

## Artículo de investigación

# Implementation of a prototype desktop software based on computer vision for the growth traceability of rainbow trout fish (*Oncorhynchus mykiss*) in the LESTOMA-UDEC Laboratory

## Implementación de un prototipo de software de escritorio basado en visión por computadora para la trazabilidad de crecimiento de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) en el Laboratorio LESTOMA-UDEC

Jaime Eduardo Andrade Ramírez <sup>1</sup> , Ivone Gisela López Cruz <sup>2\*</sup> , Yeffersson Stiven Castro Martínez <sup>3</sup> , Alejandro Flórez Lesmes <sup>4</sup> 

1. Universidad de Cundinamarca, Facatativá Cundinamarca, Colombia; [jeandrade@ucundinamarca.edu.co](mailto:jeandrade@ucundinamarca.edu.co)
2. Universidad de Cundinamarca, Facatativá Cundinamarca, Colombia; [iglopez@ucundinamarca.edu.co](mailto:iglopez@ucundinamarca.edu.co)
3. Universidad de Cundinamarca, Facatativá Cundinamarca, Colombia; [ystiven Castro@ucundinamarca.edu.co](mailto:ystiven Castro@ucundinamarca.edu.co)
4. Universidad de Cundinamarca, Facatativá Cundinamarca, Colombia; [aflorezl@ucundinamarca.edu.co](mailto:aflorezl@ucundinamarca.edu.co)

\* Correspondencia: [iglopez@ucundinamarca.edu.co](mailto:iglopez@ucundinamarca.edu.co)

**Resumen:** El seguimiento del crecimiento de las truchas arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) en sistemas cerrados de recirculación de agua representa un componente esencial para el aprovechamiento del alimento en los peces y la eficiencia de la producción acuícola. Este proceso de seguimiento requiere la aplicación de métodos exactos y no invasivos que faciliten la evaluación del desarrollo de los peces sin generarles estrés y manteniendo las condiciones del estado del medio acuático. En esta investigación, se implementó un sistema de visión por computadora que permite procesar imágenes simultáneas capturadas desde una cámara cenital y una cámara lateral ubicadas sobre un túnel de paso que conecta dos estanques de producción acuícola, con el fin de estimar semanalmente las dimensiones de los peces muestreados usando algoritmos de Machine Learning, además, de generar datos que permiten ajustar en forma automática la dosificación del alimento de los peces. Para lograr esto, inicialmente se determinaron los requerimientos y el diseño del diagrama UML aproximado del software construyendo en paralelo el sistema físico de muestreo fotográfico, luego se aplicaron ajustes para la captura de la imágenes realizando pruebas experimentales que determinaron la distancia adecuada entre las cámaras y el túnel de observación evaluando distancias desde 3 cm hasta 7 cm. Seguidamente, se abordó el problema de la distorsión óptica generada por el sistema de lentes y el medio acuático, para lo cual se obtuvo una función de corrección polinómica que permitió compensar los errores presentes en las imágenes capturadas. Luego, se implementó un algoritmo de machine learning en Python y finalmente, se analizaron y validaron los resultados experimentales, demostrando que a 7 cm entre el tubo de muestreo y la cámara, las imágenes obtenidas conservaban la totalidad del cuerpo del pez dentro del campo de visión, evitando recortes en los extremos y reduciendo los errores en la estimación de longitud. Asimismo, la ejecución del algoritmo inteligente y la consideración de la corrección óptica permitieron mejorar la relación entre las medidas reales y las calculadas por el sistema, además de generar un comando (orden) de respuesta hacia el sistema electrónico que controla y ajusta la cantidad de alimento de los peces periódicamente.

**Palabras clave:** Software; visión por computadora; inteligencia artificial; trazabilidad de crecimiento; acuicultura; trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*).

Recibido: 14/11/2025

Aceptado: 12/12/2025

Fecha de Publicación: 18/12/2025

<https://doi.org/10.57173/ritc.v1n19a6>



Derechos de autor: © 2025

**Abstract:** Monitoring the growth of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in closed recirculating aquaculture systems is an essential component for optimizing feed utilization by the fish and enhancing aquaculture production efficiency. This monitoring process requires the application of precise, non-invasive methods that facilitate the assessment of fish development without causing stress and while maintaining the conditions of the aquatic environment. In this study, a computer vision system was implemented to process simultaneous images captured by an overhead camera and a side-view camera positioned above a passage tunnel connecting two aquaculture production ponds. The system estimates the dimensions of sampled fish on a weekly basis using machine learning algorithms and generates data that automatically adjusts the fish feed dosage. To achieve this, the requirements and approximate software design were initially determined while simultaneously building the physical photographic sampling system; then, adjustments were made to image capture thru experimental tests that determined the optimal distance between the cameras and the observation tunnel, evaluating distances from 3 cm to 7 cm. Next, the optical distortion caused by the lens system and the aquatic medium was addressed, for which a polynomial correction function was derived to compensate for the errors present in the captured images. Next, a machine learning algorithm was implemented in Python, and finally, the experimental results were analyzed and validated, demonstrating that at a 7 cm distance between the sampling tube and the camera, the captured images retained the entire fish body within the field of view, preventing cropping at the edges and reducing length estimation errors. Likewise, the execution of the intelligent algorithm and the incorporation of optical correction improved the correlation between the actual measurements and those calculated by the system, as well as generating a response command for the electronic system that periodically controls and adjusts the amount of feed for the fish.

**Keywords:** Software; computer vision; IA; growth traceability; aquaculture; rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*).

## 1. Introducción

En el ámbito de la acuicultura, la trazabilidad del crecimiento de los peces constituye un elemento esencial para la optimización de la producción. Este proceso permite garantizar la calidad, eficiencia y sostenibilidad de los sistemas de cultivo [2]. Sin embargo, en el Laboratorio Experimental de Sistemas Tecnológicos Orientados a Modelos Acuapónicos (LESTOMA) de la Universidad de Cundinamarca extensión Facatativá (UDEC) donde se cría la trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*), se presenta una problemática relevante en el proceso de muestreo (trazabilidad) semanal, en el cual suele registrarse la mortalidad del 1% al 2% de las muestras de peces capturados manualmente para medirlos, lo cual afecta directamente la confiabilidad de los datos de crecimiento y el bienestar animal. Además, la dosificación y cálculo del alimento representan una medida sensible estrechamente relacionada con los costos directos de producción, por lo que la implementación de métodos precisos y no invasivos para el seguimiento del desarrollo de los peces se vuelve una necesidad prioritaria [3].

La acuicultura, es la actividad que permite obtener producción por medio del cultivo de organismos acuáticos como los animales y los vegetales [4]. La acuicultura ha surgido como una solución sostenible para el cultivo de peces, ofreciendo muchos beneficios que incluyen el medio ambiente y la seguridad alimentaria [5]. Al incorporar tecnología de monitoreo y control en estos sistemas, se ha podido optimizar procesos productivos, reducir costos y mejorar la calidad de vida de las especies [6].

En este contexto, LESTOMA-UDEC ha desarrollado investigaciones orientadas a la trazabilidad del crecimiento de peces [7], principalmente en la especie trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*), con el fin de aportar al mejoramiento de las prácticas de producción acuícola en la región sabana de occidente (Cundinamarca/Colombia). A pesar de que ya existen avances tecnológicos, todavía se siguen realizando procesos de forma manual, en este caso, uno de los procesos que se hacen de forma manual semanalmente es la trazabilidad de crecimiento de los peces del laboratorio. Este proceso consiste en sacar semanalmente a los peces de los estanques para registrar medidas como la longitud y el peso del pez. Aunque este procedimiento permite obtener

datos periódicos, resulta invasivo y estresante para los peces, lo que ha contribuido a un incremento en la tasa de mortalidad. Además, el proceso toma mucho tiempo y esfuerzo por parte de los investigadores, lo que limita la eficiencia del monitoreo y la calidad de la información recolectada.

Recientes estudios han demostrado que aplicar tecnologías como la visión por computadora en la medición de peces, ha sido efectiva para mejorar la recopilación, análisis y visualización de datos relacionados con la acuicultura [6]. La visión por computadora incluye una serie de fases necesarias para que el ordenador tenga la capacidad de percibir y comprender una imagen tratando de imitar el proceso que realizan los seres humanos [8]. En comparación con las herramientas estadísticas convencionales, el desarrollo de la inteligencia artificial ha mejorado la optimización de procesos acuapónicos permitiendo llevar un control de los peces [9].

La medición de peces a partir de imágenes digitales puede ser una alternativa no invasiva frente a los métodos manuales tradicionales. Mediante técnicas de visión por computadora es posible identificar y analizar las características morfológicas de cada pez, permitiendo calcular variables como la longitud, el área, el volumen y el peso de manera automática, eliminando la necesidad de sacar a los peces de los estanques y así disminuir el estrés y la mortalidad, al tiempo que garantiza datos más consistentes y precisos para el seguimiento de su crecimiento [10].

El costo del alimento representa entre un 50% y 60% de los costos totales de producción en la acuicultura, esto indica que es el principal gasto operativo en el sistema [11]. En la Tabla 1, se puede evidenciar el precio por kilogramo del alimento para los peces y la cantidad de alimento por día que se les debe suministrar dependiendo la etapa en la que se encuentre la trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*). Dado el costo del alimento, es indispensable ajustar la ración para evitar desperdicios, sin embargo, un muestreo manual genera una distribución deficiente del alimento lo que altera el bienestar de los peces al interrumpir su alimentación. Además, un proceso de medición manual requiere de un tiempo considerable y es invasivo para los peces, esta manipulación les genera estrés y puede contribuir al aumento de la tasa de mortalidad.

**Tabla 1.** Tabla nutricional de truchas arcoíris con productos Italcol<sup>1</sup>.

Etapa	Producto Italcol	Frecuencia de Alimentación (veces/día)	Consumo promedio diario por pez (g)	Precio aproximado (COP/Kg)
<b>Alevín (&lt;50g)</b>	Aquatrucha iniciación 50	8-10	0.8 - 1.6g	\$14.500
<b>Juvenil (50-150g)</b>	Aquatrucha levante 45	4-6	2 - 3g	\$12.000
<b>Adulto (&gt;150g)</b>	Aquatrucha finalización 40	4	4 - 8g	\$10.500

<sup>1</sup> Nota: Tabla generada por los autores, basada en [12], [13], [14].

Por lo tanto, la implementación de un sistema de visión artificial permite reducir significativamente el tiempo de medición y la manipulación de los peces, optimizando el ajuste de las dosificaciones de alimentación con más precisión y mitigando el desperdicio de este y mejorando el proceso de alimentación y de medición de los peces en sus diferentes etapas (alevín, juvenil y adulta), disminuyendo la tasa de mortalidad y los costos operativos del sistema.

<sup>1</sup> Empresa colombiana especializada en la producción de alimentos concentrados para animales.

## 2. Materiales y métodos

El prototipo de software tiene como objetivo integrar la visión por computadora con el hardware electrónico del sistema LESTOMA (cámaras), permitiendo la estimación semanal automatizada de la tasa de crecimiento de las truchas arcoíris arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) en producción. Este enfoque busca mejorar la trazabilidad, reducir los costos de producción y optimizar el bienestar animal. El desarrollo se sustenta en la estrategia Concebir, Diseñar, Implementar y Operar (CDIO) para la integración y gestión de la electrónica, complementado con el uso de metodologías ágiles para la programación y la aplicación de técnicas de inteligencia artificial para el procesamiento de datos.

Toda la investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, ya que se miden variables numéricas relacionadas con el crecimiento de las trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) a partir de los datos que se obtienen mediante las técnicas de visión por computadora; este tipo de enfoque permite establecer relaciones de causa y efecto entre variables [15]. En este contexto, el uso de imágenes digitales y mediciones mediante software permite obtener información más precisa sobre las mediciones de los peces, lo cual facilita la trazabilidad del crecimiento y la comparación con mediciones manuales. aplicación de técnicas de inteligencia artificial para el procesamiento de datos.

Todo este proceso se logra en 5 fases, donde se inicia con el levantamiento y afinamiento de los de requerimientos junto con el diseño del diagrama UML del software y el sistema físico para la captura de las imágenes. Seguidamente, se realiza la evaluación de la distancia cámara-vidrio para posteriormente aplicar la corrección a la distorsión óptica que se genera entre el medio acuático y la cámara. A continuación, se procede a realizar la implementación y ejecución del algoritmo de Machine Learning para finalmente validar el prototipo mediante técnicas estadísticas descriptivas y de comparación.

### 2.1 Requerimientos, diseño del diagrama UML del software y el diseño del sistema físico para la captura de imágenes

El proceso de medición manual de los peces es altamente invasivo lo que genera estrés aumentando la tasa de mortalidad y comprometiendo el bienestar de las truchas arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*). Además, sin un proceso de medición fiable de los peces, es difícil saber con exactitud si la dosificación de alimentación que se les está suministrando es la correcta. La dependencia de métodos imprecisos y biológicamente perjudiciales crea una brecha crítica en la gestión de la biomasa que limita la máxima eficiencia operativa del sistema. Por lo tanto, es esencial definir los requerimientos del sistema antes de iniciar el proceso, asegurando su correcto funcionamiento.

#### 2.1.1 Requerimientos

- *Requerimientos Funcionales:*

**Tabla 2.** Requerimientos Funcionales

ID	Requerimiento	Descripción
RF1	Captura y Adquisición de Frames (Imágenes)	El software deberá permitir la adquisición de frames (imágenes) desde las cámaras conectadas en dos modos: Manual (extracción bajo requerimiento del usuario) y Automático (captura en tiempo real).
RF2	Aplicación de Calibración y Escala	El sistema deberá aplicar las escalas de calibración previamente definidas para cada cámara para convertir los píxeles medidos en centímetros.
RF3	Cálculo de Biometría	El sistema deberá calcular las tres dimensiones biométricas del pez: Largo (Longitud), Alto y Ancho (Espesor), con base en las mediciones escaladas de las vistas Lateral y Cenital.

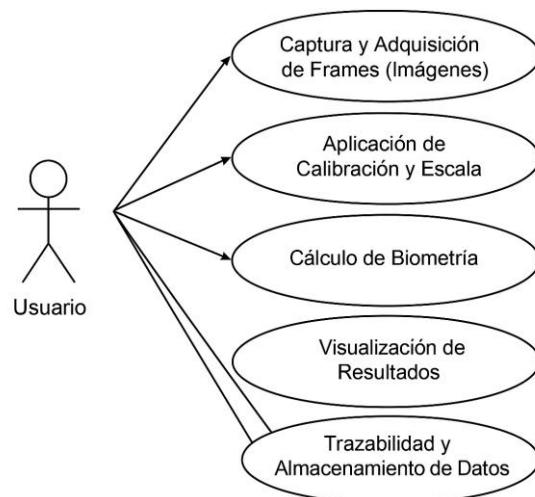
RF4	Visualización de Resultados	La interfaz principal deberá mostrar de forma simultánea los frames capturados (Vista Lateral y Cenital) y los Valores Calculados (Largo, Alto, Ancho) de forma clara y accesible al usuario.
RF5	Trazabilidad y Almacenamiento de Datos	El sistema deberá asignar un ID de Medición, registrar la Fecha y Hora, y almacenar las dimensiones (manuales y estimadas) del pez para su posterior consulta y análisis.

- *Requerimientos No Funcionales:*

**Tabla 3.** Requerimientos No Funcionales

ID	Requerimiento	Descripción
RFN1	Escalabilidad	El diseño del software y la base de datos deben ser escalables para manejar el crecimiento del volumen de datos históricos.

#### 2.1.2 Diseño del diagrama UML del software



**Figura 1.** Diagrama de Casos de Uso general del software

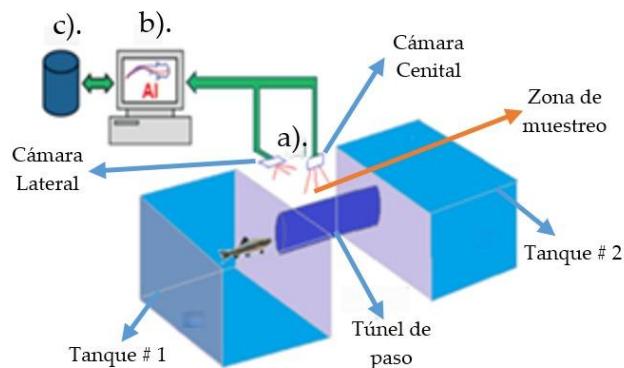
La Figura 1, representa el diagrama de casos de uso general del software, este diagrama ilustra las interacciones principales entre el actor usuario y el sistema de biometría y trazabilidad. Este diagrama modela las funcionalidades esenciales que el usuario puede ejecutar para el proceso de estimación del crecimiento.

El actor usuario, tiene acceso a las siguientes cinco funcionalidades o casos de uso esenciales, que representan el flujo de trabajo del sistema:

- **Captura y Adquisición de Frames:** Inicia el proceso de recolección de datos, donde el sistema captura y obtiene las imágenes necesarias para el análisis.
- **Aplicación de Calibración y Escala:** Permite al usuario aplicar los parámetros de calibración predefinidos para asegurar que las imágenes capturadas sean métricamente precisas, estableciendo una escala para las mediciones.
- **Cálculo de Biometría:** Es la función central del sistema, procesa las imágenes para realizar las mediciones biométricas como longitud, altura, ancho, peso o tasa de crecimiento de los peces.
- **Visualización de Resultados:** Proporciona la interfaz para que el usuario pueda ver y analizar los resultados obtenidos del cálculo de biometría.
- **Trazabilidad y Almacenamiento de Datos:** Asegura la persistencia de la información. Este caso de uso maneja el histórico de los datos biométricos y de las mediciones, garantizando su trazabilidad a lo largo del tiempo.

En resumen, el diagrama de casos de uso establece la interfaz de usuario del sistema, cubriendo desde la adquisición inicial de los datos hasta su análisis, visualización y almacenamiento.

### 2.1.3 Diseño del sistema físico para la captura de imágenes



**Figura 2.** Zona de muestreo fotográfico, laboratorio LESTOMA-UDEC.

La Figura 2 presenta un diagrama esquemático de la arquitectura del sistema propuesto para la trazabilidad y monitoreo del crecimiento de truchas arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*). El sistema está diseñado para integrar la adquisición de imágenes digitales, el procesamiento mediante inteligencia artificial y el almacenamiento de datos biométricos.

El sistema se compone de tres módulos principales interconectados que representan las etapas clave del proceso:

a). Módulo de Adquisición de Datos (Zona de Muestreo): Esta sección ilustra el subsistema físico encargado de la captura de imágenes. Consiste en dos tanques interconectados (Tanque #1 y Tanque #2) por medio de un Túnel de Paso. Es en este túnel donde se establece la zona de muestreo, diseñada para guiar individualmente a las truchas para su medición. Dos cámaras de alta resolución están estratégicamente ubicadas: una cámara cenital (superior) y una cámara lateral. Ambas operan de manera sincronizada para adquirir múltiples vistas de cada pez a medida que transita por el túnel. Para esto, se utilizaron dos cámaras digitales, una Logitech c930e de 1080p FULL HD y Kisonli HD-1081 de 1080p FULL HD, ambas a 7cm de distancia del tubo, con fondo de color verde. Las imágenes se almacenaron en formato .png.

b). Módulo de Procesamiento y Análisis (Sistema de Cómputo con IA): Las imágenes capturadas en el módulo (a) son transmitidas a una estación de cómputo, representada en el punto (b). Este módulo es el cerebro del sistema, donde se implementan y ejecutan algoritmos avanzados de visión por computadora e inteligencia artificial (IA). Su función principal es procesar las imágenes para extraer parámetros biométricos específicos de cada pez, incluyendo la longitud, altura y ancho. La IA permite la detección, segmentación y medición automatizada y robusta de los peces, minimizando la intervención manual y aumentando la eficiencia. Para el procesamiento se utilizó un equipo de cómputo con sistema operativo Windows 11, procesador AMD Ryzen 7 5800XT (8 núcleos a 4.8 GHz), tarjeta gráfica NVIDIA GeForce RTX 4060 y 24 GB de memoria RAM.

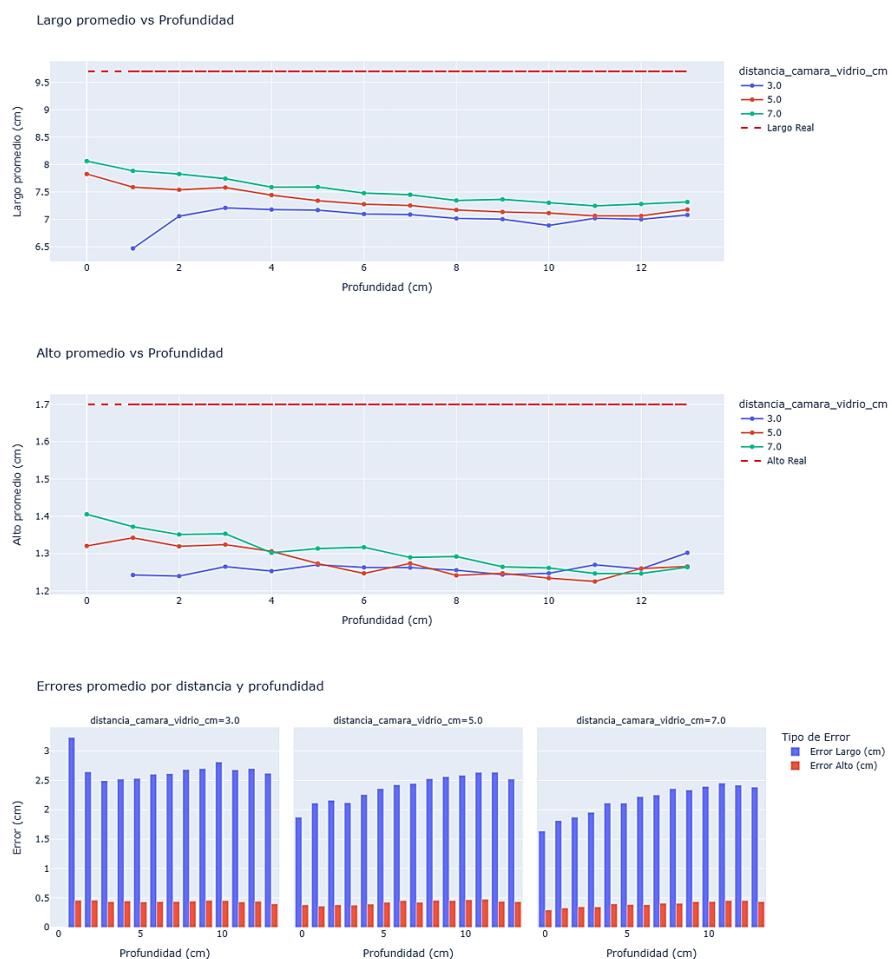
c). Módulo de Almacenamiento de Datos (Base de Datos): Finalmente, los datos biométricos extraídos por el módulo de procesamiento (b), junto con las imágenes originales de cada trucha, son almacenados en una base de datos, indicada como (c). Esta base de datos es esencial para la trazabilidad, ya que permite registrar el historial de crecimiento individual de cada pez a lo largo del tiempo. Almacenar tanto los datos numéricos como las imágenes asociadas facilita el seguimiento, la auditoría y el análisis, lo que contribuye a la mejora de los costos de producción y el bienestar animal.

En conjunto, esta arquitectura propuesta permite un monitoreo continuo y no invasivo del crecimiento de las truchas arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*), proporcionando información valiosa para una gestión acuícola más eficiente y sostenible.

## 2.2 Evaluación Distancia Cámara-Vidrio

Se realizaron pruebas con tres distancias distintas entre el vidrio del túnel de paso que esta entre los tanques como se muestra en la figura 4, con medidas de 36.5cm x 14cm x 14cm con un grosor de 4mm y las cámaras (lateral y cenital), las distancias que se probaron fueron: 3 cm, 5 cm y 7 cm, con el fin de identificar la posición óptima para registrar completamente el pez dentro del área de contorno.

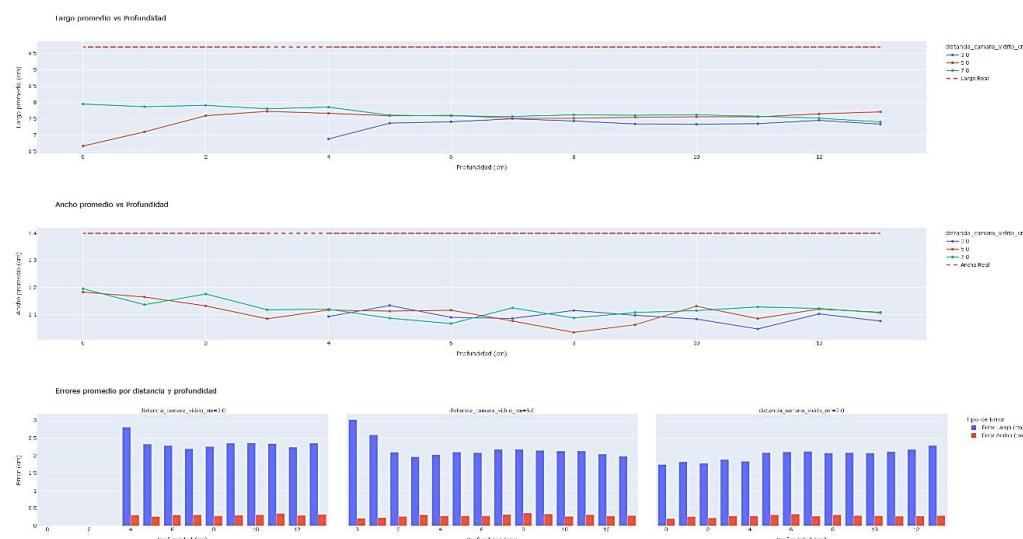
Se llegó a la conclusión de que en ambas cámaras (lateral y cenital), la distancia de 7 cm presentó los mejores resultados (Figura 4 y Figura 5), permitiendo mantener la totalidad del pez dentro del campo de visión sin pérdida de segmentos corporales y los datos más cercanos a la realidad.



**Figura 3.** Resultados promedio del largo y alto en función de la profundidad del pez en la cámara lateral.

La figura 3, presenta los resultados del análisis de precisión del sistema de medición biométrica en función de la profundidad y la distancia de la cámara Lateral. Se muestran tres gráficos que comparan las dimensiones reales con las estimada.

- Largo promedio vs. profundidad:** se observa una ligera disminución del valor estimado a medida que aumenta la profundidad, manteniéndose cercano al valor real en la mayoría de los casos.
- Alto promedio vs. profundidad:** los valores presentan mayor variabilidad, aunque tienden a seguir la tendencia del valor real dentro de un margen aceptable de error.
- Errores promedio por distancia y profundidad:** evidencia que los errores aumentan levemente con la profundidad, siendo más notorios cuando la cámara se encuentra a mayor distancia del objeto medido.



**Figura 4.** Resultados promedio del largo y ancho en función de la profundidad del pez en la cámara cenital.

La Figura 4 presenta los resultados del análisis de precisión del sistema en función de la profundidad y la distancia de la cámara Cenital, comparando dimensiones reales con las estimadas.

- Largo promedio vs. Profundidad:** Se observa una ligera disminución del valor estimado a medida que aumenta la profundidad, manteniéndose muy cercano al valor real.
- Ancho promedio vs. Profundidad:** Los valores presentan mayor variabilidad y tienden a situarse ligeramente por debajo del valor real.
- Errores promedio por Distancia y Profundidad:** Evidencia que los errores aumentan levemente con la profundidad en los tres parámetros, pero se mantienen en valores bajos.

Con lo anterior, se puede evidenciar que a distancias de 3 cm y 5 cm se observaron recortes parciales o distorsiones laterales en el contorno debido a que el tubo por ser largo y la cámara al estar muy cerca, no se tenía la visión completa del tubo, también por la refracción del vidrio, este afectaba la precisión de las mediciones de longitud y altura.

### 2.3 Corrección de distorsión óptica.

Durante las mediciones iniciales se detectó un problema de distorsión óptica derivado de los diferentes índices de refracción del aire, el vidrio y el agua. Dado que el pez se encuentra dentro del tubo lleno de agua, las imágenes capturadas por las cámaras se ven afectadas por la desviación de la luz al atravesar dichos medios.

Para mitigar este efecto, que distorsiona las dimensiones, se implementó una función matemática basada en la ley de Snell de la refracción para ajustar las mediciones [16]. La corrección se implementó mediante la siguiente ecuación, que ajusta la distancia capturada para obtener la dimensión real:

$$d_{real} = (d_{aparente} - e) \cdot \frac{n_{agua}}{n_{vidrio}} + e \cdot \frac{n_{vidrio}}{n_{aire}}$$

Donde:

- $d_{aparente}$ : distancia medida en la imagen sin corrección
- $d_{real}$ : distancia real corregida
- $e$ : espesor del vidrio
- $n_{aire} \approx 1.0003$

- $n_{vidrio} \approx 1.5$
- $n_{agua} \approx 1.333$

Al calcular los coeficientes de refracción relativos y estimar el grado de distorsión según la posición del pez, esta corrección permite obtener una estimación mucho más precisa del tamaño real del pez, aislando el error causado por la óptica.

Con el fin de compensar las variaciones de tamaño causadas por la posición del pez dentro del tubo, se analizaron los datos obtenidos a distintas profundidades y se ajustaron mediante funciones lineales y polinómicas, como se presenta a continuación:

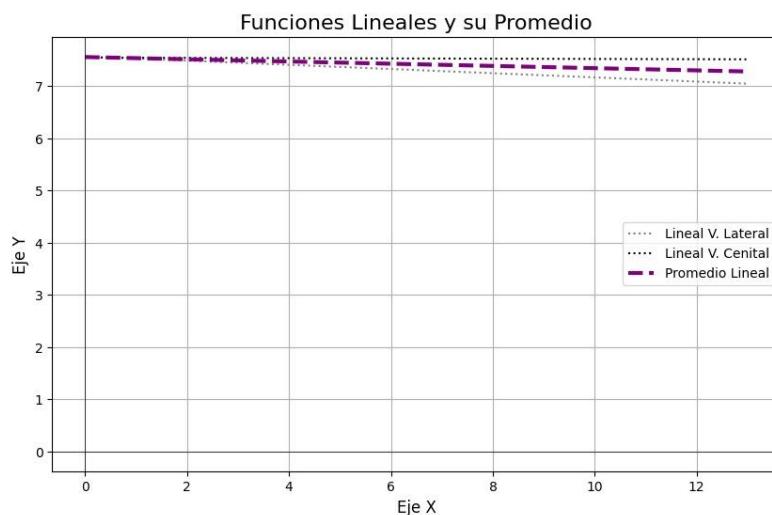
#### 2.3.1 Modelado de la relación entre posición y medida

En función de modelar los datos, se obtuvieron las siguientes funciones:

- Funciones lineales:

$$\begin{aligned} y_{lateral} &= -0.0401x + 7.5673 \\ y_{cenital} &= -0.0025x + 7.5449 \\ y_{promedio} &= -0.0213x + 7.5561 \end{aligned}$$

En la Figura 6 se muestra las tres funciones lineales (Lateral, Cenital y Promedio) ajustadas a los datos de medición. Las tres funciones son casi horizontales y exhiben una pendiente ligeramente negativa (decreciente), indicando que los valores de y se mantienen estables a lo largo del Eje X. Todas las líneas se agrupan en un rango muy estrecho, entre 7.0 y 7.6.



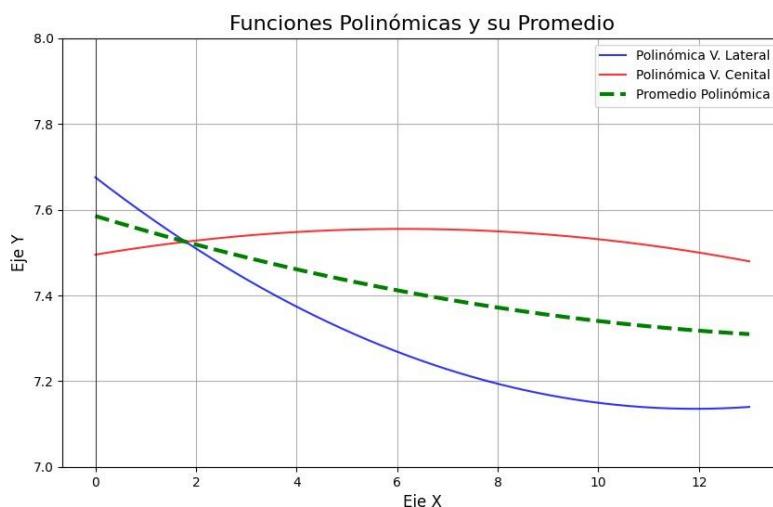
**Figura 5.** Funciones lineales de cada cámara y su promedio

- Funciones polinómicas:

$$\begin{aligned} y_{lateral} &= 0.0038x^2 - 0.0906x + 7.6754 \\ y_{cenital} &= -0.0016x^2 + 0.0196x + 7.4950 \\ y_{promedio} &= 0.0011x^2 - 0.0355x + 7.5852 \end{aligned}$$

En la Figura 6 muestra el ajuste de funciones polinómicas de segundo grado a los datos de medición (Lateral y Cenital), además de su promedio.

- Función Polinómica V. Lateral (Azul): Presenta la mayor variación, decreciendo rápidamente desde un máximo en  $x=0$  hasta un mínimo alrededor de  $x=12$ .
- Polinómica V. Cenital (Roja): Exhibe el comportamiento más estable, aumentando ligeramente hasta un pico alrededor de  $x=6$  y luego decreciendo suavemente.
- Promedio Polinómica (Verde): Actúa como una tendencia de compromiso, mostrando un descenso constante y más suave que la Cenital y la Lateral, manteniéndose entre los valores de ambas.



**Figura 6.** Funciones polinómicas de cada cámara y su promedio

En la Figura 6 se presentan las curvas ajustadas de las funciones polinómicas junto con su promedio, donde se aprecia que la función polinómica se adapta mejor al comportamiento no lineal de los datos, mostrando menor dispersión y mayor continuidad entre los valores experimentales.

En contraste, la Figura 5 muestra el ajuste lineal, que evidencia un comportamiento más rígido y una menor capacidad de adaptación al cambio de profundidad.

La comparación cuantitativa entre ambas aproximaciones evidenció que la función polinómica reduce el error promedio de medición en relación con la posición del pez, especialmente en profundidades intermedias, donde el efecto de refracción es más pronunciado.

#### 2.4 Implementación y ejecución del Algoritmo de machine Learning.

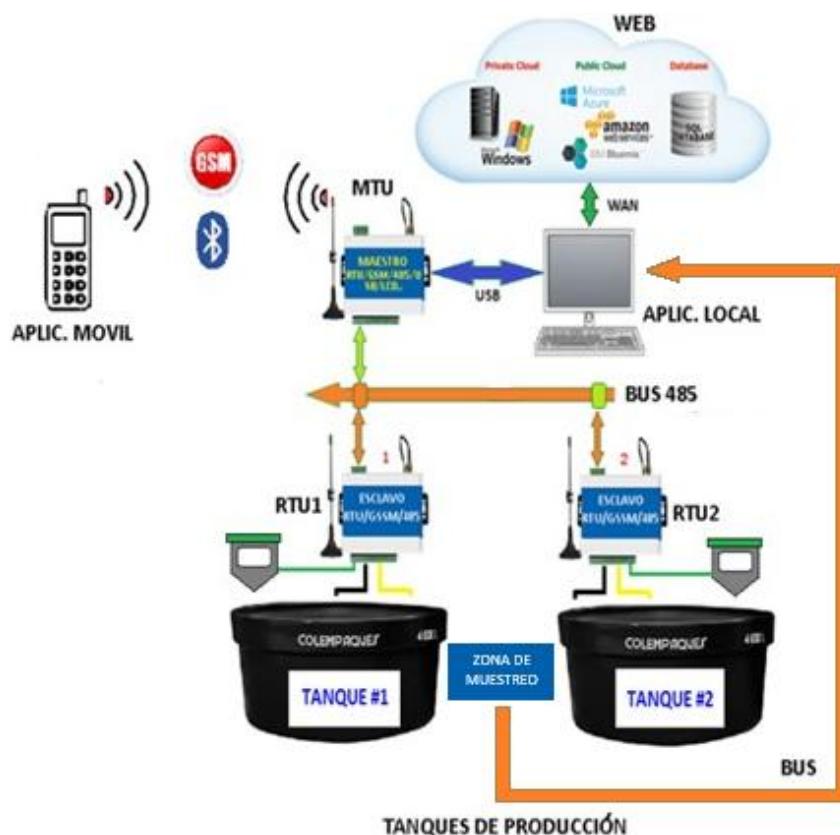
El proceso de adquisición de datos del prototipo se enfoca en la transformación de una imagen en un conjunto de métricas biométricas precisas, asegurando la trazabilidad de crecimiento de la trucha. El sistema fue desarrollado en Python utilizando Visual Studio Code, integrando una arquitectura de librerías para cubrir todas las fases del procesamiento:

La captura inicia con la adquisición de un frame (manual o automático) de las cámaras. Antes del análisis, las librerías de OpenCV se utilizan para el acondicionamiento inicial, realizando ajustes de brillo, contraste y reducción de ruido para optimizar la calidad visual en el entorno acuático.

El sistema emplea una Doble Estrategia de Detección para optimizar la precisión y la eficiencia:

- **Acondicionamiento Inicial:** La captura inicia con la adquisición de un frame (manual o automático) de las cámaras. Antes del análisis, las librerías de OpenCV se utilizan para el acondicionamiento inicial. Esto incluye la realización de ajustes de brillo, contraste y reducción de ruido, optimizando la calidad visual para el entorno acuático.
- **Detección de la Región de Interés (ROI):** Para identificar y aislar el cuerpo del pez, el modelo Moondream identifica el bounding box más aproximado del pez en las vistas lateral y cenital.
- **Segmentación Final:** Dentro de la región detectada (ROI), se aplican técnicas clásicas de detección de bordes y umbralización utilizando OpenCV para realizar la segmentación. Esta técnica aísla la silueta exacta del pez, separándolo del fondo.

La silueta segmentada es la base para la extracción biométrica. Una vez aplicadas las escalas de calibración para la conversión a centímetros, el sistema calcula el largo, alto y ancho, y estima métricas como el peso y el factor K.



**Figura 7.** Arquitectura de conectividad del sistema LESTOMA-UDEC

La Figura 7, ilustra la arquitectura de conectividad del sistema del laboratorio LESTOMA-UDEC, mostrando cómo la electrónica de adquisición de imágenes se integra con la aplicación de procesamiento (APLIC. LOCAL) y los servicios en la nube.

La Aplicación Local es la estación de cómputo donde reside la lógica de la Inteligencia Artificial (IA) y donde se procesan los datos de las cámaras.

- **Conexión y Procesamiento:** La aplicación local recibe los frames de las cámaras a través de un bus de datos desde la zona de muestreo y ejecuta la doble estrategia de detección descrita anteriormente.
- **Estructura de Datos JSON:** Una vez que el procesamiento biométrico es completado por la IA, los resultados se encapsulan en el formato JSON (JavaScript Object Notation). Una vez que la Inteligencia Artificial (IA) en la aplicación local calcula los parámetros biométricos (largo, ancho, alto, peso, Factor K), estos resultados se serializan en un objeto JSON antes de ser enviados a la base de datos.
- **Flujo de Almacenamiento:** Los frames procesados se guardan en formato .jpg en el almacenamiento local, mientras que el paquete JSON es enviado a la base de datos localmente, completando el ciclo de trazabilidad.

## 2.5 Validación prototipo

La validación del prototipo se llevó a cabo mediante un estudio comparativo de campo con una duración de mes y medio. Este estudio contrastó sistemáticamente las métricas biométricas obtenidas automáticamente por el software de visión por computadora con las mediciones manuales de referencia.

La muestra consistió en 100 ejemplares de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*), seleccionados aleatoriamente de los estanques de producción, las mediciones se realizaron a lo largo de mes y medio, permitiendo evaluar la consistencia del sistema y su capacidad de trazabilidad a través de múltiples ciclos de crecimiento.

Las dimensiones reales de la muestra de 100 peces se obtuvieron utilizando herramientas de medición como una balanza digital, una pecera con hojas milimétricas y un celular para la toma de imágenes del pez en diferentes ángulos, para determinar su longitud, alto, ancho y peso.

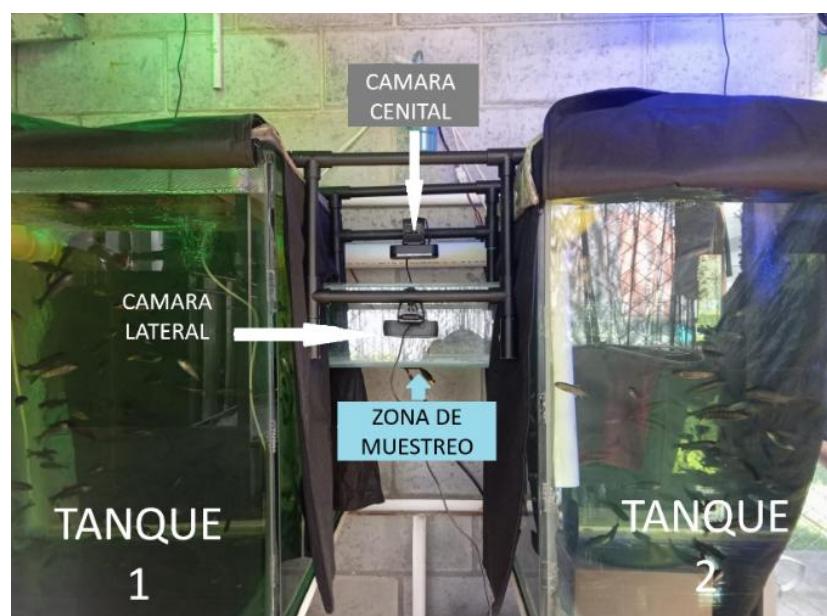
Para la medición automática, en la zona de muestreo se fueron adquiriendo frames (vistas cenital y lateral) de cada pez, el software de la aplicación local procesó estas imágenes utilizando la estrategia de doble detección de IA para obtener la biometría.

Posteriormente se realizaba la comparación entre ambas mediciones y así determinar la precisión del prototipo, estableciendo la desviación porcentual de las métricas automáticas respecto a las mediciones manuales.

### 3. Resultados

El proyecto ha logrado avances significativos en la implementación y optimización del sistema de medición no invasiva de truchas arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*). A continuación, se detallan los resultados experimentales más relevantes obtenidos.

#### 3.1. Configuración del Prototipo Físico (Zona de Muestreo)



**Figura 8.** Zona de muestro laboratorio LESTOMA-UDEC

La Figura 8 muestra el sistema físico de la zona de muestreo implementado en el laboratorio LESTOMA-UDEC. Esta configuración física es importante para el proceso de adquisición de datos del sistema.

El sistema consta de dos tanques (TANQUE 1 y TANQUE 2) interconectados, entre los cuales se sitúa la zona de muestreo, que contiene un túnel de paso y dos cámaras (cámara cenital y cámara lateral) de alta resolución para la captura de imágenes:

- **Cámara Cenital:** Orientada verticalmente, captura la vista superior del pez, esencial para medir el ancho real y la longitud proyectada.
- **Cámara Lateral:** Orientada horizontalmente, captura la vista lateral del pez, para medir el alto y la longitud en esa proyección.

La sincronización de la captura de frames en ambas vistas permite un cálculo de biometría más preciso que los sistemas basados en una sola cámara.

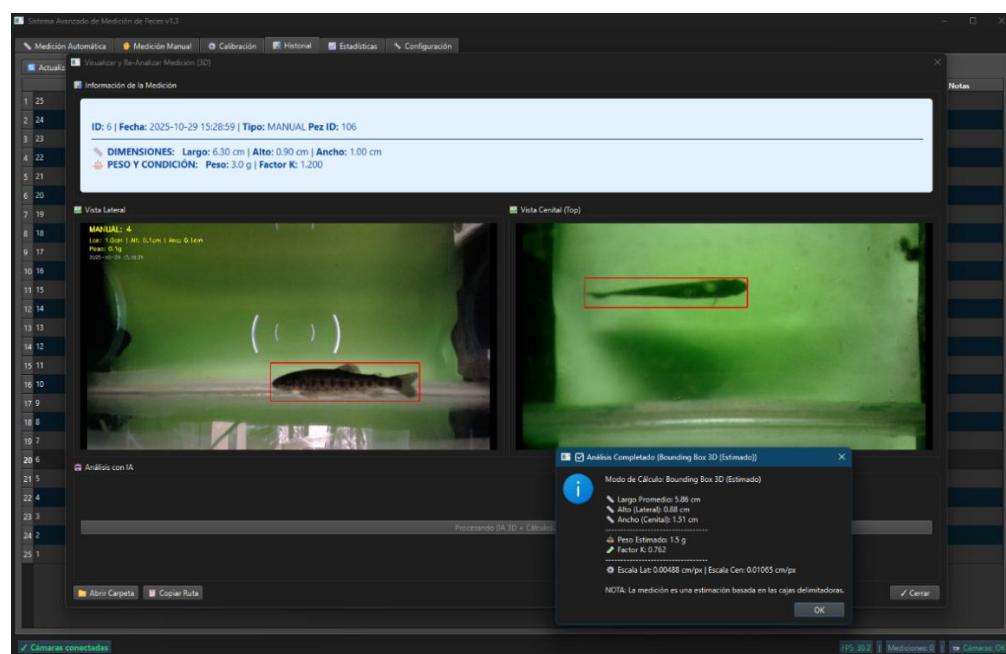
### 3.2 Extracción automática del pez mediante visión artificial

El proceso de extracción automática del pez se inicia con la adquisición del frame, el cual puede ser extraído de las cámaras tanto en modo manual como en captura automática en tiempo real. Para que el software de escritorio reciba esta información visual, la integración entre el hardware (cámaras) y el software se realiza mediante el intercambio de comandos y datos estructurados en formato .json (JavaScript Object Notation), un protocolo ligero y eficiente.

Una vez que el frame ha sido transferido, el sistema lo analiza con el modelo de Moondream para identificar el bounding box más aproximado al contorno del pez en ambas perspectivas: la vista lateral y la vista cenital (Figura 10).

Una vez identificadas las coordenadas, se aplica una incrustación por croma dentro de esa región, permitiendo aislar la silueta del pez y eliminar el fondo o el exceso de agua dentro del recuadro. Esta técnica mejora la precisión al medir solo el cuerpo del pez y no la región rectangular completa del bounding box.

Finalmente, se aplican las escalas de calibración de cada cámara para obtener las dimensiones en centímetros: largo, alto y ancho. Además, con los datos recopilados se hace una estimación del peso del pez.



**Figura 9.** Interfaz del sistema de Visualización y Re-Análisis (3D) mediante visión por computadora.

En la figura 9 se puede observar un ejemplo, donde se muestran ambas vistas del pez, los bounding boxes generados y los valores calculados automáticamente por el sistema, incluyendo largo, alto, ancho y el peso estimado de la trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*).

### 3.3 Resultado de la validación del prototipo

Durante un periodo de mes y medio, se llevó a cabo la validación experimental del sistema considerando una muestra semanal de 100 truchas arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) en etapa de alevinaje. Los resultados obtenidos demostraron la capacidad del prototipo para identificar y segmentar los peces dentro del entorno de muestra con una precisión del 93% en la medición longitudinal, respecto al valor medido manualmente. De igual manera, el cálculo del peso en gramos calculado de acuerdo con la comparación de las tablas de conversión de talla y peso ofrecidas por la FAO, presentó una desviación del 10 % en el cálculo de la biomasa. Esta discrepancia en el peso no es por un fallo de detección, sino que puede deberse a una limitación geométrica al

proyectar imágenes en dos planos a estimaciones volumétricas sin una referencia de profundidad totalmente ajustada y a la desviación media que pudieran llegar a tener las estimaciones de la FAO.

**Tabla 4.** Tabla de relación de longitud en centímetros y peso en gramos para un ejemplar en trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*).

Relación de longitud y peso de la trucha arcoíris			
Longitud en cm	Peso en g	Longitud en cm	Peso en g
2,5	0,18	6,5	3,72
3,0	0,40	7,0	4,60
3,5	0,61	7,5	5,60
4,0	0,86	8,0	6,70
4,5	1,15	8,5	7,90
5,0	1,49	9,0	9,20
5,5	2,18	9,5	10,53
6,0	2,87	10,0	12,00

<sup>1</sup> Nota: Adaptado de [20], Relación de longitud y peso de la trucha arcoíris en etapa de alevinaje

Estos hallazgos no comprometen la viabilidad del sistema, pero se procederá a realizar ajustes en el factor de conversión para corregir la discrepancia detectada, esto permitirá obtener un bounding box más ajustado al cuerpo real del pez, mejorando significativamente la precisión del cálculo volumétrico y del Factor K.

#### 4. Discusión

La implementación de un prototipo de software que integra la visión por computadora para la trazabilidad de crecimiento de truchas arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) representa una ventaja fundamental sobre las técnicas tradicionales, principalmente por su naturaleza no invasiva. La manipulación física de los peces para el pesaje y la medición manual genera estrés significativo y puede llevar a la pérdida de la capa mucosa protectora, incrementando la susceptibilidad a enfermedades y resultando en una mortalidad derivada del manejo [17]. Además, la necesidad de mano de obra y el tiempo requerido para estos procesos manuales añaden costos operativos y reducen la frecuencia con la que se pueden obtener datos, limitando la precisión de las tasas de crecimiento semanales. La presente investigación demuestra la viabilidad de combinar técnicas avanzadas como la visión por computador y el procesamiento de imágenes para eliminar estos riesgos y costos asociados.

Los resultados más importantes de esta investigación incluyen la extracción del contorno del pez mediante la detección con Moondream y Yolo v8 y la segmentación por croma. El análisis experimental permitió determinar que la distancia óptima entre la cámara y el vidrio del tubo es de 7 cm, tanto en la vista lateral como en la cenital y el desarrollo de una función polinómica para mitigar la distorsión causada por la refracción del aire, del vidrio y del agua dependiendo la posición del pez en el tubo.

Al comparar estos resultados con la investigación de [18], quien también como objeto de estudio tenía a las truchas arcoíris, su resultado de precisión fue notable, logrando menos del 5% de error. Sin embargo, este sistema fue diseñado para los desafíos de un estanque real, como la turbidez del agua y los cambios de luz solar. En cambio, dentro de los resultados que se obtuvieron, se analizó un problema diferente: la distorsión óptica causada por un tubo de vidrio. Por lo tanto, mientras que el resultado de Yamao [10] valida la robustez del sistema en condiciones variables, este proyecto valida un modelo de corrección específico para mediciones de alta precisión en un entorno en vivo.

Por otra parte, en el estudio de [19], se logró un nivel de precisión muy elevado en la medición de peces globo, cabe aclarar que el método usado implicaba sacar el pez del agua y fotografiarlo, evitando el problema de refracción. En la presente investigación al aplicar una corrección polinómica (sección 2.3.1) representa un paso necesario para que los sistemas que miden bajo el agua puedan aspirar a ese mismo nivel de correlación y fiabilidad.

En conjunto, los avances obtenidos hasta el momento de la investigación confirman la viabilidad técnica del enfoque y confirman la viabilidad para un sistema de trazabilidad de crecimiento de los peces, no invasivo y adaptable a diferentes condiciones experimentales. A futuro, se busca profundizar en el entrenamiento del modelo de visión por computadora para mejorar la detección de los peces y que los parámetros arrojados por el sistema se ajusten más a la realidad.

### 5. Conclusiones

Hasta el momento, el desarrollo del prototipo de software basado en visión por computadora para la trazabilidad de crecimiento de los peces trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) ha permitido alcanzar avances importantes en la etapa de calibración, modelado óptico y procesamiento de imágenes.

El proyecto ha logrado determinar experimentalmente los parámetros óptimos de captura en cámaras cenital y lateral, desarrollar un modelo de corrección por refracción para mejorar la precisión de las mediciones e implementar un método de detección y extracción automática del pez utilizando visión artificial.

Se implementó y validó un método de detección y extracción automática del contorno del pez. La integración del modelo Moondream con técnicas de segmentación fina (por croma o detección de bordes) permite aislar la silueta del pez con una alta tasa de éxito, sentando las bases para una medición automatizada y no invasiva.

Aunque el trabajo continúa en desarrollo, los resultados obtenidos demuestran la viabilidad técnica del enfoque propuesto y sientan las bases para un sistema de medición no invasivo y automatizado. Al eliminar la manipulación manual de los peces, el sistema contribuye a la reducción del estrés, la disminución de la mortalidad asociada al manejo y la optimización de los costos operativos, posicionando el prototipo como un fundamento sólido para un futuro sistema de trazabilidad de crecimiento altamente preciso y adaptable a distintas condiciones experimentales en acuicultura.

A futuro, se prevé la optimización del entrenamiento de IA con el propósito de consolidar un sistema de medición de alta precisión. Esta etapa incluirá la ampliación del conjunto de datos de entrenamiento para mejorar la robustez del modelo ante las variaciones de luminosidad y turbidez. La meta final es la transferencia tecnológica del prototipo, permitiendo al laboratorio LESTOMA-UDEC contar con una herramienta precisa y automatizada para la gestión eficiente de la alimentación y la predicción de las tasas de crecimiento de las truchas arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*).

### Referencias

1. F. Campana, M. Bolzonella, E. Royer, A. C. Lima, y R. Pastres, "Predicting farmed rainbow trout weight distribution to improve feeding practice: an individual-based model approach," *Open Res. Eur.*, vol. 2, n.º 63, may. 2022, doi: 10.12688/openreseurope.14740.1.
2. E. J. Vettom, A. Danve, and Y. Khalasi, "Precision Aquaculture: Integrating technology for enhanced production," *Precision Aquaculture*, Feb. 2024.
3. D. Li, Y. Hao, and Y. Duan, "Nonintrusive methods for biomass estimation in aquaculture with emphasis on fish: a review," *Reviews in Aquaculture*, vol. 12, no. 1, pp. 1–22, Jan. 2020, doi: 10.1111/raq.12388.
4. Ministerio de Asuntos Agrarios, Prov. de Bs. As., Argentina and A. Bocek, "ACUICULTURA," 2007. Accessed: Oct. 2025. [Online]. Available: <https://www.produccion-animal.com.ar>
5. K. Brye and D. B. S. E. U. N. L. USA, "Aquaculture: a sustainable solution for fish cultivation and global food security," *J. Agric.*, vol. 6, no. 4, pp. 91–93, 2023, doi: 10.37532/jagri.2023.6(4).91-93.
6. A. I. Zanfrillo, F. R. M. P. U. T. N. y F. C. E. S. U. N. M. P., "Aplicación de tecnologías en los sistemas de trazabilidad pesquera," *Ser. Metodologías ID. Documentos de Trabajo*, n.d.
7. A. Bravo Bohórquez, F. A. Lanza Rodríguez, and D. L. Hernández Bustos, "Plataforma computacional para optimizar la gestión remota de sistemas acuapónicos, aplicando modelos estadísticos," *Proy. de Invest.*, Univ. de Cundinamarca, 2024.

8. A. D. Cantero Alonso and E. A. Martínez Jara, "Visión por computador: identificación, clasificación y seguimiento de objetos," Tesis/Informe, Facultad Politécnica, Univ. Nacional del Este, Parag., 2016.
9. W. Vásquez-Quispesivana, M. Inga, and I. Betalleluz-Pallardel, "Inteligencia artificial en acuicultura: fundamentos, aplicaciones y perspectivas futuras," *Scientia Agropecuaria*, vol. 13, no. 1, pp. 79–96, 2022, doi: 10.17268/sci.agropecu.2022.008.
10. D. Roy, M. Padhiary, P. Roy, and J. A. Barbhuiya, "Artificial intelligence-driven smart aquaculture: Revolutionizing sustainability through automation and machine learning," *LatIA*, vol. 2, p. 116, 2024, doi: 10.62486/latia2024116.
11. M. C. Martínez & J. S. Ramos Informe de pasantías en sistema productivo de cultivo de Trucha Arcoíris (*Oncorhynchus mykis*) Usme – Vereda Curubital, Bogotá. [online]. Disponible en: <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/60335>.
12. Italcol, "AQUATRUCHA INICIACIÓN 50 – Alimento completo para las etapas de Larvicultura y Alevinaje de Trucha Arco Íris," Italcol, Colombia. [En línea]. Disponible: <https://italcol.com/producto/aquatrucha-iniciacion-50/>
13. Italcol, "AQUATRUCHA LEVANTE 45 – Alimento completo para juveniles de Trucha Arco Íris," Italcol, Colombia. [En línea]. Disponible: <https://italcol.com/producto/aquatrucha-levante-45/>
14. Italcol, "AQUATRUCHA FINALIZACIÓN 40 – Alimento completo para el engorde de Trucha Arco Íris," Italcol, Colombia. [En línea]. Disponible: <https://italcol.com/producto/aquatrucha-finalizacion-40/>
15. C. A. Bernal, Metodología de la investigación: Administración, economía, humanidades y ciencias sociales, 3rd ed. Pearson Educación, 2010.
16. Han, S. H., et al. (2018). A Vision-Based Method for Underwater Fish Size Measurement Using Refraction Correction and Perspective Projection. En: *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 27271-27279. [DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2833076].
17. A. Auró de Ocampo y L. Ocampo Camberos, "Diagnóstico del Estrés en Peces," *Veterinaria México*, vol. 30, no. 4, <https://www.redalyc.org/pdf/423/42330411.pdf>
18. E. Yamao, "Low-cost IoT and computer vision-based on aquaculture monitoring system," *Campus*, vol. 29, no. 37, pp. 207-214, Ene.-Jun. 2024, doi: 10.24265/campus.2024.v29n37.10.
19. Z. Lin, S. Yoshikawa, M. Hamasaki, K. Kikuchi, y S. Hosoya, "Automated phenotyping empowered by deep learning for genomic prediction of body size in the tiger pufferfish, *Takifugu rubripes*," *Aquaculture*, vol. 595, p. 741491, 2025, doi: 10.1016/j.aquaculture.2024.741491.
20. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Manual práctico para el cultivo de la trucha arcoíris. Guatemala: FAO, 2014.