muestra en la Tabla 28.

Tabla 28. Relaciones entre landmarks. Las marcas indican que la variable en la columna está considerada en la ecuación de cada renglón.

<i>Rel</i>	<i>Lnmk retirado</i>	<i>No. Lmks</i>	<i>MS-OAPEC</i>	<i>MS-AM</i>	<i>MS-PSO</i>	<i>AM-OAPEC</i>	<i>AM-PSO</i>
1	-	4	• ^x				• ^x
2	PSO	3	• ^x	• ^x		• ^x	
3	MS	3				• ^x	• ^x
4	OAPEC	3		• ^x	• ^x		• ^x
5	AM	3	• ^x		• ^x		

La ecuación resultante con mayor R² ajustada es la número 1 con 4 landmarks (OAPEC, PSO, MS, AM), seguida por las ecuaciones 5, 2, 3 y 4 que están compuestas cada una por 3 landmarks Tabla 29. En las ecuaciones 3 y 5 se utilizaron dos variables independientes debido a la redundancia de los landmarks OAPEC y PSO utilizados en la llave.

Tabla 29. Ecuaciones para diferenciar entre especies. Se observan las ecuaciones, el grado de ajuste y la *p-Value*.

No.	Lmks	Ecuación	R² Ajustada	<i>p-Value</i>
1	4	$\overline{OAPEC - PSO} = -12.7854 + 0.467744 \cdot \overline{MS - OAPEC} + 0.436621 \cdot \overline{AM - PSO}$	97.1495	0.0000
2	3	$\overline{OAPEC - PSO} = -14.866 + 0.212047 \cdot \overline{MS - OAPEC} + 0.385969 \cdot \overline{MS - AM} + 0.519491 \cdot \overline{AM - OAPEC}$	96.5047	0.0000
3	3	$OAPEC-PSO = 3.52101 + 0.353006 \cdot \overline{AM - OAPEC} + 0.776179 \cdot \overline{AM - PSO}$	95.6445	0.0000
4	3	$OAPEC-PSO = 10.931 + 0.231756 \cdot \overline{MS - AM} - 0.150889 \cdot \overline{MS - PSO} + 1.13956 \cdot \overline{AM - PSO}$	94.4667	0.0000
5	3	$OAPEC-PSO = -13.1353 + 1.06835 \cdot \overline{MS - OAPEC} - 0.637201 \cdot \overline{MS - PSO}$	97.0222	0.0000

Eficiencia de ecuaciones 2D

Se obtuvieron 5 ecuaciones con el mejor grado de ajuste que cumplieran los criterios mencionados en la sección Material y método.

De la sustitución de las coordenadas de landmarks en las ecuaciones se obtuvo que la ecuación 3 (con 3 landmarks) predijo de manera acertada y constante la pertenencia a la especie de los organismos.

En la Tabla 30 se comparan los datos obtenidos con la ecuación 3 (3 landmarks) y los datos observados en píxeles. Así como el resultado de la discriminación para ejemplares no pertenecientes a *L. synagris*, los cuales se etiquetan como “Desconocido” cuando el nivel de similitud resulta mayor al 95%. Todo nivel de similitud menor o igual al 95% arroja como resultado “*L. synagris*”. Al menos para la discriminación de entre las especies *L. griseus*, y *H. guentherii*, la discriminación resultó positiva, e incluso al comparar con otra especie de otro género, pero con forma similar (*Ocyurus chrysurus*), la eficiencia en discriminación fue positiva.

Tabla 30. Comprobación de la eficiencia de las ecuaciones para discriminación entre especies. Se observan las imágenes utilizadas para la captura de landmarks, la especie y los resultados de la ecuación 3.

Imagen	Especie	Ec 3 (pix)	Obs (pix)	Result Ec3
	<i>Lutjanus griseus</i>	156.6042	162.2898	Desconocido
	<i>Hoplopagrus guentherii</i>	82.6751	73.9256	Desconocido
	<i>Lutjanus synagris</i>	114.3202	113.4636	<i>L. Synagris</i>
	<i>Ocyurus chrysurus</i>	84.7811	90.4267	Desconocido

Morfometría Geométrica 3D

Geometría y calibración 3D de las cámaras

En la Figura 17 se observa el resultado de la captura simultanea de imágenes para el método 3D y el acomodo ortogonal del pez sobre la placa de unicel en la plataforma de fotografiado.



Figura 17. Imágenes corregidas en estereoscopia de los organismos.

Se obtuvieron los parámetros de calibración para ambas cámaras Tabla 31.

Tabla 31. Parámetros de calibración 3D cámaras izquierda y derecha. AV: Ángulo de visión, ACAM: Ángulo de la cámara con respecto al eje óptico; ZPIX: Profundidad calculada en píxeles.

Cámara	Izquierda	Derecha
AV	63.8611	63.0131
ACam	90.2502	89.4902
DifACam	0	-0.7599
ZPix	2934.9171	2975.7331

Obtención de ecuaciones 3D

De la regresión lineal 3D (Figura 18) se obtuvo una pendiente de 1.0394 y un intercepto de 0.6298.

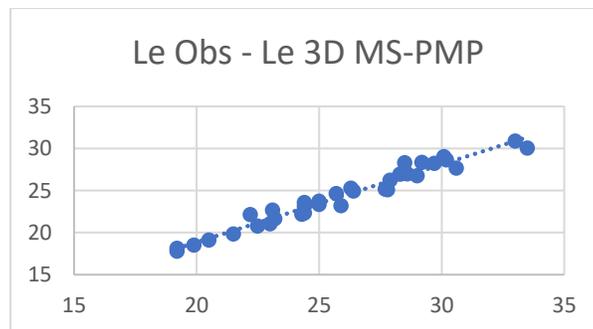


Figura 18. Grafica de regresión lineal Le observada vs Le 3D MS-PMP calculada mediante la ecuación de distancias entre puntos 3D.

Se utilizó la Ecuación 6 para calcular Le 3D.

$$\text{Le } 3\text{D} = 0.6298 + (1.0394)(\text{Le}3\text{D MS} - \text{PMP})$$

Ecuación 6.
Estimación de Le 3D a partir de regresión lineal simple.

Donde:

- Le 3D:** Longitud estándar 3D
- 0.6298 y 1.0394:** Constantes a y b respectivamente
- MS:** Coordenadas 3D de MS
- PMP:** Coordenadas 3D de PMP

Se obtuvo la regresión lineal para 3D corregida (Figura 19).

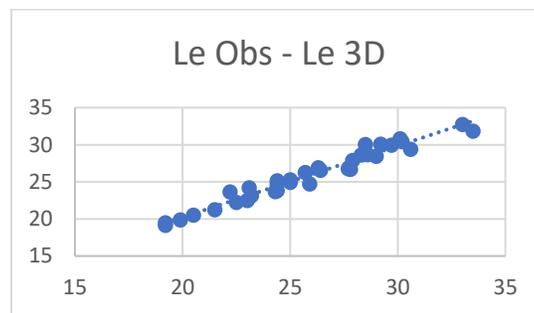


Figura 19. Gráficas de regresión lineal Le Observada vs Le 3D.

Se obtuvieron los datos resultantes de la regresión, en la que se muestra que no hay diferencia significativa entre Le observada y Le 3D calculada (Tabla 32).

Tabla 32. Resultados de la regresión Le Obs vs Le 3D mediante el método 3D.

MUESTRA	Prom Le Obs (cm)	PROM LE 3D corr(CM)	resprom (cm)	PENDIENTE	R ² Ajustado
3D	25.96	25.96	0	1.0	96.1096

Eficiencia de ecuaciones

Se obtuvo el gráfico (Figura 20) dispersión de los residuos de Le 3D Corregida, para observar la distribución a nivel individual.

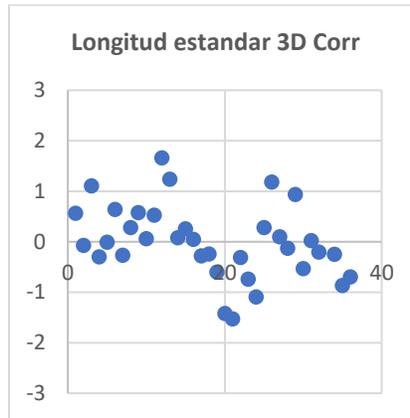


Figura 20. Residuos longitud estándar 3D corregida (Nivel individual).

Se obtuvo el residuo máximo y mínimo, promedio y rango residuales de Le 3D corregido (Tabla 33).

Tabla 33. Residuos Le 3D corregida (nivel poblacional)

Muestra	Res Max (cm)	Res Min (cm)	PromRes (cm)	Rango res (cm)
Le 3D corr	1.6585	-1.5285	-1.02521E-14	3.1871

Comparación de varias muestras

Prueba de ANOVA. La tabla ANOVA descompone la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón- F , que en este caso es igual a 0.000080888, es el cociente entre el estimado entre grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el p -Value de la razón- F es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 3 variables con un nivel del 95.0% de confianza (Tabla 34).

Tabla 34. Tabla de ANOVA

	Cuadrado Medio	Razón-F	p-Value
Entre grupos	0.00108168	0.00	0.9999
Intragrupos	13.3725		

Verificación de varianza. Puesto que el *p-value* es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar, con un nivel del 95.0% de confianza (Tabla 35).

Tabla 35. Prueba de Levene para varianzas.

	Prueba	p-Value
Levene	0.0349253	0.965689

Prueba de mediana de Mood. La prueba no paramétrica de medianas de Mood evalúa la hipótesis de que las medianas de todas las 3 muestras son iguales. Lo hace contando el número de observaciones en cada muestra, a cada lado de la mediana global, la cual es igual a 25.7. Puesto que el *p-Value* para la prueba de chi-cuadrada es mayor o igual a 0.05, las medianas de las muestras no son significativamente diferentes con un nivel de confianza del 95.0% (Tabla 36).

Tabla 36. Prueba de Medianas

Muestra	Mediana
Long estándar	25.8
LeEspCorr3D	25.7547
Le2DA	25.1064
Estadístico	0.30479
p-Value	0.858649

Comparación de líneas de regresión

ANOVA Adicional para Variables Según el Orden de Introducción. Dado que el *p-Value* para las pendientes es mayor que 0.1, no existen diferencias estadísticas entre las pendientes para los distintos valores de Le 2D y Le 3D con un nivel de confianza del 90% o mayor. Dado que el *p-Value* para los interceptos es mayor que 0.1, no existen diferencias estadísticamente significativas entre los interceptos para los diferentes valores de Le 2D y Le 3D con un nivel de confianza del 90% o mayor (Tabla 37).

Tabla 37. Resultados de ANOVA para intercepto y pendiente de Le 2D y Le 3D Corregido.

Fuente	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	<i>p-Value</i>
Intercepto	0.0016071	0.0016071	0.9672
Pendiente	0.0210354	0.0210354	0.8817

En la gráfica de modelo ajustado se observa la distribución de Le 2D y Le 3D con respecto a la línea de tendencia (Figura 21)

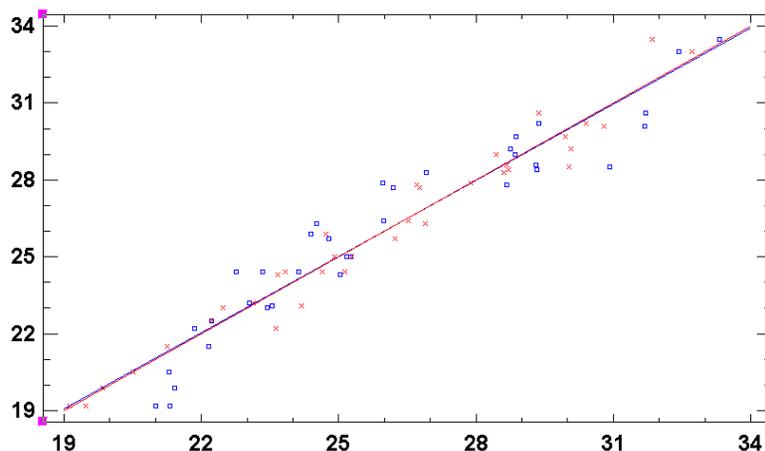


Figura 21. Gráfica del modelo ajustado. Aparecen dos líneas de regresión (Azul; Le 2D y Rojo; Le 3D corr).

Discriminación de *Lutnajus synagris* 3D

Después de realizar las regresiones con las distancias calculadas con coordenadas 3D, se obtuvieron las ecuaciones siguiendo la misma configuración de landmarks.

Como se observa en la Tabla 38, la ecuación 5 resultó con mayor R² ajustada, seguida por la ecuación 2, 1, 3 y 4 respectivamente.

Tabla 38. Ecuaciones 3D para diferenciar entre especies. Se observan las ecuaciones, el grado de ajuste y la *p-Value*.

No.	Lmks	Ecuación	R ² Ajustada	<i>p-Value</i>
1	4	$\overrightarrow{OAPEC - PSO} = -0.181641 + 0.612852 \cdot \overrightarrow{MS - OAPEC} + 0.131898 \cdot \overrightarrow{AM - PSO}$	99.701	0.0000
2	3	$\overrightarrow{OAPEC - PSO} = -0.268736 + 0.554273 \cdot \overrightarrow{MS - OAPEC} - 0.0432894 \cdot \overrightarrow{MS - AM} + 0.245699 \cdot \overrightarrow{AM - OAPEC}$	99.7276	0.0000
3	3	$OAPEC-PSO = -0.436733 + 0.761483 \cdot \overrightarrow{AM - OAPEC} + 0.428311 \cdot \overrightarrow{AM - PSO}$	99.4904	0.0000
4	3	$OAPEC-PSO = -0.0348767 + 0.454903 \cdot \overrightarrow{MS - AM} + 0.120326 \cdot \overrightarrow{MS - PSO} + 0.759522 \cdot \overrightarrow{AM - PSO}$	98.8121	0.0000
5	3	$OAPEC-PSO = -0.0419924 + 0.92751 \cdot \overrightarrow{MS - OAPEC} - 0.481136 \cdot \overrightarrow{MS - PSO}$	99.8127	0.0000

Eficiencia de ecuaciones 3D

Se obtuvieron 5 ecuaciones con grados de ajuste mayores a 99% y se obtuvo que la ecuación 5 con tres landmarks (OAPEC, PSO y MS) y con mayor R² ajustada (99.8127) fue la que identificó correctamente a todos los organismos de *Lutnajus synagris* sometidos a la prueba.

En la Tabla 39 se muestran los datos obtenidos mediante las ecuaciones de la Tabla 38 y el resultado de la identificación de organismos pertenecientes a *Lutjanus synagris*. Siguiendo los criterios de discriminación propuestos en la sección Eficiencia de ecuaciones.

Tabla 39. Comprobación de la eficiencia de las ecuaciones para la identificación de *Lutjanus synagris* con el método 3D. Se observan las imágenes utilizadas para la captura de landmarks, la especie y los resultados de las ecuaciones: (LS = *L. synagris*), (D = Desconocido).

Imagen	Especie	Obs (cm)	Ec 1 (cm)	Ec2 (cm)	Ec 3 (cm)	Ec 4 (cm)	Ec5 (cm)
	<i>Lutjanus synagris</i>	5.6140	5.6732 (LS)	5.7100 (LS)	5.1833 (D)	5.1108 (D)	5.6806 (LS)
	<i>Lutjanus synagris</i>	5.5782	5.8516 (D)	5.7725 (D)	5.6684 (LS)	6.0154 (D)	5.6935 (LS)
	<i>Lutjanus synagris</i>	5.4651	5.6631 (D)	5.6016 (LS)	5.5270 (LS)	5.7951 (D)	5.4584 (LS)
	<i>Lutjanus synagris</i>	5.6636	5.7845 (LS)	5.7765 (LS)	5.7509 (LS)	5.8577 (D)	5.7262 (LS)
	<i>Lutjanus synagris</i>	4.0949	4.0075 (LS)	4.0669 (LS)	4.0322 (LS)	3.7886 (D)	4.1179 (LS)
	<i>Lutjanus synagris</i>	4.6978	4.6518 (LS)	4.7130 (LS)	4.6140 (LS)	4.3844 (D)	4.7461 (LS)

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Muestreo de organismos

Obtención de organismos y parámetros biológicos (dimensiones corporales)

En función del resultado, tal y como se observó en la sección de Obtención de organismos, conseguir el material biológico comprándolo en un sitio diferente al planteado no es muy conveniente, debido a que los tamaños de venta de los peces están sujetos a la selección de tallas comerciales convenientes para los vendedores, por lo tanto, es importante que este tipo de trabajos se haga en campo donde se pueda tener acceso a los organismos necesarios para el estudio. Ante este impedimento nos vimos imposibilitados de contar con todo el intervalo de muestra.

Debido a que en el mercado la mayor parte de estos organismos se venden sin vísceras, ya que con ellas se acelera la descomposición, en este trabajo resulta una limitante el no poder obtener el peso total de los organismos, por esta razón, únicamente se trabajó con el peso eviscerado. Así mismo, no se pudo utilizar la muestra para otro tipo de estudios tales como el análisis de contenido estomacal, para estimar índices como el hepatosomático, gonadosomático o sexar.

A pesar de la amplitud de intervalo elegida (2 cm) no se pudo completar la cuota deseada, sin embargo, los datos registrados para las diferentes dimensiones medidas directamente resultaron suficientes para realizar los análisis estadísticos que se mencionan en los apartados siguientes.

Las tallas más comunes reportadas para esta especie en el Golfo de México son de 25 cm Lt (FishBase); según nuestros muestreos los individuos procesados se encontraban entre 23.6 cm Lt (1.4 cm abajo del promedio) y 47.4 cm Lt (22.4 cm arriba del promedio).

Plataforma de fotografiado

El uso de una plataforma de fotografiado permitió mantener la misma geometría para todas las fotos, por lo que se evitó la corrección de cada toma haciéndose una corrección general con los mismos valores.

Para estudios de este tipo, es pertinente contemplar una infraestructura semejante a la utilizada en este trabajo, ya que, permite estandarizar el posicionamiento de los peces, fijar la perspectiva e inclinación de las imágenes, facilita la identificación de aberraciones y la corrección de imágenes al tener una geometría constante y homogénea. Estas características son importantes debido a que, de no tenerlas, las coordenadas de los landmarks serían diferentes para cada foto, aumentando la variabilidad de las posiciones.

Utilizar una referencia nos permite evaluar si nuestros datos van acorde a la realidad, y detectar posibles errores en nuestros métodos y estimaciones.

Captura de imágenes

La incertidumbre en la ubicación de los landmarks asociados a estructuras móviles como las aletas resultó mayor debido a la variación en su colocación ya que no hay una posición estándar en todos los organismos respecto a su ángulo de movimiento. Debido a lo anterior, los landmarks ubicados al final de las aletas, no fueron utilizados para la creación de ecuaciones debido a que se encuentran en estructuras con alta incertidumbre en su posición por el grado de apertura además de ser difícilmente reconocibles en imágenes de los peces bajo el agua, por lo tanto, tienen un menor grado de correlación en las ecuaciones generadas para estimar los parámetros L_t , L_f , L_e , y P_e .

El hecho de tomar 4 imágenes bajo diferentes configuraciones de iluminado funcionó adecuadamente, ya que ocasionalmente algunas de las 4 imágenes no eran del todo adecuadas, lo que, en caso de no haber hecho repeticiones, hubiera obligado a repetir el fotografiado.

Procesamiento de imágenes

Tomando como referencia las imágenes de la cuadrícula, un análisis visual, muestra el grado de corrección de la aberración óptica (Figura 9) y después de varios ensayos se alcanzaron los parámetros de corrección mostrados en la Tabla 4.

Si bien en la comprobación de eficiencia, los resultados fueron concluyentes a favor del método utilizado (Tabla 3), es posible mejorar la corrección de imágenes y, en consecuencia, la precisión en los parámetros estimados a partir de ellas. Debido a que la estimación de parámetros en los programas empleados es resultado de la percepción visual en pantalla, estos dependen del usuario y de la poca precisión numérica de los programas (la mayoría consideran solo uno o dos decimales en algunas de sus rutinas).

Corrección de distorsión

La diferencia en distorsión geométrica entre cámaras indica que a pesar de que ambas son modelo Canon G12, con número de serie secuencial, la óptica es diferente para cada una, por esto no es prudente basarse en los parámetros del fabricante para su corrección, haciéndose necesaria la implementación de procedimientos que permitan hacer la corrección individual mediante la corroboración de los parámetros ópticos reales de cada cámara.

El patrón curvilíneo en la distorsión observado en la Figura 8 indica que, en torno al centro, el promedio total de las distancias sin distorsión tiende a acercarse al promedio de las distancias reales (5 cm), por ello, en promedio las cámaras tienen buena calidad, pero para estudios donde se requiere mayor precisión se compromete la capacidad de estimar la distancia correcta en centímetros entre landmarks mediante proporción, a pesar de que la distorsión en distancias sin corregir promedio tiende a generar distancias cercanas a 5.0 cm, el amplio rango y los patrones de dispersión (Tabla 3) indican que existe mayor incertidumbre en

landmarks cercanos a las orillas, lo que aleja las distancias a más de 5.0 cm y con ello las posiciones verdaderas.

En nuestro caso, la ubicación de la mayoría de los landmarks es lejana a las orillas, con eso estamos seguros de que la ubicación contiene un mínimo error. Al minimizar la discrepancia entre la ubicación correcta de los landmarks en píxeles nos acercaremos más a la ubicación real en centímetros.

La drástica disminución en la distorsión indica que la corrección fue necesaria. Ello se observa principalmente en la reducción del rango residual de 9.9987 píxeles a 2.0173 en la cámara izquierda y, de 12.9024 a 4.0018 para la cámara derecha. A pesar de que la corrección no fue perfecta, el error residual de alrededor de 4 píxeles permite que la no eliminación total de la distorsión geométrica no represente un inconveniente para la utilización de esta técnica, ya que el resultado de la corrección se encuentra en un límite aceptable, considerando que la ubicación de un landmark en particular por los usuarios normalmente puede estar equivocada por 1 o 2 píxeles, por lo que la mejora en la estimación de distancias reales es notable y totalmente aceptable.

Parámetros de Corrección (Calibración 2D)

La corrección es necesaria, pero a pesar de la reducción de la distorsión obtenida, no se pudo eliminar totalmente debido a que los programas utilizados (Photoshop, StereoPhotoMaker, PTLens) se basan primordialmente en la apreciación visual de la reducción de la distorsión, además de que el grado de precisión empleado se restringe en su mayoría a dos decimales y que en ocasiones dichos programas no consideran todos los parámetros de los algoritmos de corrección. A pesar de que la dispersión en el eje Y disminuye, los patrones curvilíneos se mantienen, por lo que es de esperarse mayor incertidumbre en el sentido vertical que en el horizontal (Figura 8). Las discrepancias en la escala se resuelven en la etapa de procesamiento de datos por el método de Procrustes.

Criterios de procesamiento de datos

Los criterios utilizados para la selección y la secuencia en el ordenamiento de los landmarks permitieron definir el contorno del pez en las gráficas y reconocer con facilidad las estructuras en las imágenes.

El seccionar el cuerpo del pez en anterior y posterior resultó necesario debido a que por la movilidad de los organismos al nadar, en ocasiones los landmarks no son fácilmente reconocibles en las imágenes, sin embargo, al dividirlo, y mediante la colocación de los landmarks en estructuras duras y cercanas entre ellas, la ubicación de estos puntos de referencia fue más sencilla y con ello, la estimación de las ecuaciones y el cálculo de las dimensiones del pez sin importar la posición en la que sea fotografiado, así mismo se pueden aplicar las ecuaciones con sólo una de las dos secciones.

Las distancias entre los landmarks MS-FURCA, MS-PMP y MS-ACLV/ACLD resultaron las más adecuadas, es decir, permitieron la mayor correlación con el menor error residual para el ajuste de las ecuaciones y con ello la mayor precisión en la estimación de las longitudes total, estándar y furcal.

Variabilidad

Los landmarks considerados para la Llave fueron los mejores debido a que: a) presentan la menor desviación estándar en torno al centroide (variabilidad), b) se encuentran agrupados en estructuras duras, y c) pertenecen a la sección anterior del pez, lo que facilita su ubicación en las imágenes.

Gran parte de la variabilidad no se debió a cambios en la forma corporal, sino a imprecisiones en la colocación de los landmarks en las imágenes, es decir, se debían a criterios metodológicos relacionados con el correcto posicionamiento geométrico de las estructuras. Las estructuras en que repercute primordialmente dicho comportamiento son las móviles, en particular las ubicadas en torno a las

aletas y en menor medida a las del maxilar inferior. La variabilidad detectada en otras estructuras no móviles y en particular las ubicadas sobre estructuras duras reflejarían variabilidad en forma y no la ubicación incorrecta de sus respectivos landmarks.

Morfometría Geométrica 2D

Relaciones Longitud-Longitud con datos observados (Le, Lt, Lf)

Por presentar la menor variabilidad entre sus landmarks representativos $MS=0.0038$ y $PMP=0.0033$ (Tabla 6), la longitud estándar fue la mejor variable independiente; los landmarks representativos de las longitudes total y furcal no figuran en la misma Tabla 6, presentan mayor variabilidad que los primeros 6 incluidos. El hecho de que la longitud estándar haya resultado con menor incertidumbre hace a nuestros resultados más compatibles con los reportados en literatura donde se considera a esta variable como referente.

Aunque estadísticamente el valor de *p-Value* indica una relación significativa entre las variables dependiente e independientes, el porcentaje de explicación de los datos no es óptimo, ya que de manera particular consideramos R^2 Ajustado > 99% como muy bueno, R^2 Ajustado > 98% como bueno y R^2 Ajustado > 97% como aceptable. Bajo este criterio, la estimación de la longitud furcal es más confiable que la estimación de la longitud total mediante ecuaciones. Lo anterior se debió a la dificultad de colocar exactamente el landmark en la furca, debido a que, por la forma de la cola es difícil localizar este punto con precisión, a lo que decidimos colocar el landmark en línea con la línea media respecto al hocico (Figura 10).

Cálculo de ecuaciones sección anterior (OAPEC - PSO, Le, Lt, Lf, Pe)

Llave

El criterio de selección de landmarks con menor variabilidad y fácil ubicación en las fotos se tradujo en altos niveles de correlación para la estimación de la llave. El grado de ajuste óptimo (R^2 ajustada = 99.99% > 99% \approx muy bueno) se obtuvo para 4 landmarks, aunque una estimación aceptable se puede alcanzar con 3 landmarks (R^2 ajustada = 97.14% > 97% \approx aceptable). Para ambos casos, la relación entre las variables involucradas es significativa.

Ecuación para estimación de Le a partir de la llave

Para la estimación de la longitud estándar a partir de la llave proveniente de landmarks en imágenes, la ecuación alcanzó un nivel inferior al aceptable (R^2 ajustada < 97.00%) pero se puede considerar funcional a pesar de la variabilidad. Ya que todos los organismos utilizados se consiguieron eviscerados, es muy probable que esto haya influido en el posicionamiento adecuado de uno de los landmarks usados para la llave, particularmente en OAPEC = Origen aleta pectoral.

Relaciones Longitud-Longitud

La sustitución de Le calculada en las ecuaciones con datos observados nos permitió estimar Lf y Lt a partir de la llave conservando los porcentajes de ajuste (R^2 Ajustado = 98.1661 y R^2 Ajustado = 97.842, respectivamente) de las ecuaciones originales, a pesar de ello el grado de ajuste fue muy bueno para Lf y aceptable para Lt.

Ecuaciones Longitud-Peso

La ecuación para P_e a partir de la llave con 2 landmarks no alcanzó un porcentaje de ajuste aceptable (R^2 Ajustado = 92.3957) en comparación con las ecuaciones calculadas con 3 (R^2 Ajustado = 98.1911) y 4 landmarks (R^2 Ajustado = 98.2818), lo cual indica que a mayor cantidad de landmarks, mejor es el grado de ajuste obtenido para la estimación de la magnitud P_e y muestra que a pesar de obtener un parámetro llave, no se puede garantizar un poder de predicción óptimo. Sin embargo, cualquiera de las tres ecuaciones se puede considerar funcional en caso de no ser visible algún landmark seleccionado para cada ecuación. La estimación del peso es más incierta que la de las dimensiones corporales (longitudes), la razón principal está en que el crecimiento de las dimensiones corporales siempre es positivo respecto al tiempo, es decir, ningún pez a un tiempo 2 puede tener una longitud menor a la alcanzada en un tiempo 1, mientras que para el peso la variación ocurre en ambos sentidos. Lo anterior significa que para las dimensiones corporales la variabilidad siempre oscila en torno a una media mayor que la anterior mientras que en, en el caso del peso, el incremento en la media puede ser aún negativo, con lo que la variabilidad absoluta siempre será mayor para el peso que para las longitudes. Otro factor específico en nuestro estudio se encuentra en que se trabajó con peces eviscerados, lo que nos impidió detectar los efectos del sexo, estadio gonádico sobre la masa muscular, y del llenado estomacal.

Eficiencia de las ecuaciones

Como se observa en la Tabla 12, el residuo entre el promedio observado y calculado resultante de las ecuaciones para el cálculo de L_t , L_f y L_e es mínimo ($5.80281E-05$, $-4.354E-06$ y $-1.49201E-06$, respectivamente), esto indica que la estimación de estos parámetros a nivel poblacional es óptima. A nivel individual la alta variabilidad en el grado de ajuste de algunas ecuaciones significa que la estimación de valores individuales puede ser poco precisa (residuo máximo y mínimo = ± 2 cm, en cada

sección), lo que se atribuye a la diferencia que puede haber en la composición física individual de cada pez.

Con respecto a la Tabla 12, podemos observar que el residuo promedio (error promedio) para la estimación de los parámetros Lt, Lf y Le es de ± 1 cm, lo cual, a nivel poblacional resulta ser una cifra muy pequeña y poco significativa si se compara con la incertidumbre al medir un pez de manera manual.

En cuanto al parámetro Pe, se puede observar en la Tabla 14 que el residuo de los promedios observados y calculados mediante la llave (2 landmarks) es de 2.2129 cm, lo cual, comparado con los residuos obtenidos mediante la estimación de Pe con 3 y 4 landmarks (-0.3829 y -0.0462), es un valor elevado, esto indica que, a nivel poblacional, la estimación del parámetro Pe es más confiable mientras más landmarks sean visibles. A nivel individual, los residuos máximos y mínimos obtenidos de la diferencia entre Pe observados y Pe calculados para la Llave (Máx=96.2212 g y Mín=-132.0002 g) son mayores a comparación de los obtenidos mediante 3 (Máx= 58.6513 g y Mín=-67.0456 g) y 4 landmarks (Máx= 66.7123 g y Mín=-51.6507 g), por lo que, ocurre el mismo caso que a nivel poblacional, entre mayor sea el número de landmarks visibles, mejor será la capacidad de predicción de las ecuaciones.

Cálculo de ecuaciones sección posterior ($\overline{OAC - IAA}$, Lf, Le, Lt y Pe)

Llave

Al comparar las secciones anterior y posterior, aunque ambas fueron muy buenas, la anterior es ligeramente más precisa para la estimación de una llave como base para la obtención de ecuaciones. Aunque lo obtenido para la llave es en general muy bueno, resulta más preciso utilizar entre 3 y 4 landmarks para la estimación de ecuaciones, ya que ello arroja mayor precisión que el basarse únicamente en la llave.

Ecuaciones Le a partir de la llave

Como se mencionó en la sección anterior, la estimación de ecuaciones basadas en tres y 4 landmarks es mejor que con sólo la llave, a pesar de ello se obtiene una *r*-cuadrada ajustada a nivel funcional. El hecho de haber contado únicamente con organismos eviscerados y de diferentes stocks seguramente fue un factor que influyó en la falta de grado de ajuste, ya que diferentes poblaciones tienden a tener fisonomías (formas regionales y temporales) con diferentes características morfométricas. Así mismo, el posicionamiento del landmark puede introducir variabilidad si la captura de estos se hace por diferentes observadores.

Relaciones Longitud-Longitud

El uso de las llaves anterior y posterior arrojan un grado de ajuste bueno y aceptable; dado que ambas se basan en “Le” y que la distancia entre los landmarks que definen Le es menor a la encontrada entre los landmarks de la llave, es de esperarse que el efecto de la imprecisión en la selección de landmarks sea menor que cuando se considera sólo a la llave. De igual manera, en las distancias sobre el eje cabeza cola, el efecto de las vísceras es nulo, por lo que es esperable tener mayor grado de ajuste y mayor precisión en la estimación de dimensiones longitud-longitud. La mejor estimación de dimensiones en el eje cabeza-cola corresponde a la longitud furcal (nivel de “muy bueno”).

Ecuaciones Longitud-Peso

Para la estimación del peso, resulta preferible hacerlo con el mayor número de landmarks, resultando que con cuatro se obtiene el mayor grado de ajuste (bueno), mientras que sólo con la llave sólo resulta aceptable).

Con lo anterior se reafirma lo mencionado cuando se abordó la obtención de ecuaciones para la sección anterior del cuerpo: a mayor cantidad de landmarks, es mejor el grado de ajuste para la estimación de Pe .

Eficiencia de ecuaciones

El nivel de predicción a nivel de promedios poblacionales es excelente a pesar de ser mayor en magnitud al del residuo estimado en la sección anterior del cuerpo, ya que para la estimación de las longitudes L_t , L_f y L_e de la sección posterior del cuerpo, los residuos promedio tuvieron una magnitud muy pequeña, menor a un milímetro: 0.0947, 0.0899 y 0.0782 respectivamente (Tabla 20).

A nivel poblacional, el residuo promedio (error promedio) para la estimación de los parámetros L_t , L_f y L_e de ± 1 cm indica que se trata de una cifra muy pequeña y poco significativa si se compara con la incertidumbre al medir un pez de manera manual (Tabla 20).

En cuanto al parámetro Pe (Tabla 22), el residuo de los promedios observados y calculados mediante la llave con 2 landmarks (2.4681 cm) es elevado comparado con los residuos obtenidos mediante la estimación de Pe con 3 y 4 landmarks (-0.5245 y -0.2374), lo que indica que, a nivel poblacional, la estimación del parámetro Pe es más confiable mientras más landmarks sean visibles. A nivel individual ocurre la misma situación que con la sección anterior, ya que los residuos máximos y mínimos obtenidos de la diferencia entre Pe observados y Pe calculados para la Llave (Máx= 168.4623 g y Mín= -142.2438 g) son mayores a comparación de los obtenidos mediante 3 (Máx= 76.3746 g y Mín= -89.7694g) y 4 landmarks (Máx= 80.0806 g y Mín= -81.3920 g), por lo que, a nivel poblacional, entre mayor sea el número de landmarks visibles, mejor será la capacidad de predicción de las ecuaciones.

Si bien, en los gráficos de los residuos en torno a cero (Figura 14 y Figura 16) la dispersión puede parecer mínima, a nivel individual, las estimaciones de P_e tienen alto grado de incertidumbre, esto se puede corroborar visualizando las tablas de residuos máximos y mínimos de ambas secciones (Tabla 15 y Tabla 23). Lo anterior se le puede atribuir, al fenómeno entorno a la especie de estudio y no al grado de ajuste de las ecuaciones.

Relaciones Longitud-Longitud (estimación por ecuaciones, “calidad” o “confiabilidad” en las estimaciones a nivel distribución y población: porciones corporales anterior y posterior)

Para la discriminación entre valores observados y predichos en ambas partes anterior del cuerpo, la prueba paramétrica indica que no hay diferencia significativa entre las desviaciones estándar; La prueba paramétrica es la más indicada ya que no hubo diferencia de varianzas en ningún caso, de igual manera, la prueba no paramétrica tampoco encontró diferencias significativas, por lo que podemos asumir que no existe evidencia estadística de que las distribuciones de datos obtenidos a partir de las ecuaciones de las longitudes sean diferentes de las observadas a partir de medición directa. Lo anterior significa que la aplicación de este método morfométrico es confiable y la calidad de las poblaciones de datos obtenidas tiene una “calidad estadística” similar a la de los datos originales (observados). Según únicamente los valores del nivel de probabilidad p , la estimación a partir de la parte anterior del cuerpo es más confiable que con la posterior.

Relaciones Tamaño-Biomasa= Longitud-Peso (estimación por ecuaciones, “calidad” o “confiabilidad” en las estimaciones a nivel distribución y población; anterior y posterior)

Al igual que con las longitudes, la estimación de pesos mediante ecuaciones morfométricas no tiene diferencia significativa respecto a los valores determinados directamente (valores reales), y en todos los casos (uso de la llave, tres y cuatro

landmarks) la prueba paramétrica es adecuada. Para ambas secciones corporales anterior y posterior se corrobora que la aplicación de este método morfométrico es confiable y la calidad de las poblaciones de datos obtenidas es estadísticamente similar a la de los datos originales (observados).

Discriminación entre especies 2D

La diferencia morfométrica entre especies de este género es un atributo utilizable para la discriminación a partir de métodos morfométricos, por lo cual es importante considerar landmarks que reflejen dichas diferencias tanto en el eje anteroposterior como en el dorsoventral, cumpliéndose los criterios mencionados en la sección de método.

Para la selección de landmarks empleables en la construcción de ecuaciones, es importante señalar que el grado de ajuste es el mejor criterio, ya que maximiza la capacidad de generar valores más cercanos a los de la llave; dado que la llave tiene la menor variabilidad, cualquier deficiencia en el grado de ajuste reflejará la no pertenencia a esta especie, con ello, servirá como un buen elemento para la discriminación de esta especie entre las otras del género.

Eficiencia de ecuaciones para la discriminación de especies 2D

Para ser considerado como perteneciente a *L. synagris* por grado de ajuste, se encontró que a un porcentaje de 95% la discriminación correcta de otros miembros de *L. synagris* y formas similares de la familia fue eficiente.

De acuerdo con el grado de ajuste, se esperaba mayor eficiencia aplicando la ecuación 1 con 4 landmarks (R^2 Ajustada =97.1495), sin embargo, los resultados aquí presentados reflejan que el método es más eficiente usando la ecuación 3 (3 landmarks) con un grado de ajuste aceptable (R^2 Ajustada =95.6445). Lo anterior implica que en 2D, la elección de landmarks es más importante que el grado de ajuste, es decir, que el buen funcionamiento de la ecuación está asociado a la

proporción intrínseca entre las distancias que componen la ecuación. La discriminación entre grupos de organismos es más eficiente mediante la aplicación de técnicas basadas en similitud, por ejemplo, componentes principales, las cuales no son eficientes para organismos en particular, especialmente cuando existe traslape entre poblaciones, debido a que con la aplicación de morfometría buscamos que el poder de discriminación sea más eficiente para individuos que para grupos, ya que el resultado servirá para conteos, es más importante una buena ecuación discriminatoria que un buen grado de ajuste inherente a la variabilidad morfométrica, por lo que nuestros resultados pueden considerarse como altamente valiosos en relación al objetivo inicial de que sirvan para el conteo de organismos sin extraerlos o manipularlos.

El poder de discriminación resultó ser eficiente utilizando mediciones tanto en pixeles como en distancias reales, por lo que es independiente de su aplicación directa en fotografías como en imágenes geoméricamente corregidas.

Se seleccionó la región anterior del cuerpo (Figura 10) por constituir una estructura dura en su mayor parte y tener deformación mínima por el movimiento natural de los organismos. En la sección posterior no se logró apreciar, visualmente, alguna diferencia significativa en las dimensiones con las cuales se pudiera discriminar entre especies.

Morfometría Geométrica 3D

Geometría y calibración 3D de las cámaras

A pesar de que las cámaras son de la misma marca y modelo, y que se posicionaron lo más perfecto posible, existen pequeñas diferencias entre su óptica interna y externa, lo que indica que el calibrado por separado es esencial. Las pequeñas diferencias se encuentran en el orden de 40 pixeles que son mucho mayores al error en la selección de landmarks (± 3 pixeles).

Obtención de ecuaciones 3D

Como se esperaba, la relación entre Le observada y Le estimada mediante visión 3D sigue una tendencia lineal. Al comparar la estimación mediante distancias 3D (esperados) respecto a los valores reales (observados), se espera que entre más cercano a 1.0 el valor de la pendiente, la ecuación de predicción sea más eficiente, en nuestro caso (Tabla 32) se encuentra que la estimación 3D es altamente eficiente.

Eficiencia de ecuaciones

Según el grado de ajuste (R^2 ajustada < 96.10%), Le 3D estimado alcanzó un nivel inferior al aceptable, sin embargo, se puede considerar como funcional a pesar de la variabilidad, ya que no se rechaza la hipótesis en la que Le observada y Le 3D sean estadísticamente iguales, debido a la pendiente igual a 1.0 en la Tabla 32. Así mismo, la dispersión en la Figura 19 resulta buena y la comparación entre promedios de Le Observada y Le 3D estimada es la misma.

En cuanto al gráfico de residuos (Figura 21), podemos observar que los puntos se distribuyen entorno a cero (max=1.6585, min=-1.5285), por lo que podemos decir que las predicciones calculadas por la ecuación permiten tener resultados aceptables a nivel individual.

A nivel poblacional, se puede observar en la Tabla 33, que el promedio de los residuos es pequeño (-1.02521E-14), lo cual indica la buena estimación de la longitud estándar mediante el método 3D corregido.

Comparación de varias muestras

El procedimiento de comparación de varias muestras compara dos o más muestras independientes de datos variables. Las pruebas que se ejecutan determinan si hay o no diferencias significativas entre las medias, las varianzas y/o medianas de las

poblaciones muestreadas. En el caso de nuestros datos, las pruebas paramétricas: ANOVA y Verificación de varianzas no rechazaron la hipótesis nula en la que no existe diferencia significativa entre las medias y las varianzas respectivamente. De igual manera, de la prueba paramétrica realizada (prueba de mediana de Mood) se obtuvo que las medianas no son significativamente diferentes. De esta manera, se asumió que las distribuciones de datos obtenidos a partir de las ecuaciones para Le 3D sean diferentes a las observadas a partir de medición directa y que la aplicación de este método morfométrico 3D es confiable para obtener información valiosa tanto a nivel poblacional como a nivel individual.

Comparación de líneas de regresión

La comparación entre líneas se usa para comparar líneas de regresión relacionadas con Y y X en dos o más niveles de un factor categórico. Las pruebas son utilizadas para determinar si hay o no diferencias significativas entre el intercepto y la pendiente en diferentes niveles. Según la prueba realizada para este estudio, los valores de *p-Value* de las pendientes e interceptos son mayores a 0.1 (Tabla 37), lo cual indica que no hay diferencias significativas entre las pendientes e interceptos de Le 2D y Le 3D.

Si bien obtenemos resultados confiables de ambos métodos (2D y 3D), como se observa en la gráfica del modelo ajustado (Figura 21), la estimación de Le a partir del método 3D tiene mejor calidad en cuanto a la predicción de las distancias.

Discriminación de *Lutnajus synagris* 3D

Para la identificación de *L. synagris* es importante señalar que, a pesar de utilizar las mismas combinaciones de landmarks ocupadas en el proceso de discriminación 2D, el resultado fue diferente, ya que, en este caso, la ecuación 5 fue la que obtuvo un mejor grado de ajuste (R^2 Ajustada=99.8127) y predijo de manera constante y acertada la pertenencia a la especie de estudio, esto indica que en 3D el mayor

grado de ajuste corresponde con la buena elección de los landmarks para obtener eficiencia en la identificación.

Así mismo, para este apartado no se pudo comparar con otras especies cercanas y desconocidas porque no se tienen pares estereoscópicos de imágenes tomadas directamente ni de internet.

Eficiencia de ecuaciones para la discriminación de especies 3D

Se comprobó la eficiencia de las ecuaciones mediante los mismos criterios utilizados en el apartado 2D y utilizando la sección anterior del pez. En este caso el grado de ajuste de la ecuación 5 corresponde con su capacidad de predicción, debido a que sus resultados fueron acertados y constantes en todas las pruebas. De esta manera se comprueba mayor eficiencia del método 3D para identificar a la a nivel individual a través de estereo-pares.

CONCLUSIONES

Muestreo de organismos

Tanto para el método 2D como para el 3D, a pesar de las limitaciones que hubo en el muestreo, los resultados son satisfactorios, sin embargo, podrían enriquecerse considerablemente aprovechando la información que no se pudo obtener de los organismos en este estudio.

El empleo de una plataforma de fotografiado es fundamental, ya que permite el fotografiado repetitivo manteniendo las condiciones geométricas lo cual es importante para la calibración del sistema, la creación de ecuaciones y corrección sistemática de aberraciones geométricas.

Procesamiento de imágenes

Con la corrección de imágenes se gana mucha precisión, sin embargo, se podría mejorar más, para esto es recomendable utilizar un software especializado que se base en corrección matemática.

El método empleado para el procesamiento de imágenes depende de la adecuada corrección de la distorsión geométrica. A pesar de las restricciones cuantitativas del software disponible, los resultados pueden considerarse como confiables y adecuados, puesto que el error resultante entre los valores estimados con los observados es mínimo.

Criterios de procesamiento de datos

El reflejo de diferentes variables, incluso cualitativas, como en nuestro caso las limitaciones por la temporada de pandemia, puede detectarse mediante métodos morfométricos, por lo cual deficiencias en el grado de ajuste no necesariamente indican variabilidad del fenómeno estudiado sino factores anormales.

Variabilidad

Utilizar la desviación estándar en torno al centroide es una forma eficaz de indicar variabilidad en un grupo de coordenadas. Por esta razón, el uso de un parámetro Llave conformado por las dos coordenadas con menor variabilidad dio resultados tan favorables al ser utilizado como variable independiente para la estimación de longitudes (L_e , L_t y L_f), sin embargo, en cuanto al cálculo del Peso eviscerado (P_e),

el incremento en la media puede ser negativo o positivo, ya que depende de factores inherentes a su hábitat, por lo que la variabilidad en el cálculo siempre será alta a pesar de utilizar las coordenadas con menor variabilidad.

Morfometría Geométrica 2D

Con la geometría 2D se alcanza satisfactoriamente el objetivo de estimar dimensiones corporales y biomasa a partir de imágenes sin contacto con los organismos eliminando la necesidad de sacrificio en campo.

El número de datos es menos importante que lo adecuado de los mismos conforme a la tendencia de variación del fenómeno dentro del rango de variación natural, aunque sean pocos datos, si son los correctos y están bien tomados arrojarán mejores resultados que muchos datos con alta incertidumbre.

Para 2D, basar la estimación de dimensiones y biomasa a partir de una llave es eficiente, y resulta optima para la estimación de parámetros poblacionales y un poco limitada para estimaciones individuales debido a la variabilidad intrínseca de las relaciones longitud – longitud y longitud – peso.

Morfometría Geométrica 3D

El empleo de la relación Le Observada – Le Calculada para obtener Le 3D a partir de una regresión lineal, resultó ser un método eficiente, ya que el error de medición obtenido es mínimo. Esto habla positivamente del potencial del método de calibración 3D y del proceso de obtención de coordenadas 3D, ya que parece ser que disminuye la variabilidad de los grupos de coordenadas.

General

La aplicación de la morfometría geométrica en 2D y 3D es eficiente para la discriminación de la especie con el objetivo de efectuar conteos de organismos a partir de imágenes sin sacrificio o contacto de organismos.

La eficiencia de las ecuaciones para la discriminación de la especie no necesariamente se asocia al grado de ajuste, sino a la elección adecuada de los landmarks involucrados.

Existen dos factores inherentes a considerar en estudios morfométricos: los del fenómeno y los del método; una buena metodología y eficiencia de herramientas para la corrección de errores sistemáticos permite un estudio confiable del fenómeno.

SUGERENCIAS Y PERSPECTIVAS

Antes de construir la plataforma, se consideren las tallas de los peces que se van a trabajar, lo cual evitaría el fotografiado parcial de los organismos y la necesidad de emplear software para la creación de mosaicos, lo cual puede influir en la aberración de la imagen total del organismo.

Asegurar la obtención de ejemplares completos y de la misma procedencia para poder profundizar en estudios como morfometría de otolitos o escamas, índices hepatosomáticos y gonadosomáticos, entre otros.

Optimizar el muestreo para obtener parámetros como sexo del organismo, época en que se realiza la colecta, peso total o peso visceral.

Se sugiere ensayar la iluminación entorno al tamaño de los organismos, iniciando el fotografiado desde el más pequeño al más grande o viceversa para mantener un patrón lo más adecuado en todo el intervalo de tallas.

En estudios posteriores sería recomendable probar estas ecuaciones con fotografías de otras especies del mismo género para evaluar el poder de discriminación aun disminuyendo el nivel de confianza, y con ello, encontrar los alcances de este método morfométrico como herramienta de discriminación en herramientas de cómputo.

REFERENCIAS

- Abarca-Arenas, L. G., Franco-López, J., González-Gándara, C., & Silva-López, G. (2012). Los peces de la costa veracruzana: relación especies-área y conectividad entre sitios. *Investigación ictiológica en México Temas selectos en honor al Dr. José Luis Castro Aguirre. Universidad Nacional Autónoma de México. México*, 304(11), 127-158.
- Adams, D. C., Rohlf, F. J., & Slice, D. E. (2004). Geometric morphometrics: ten years of progress following the 'revolution'. *Italian Journal of Zoology*, 71, 5-16.
- Adams, D. C., Rohlf, F. J., & Slice, D. E. (2013). A field comes of age: geometric morphometrics in the 21st century. *Hystrix*, 24(1), 7.
- Aguirre, W. E., & Prado, P. J. (2018). *Guía práctica de morfometría geométrica: aplicaciones en la ictiología* (Vol. 1). Esmeraldas, Quito: Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Esmeraldas (PUCESE).
- Allen, R. G. (1985). Fao Species catalogue. Snappers of the world an annotated and Illustrated Catalogue of Lutjanid species known to date. In FAO (Ed.), *FAO Fisheries Synopsis* (Vol. 6, pp. 208). Roma, Italy.
- Arreguín-Sánchez, F., & Manickchand-Heileman, S. (2005). The trophic role of lutjanid fish and impacts of their fisheries in two ecosystems in the Gulf of Mexico. *Journal of Fish Biology*, 53, 143-153. doi:10.1111/j.1095-8649.1998.tb01024.x
- Bannerot, S., W.W. Fox Jr, and J.E. Powers. (1987). *Reproductive strategies and the management of snappers and groupers in the Gulf on Mexico and Caribbean*. Boulder, Colorado, USA: Westview Press.
- Bookstein, F. L. (1991). *Morphometric tools for landmark data: geometry and biology* (Digital ed. Vol. 1). Cambridge, United Kingdom: Cambridge Univ. Press.
- Bookstein, F. L., Chernoff, B., Elder, R., Humphries, J., Smith, G., & Strauss, R. (1985). Morphometrics in evolutionary biology. Special Publication 15. *Academy of Natural Sciences, Philadelphia*, 277.
- Cappo, M., Harvey, E., & Shortis, M. (2006). Counting and measuring fish with baited video techniques-an overview. *AFSB CONFERENCE AND WORKSHOP" CUTTING-EDGE TECHNOLOGIES IN FISH AND FISHERIES SCIENCE*, 1, 15.
- Cervigón, F., Cipriani, R., Fischer, W., Garibaldi, L., Hendrickx, M., Lemus, A., . . . Rodriguez, B. (1992). *Fichas FAO de identificación de especies para los fines pesca. Guía de campo de las especies comerciales marinas y de aguas salobres de la costa septentrional de Sur América*. Retrieved from Roma (Italia).
- Claude, J. (2008). *Morphometrics with R* (Vol. 1). Montpellier, France: Springer Science & Business Media.
- Coggins Jr, L. G., Gwinn, D. C., & Allen, M. S. (2013). Evaluation of age-length key sample sizes required to estimate fish total mortality and growth. *Transactions of the American Fisheries Society*, 142(3), 832-840.
- Dryden, I. L., & Mardia, K. V. (1998). Statistical shape analysis: Wiley series in probability and statistics. In. New York, NY: John Wiley & Sons, Ltd.

- Elewa, A. M. (2004). *Morphometrics: applications in biology and paleontology* (Vol. 14): Springer Science & Business Media.
- García Rivero, A. (2013). *Desarrollo de la metodología para la aplicación de visión estereoscópica en la estimación de parámetros ecológicos de corales*. (Biologist Batchelors). FES Zaragoza, UNAM, CDMX, México.
- Granados, R. M. (2016). Modelos de regresión lineal múltiple. *Granada, España: Departamento de Economía Aplicada, Universidad de Granada*.
- Harvey, E., Fletcher, D., & Shortis, M. (2001). Improving the statistical power of length estimates of reef fish: a comparison of estimates determined visually by divers with estimates produced by a stereo-video system. *Fishery bulletin-national oceanic and atmospheric administration*, 99(1), 72-80.
- Heemstra, P. C., & Randall, J. E. (1984). FAO species catalogue. *FAO fisheries Synopsis*, 16(125).
- Hernández Osorio, M. A. (2014). *Desarrollo de metodología para la evaluación de parámetros ecológicos en comunidades ícticas arrecifales mediante fotografía estereoscópica*. (Licenciatura). FES Zaragoza, UNAM, CDMX, México
- Karr, J. R. (1981). Assessment of biotic integrity using fish communities. *Fisheries*, 6(6), 21-27.
- Kendall, D. G. (1977). The diffusion of shape. *Advances in applied probability*, 9(3), 428-430.
- Klingenberg, C. P. (2016). Size, shape, and form: concepts of allometry in geometric morphometrics. *Development Genes and Evolution*, 226(3), 113-137. doi:10.1007/s00427-016-0539-2
- Lessios, H. A. (1996). *Methods for quantifying abundance of marine organisms*. Paper presented at the Methods and techniques of underwater research. Proceedings of the American Academy of Underwater Sciences Scientific Diving Symposium. Washington DC.
- Mallet, D., & Pelletier, D. (2014). Underwater video techniques for observing coastal marine biodiversity: a review of sixty years of publications (1952–2012). *Fisheries Research*, 154, 44-62.
- Marzoa Domínguez , A. (2020, 1 Setembre 2020). Aberraciones ópticas I: la aberración esférica. "Astronomia", 255, 24-34. Retrieved from <http://hdl.handle.net/2117/342311>
- Parrish, J. D. (1987). The trophic biology of snappers and groupers. *Tropical snappers and groupers: Biology and fisheries management*, 405-463.
- Pelletier, D., Leleu, K., Mou-Tham, G., Guillemot, N., & Chabanet, P. (2011). Comparison of visual census and high definition video transects for monitoring coral reef fish assemblages. *Fisheries Research*, 107(1-3), 84-93.
- Perez Huesca, R. A. (2015). *Estimación de cobertura real en estructuras coralinas* (Licenciatura). FES Zaragoza, UNAM, CDMX, México.
- Plaza Archundia, J. C. (2013). *Morfometría 3D de especies ícticas del arrecife Santiaguillo, PNSAV, Veracruz*. (Licenciatura). FES Zaragoza, UNAM, CDMX, México.
- Reyment, R. A. (1996). An idiosyncratic history of early morphometrics. In *Advances in morphometrics* (pp. 15-22): Springer.
- Rodríguez-Jaume, M.-J., & Mora Catalá, R. (2001). Análisis de regresión múltiple.

- Rohlf, F. J. (1993). Relative warp analysis and an example of its application to mosquito. *Contributions to morphometrics*, 8, 131.
- Rohlf, F. J. (1999). Shape statistics: Procrustes superimpositions and tangent spaces. *Journal of classification*, 16(2), 197-223.
- Rohlf, F. J., & Bookstein, F. L. (1990). *Data acquisition*. In: *Proceedings of the Michigan morphometrics workshop*. University of Michigan Museum of Zoology.
- Rojo Abuín, J. M. (2007). Regresión lineal múltiple. *IdEyGdM-Ld Estadística*, 32.
- Salas-Pérez, J. d. J., & Granados-Barba, A. (2008). Oceanographic characterization of the Veracruz reefs system. *Atmósfera*, 21(3), 281-301.
- Shortis, M., Harvey, E., & Seager, J. (2007). *A review of the status and trends in underwater videometric measurement*. Paper presented at the Invited paper, SPIE Conference.
- Slice, D. E. (2001). Landmark coordinates aligned by Procrustes analysis do not lie in Kendall's shape space. *Systematic biology*, 50(1), 141-149.
- Sluka, R., Chiappone, M., & Sealey, K. S. (2001). Influence of habitat on grouper abundance in the Florida Keys, USA. *Journal of fish biology*, 58(3), 682-700.
- Toro Ibacache, M. V., Manriquez Soto, G., & Suazo Galdames, I. (2010). Morfometría geométrica y el estudio de las formas biológicas: de la morfología descriptiva a la morfología cuantitativa. *International Journal of Morphology*, 28(4), 977-990.
- Zelditch, M. L., Swiderski, D. L., & Sheets, H. D. (2012). *Geometric morphometrics for biologists: a primer* (2nd ed. Vol. 1). New York: Elsevier Academic Press.
- Zhang, Z. (2000). A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 22(11), 1330-1334.