

# Universidad Autónoma de Baja California

Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño



Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería



## Sistema de visión por computadora para contabilizar larvas de peces

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de

MAESTRO EN INGENIERÍA

Presenta

**ERNESTO MARTÍNEZ SANDOVAL**

Ensenada, Baja California, diciembre del 2015.

**Universidad Autónoma de Baja California**

Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño

**Sistema de visión por computadora para contabilizar larvas de peces**

**TESIS**

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

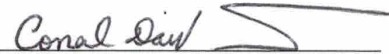
Presenta

Ernesto Martínez Sandoval

Aprobada por:



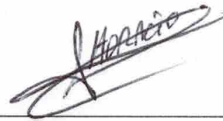
Dr. Miguel Enrique Martínez Rosas  
Director de Tesis



Dr. Conal David True  
Miembro del Comité



Dr. Manuel Moises Miranda Velasco  
Miembro del Comité



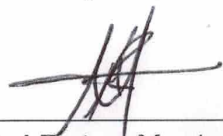
Dr. Horacio Martínez Reyes  
Miembro del Comité

Ensenada, Baja California, noviembre del 2015.

**Resumen** de la tesis de **Ernesto Martínez Sandoval**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN INGENIERÍA del programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería (MYDCI) de la UABC. Ensenada Baja California, México, diciembre del 2015.

## **Sistema de visión por computadora para contabilizar larvas de peces**

Resumen Aprobado por:



---

Dr. Miguel Enrique Martínez Rosas  
Director de Tesis

En este trabajo se presenta la metodología para la implementación de un sistema de visión por computadora para contabilizar larvas de peces basado en el procesamiento de imágenes. Se indican las condiciones para realizar la detección de larvas, además de la descripción de los algoritmos implementados para el procesamiento de las imágenes capturadas. También se indican los retos involucrados en la contabilización de especímenes en movimiento y con dimensiones reducidas. A partir de los resultados obtenidos se proponen condiciones para mejorar la captura de imágenes, de manera que su aplicación para el conteo de larvas en sistemas acuícolas es prometedora.

**Palabras Clave:** *Algoritmos de detección, Procesamiento de imágenes, Contabilización de larvas*

# Dedicatoria

A mis padres quienes me apoyan en todo momento para conseguir mis metas.

A mi hermano por inspirarme con su trayectoria, respaldarme con su experiencia y apoyarme incondicionalmente.

A mis familiares por sus buenos deseos y palabras de apoyo.

A todos los que me apoyaron en lo personal y profesional para concluir esta tesis.

Para ellos es esta dedicatoria de tesis, pues es a ellos a quienes se las debo por su apoyo.

# Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento:

A mis sinodales Dr. Manuel Moises Miranda Velasco, Dr. Conal David True, Dr. Horacio Martínez Reyes y en especial a mí asesor de tesis el Dr. Miguel Enrique Martínez Rosas por sus consejos, críticas y apoyo durante el desarrollo de esta tesis.

A mis compañeros y amigos: por su amistad y buenos momentos de grata convivencia durante las jornadas de trabajo.

Al personal de posgrado esta institución por su tiempo, sus atenciones, amabilidad y disposición para ayudarme.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico brindado, a la Facultad de Ingeniería Arquitectura y Diseño, así como también a la Unidad de Biotecnología en Piscicultura de la Facultad de Ciencias Marina ambas pertenecientes a la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), por las facilidades otorgadas para la realización de éste trabajo.

# Índice general

|                                                  |           |
|--------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUCCIÓN</b>                           | <b>1</b>  |
| 1.1. Antecedentes . . . . .                      | 1         |
| 1.2. Planteamiento del problema . . . . .        | 3         |
| 1.3. Objetivos . . . . .                         | 4         |
| 1.3.1. Objetivo general . . . . .                | 4         |
| 1.3.2. Objetivos específicos . . . . .           | 4         |
| 1.4. Descripción del contenido . . . . .         | 5         |
| <b>2. Antecedentes</b>                           | <b>7</b>  |
| 2.1. Introducción . . . . .                      | 7         |
| 2.2. Sistemas de cultivo de peces . . . . .      | 9         |
| 2.3. Métodos de conteo . . . . .                 | 14        |
| 2.4. Sistemas de visión . . . . .                | 18        |
| 2.5. Procesamiento digital de imágenes . . . . . | 19        |
| 2.6. Adquisición de imágenes . . . . .           | 21        |
| <b>3. DESARROLLO</b>                             | <b>23</b> |

|                                                                               |           |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.1. Propuesta de diseño . . . . .                                            | 23        |
| 3.2. Observaciones <i>in situ</i> . . . . .                                   | 24        |
| 3.3. Montajes . . . . .                                                       | 27        |
| 3.3.1. SAI V1 . . . . .                                                       | 27        |
| 3.3.2. SAI V2 . . . . .                                                       | 28        |
| 3.3.3. SAI V3 . . . . .                                                       | 29        |
| 3.3.4. SAI V4 . . . . .                                                       | 31        |
| 3.3.5. SAI V5 . . . . .                                                       | 32        |
| 3.4. Control remoto . . . . .                                                 | 33        |
| 3.4.1. Cámara . . . . .                                                       | 33        |
| 3.4.2. Iluminación del Sistema de Adquisición de Imágenes . . . . .           | 34        |
| 3.5. Algoritmos . . . . .                                                     | 36        |
| 3.5.1. Función ventanas . . . . .                                             | 37        |
| 3.5.2. Función umbral . . . . .                                               | 37        |
| 3.5.3. Diagrama de flujo para identificar el umbral más óptimo . . . . .      | 38        |
| 3.5.4. Función cuadro . . . . .                                               | 39        |
| 3.5.5. Diagrama de flujo para generar cuadro para limitar procesado . . . . . | 39        |
| 3.5.6. Función distancias . . . . .                                           | 40        |
| 3.5.7. Función cuadro chico . . . . .                                         | 42        |
| 3.5.8. Diagrama de flujo para generar cuadro mínimo para patron . . . . .     | 42        |
| <b>4. Pruebas y resultados</b>                                                | <b>44</b> |
| 4.1. Juveniles . . . . .                                                      | 44        |
| 4.1.1. Algoritmo primera version (v1) . . . . .                               | 46        |

|                                                                   |           |
|-------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.2. Larvas . . . . .                                             | 46        |
| 4.2.1. Adecuación de imagen y umbralización . . . . .             | 47        |
| 4.2.2. Variedad de posiciones de las larvas . . . . .             | 50        |
| 4.2.3. Algoritmo tercer version (v3) . . . . .                    | 51        |
| 4.2.4. Algoritmo décima version (v10) . . . . .                   | 54        |
| 4.2.5. Algoritmo decimoctava version (v18) . . . . .              | 57        |
| 4.2.6. Tablas de eficiencia de conteo . . . . .                   | 61        |
| 4.2.7. Gráficas eficiencia de las principales versiones . . . . . | 68        |
| 4.2.8. Mediciones de los puntos de interés . . . . .              | 71        |
| <b>5. Conclusiones Generales</b>                                  | <b>74</b> |
| 5.1. Discusiones . . . . .                                        | 74        |
| 5.2. Conclusiones . . . . .                                       | 76        |
| 5.3. Trabajo a futuro . . . . .                                   | 78        |

# Índice de figuras

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1. Estimación de numero de peces de una población y requerimiento de tiempo empleando tres métodos distintos. . . . . | 17 |
| 2.2. Parte del universo de aplicaciones para el procesamiento digital de imágenes. . . . .                              | 21 |
| 2.3. Elemento que conforman el sistema visual humano. . . . .                                                           | 22 |
| 2.4. Esquema simplificado para el proceso de formación de imágenes en una cámara. . . . .                               | 22 |
| 3.1. Zona de muestra para contabilización manual. . . . .                                                               | 24 |
| 3.2. Vista del Sistema de Adquisición de Imágenes (SAI.v1). . . . .                                                     | 27 |
| 3.3. Vista del Sistema de Adquisición de Imágenes (SAI.v2). . . . .                                                     | 29 |
| 3.4. Vista del Sistema de Adquisición de Imágenes (SAI.v3). . . . .                                                     | 30 |
| 3.5. Zonas de muestra A y B de vidrio de 3 mm de espesor . . . . .                                                      | 31 |
| 3.6. Vista del Sistema de Adquisición de Imágenes (SAI.v5). . . . .                                                     | 32 |
| 3.7. Lámpara fluorescente con difusor. . . . .                                                                          | 34 |
| 3.8. Lámpara LED con difusor. . . . .                                                                                   | 35 |
| 3.9. Diagrama de flujo para generar ventanas (submuestreo) . . . . .                                                    | 37 |

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.10. Diagrama de flujo para etiquetado de objetos en la imagen . . . . .                                       | 38 |
| 3.11. Diagrama de flujo para generar cuadro para limitar procesado . . . . .                                    | 39 |
| 3.12. Diagrama de flujo para generar cuadro ajustable de información . . . . .                                  | 40 |
| 3.13. Diagrama de flujo para encontrar distancias entre objetos . . . . .                                       | 41 |
| 3.14. Diagrama de flujo para generar cuadro mínimo para patron . . . . .                                        | 43 |
| 4.1. Imagen que ilustra como el recipiente de muestra se encuentra sobre un<br>estaque . . . . .                | 45 |
| 4.2. Imagen de zona de muestra con impurezas en la lente de la cámara. . .                                      | 45 |
| 4.3. Imagen de zona de muestra bien enfocada pero que presenta reflejos. . .                                    | 45 |
| 4.4. Sección de imagen del recipiente de muestreo para juveniles. . . . .                                       | 46 |
| 4.5. Imagen resultante de la primera versión del algoritmo de conteo . . . . .                                  | 46 |
| 4.6. Imagen de larvas de 3 semanas de vida en recipiente de transporte . . .                                    | 47 |
| 4.7. Image binaria con umbral alto (0.7). . . . .                                                               | 47 |
| 4.8. Imagen resultante del algoritmo de contabilización procesando la imagen<br>mostrada en figura 4.7. . . . . | 47 |
| 4.9. Imagen resultante al realizar una detección de círculos. . . . .                                           | 48 |
| 4.10. Sección de imagen para el procesado focalizado en una única larva . . .                                   | 49 |
| 4.11. Imagen con factor 0.4 de binarizado . . . . .                                                             | 49 |
| 4.12. Imagen con factor 0.5 de binarizado . . . . .                                                             | 49 |
| 4.13. Imagen con factor 0.6 de binarizado . . . . .                                                             | 49 |
| 4.14. Larva en posición lateral . . . . .                                                                       | 50 |
| 4.15. Larva con dirección casi frente al lente . . . . .                                                        | 50 |
| 4.16. Larva con cierto ángulo frente al lente . . . . .                                                         | 50 |

|                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.17. Larva en posición ideal para procesado . . . . .                                                 | 50 |
| 4.18. Sección de recipiente de muestreo de larvas. Tercera versión del algoritmo<br>de conteo. . . . . | 51 |
| 4.19. Imagen resultante de la tercera versión del algoritmo de conteo. . . . .                         | 51 |
| 4.20. Imagen capturada por versión 3 del SAI . . . . .                                                 | 53 |
| 4.21. Imagen con factor de binarizado 0.52 . . . . .                                                   | 53 |
| 4.22. Imagen con factor de binarizado 0.6 . . . . .                                                    | 53 |
| 4.23. Imagen adquirida a través del SAI v2 . . . . .                                                   | 54 |
| 4.24. Imagen adquirida a través del SAI v2 . . . . .                                                   | 55 |
| 4.25. Imagen adquirida a través del SAI v2 . . . . .                                                   | 55 |
| 4.26. Imagen adquirida a través del SAI v2 . . . . .                                                   | 56 |
| 4.27. Imagen limpia adquirida a través del SAI v5 . . . . .                                            | 57 |
| 4.28. Imagen que muestra los puntos detectados después de procesar la Figura<br>4.27 . . . . .         | 58 |
| 4.29. Imagen con larva fuera de enfoque a causa de su propio movimiento . .                            | 59 |
| 4.30. Imagen que muestra los puntos detectados después de procesar la Figura<br>4.29 . . . . .         | 59 |
| 4.31. Imagen que muestra un traslape en los puntos de interés de las larvas .                          | 60 |
| 4.32. Imagen que muestra un traslape en los puntos de interés de las larvas .                          | 61 |
| 4.33. Desempeño evaluado con imagen 15 (SAI v5) . . . . .                                              | 68 |
| 4.34. Desempeño evaluado con imagen 4749 (SAI v1) . . . . .                                            | 68 |
| 4.35. Desempeño evaluado con imagen 15 (SAI v5) . . . . .                                              | 69 |
| 4.36. Desempeño evaluado con imagen 4749 (SAI v1) . . . . .                                            | 69 |
| 4.37. Desempeño evaluado con imagen 15 (SAI v5) . . . . .                                              | 69 |

|                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.38. Desempeño evaluado con imagen 4749 (SAI v1) . . . . .                                                   | 69 |
| 4.39. Desempeño evaluado con imagen 15 (SAI v5) . . . . .                                                     | 70 |
| 4.40. Desempeño evaluado con imagen 4749 (SAI v1) . . . . .                                                   | 70 |
| 4.41. Desempeño evaluado con imagen 15 (SAI v5) . . . . .                                                     | 70 |
| 4.42. Desempeño evaluado con imagen 4749 (SAI v1) . . . . .                                                   | 70 |
| 4.43. Medidas en pixeles resultado del procesado de la imagen con detección<br>de bordes de objetos . . . . . | 71 |
| 4.44. Medidas en pixeles resultado del procesado de la imagen con detección<br>círculos. . . . .              | 71 |
| 4.45. Silueta con 5 objetos que provoca mediciones falsas . . . . .                                           | 72 |
| 4.46. Imagen resultante del proceso de detección de círculos . . . . .                                        | 72 |

# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

La acuicultura como cualquier actividad humana que maneja recursos naturales para la producción de alimentos, es tanto una fuente de impacto al medio ambiente, como una fuente de alimento, empleo e ingresos [1].

México se considera como uno de los países con mayores recursos pesqueros y de biodiversidad marina, tanto como por la extensión de sus litorales como por su excelente ubicación geográfica. Sin embargo, los rendimientos de las capturas no presentan incrementos sustanciales, por lo cual la acuicultura jugará un papel importante en el suministro de alimento [1].

El crecimiento de la industria acuícola ha sido el resultado de los avances en el desarrollo tecnológico y de conocimiento en esta área. Dentro de los factores de relevancia para este crecimiento se encuentra el perfeccionamiento de tecnologías que permiten reducir el consumo de agua y el desarrollo de sistemas de rehuso; los sistemas electrónicos

de monitoreo y control de variables físico-químicas [2].

El cultivo de organismos acuáticos, implica alguna forma de intervención en el proceso de crianza con el fin de aumentar la producción. Un concepto clave para definir los sistemas de producción acuícola es la intensidad de producción, término que se refiere a la combinación de dos variables: cantidad de material biológico cosechado por unidad de área del sistema de cultivo (productividad) y el grado de manipulación de los procesos naturales (nivel de tecnología) [1].

La acuicultura (Del latín *aqua*, agua y *cultura*) es la técnica del cultivo de especies acuáticas vegetales y animales [3]. Otro autor la define como: es el cultivo de organismos acuáticos bajo condiciones controladas o semicontroladas [4]. De la misma manera se define como: la ciencia y el arte del cultivo de organismos acuáticos [5].

Dependiendo del criterio utilizado para la clasificación se puede catalogar la acuicultura en función del objetivo final del cultivo. Siendo para este caso, la mejora de cardúmenes naturales a través de la captura de reproductores y transplante artificial de especímenes.

Los sistemas de monitoreo se refieren a las tecnologías implementadas en acuicultura con el fin de conocer las condiciones del organismo y su entorno.

Comúnmente el monitoreo de muchos procesos se llevan acabo de manera manual y apoyados en estadística. A través de muestras se pueden determinar ciertos parámetros físico-químicos tales como: cantidad, tamaño, peso, temperatura, pH, salinidad, etc.

Actualmente existen dispositivos que ayudan con estas tareas donde los organismos pueden ser monitorizados sin ser sometidos a niveles altos de estrés por manejo , además de acortar el proceso rutinario y reducir el nivel de error por factor humano. Estos dispositivos o herramientas nos proporcionan una manera eficiente y no invasiva de

evaluar las condiciones en que mantienen los organismos.

Por otro lado, cuando se realiza procesamiento de imágenes, se utilizan imágenes digitales que corresponden a fotografías que han sido convertidas a un formato de unos y ceros para que puedan ser interpretados por una computadora. Uno de los aspectos por los cuales el procesamiento de imágenes y técnicas de análisis son temas interesantes de estudio es la gran diversidad de campos en donde se puede aplicar [6].

## 1.2. Planteamiento del problema

En los sistemas cerrados de cultivo de organismos acuáticos, para investigación o producción en granjas uno de los factores relevantes para evaluar el desempeño del sistema es conocer el número de organismos contenidos en los recipientes. Para lo cual es necesario realizar conteos rutinarios y así efectuar estimaciones para controlar de manera adecuada la alimentación de los especímenes, reconocer parámetros de mortalidad, crecimiento y desarrollo. Para la investigación de sistemas acuícolas, es necesario utilizar sistemas de contabilización automáticos, que permitan tener un número preciso de la cantidad de individuos contenidos, lo cual proporciona a la industria un valor más acertado para el proceso de producción y de compra-venta, además aporta información valiosa sobre el comportamiento general de la población de peces. Dependerá de la aplicación y condiciones para las cuales se quiera realizar un conteo para poder decidir cual método es el más adecuado. El método de malla reticulada + fotografía es utilizado principalmente a nivel laboratorio, tal es el caso del laboratorio de Unidad de Biotecnología en Piscicultura (Unidad de Manejo y Conservación Ambiental de Reproducción y Crianza de Totoaba) facilitó muestras para llevar a cabo este trabajo. Los métodos

comparten una necesaria manipulación directa de los especímenes y su confiabilidad depende de la habilidad del personal para no ejercer demasiado estrés o lesiones en los organismos que pueden llevar a altos índices de mortandad por manejo.

Con éste trabajo, además del desarrollo de la metodología para el procesamiento de imágenes con el propósito de contabilizar peces, se pretende aportar una herramienta tecnológica más a las instalaciones de un sistema cerrado de producción para fines de repoblación de la unidad de Biotecnología en Piscicultura de la Facultad de Ciencias Marinas de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC).

## 1.3. Objetivos

### 1.3.1. Objetivo general

*Diseñar un sistema para contabilizar larvas de peces en un laboratorio de investigación de cultivos de organismos acuáticos en sistemas cerrados.*

### 1.3.2. Objetivos específicos

Con el fin de alcanzar el objetivo general, se desprenden los siguientes objetivos específicos:

- *Identificar el algoritmo más adecuado para realizar la segmentación de la forma de larvas de peces.*
- *Implementar un sistema de adquisición de imágenes.*
- *Estudiar el efecto de la iluminación en la adquisición de las imágenes*

- *Evaluar el desempeño de los algoritmos de conteo de peces*

## 1.4. Descripción del contenido

Este trabajo está dividido en los siguientes capítulos:

**Capítulo 1.** En éste capítulo se da una breve introducción donde se presentan los antecedentes, se muestra el planteamiento del problema, se plantean el objetivo general, los objetivos específicos y una breve descripción de los capítulos de los que se comprende éste trabajo.

**Capítulo 2.** En éste capítulo se presentan algunos sistemas de cultivo y características, se describen métodos de conteo de uso común en acuicultura, se describen conceptos básicos entorno al procesamiento digital de imágenes, se plantean los sistemas de visión y la adquisición de imágenes.

**Capítulo 3.** En este capítulo se describen las distintas etapas que se realizaron durante el desarrollo de este trabajo. Los datos técnicos que describen el tipo de equipo empleado así como sus distintas configuraciones. También en esta sección se presentan diagramas de flujo que describen las funciones empleadas para detectar información considerada de interés para la detección.

**Capítulo 4.** En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las pruebas y experimentos desarrollados durante la fase experimental. Las imágenes que se obtuvieron con los distintos tipos de iluminación, así como los inconvenientes que se observaron con cada tipo de lámparas. También, se presenta la calidad de las distintas imágenes así como los parámetros con los cuales se debe contar para

poder realizar un procesamiento adecuado de imagen. El desempeño de los distintos algoritmos desarrollados al procesar una variedad de imágenes bajo distintas condiciones.

**Capítulo 5.** En este capítulo se presentan las conclusiones basandose en los resultados obtenidos, así como en observaciones, experiencias adquiridas durante el desarrollo de los distintos algoritmos implementados, el diseño y construcción del sistema de adquisición de imágenes, y el análisis de los datos procesados. También, se presentan los trabajos futuros que se desprenden de ésta tesis, debido a que el desarrollo de este tipo de herramientas para el área acuícola tiene un gran potencial.

# Capítulo 2

## Antecedentes

### 2.1. Introducción

La ingeniería acuícola cubre una gran área de conocimiento e implica muchas especialidades como: ingeniería mecánica, ingeniería ambiental, tecnología de materiales, instrumentación y monitoreo, diseño de edificios y construcción. El principal objetivo de esta disciplina es utilizar la ingeniería técnica, principios en acuicultura y sistemas de producción biológicos para practicar la acuicultura de manera eficiente y sustentable [2].

Los estadios tempranos de vida son especialmente sensibles tanto a los factores bióticos como abióticos adversos que pueden provocar mortalidades elevadas. Es bien conocido que en el ambiente, la supervivencia de las larvas presenta altas fluctuaciones, debido a múltiples factores que provocan valores de supervivencia desde 10 % hasta 0.1 % [7], [8]. Los puntos críticos del estado larvario están asociados a períodos iniciales de alimentación en que las larvas alcanzan a almacenar un mínimo de sustancias

esenciales para lograr con éxito el siguiente estadio. En el período inicial después de la eclosión, las larvas de la mayoría de las especies de peces marinos requieren alimento vivo, y esto es parte de la razón porque la fase larvaria es un cuello de botella en el desarrollo de la acuicultura marina [9], [10], [11].

Entre los factores críticos para la supervivencia de huevos y larvas, se pueden mencionar los siguientes [7],[8]:

1. Factores externos

- Físicos: temperatura, iluminación, flujo de agua, corrientes, etc.
- Químicos: Oxígeno disuelto, el amonio, la salinidad, el pH, etc.

2. Factores internos

- Genéticos: Son conferidos por los padres a través del material heredado.
- Etológicos: Comportamiento alimenticio y procesos de escape para no ser capturados.
- Biológicos: Competencia y depredación rigen su supervivencia.
- Nutricionales: Confieren a las larva la energía necesaria para su metabolismo, crecer y asegurar su supervivencia.

Temperatura: variable del hábitat extremadamente importante para todos los organismos, pero especialmente para los animales ectotermos, como los peces. Determina las tasas metabólicas y de crecimiento en huevos y larvas, y en consecuencia, afecta la talla en los momentos de eclosión, duración de las diferentes fases del desarrollo, las tasas de alimentación y digestión, el comportamiento, la velocidad de natación, etc. La

temperatura también afecta a huevos y larvas de forma indirecta ya que determina la viscosidad y los niveles de saturación de oxígeno del agua, así como la productividad. La iluminación determina la duración de los periodos de alimentación diaria de las larvas y la profundidad a la que éstas pueden encontrar el alimento. La luz también afecta la turbidez y la percepción del color y por lo tanto la visión de la larva, que les permite detectar presas y huir de los predadores [12], [13].

Oxígeno: Es la variable química mas importante en la determinación de las tasas de supervivencia de huevos y larvas. En primer lugar, las tasas metabólicas dependen directamente de los niveles de oxígeno disuelto en el agua. Los huevos son muy sensibles a cambios en los niveles de oxígenos ya que existe cierto nivel de respiración través del corión, pero menos que las larvas , en las que el cambio de respiración cutánea a branquial y el desarrollo de un sistema de transporte de oxígeno a través de la sangre hacen que durante esta etapa el individuo se encuentre en una situación especialmente vulnerable siendo altamente sensible a la concentración de oxígeno disuelto en el medio. Otra variable destacable es el pH, cuyos cambios pueden provocar alteraciones en la funcionalidad de ciertas macromoléculas (proteínas, lípidos, etc.). Bajos niveles de pH alteran la funcionalidad de enzimas y membranas aumentando el riesgo de infección [12], [13].

## 2.2. Sistemas de cultivo de peces

El comportamiento social de las diferentes especies de peces está directamente ligado a las diversas formas de cultivo. Algunos animales muestran agresividad a bajas densidades, mientras que otras especies pueden exhibir crecientes niveles de agresión o

canibalismo, a medida que aumenta la densidad [14]. Las especies agresivas o caníbales pueden ser cultivadas, aunque la sobrevivencia a menudo no es buena comparada con aquellas especies que tienen compatibilidad social, derivando en ocasiones en una forma de estrés [14]. En cultivo de peces, la densidad de siembra esta relacionada al sistema de cultivo empleado y la especie cultivada, disminuyendo el peso de los peces, la utilización de alimento y la sobrevivencia a medida que la densidad aumenta [15]. La capacidad de carga está limitada por el consumo de oxígeno y la acumulación de producto metabólico; los cuales son proporcionales a la cantidad de alimento consumido [16]. Si bien existe una relación directa entre la densidad del cultivo, el consumo de oxígeno y la producción de desechos metabólicos, la reducción de la densidad se traduce en una mejor calidad de los peces; aún cuando no existan causas aparentes de estrés medio ambiental en la condición original de amontonamiento [15]. A mayor cantidad de biomasa en un estanque (debida a mayor densidad o a mayores pesos individuales); es mayor el requerimiento de oxígeno, al igual que la acumulación de catabolitos excretados por peces (en especial amoníaco), que siendo tóxico inhiben el crecimiento [17].

Existe una variedad de opciones en sistemas de cultivo de peces. Algunos se pueden utilizar con el propósito de cultivar diferentes especies, aunque algunos se desarrollan para una especie en particular o algunos organismos relacionados [4]. Para realizar una clasificación de estos sistemas de acuerdo a las facilidades y sistemas de producción, basándose en el grado de tecnología utilizado o en la producción por unidad de volumen ( $m^3$ ) o por unidad de área ( $m^2$ ) la cual es una forma común de clasificación de acuicultura.

Cultivo Extensivo: el cultivo extensivo involucra baja producción por unidad de volu-

men, la intervención humana es mínima así como el uso de sustancias artificiales. Se caracteriza también por su bajo nivel de tecnología así como un bajo nivel de inversión.

**Cultivo Intensivo:** el cultivo intensivo, en el cual se manejan densidades altas, requiere de mayor tecnología y se utilizan entradas artificiales de agua. Todo esto implica niveles de inversión elevados. En este tipo de cultivo se busca controlar la mayor cantidad de parámetros posibles como: temperatura, alimentación balanceada, control de enfermedades, entre otras. Esto con el fin de mantener el sistema en óptimas condiciones para el mejor desarrollo de la especie que se este cultivando. La contra parte de estos sistema es el alto número de muertes a comparación con los sistemas extensivos debido a que los organismos se estresan continuamente por distintos motivos tales como: manejo, crecimiento acelerado, espacio, cambios repentinos en parámetros físicos.

**Cultivo Semi-Intensivo:** el cultivo semi-intensivo es una combinación de los sistemas extensivos e intensivos antes mencionados. Por ejemplo, la crianza intensiva de crías combinada con la engorda extensiva.

Otra forma de catalogar se basa en el tipo de tecnología utilizada para el cultivo. La clasificación basada en el diseño y funcionalidad de las unidades de producción [2]. Esto depende de la especie y el ciclo de vida que se este manejando.

**Unidades Abiertas:** unidades abiertas de producción, donde se cuenta con paredes permeables, mallas o redes donde el organismo interactúa con el medio que lo rodea. Sistemas abiertos es la modalidad más antigua considerando que un sis-

tema natural sin modificaciones hechas por el hombre es un sistema abierto. Es también el mas utilizado hoy en día. Las dos características principales que hacen tan popular a un sistema abierto, son su bajo costo y sus limitados requerimientos de administración. En los sistemas abiertos más sofisticados, el conocimiento necesario para administrar el sistema puede ser considerable, y los costos involucrados pueden ser también altos. Existen distintos métodos para incrementar la producción siendo común la protección contra los depredadores de los organismos cultivados, a través de cortinas de burbujas, redes de malla fina, enrejados y diques. Otra modalidad dentro de los sistemas de cultivo abiertos son los *cultivos en suspensión*, los cuales pueden tomar muchas formas (en balsas, canastas, jaulas, etc.), pero el principal mérito es que permite que organismos crezcan en una columna vertical de agua. Mediante la utilización de la tercera dimensión la producción por unidad de área superficial puede ser incrementada considerablemente.

Unidades Semi-Cerradas: Unidades semicerradas las cuales se caracterizan por el uso de agua natural a la que se permite pasar una sola vez a través del sistema. La mayoría de los sistemas semicerrados son operados en instalaciones construidas para el propósito específico de cultivo. Esto incrementa el costo de capital de operación pero usualmente disminuye la dependencia de las condiciones climatológicas y otros fenómenos naturales. La mayor ventaja de estos sistemas es que se lleva una mejor administración en comparación con el sistema abierto; además que el control puede ser ejercido sobre variables tales como: la temperatura del agua, la velocidad y volumen de la misma, predadores y enfermedades.

Unidades Cerradas: unidades cerradas de producción, en donde el organismo se mantiene en sistemas cerrados de producción (separados del ambiente externo), el fluido de trabajo es colocado dentro del sistema y éste es raramente cambiado con fuentes externas al sistema. Tienen dos desventajas principales: altos costos de inversión y operación. Los costos de inversión son el resultado de la necesidad de adquisición de equipos para purificación y filtración. Los costos de operación también son altos debido a los costos de bombeo. Dentro de las ventajas que ofrece este tipo de sistemas destaca el preciso control de los parámetros ambientales. El control de la temperatura del agua y de otros parámetros ambientales permite un crecimiento más rápido y un uso del alimento más económico y eficiente debido a la reducción de los niveles de *estrés*, además mejora su resistencia a enfermedades [18].

Por otra parte existe una clasificación por tipo de categoría de acuicultura que se vaya a realizar, por ejemplo la siguiente clasificación se basa en el objetivo final del cultivo [19].

1. Producción de alimentos.
2. Producción de pesca deportiva.
3. Organismos acuáticos para abastecimiento de grupos de investigación científica, y para consumo de uso recreativo o de ornato.
4. Organismos acuáticos para recircular desechos orgánico.

5. Organismos acuáticos para la producción de artículos industriales, tales como aceite, perlas, alimento para animales y medicamentos.
6. Mejora de cardúmenes naturales a través de la captura de reproductores y transplante artificial de especímenes.

Como resultado de éste trabajo, se obtendría una herramienta tecnológica complementaria para las instalaciones de un sistema cerrado de cultivo intensivo. Un caso particular de dicho tipo de cultivo se ha desarrollado en la UABC con fines de repoblación de una especie a través de la captura de reproductores y transplante artificial de especímenes.

## 2.3. Métodos de conteo

En una amplia gama de industrias es necesario utilizar métodos para contabilizar elementos, una de las técnicas de conteo más comunes se basa en principios ópticos. Uno de los requisitos básicos para evaluar las operaciones de acuicultura es implementar un medio para contar las existencias de huevos, larvas, juveniles y peces en sus distintas etapas de crecimiento (desde guardería hasta la comercialización). La contabilización de los peces es de vital importancia (dependiendo de la densidad de especímenes), ya que auxilia a los acuicultores a tomar decisiones para abastecer apropiadamente sus estanques y jaulas, gestionar estrategias de alimentación precisos y diseñar un programa de mercadeo [20], [21]. Las soluciones técnicas disponibles presentan algunos inconvenientes, tales como: orientación, manejo de peces de tallas grandes, sofisticados y requieren un manejo especializado [22],[23], [24], [25]. Las estimaciones generalmente se llevan

acabo al final del periodo larvario, cuando el espécimen alcanza una talla y peso que lo hace más manejable y resistente (aproximadamente 30 mg), y al final del período de crecimiento cuando han alcanzado unos pocos gramos [26]. Para decidir el método propicio de conteo intervienen factores tales como: características de la especie, etapa de desarrollo en la que se requiere contar, volumen a contabilizar, instalaciones, etc. [19]. Dentro de los métodos de conteo en el área de acuicultura son comunes los siguientes:

- Biomasa: Estimación a través del peso de una muestra representativa.
- Conteo manual: Conteo individual (uno a uno) de los organismos.
- Malla reticulada + fotografía: Conteo visual de muestras a través de captura de imágenes.

Biomasa: el método de biomasa consiste en conocer la cantidad de peso vivo por unidad de volumen de agua. Esto significa tomar una muestra con un recipiente de volumen conocido y drenar la materia contenida en el recipiente para posteriormente conocer su peso. De esta manera es posible estimar la cantidad de materia viva de la población en el volumen de agua contenidos. Para tener una estimación de la cantidad de individuos se realiza un muestro y se pesan de forma individual, obteniendo así un promedio de peso por individuo. Con estos datos basta dividir  $\text{peso total} / \text{peso individual}$  para obtener una estimación de la población. Cabe resaltar que este método es invasivo al tener un manejo directo de los individuos, lo cual lleva a un alto grado de estrés y posibles lesiones que se puedan ocasionar durante el proceso. Debido a esto no es un método aconsejado para especímenes pequeños y frágiles [26], [2].

Conteo Manual: el método de conteo manual como su nombre lo indica, es llevado acabo cuando se contabiliza de forma individual cada individuo. Sin embargo, no siempre es posible contabilizar toda una población. Por lo que, es necesario tomar muestras representativas en un volumen conocido de agua, tal como en el método de biomasa. Se contabilizan uno a uno cada individuo de cada muestra para obtener un promedio en dicho volumen de agua. Para finalizar, se extrapolan los datos obtenidos de la muestra dando como resultado un total de individuos en el volumen total de agua, lo que es un estimado de la población. Dicho método, también es considerado invasivo ya que invariablemente se tiene un contacto directo con los individuos y además es una práctica común el inmovilizar las muestras con algún tipo de **sustancia o fármaco** para poder llevar acabo el conteo de manera más ordenada y precisa. Este método funciona tanto para individuos visibles al microscopio, como para individuos completamente desarrollados [26], [2].

Malla Reticulada + Fotografía: el método de malla reticulada + fotografía permite un mejor manejo de los individuos, aportando menor grado de estrés ya que solo es necesario tomar fotografías de muestras representativas de la población en la zona de muestra previamente cuadrículada para facilitar el posterior conteo en las imágenes obtenidas. Este método permite realizar multiples muestras de tal manera que se comprenda una población entera, sin embargo, esto dependerá de las dimensiones de la población, de la cantidad de personal y tiempo disponible para realizar el conteo de forma visual en las imágenes capturadas [26], [2].

**Comparación del conteo manual, fotografía y biomasa [26]**

*Metodología:* una población de tres meses de vida de larvas de lobina (*Dicentrarchus labrax*) con peso promedio de 30 mg, se contabilizó empleando tres métodos distintos. En primer lugar, los peces fueron contabilizados uno a uno (*conteo manual*). En segundo lugar, la población total fue fotografiada (*mallá reticulada + fotografía*) en donde todos los peces se contaron individualmente en cada imagen. En tercer lugar, se tomaron submuestras apoyados con redes de captura, las cuales se drenaron para obtener el peso de la población (*biomasa*); el peso de la larva individual se obtuvo después de un secado rápido a una muestra anestesiada con papel de seda.

*Resultados:* en la Figura 2.1 se muestran los resultados obtenidos, a partir de la comparación de los tres métodos antes mencionados. Los tiempos requeridos para cada operación fueron los siguientes: el conteo manual requirió de cuatro horas y tres operadores; para tomar fotografías (mallá reticular + fotografía) y para determinar el peso (biomasa) se requirieron dos operadores por un lapso de una hora. El conteo de peces en las fotografías de un operador por un lapso de cinco horas.

|                                                       | <b>Método</b>        |                      |                   |
|-------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|-------------------|
|                                                       | <b>Conteo manual</b> | <b>Biomasa</b>       | <b>Fotografía</b> |
| <b>Número estimado de peces</b>                       | <b>20580</b>         | <b>19406 - 21586</b> | <b>17896</b>      |
| <b>Tiempo requerido para el conteo (horas hombre)</b> | <b>12</b>            | <b>2</b>             | <b>5</b>          |

Figura 2.1: Estimación de numero de peces de una población y requerimiento de tiempo empleando tres métodos distintos.

Como la presencia de cada pez se comprueba en las fotografías, el único error que pudo producirse usando el método fotográfico, es por el factor humano; el cual no supera el valor de 1 % aproximadamente para una población de este tamaño. Por lo tanto, se puede considerar que el verdadero número de peces fué dado por éste método. En consecuencia, en los métodos de biomasa y conteo manual existió una sobre estimación de la población de 8-21 % y 15 % respectivamente [26].

Para el propósito de este trabajo, se eligió el método de *conteo manual* de forma visual ya que las muestras que se establecieron son de 15 a 20 individuos por litro de agua.

## 2.4. Sistemas de visión

Siguiendo su continuo desarrollo por las últimas tres décadas, la tecnología de visión por computadora es ahora una sofisticada tecnología de inspección de uso común. Los avances en circuitería (hardware) han dado como resultado el desarrollo de cámaras y equipos periféricos con mayor sensibilidad y capacidades de procesamiento más rápidas a menor costo, además de haber facilitado su operación e incorporar mejores sistemas de control. Los avances en los métodos de procesamiento de imágenes y clasificación han permitido la **rápida** extracción de detalles finos en imágenes y la interpretación de datos con mayor precisión para las decisiones de control. Como resultado, las tecnologías de visión por computadora se utilizan en casi todas las industrias para una amplia variedad de tareas de inspección. Sin embargo, estas tecnologías aún no se utilizan ampliamente en la acuicultura [20].

Una publicación de Mathiassen (2011) [27] revisó el potencial de diversas tecnologías de visión, incluyendo visión por computadora, para la inspección de pescado y productos pesqueros. La aplicación de los sistemas de visión por computadora se ha enfocado en cuatro áreas: investigación, comprensión de procesos y su optimización, clasificación y separación automática, así como procesamiento automatizado. Todos estos relacionados con operaciones post-cosecha. Estas operaciones pueden presentar retos complejos de inspección tales como: velocidad apropiada, detección de atributos internos, etc. Por otro lado, en la mayoría de los casos el entorno y las condiciones bajo las cuales opera la tecnología son controlables (iluminación, la posición del producto con respecto al sensor, estabilidad mecánica, etc.) [27], [20]. En base a lo descrito previamente, la aplicación de tecnologías de visión en la acuicultura es desafiante. Los sujetos inspeccionados son sensibles, se estresan fácilmente y son libres de moverse en un entorno en el que la iluminación, la visibilidad y la estabilidad generalmente no son fácilmente controlables. Además, los sensores deben de funcionar bajo el agua o en ambientes muy húmedos [20].

## 2.5. Procesamiento digital de imágenes

Se puede describir al procesamiento digital de imágenes como un conjunto de técnicas que se aplican a las imágenes digitales por medio de un ordenador digital con el objeto de mejorar su calidad o facilitar la búsqueda de información [28].

Una imagen digital se compone de un número finito de elementos, cada uno de los cuales tiene una ubicación particular. Estos elementos se denominan *elementos de imagen*, *pels* o *pixeles*. Este último es el término más ampliamente utilizado para denotar

los elementos de una imagen digital [29]. Imagen puede ser definida como una función de dos dimensiones,  $f(x, y)$ , donde  $x$  y  $y$  son coordenadas espaciales y la amplitud de  $f$  en cualquier par de coordenadas  $(x, y)$  se denomina intensidad o nivel de gris de la imagen en ese punto. Cuando  $x, y$ , y los valores de intensidad de  $f$  son todos cantidades discretas finitas, se llama a la imagen una *imagen digital* [29].

Las primeras computadoras suficientemente potentes para llevar a cabo las tareas de procesamiento de imágenes de manera significativa aparecieron en los principios de 1960. El nacimiento del procesamiento digital de imágenes de hoy se puede remontar a la disponibilidad de computadoras y al inicio del programa espacial durante ese período. Fue necesaria la combinación de estos dos acontecimientos para enfocar el potencial de los conceptos de procesamiento digital de imágenes. En paralelo con las aplicaciones espaciales las técnicas de procesamiento digital de imágenes empezó a finales de 1960 y principios de 1970 para uso médico, observaciones de recursos terrestres de forma remota, y astronomía [29].

Virtualmente todas las ramas de la ciencia tienen subdisciplinas que utilizan dispositivos de grabación o sensores que coleccionan datos de imagen del entorno como se muestra en la figura 2.2 [6].

Las aplicaciones de procesamiento de imágenes usualmente manejan grandes cantidades de datos, y normalmente se requiere el procesamiento de dichos datos en tiempo real o por lo menos en un tiempo razonable [30].

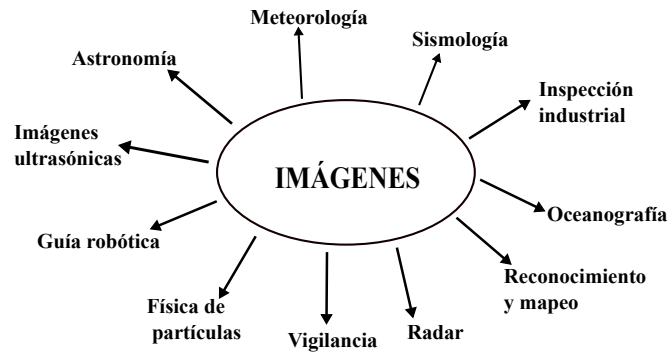


Figura 2.2: Parte del universo de aplicaciones para el procesamiento digital de imágenes.

## 2.6. Adquisición de imágenes

En el ojo humano, la distancia entre la lente y la región de formación de imágenes (retina) es fija, y la longitud focal necesaria para lograr el enfoque adecuado se obtiene variando la forma de la lente. Las fibras en el cuerpo ciliar logran esto aplanando o engrosando la lente para objetos distantes o cercanos respectivamente. Los ojos humanos tienen un campo circular cercano de visión y están compuestos de tres membranas (figura 2.3). La membrana exterior, la esclerótica, es continua posteriormente con la cubierta del nervio óptico y anterior con la córnea. El iris y el cuerpo ciliar, que suspende la lente, surgen en la capa intermedia, la coroides, contiene la red capilar. La membrana de detección de luz interior, la retina, recibe el interior de la parte posterior del ojo. El primer paso en el proceso visual es el control automático de la cantidad de luz que entra al ojo a través del iris. El flujo se centra por la lente a la fovea en la región central de la retina donde se detecta como color. La señal se amplifica y luego es transmitida a través de la vía visual para la interpretación en áreas específicas de la corteza visual del cerebro [31], [29].

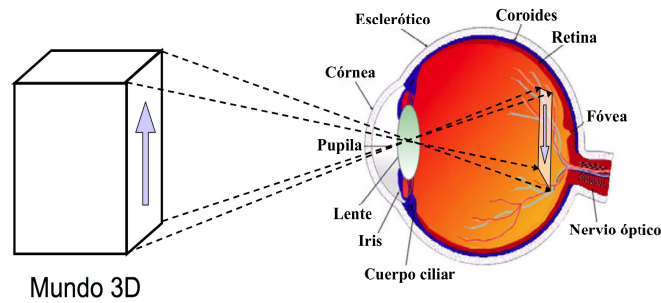


Figura 2.3: Elemento que conforman el sistema visual humano.

Las cámaras imitan el proceso llevado a cabo por el ojo humano. Pero en el caso de las cámaras la lente tiene una longitud focal fija, y se centra a varias distancias para lograr variar la distancia entre la lente y el plano de la imagen. Logrando con esto un correcto enfoque de las imágenes. Además, utilizan un filtro de color comúnmente distribuidos en base al patrón Bayer. Este patrón alterna filas de rojos y verdes con filas de azul y verdes. Estos píxeles no están repartidos de manera equitativa, debido a que el ojo humano no es sensible por igual a estos tres colores y es necesaria incluir mayor información de color verde para que al crear la imagen, el ojo pueda percibir un verdadero color [29]. En la Figura 2.4, se muestra un modelo simplificado para representar el funcionamiento de una cámara fotográfica.

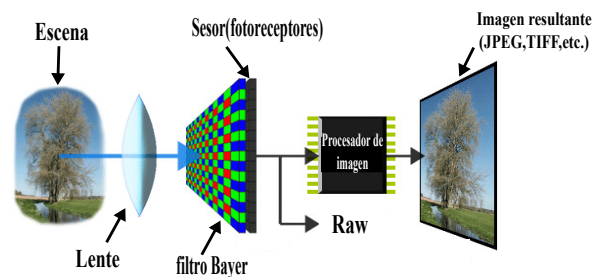


Figura 2.4: Esquema simplificado para el proceso de formación de imágenes en una cámara.

## Capítulo 3

# DESARROLLO

### 3.1. Propuesta de diseño

En base a la importancia del conteo de larvas, se propone realizar un algoritmo en conjunto con un sistema de visión por computadora para implementar un contador de larvas basado en procesamiento de imágenes. Las imágenes de las larvas serán capturadas bajo condiciones controladas de iluminación. Debido a las características de las larvas (elementos vivos, tamaño reducido, silueta translúcida, constante movimiento, sensibles y frágiles), se considero necesario el diseñar e implementar un sistema de adquisición capaz de operar por periodos extendidos de tiempo de manera automática. El sistema de adquisición planteado permite obtener imágenes más limpias y nítidas con el fin de favorecer su procesamiento.

### 3.2. Observaciones *in situ*

Debido a la complejidad de montar y manipular un sistema de adquisición de imágenes en los estanques de una instalación acuícola, se decidió obtener algunas imágenes representativas *in situ* y posteriormente se implementó un montaje de captura en el Laboratorio del Cuerpo Académico Comunicaciones e Instrumentación Electrónica de la FIAD-UABC. Adicionalmente, el cuerpo académico cuenta con algunas fotografías del proceso actual de conteo de juveniles. La captura de las imágenes de conteo de juveniles fue realizada de forma manual (mano alzada) obteniendo imágenes similares a la que se muestra en la figura 3.1. La etapa juvenil es la etapa en la que los ejemplares cuentan con la talla mínima que permite un proceso de conteo de toda la población debido a que el individuo ya es suficientemente resistente al manejo.



Figura 3.1: Zona de muestra para contabilización manual.

Dicho proceso inicia con el montaje de un contenedor de fondo blanco de  $1/2 \text{ m}^2$

aproximadamente, en el que se trazó previamente una cuadrícula de referencia con plumón indeleble, como se observa en la figura 3.1. El contenedor se coloca muy próximo al estanque del que se obtiene la muestra de especímenes para reducir los desplazamientos y generación de estrés en los peces. Una vez que se deposita la muestra de peces se deja transcurrir un pequeño lapso de tiempo para que los peces se distribuyan en el recipiente y se eviten los traslapes de especímenes en las imágenes. Se hace la captura de varias imágenes con una cámara (que puede variar desde una sofisticada SLR Digital a la que incluye un teléfono celular típico) imagen más nítida para su almacenamiento. Como último paso se depositan los ejemplares de la muestra en otro estanque y se repite el proceso. Una vez almacenadas todas las imágenes se procede a realizar un conteo visual con ayuda de una computadora.

- El nivel de humedad relativa es cercano al 100 %.
- La temperatura sobrepasa los 30 grados centígrados.
- La iluminación no es adecuada para la adquisición de imágenes.
- La profundidad de los estanques excede en algunos casos los 2 m.
- El fondo de las tinas de selección es de tonalidad clara lo cual permite contar con un buen contraste para las imágenes
- El sistema de recirculación y aireación provocan que el agua tenga movimiento y burbujas en todo momento.
- Es posible que se presenten salpicaduras de agua por el movimiento repentino de los especímenes grandes.

| Captura manual                             |                                   |
|--------------------------------------------|-----------------------------------|
| Ventajas                                   | Desventajas                       |
| Práctico                                   | Exposición a condiciones extremas |
| Rápido                                     | Tomas repetidas                   |
| Económico                                  | Condiciones no controladas        |
| Sin restricciones de equipo ni calibración | Factor humano                     |

Para realizar ensayos con los materiales disponibles se adaptó una pecera de 10 galones de capacidad. Esta primera versión de SAI (Sistema de Adquisición de Imágenes) sirvió para conocer los factores de relevancia en el proceso de adquisición además de aportar las primeras imágenes para evaluar los algoritmos de procesamiento y resultados generados.

Algunos factores a considerar para obtener una buena calidad en las imágenes:

- Tamaño de zona de muestra.
- Material adecuado (vidrio, acrílico).
- Distancia focal.
- Velocidad de captura.
- Tipo de lamparas y ubicación.
- Fondo
- Características y parámetros de la cámara.

### 3.3. Montajes

En éste apartado se describen los montajes utilizados durante los distintos experimentos realizados en este trabajo, así como las diferentes modificaciones realizadas al sistema de adquisición de imágenes (SAI), el cual es un punto clave para la captura de imágenes de buena calidad.

#### 3.3.1. SAI V1

La primera versión del *SAI* se puede observar en la figura 3.2. Ésta version se obtiene de la integración de los resultados obtenidos de varios ensayos por separado de iluminación, manejo de cámara, descarga y almacenamiento de imágenes, niveles de agua y tipos de fondo. Para los primeros ensayos bajo esta plataforma de adquisición se trabajó alimentando la cámara únicamente con su batería interna, por lo que se limitó su tiempo de uso aproximadamente a 6 horas, de esta manera se pudo evaluar el funcionamiento general del sistema en un escenario donde la cámara dejase de trabajar repentinamente.

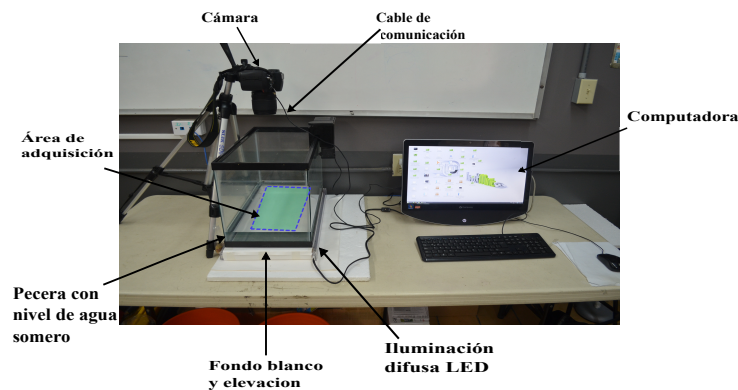


Figura 3.2: Vista del Sistema de Adquisición de Imágenes (SAI.v1).

| SAI V1                              |                                                        |
|-------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Ventajas                            | Desventajas                                            |
| Montaje sencillo                    | Zona de captura muy grande                             |
| Materiales disponibles              | Capacidad de alimentación externa(D5100,D7100)         |
| Robusto en operación                | Sin control on/off de lámparas                         |
| Distancia focal constante           | Contaminantes externos (luz, desechos en el aire, etc) |
| Almacenamiento interno en la cámara | Empotrado de la cámara                                 |

### 3.3.2. SAI V2

Tomando en consideración los resultados de la primera version del sistema de adquisición se observó que una de las desventajas más relevantes para la captura de imágenes representativas fueron las dimensiones de la zona de muestreo, las cuales son excesivas para la cantidad de larvas que se manejó (20 aproximadamente). Además de que la zona efectiva de adquisición de la cámara a 50 cm. de altura comprende al rededor de 2/3 de la pecera. Por lo que, para los siguientes experimentos se acotó la zona de captura de imágenes (con ayuda de una división dentro de la pecera), disminuyendo así el área de muestreo, tal como se puede observar en la Figura 3.3. Además de la modificación a la pecera se realizó el ajuste en el modo de captura de la cámara. Pasando de una sola toma (single-shot) a tomas multiples o en ráfaga (NOMBRE). Este cambio permite obtener imágenes en instantes de tiempo muy cortos, por lo que la posición de las larvas no varían mucho y se tienen distintas imágenes con la misma cantidad de larvas en posiciones similares.

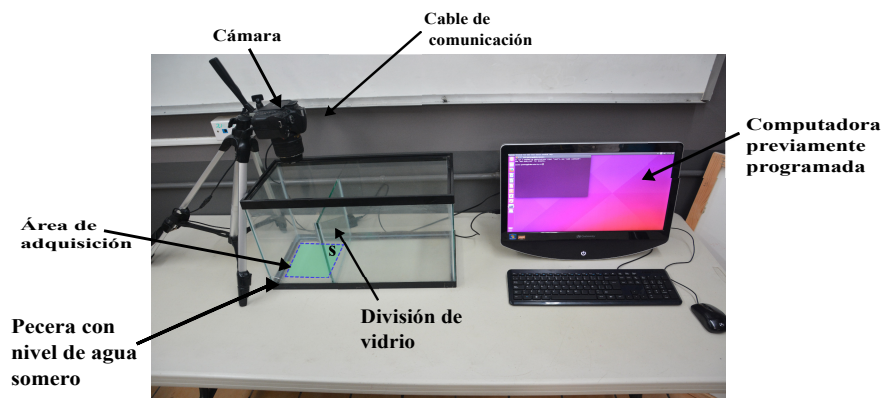


Figura 3.3: Vista del Sistema de Adquisición de Imágenes (SAI.v2).

| SAI V2                    |                                                        |
|---------------------------|--------------------------------------------------------|
| Ventajas                  | Desventajas                                            |
| Montaje sencillo          | Parpadeo                                               |
| Robusto en operación      | Sin control on/off de lámparas                         |
| Materiales disponibles    | Alimentación por batería interna(D7100)                |
| Distancia focal constante | Contaminantes externos (luz, desechos en el aire, etc) |
| Descarga de imágenes      | Empotrado de la cámara                                 |
|                           | Limite de capturas(modos ráfaga)                       |
|                           | Tiempo de descarga de datos                            |

3.3.3. SAI V3

Los contaminantes que se hacen visibles ante el lente de la cámara durante la duración del experimento 6, 12 y 24 horas respectivamente, son los siguientes: reflejos,

parpadeos, sombras, alimento, desechos (larvas muertas), hechos, polvo. En base a la calidad de las imágenes obtenidas por los montajes descritos hasta el momento y el procesamiento de las mismas, se ha observado que las mejoras que se implementan en la adquisición de las imágenes permiten una mejor extracción de la información de interés contenida dentro de las imágenes. Lo que a su vez justifica una mayor cantidad de tiempo dedicado a mejorar el sistema de adquisición (SAI). En la Figura 3.4 se muestran las modificaciones realizadas al montaje, las cuales comprenden un armazón de aluminio de 1/16 de pulgada de espesor, una base para montar la cámara con ajuste vertical, un par de lámparas fluorescentes de 2 pies y 60 watts, un fondo de acrílico de 1/16 de pulgada color blanco que permite el paso de luz de las lámparas y una zona de muestreo de vidrio. Por otro lado, se eligió la distribución de linux Ubuntu 14.04 como plataforma de operación para ejecutar las rutinas del SAI, de manera que se eliminaran los problemas de compatibilidad sin perder la capacidad de trabajar con distintos equipos (cámaras y computadoras).

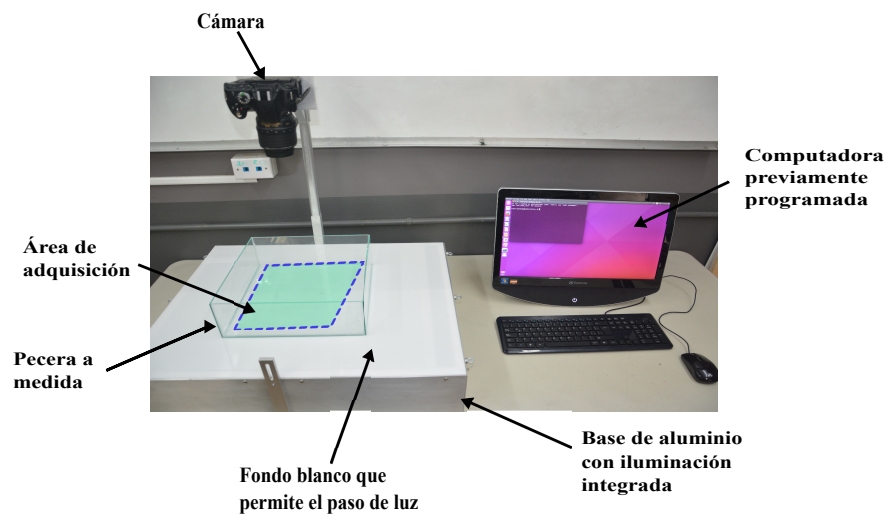


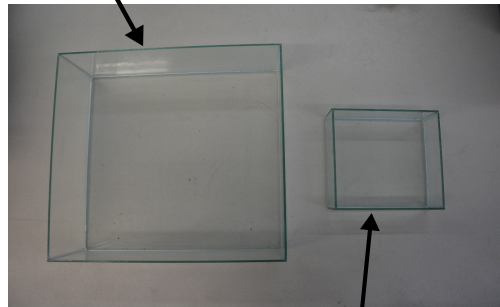
Figura 3.4: Vista del Sistema de Adquisición de Imágenes (SAI.v3).

| SAI V3                                 |                                  |
|----------------------------------------|----------------------------------|
| Ventajas                               | Desventajas                      |
| Estabilidad en cámara                  | Contaminantes externos           |
| Robusto y confiable                    | Limite de capturas(modos ráfaga) |
| Control de posición vertical de cámara | Control on/off de lámparas       |
| Descarga de imágenes                   |                                  |
| Zona de muestra manejable              |                                  |

### 3.3.4. SAI V4

Para la siguiente versión del sistema de adquisición (figura 3.5) se realizó un cambio en las dimensiones de la zona de muestra, de 30 cm x 30 cm a 15 cm x 15 cm, esto con el fin de obtener una zona de muestreo adecuada al tamaño de muestra.

**Zona de muestra A(30x30x10)**



**Zona de muestra B(15x15x5)**

Figura 3.5: Zonas de muestra A y B de vidrio de 3 mm de espesor

3.3.5. SAI V5

La version final del sistema de adquisición mostrada en la figura 3.6 incluye el control on/off de iluminación y la cubierta de aislamiento. Debido a esta última modificación de aislamiento fue necesario implementar tanto el control de iluminación como el acceso a la cámara de manera remota. Estos dos controles se realizan a través del acceso via IP con el envío de un archivo ejecutable que incluye las instrucciones tanto de encendido y duración de las lámparas, como de los parámetros de captura de la cámara.

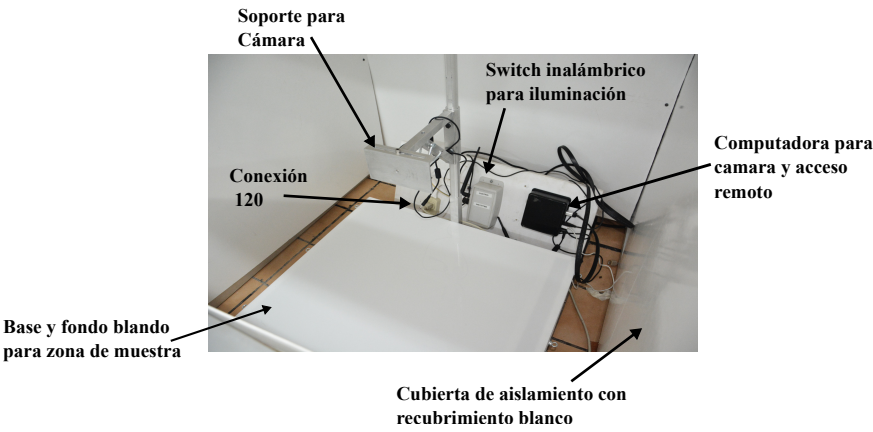


Figura 3.6: Vista del Sistema de Adquisición de Imágenes (SAI.v5).

| SAI V5                                 |                              |
|----------------------------------------|------------------------------|
| Ventajas                               | Desventajas                  |
| Manejo a distancia                     | Tamaño y peso                |
| Robusto y confiable                    | Acoplamiento de dispositivos |
| Control de posición vertical de cámara |                              |
| Descarga de imágenes                   |                              |
| Zona de muestra manejable              |                              |
| Estabilidad en cámara                  |                              |

## 3.4. Control remoto

### 3.4.1. Cámara

Para el manejo de la cámara es necesario la ejecución de mandos para lo que se establece una conexión vía IP lo que permite enviar un archivo ejecutable con las instrucciones y configuraciones para la cámara así como el tiempo de encendido de las lámparas. Los ensayos para control de cámaras se realizaron con los equipos indicados a continuación : Cámara DSLR Nikon D5100, Cámara DSLR Nikon D7100, Cámara CCD Thorlabs DCU223C, Cámara Nikon S9100 Coolpix. Para controlar la adquisición y almacenamiento de las imágenes, se conectó la cámara fotográfica a través de uno de los puertos USB a la computadora, por lo que es necesario revertir este paso permitiendo que el programa *gphoto2* pueda acceder libremente a la cámara. Ésta es una aplicación libre, redistribuible, lista para el uso conjunto de aplicaciones de software de cámaras digitales para sistemas UNIX; desarrollados por dedicados voluntarios de todo el mundo, lo que explica que dicha aplicación soporte actualmente más de 2100 modelos de cámaras. Se ejecuta en una amplia gama de sistemas operativos tipo UNIX, incluyendo Linux, FreeBSD, NetBSD, MacOS X, etc. Está disponible gratuitamente y se distribuye bajo los términos de la licencia GNU LGPL. La forma de acceso es a través de mandos de terminal lo cuales dependen de las características y capacidades de cada cámara. De esta manera se identifican las acciones que pueden manipularse por medio de ésta aplicación. La terminal elegida pertenece a una de las distribuciones de Linux la cual integra el comando CRON (del griego chronos que significa tiempo). En el sistema operativo Unix, cron es un administrador regular de procesos en segundo plano (demonio -daemon en inglés-) que ejecuta procesos o guiones a intervalos regulares (por

ejemplo, cada minuto, día, semana o mes). Los procesos que deben ejecutarse y la hora en la que deben hacerlo se especifican en el fichero crontab.

### 3.4.2. Iluminación del Sistema de Adquisición de Imágenes

La primer captura de imágenes se llevo a cabo de forma manual para establecer una imagen de referencia y evaluar la posibilidad de procesar imágenes contaminadas con condiciones similares a las capturadas en el laboratorio de larvas.

Debido a las desventajas observadas al realizar capturas prolongadas (repetitivas) se adaptó un tripié para posicionar la cámara sobre una pecera, la cual funcionaría como zona de muestra. Posteriormente se acoplaron lamparas (Figuras 3.7 y 3.8) para mejorar el contraste. En este sentido se realizaron cambios en el tipo de lámparas, así como en su ubicación para evaluar la configuración más adecuada para obtener imágenes nítidas.

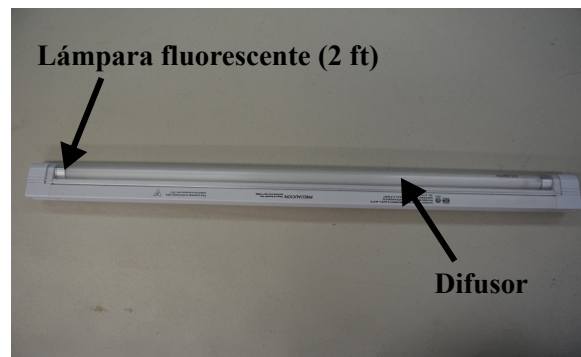


Figura 3.7: Lámpara fluorescente con difusor.

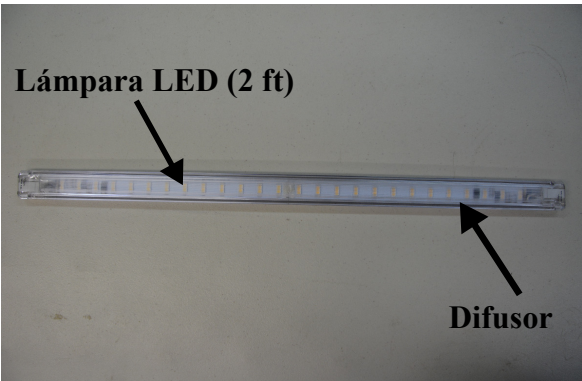


Figura 3.8: Lámpara LED con difusor.

| Lámparas       |                                                                  |                                                                 |
|----------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Tipo           | Ventajas                                                         | Desventajas                                                     |
| Incandescentes | Mejora en contraste                                              | Alimentación<br>Uniformidad<br>Color amarillento<br>Temperatura |
| LED            | Color<br>Mejor contraste<br>Temperatura                          | Parpadeo<br>Distribución<br>Dimensiones<br>Alimentación         |
| Fluorescentes  | Color<br>Contraste<br>Estabilidad<br>Temperatura<br>Alimentación | Dimensiones<br>Balastra                                         |

El control de encendido y apagado de las lámparas se realizó a través del envío de mandos de manera inalámbrica bajo el protocolo 802.15.4 (Xbee), programados en un microcontrolador mini AT para el manejo de tres reveladores a 120v - 1 A.

### 3.5. Algoritmos

A continuación se describen las funciones y diagramas de flujo principales diseñados e implementados específicamente para el procesamiento de imágenes de este trabajo. La secuencia en la que se describen es importante ya que es el mismo orden de operación dentro del programa principal. En el llamado programa principal se realizan procesos tales como: Identificar y cargar la imagen a procesar, ingresar las dimensiones del cuadro de exploración, establecer umbrales de procesamiento, llamar (invocar o ligar) funciones, etc. También, se hace una adecuación del tamaño de la información de salida de las funciones para poder interpretarla y almacenarla correctamente.

### 3.5.1. Función ventanas

Esta función ventana se muestra en la Figura 3.9 se utiliza para dividir la imagen original en secciones (áreas) dadas por el usuario en pixeles. Con el fin de dividir la imagen en regiones más pequeñas, lo cual favorece un procesamiento más fino y ocasionalmente más rápido.

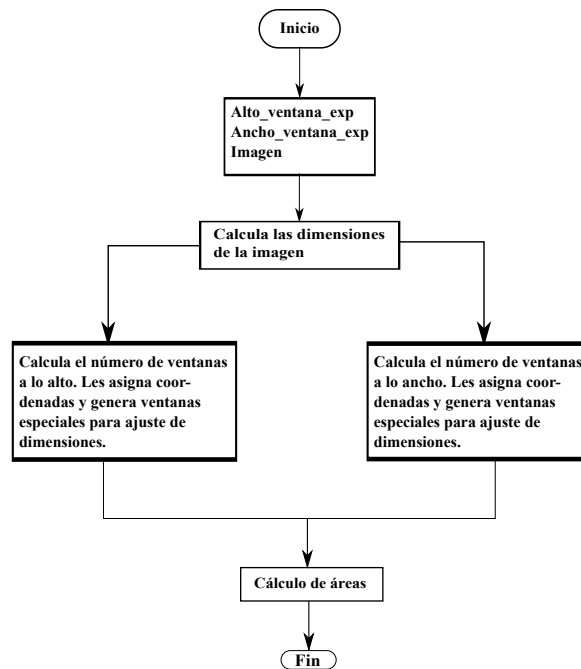


Figura 3.9: Diagrama de flujo para generar ventanas (submuestreo)

### 3.5.2. Función umbral

La función umbral de la Figura 3.10 realiza un barrido de valores (0.3 a 0.7) para identificar el umbral óptimo de procesamiento. Opera dentro de los límites dados por la *función ventanas*. Como resultado: clasifica la ventana como factible para un posterior

proceso en caso de que contenga o no contenga objetos respectivamente; posteriormente, le asigna un umbral óptimo de procesamiento, además de etiquetar los objetos encontrados. Dentro de las operaciones de ésta función se encuentra también el cálculo de áreas de los objetos para tener información que ayude a decidir si el objeto es de interés.

### 3.5.3. Diagrama de flujo para identificar el umbral más óptimo

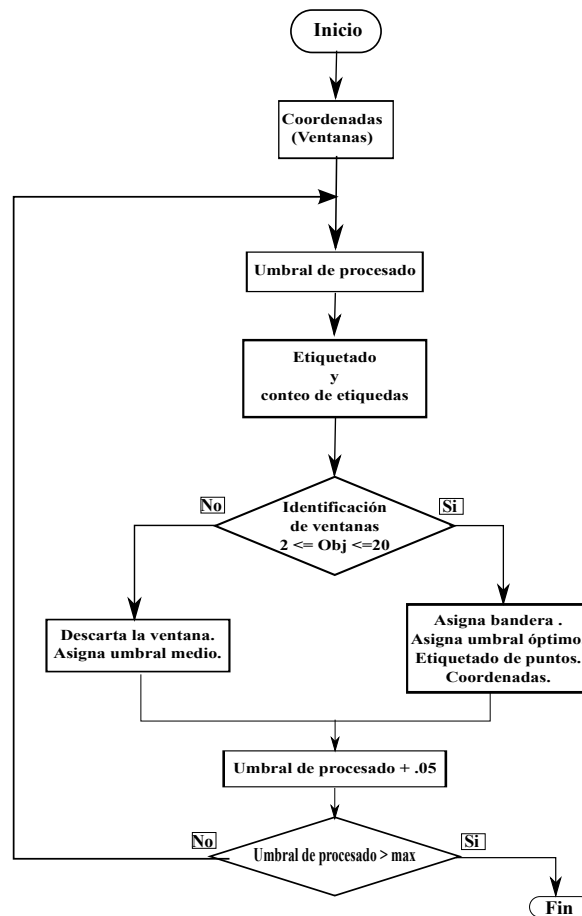


Figura 3.10: Diagrama de flujo para etiquetado de objetos en la imagen

### 3.5.4. Función cuadro

Con ésta función cuadro que se muestra en la Figura 3.11 se generan cuadros a los que se les llama *cuadro de exploración* de dimensiones conocidas centrados en los objetos detectados. Éstos *cuadros de exploración* buscan comprender los tres puntos más visibles de una larva (par de ojos y sistema digestivo). Esta tarea se realiza en cada uno de los objetos para calcular una primera aproximación en la identificación de los elementos que componen un objeto y evaluar si dichos elementos pertenecen a una misma larva.

### 3.5.5. Diagrama de flujo para generar cuadro para limitar procesamiento

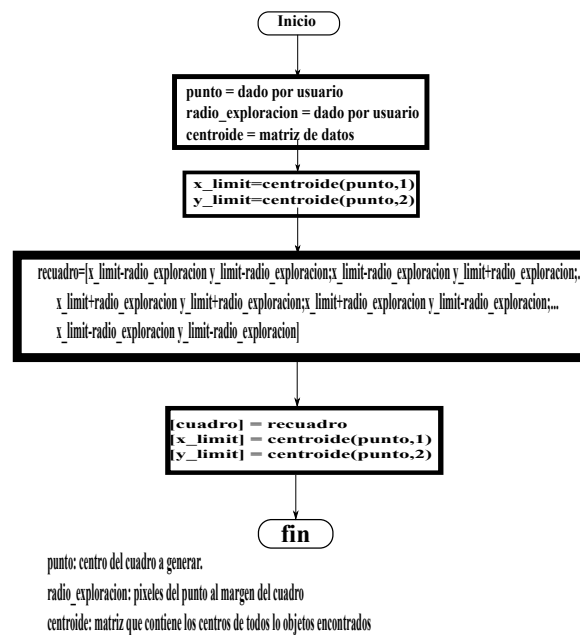


Figura 3.11: Diagrama de flujo para generar cuadro para limitar procesamiento

### 3.5.6. Función distancias

Por medio de esta función distancias de la Figura 3.12 se calculan las distancias entre los centros de los objetos dentro de los cuadros antes descritos. Posteriormente, se realiza una comparación entre los resultados, de ser iguales permite establecer que los objetos pertenecen a una misma larva. Al ser distintos estos objetos se descartan del grupo válido.

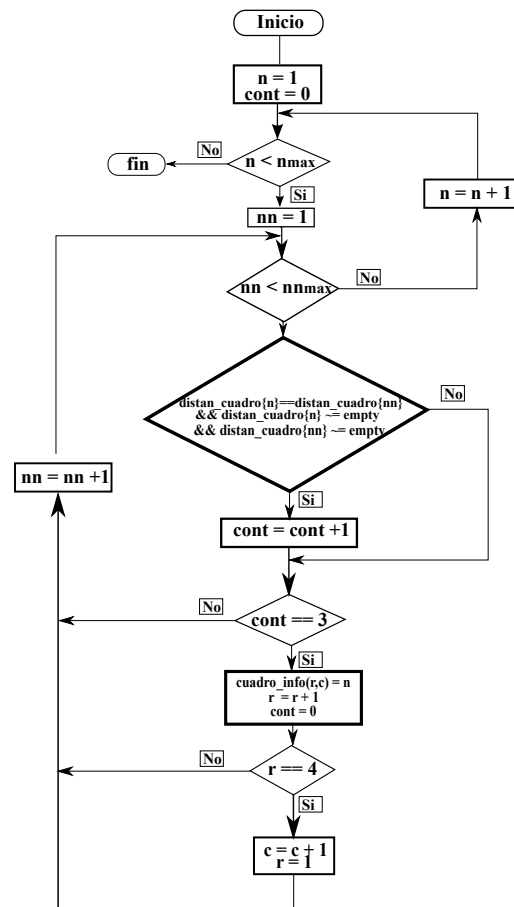


Figura 3.12: Diagrama de flujo para generar cuadro ajustable de información

Como se mencionó anteriormente, la distancia entre objetos juega un papel importante para su validación y clasificación. En la Figura 3.13 se describe con ayuda de un diagrama de flujo como se calculan dichas distancias.

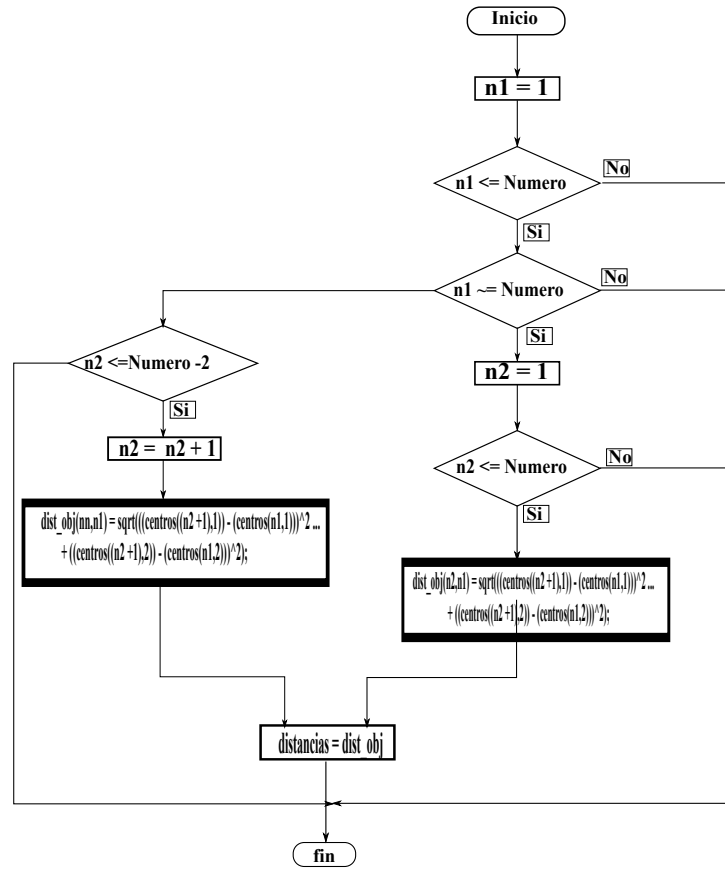


Figura 3.13: Diagrama de flujo para encontrar distancias entre objetos

### 3.5.7. Función cuadro chico

Realiza un promedio de los puntos detectados dentro del cuadro y genera un nuevo cuadro de dimensiones mínimas que comprendan los puntos de interés, además centra la larva para realizar un recorte en la imagen original y así poder observar y manipular el objeto detectado de una manera más eficiente.

### 3.5.8. Diagrama de flujo para generar cuadro mínimo para patron

Las similitud entre el diagrama que se presenta en la figura 3.11 y el que se muestra en la figura 3.14, es debido a que de igual manera se trata de la generación de un cuadro. Este algoritmo utiliza los datos arrojados por el diagrama de la figura 3.11, realizando un promedio de las posiciones de los centros de objetos encontrados para usarlo como punto de partida para creación de este nuevo cuadro. Entre los objetivo de controlar el tamaño de este cuadro se pueden mencionar: cubrir el área mínima necesaria para delimitar los objetos de interés, tener la menor cantidad de información almacenada pero suficiente para vincularla con la imagen original, generar multiples ventanas para procesarlas de manera rápida y eficiente, ya que se observo que es más eficiente procesar múltiples imágenes de tamaño reducido que procesar imágenes completas de grandes dimensiones.

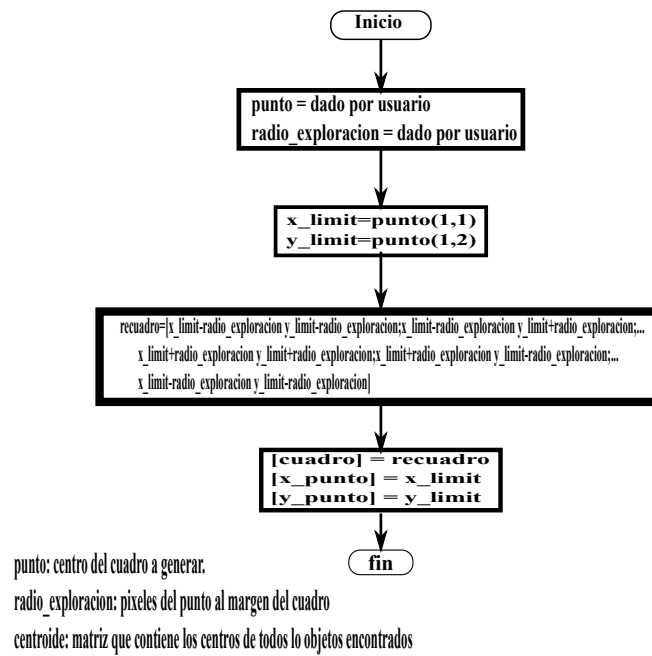


Figura 3.14: Diagrama de flujo para generar cuadro mínimo para patron

# Capítulo 4

## Pruebas y resultados

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos en diferentes experimentos y ensayos realizados para los propósitos de este trabajo (4 versiones más representativas). Al ser un trabajo que emplea técnicas de procesamiento de imágenes muchos de estos resultados se muestran con la ayuda de fotografías. Para tener un punto de referencia se decidió utilizar como base de partida el conteo manual que se realiza actualmente en el laboratorio de acuicultura.

### 4.1. Juveniles

Como se mencionó en apartados anteriores, un conteo más preciso solo se puede realizar hasta la etapa de desarrollo conocida como juvenil, la cual le permite al personal del laboratorio ejercer un mejor manejo de los especímenes sin causarles grandes daños o niveles de estrés demasiado altos. La Figura 4.1 ilustra como se realiza la adquisición de imágenes sobre el tanque destino (donde se pretenden depositar los especímenes),

colocando un soporte sobre el borde superior del estanque que sirve como base del recipiente que contiene las muestra; también se muestran las características típicas para el conteo de forma visual con ayuda de impresiones o una computadora.



Figura 4.1: Imagen que ilustra como el recipiente de muestra se encuentra sobre un estanque

Es de esperarse que bajo las condiciones de temperatura, humedad y del manejo constante de agua en el laboratorio se presenten impurezas en la lente de la cámara (Figura 4.2) que den origen a imágenes poco apropiadas para la contabilización de peces. En el mejor de los casos bajo estas condiciones se obtienen imágenes como en la Figura 4.3.



Figura 4.2: Imagen de zona de muestra con impurezas en la lente de la cámara.



Figura 4.3: Imagen de zona de muestra bien enfocada pero que presenta reflejos.

### 4.1.1. Algoritmo primera version (v1)

Como primer ensayo para procesar imágenes adquiridas bajo las condiciones antes mencionadas se optó por trabajar con imágenes como las que utiliza el personal del laboratorio de Acuicultura para realizar el conteo de peces por el método visual. Debido a que estas imágenes presentan poca uniformidad se dividió la imagen total para obtener secciones que facilitarían el procesamiento, así se muestra en la Figura 4.4. Esta imagen se utilizó para probar el desempeño de la primera versión del algoritmo de conteo dando como resultado la imagen de la Figura 4.5.



Figura 4.4: Sección de imagen del recipiente de muestreo para juveniles.

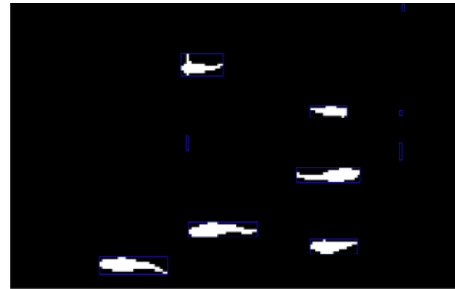


Figura 4.5: Imagen resultante de la primera versión del algoritmo de conteo

## 4.2. Larvas

Teniendo como referencia las imágenes y los inconvenientes que se presentan en la captura de imágenes en el conteo de juveniles, se inició entonces la prueba de contabilización con la captura de imágenes en larvas, un ejemplo de este caso se muestra en la Figura 4.6.

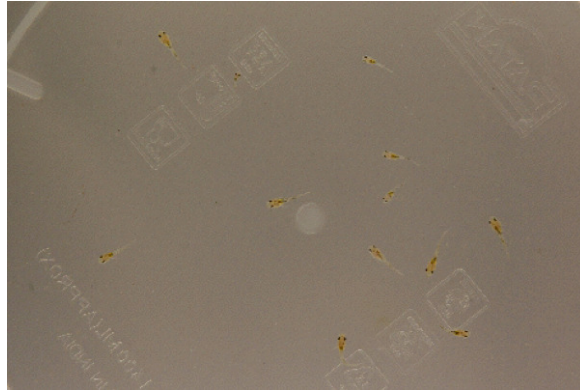


Figura 4.6: Imagen de larvas de 3 semanas de vida en recipiente de transporte

#### 4.2.1. Adecuación de imagen y umbralización

Una condición para iniciar el conteo dentro del algoritmo es utilizar imágenes en formato binario, por lo cual se requiere de una adecuación de la imagen. Aplicando la etapa de adecuación de imagen del algoritmo (v2), en la Figura 4.6, se obtuvo la imagen binaria de la Figura 4.7.

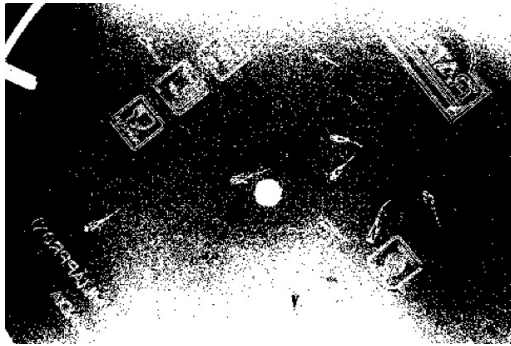


Figura 4.7: Image binaria con umbral alto (0.7).

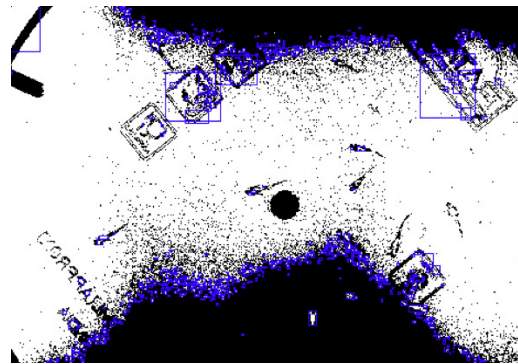


Figura 4.8: Imagen resultante del algoritmo de contabilización procesando la imagen mostrada en figura 4.7.

Una vez obtenida la imagen en formato binario se procede a aplicar la etapa del algoritmo para detectar centros de puntos de interés así como sus dimensiones y perímetros. En la Figura 4.8 se puede observar el resultado de la detección basada en centros de objetos que cumplen con los parámetros establecidos.

De igual forma se realizó un procesamiento de la imagen basado en la detección de círculos de dimensiones establecidas. Por medio de distintos ensayos se observó la similitud de los puntos de interés con una forma circular. En la Figura 4.9 se muestra la detección de elementos basados en círculos.

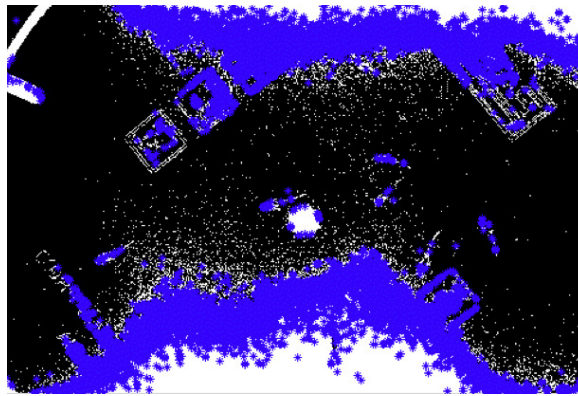


Figura 4.9: Imagen resultante al realizar una detección de círculos.

A partir de los resultados obtenidos, se observó que un factor crucial para una buena detección de puntos de interés era una adecuada binarización. Por tal motivo se decidió realizar distintos ensayos en secciones de imágenes que contuvieran larvas de manera individual, de manera que se pudiera establecer que umbral sería el más adecuado para cada caso. Una sección de este tipo se muestra en la Figura 4.10. También tres casos de la misma sección procesada con umbrales distintos: Figuras 4.11, 4.12 y 4.13.

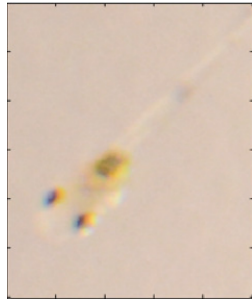


Figura 4.10: Sección de imagen para el procesamiento focalizado en una única larva

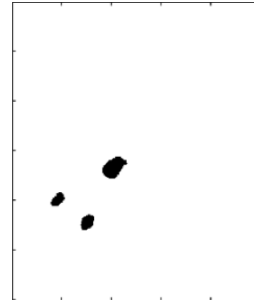


Figura 4.11: Imagen con factor 0.4 de binarizado

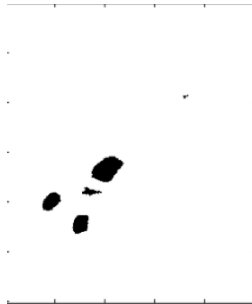


Figura 4.12: Imagen con factor 0.5 de binarizado

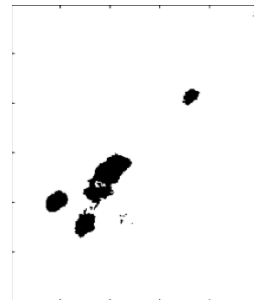


Figura 4.13: Imagen con factor 0.6 de binarizado

El factor de umbral debe elegirse entre los valores  $[0, 1]$  para nuestro caso los resultados de estos ensayos arrojan valores entre  $[0.4, 0.6]$  para obtener imágenes binarias viables para una detección. También se observó que entre más bajo sea el nivel de umbral mayor la cantidad de información que se pierde. De manera opuesta, a mayor nivel de umbral menor será la pérdida de información. Sin embargo, en ambos casos la detección podría complicarse, ya sea porque un umbral bajo descarte información de interés o porque un umbral alto enmascare algún punto de interés.

### 4.2.2. Variedad de posiciones de las larvas

Derivado de los múltiples ensayos realizados para encontrar un umbral más adecuado se observó la variedad de posiciones que adopta una larva como parte de su comportamiento habitual. Estas posiciones que presentan un reto importante para detectar los puntos de interés ya que no siempre son completamente visibles, las dimensiones establecidas cambian según la posición y se dificulta establecer un patron viable. Las posiciones que se presentan son variantes de las que se muestran en las Figuras: 4.14, 4.15, 4.16. La posición ideal para una favorable detección se muestra en la Figura 4.17.



Figura 4.14: Larva en posición lateral



Figura 4.15: Larva con dirección casi frente al lente



Figura 4.16: Larva con cierto ángulo frente al lente

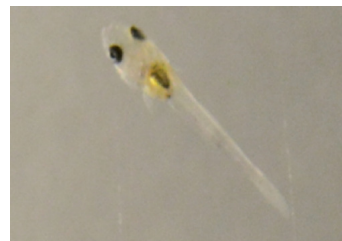


Figura 4.17: Larva en posición ideal para procesamiento

### 4.2.3. Algoritmo tercer version (v3)

Con los umbrales establecidos para las secciones de larvas individuales el trabajo se centró en adaptar las condiciones de detección dentro del algoritmo teniendo como resultado la tercera version. Una de las imágenes base para probar este algoritmo se muestra en la Figura 4.18. La imagen señalada anteriormente también se emplea en esta ocasión para comparar los resultados nuevos con los obtenidos previamente, los cuales no favorecían una buena detección. El caso opuesto se ilustra en la imagen de la Figura 4.19 en donde uno de los principales ajustes realizados fue el procesar la imagen con un umbral más adecuado. Cabe resaltar que esta imagen tiene un fondo poco homogéneo ya que presenta formas tales como : letras, dibujos y contornos propios del recipiente. Sin embargo, la distribución de la luz es bastante buena lo cual ayuda a que el umbral único usado discrimine de mejor manera.

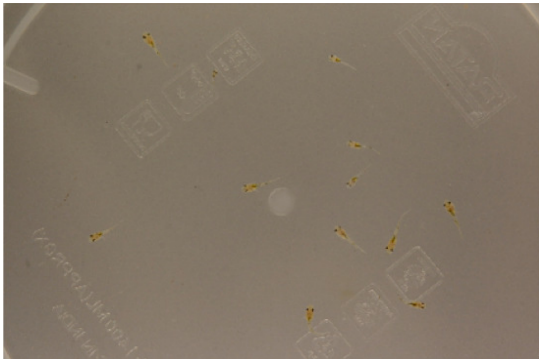


Figura 4.18: Sección de recipiente de muestreo de larvas. Tercera versión del algoritmo de conteo.

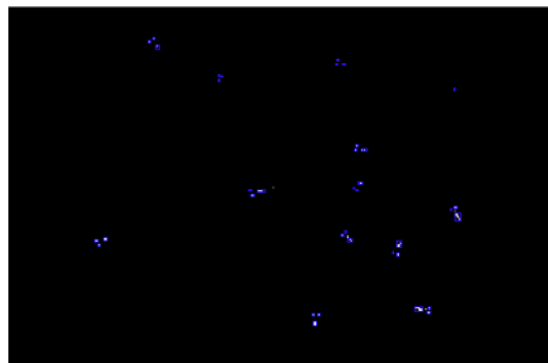


Figura 4.19: Imagen resultante de la tercera versión del algoritmo de conteo.

Al tener una versión del algoritmo funcional para el propósito de este trabajo se decidió avanzar en el sistema de adquisición de imágenes (SAI), el cual también juega un papel importante, ya que permite llevar acabo experimentos de larga duración con condiciones de captura de imágenes iguales entre si. Lo que ayuda a garantizar la confiabilidad de los experimentos. Esta versión del SAI tiene una principal adecuación que consta de colocar un negatoscopio debajo de la pecera para sustituir las lámparas laterales. Las imágenes obtenidas de estos ensayos son imágenes más limpias con un fondo más uniforme y una mejor distribución de luz, similares a la que se muestra en la Figura 4.20. Sin embargo, conforme a lo mencionado en capítulos anteriores, se tiene la convicción de trabajar con imágenes no tan favorables de cada ensayo para conseguir un algoritmo más robusto. Es por esto que la imagen antes mencionada es seleccionada precisamente por tener características no del todo favorables para un buen procesado, pero que se considera, son circunstancias reales que se pueden presentar durante un proceso de conteo típico. En este caso se pueden observar que la variación de umbrales disminuyó considerablemente entre  $[0.52, 0.6]$ , sin embargo sigue presente un único umbral para toda la imagen lo cual sigue provocando en ocasiones falta de información o su contraparte un exceso de la misma. Así se observa en las Figuras 4.21 y 4.22.

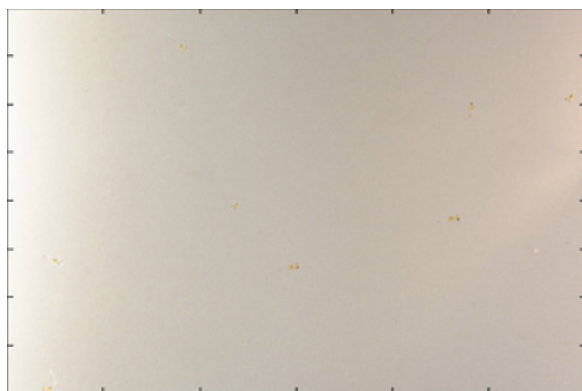


Figura 4.20: Imagen capturada por versión 3 del SAI

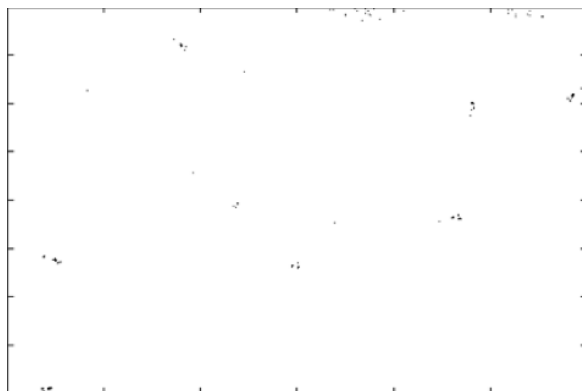


Figura 4.21: Imagen con factor de binarizado 0.52

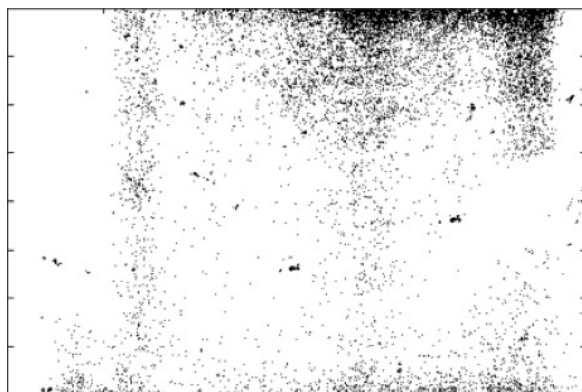


Figura 4.22: Imagen con factor de binarizado 0.6

#### 4.2.4. Algoritmo décima version (v10)

En éste apartado del trabajo se hace mención a imágenes capturadas por el sistema de adquisición de imágenes (v2), en el cual se iluminó con focos incandescentes valorar este tipo de iluminación y la calidad de las imágenes. Las imágenes obtenidas de estos ensayos se muestran en las Figuras 4.23 y 4.25. En la Figura 4.23 se observó que el fondo contiene manchas originadas por la iluminación, esto debido en parte por los focos incandescentes individuales empleados y a la cantidad de calor que generabas. También se observó que el contraste era bajo debido a la longitud de onda emitida por dichos focos (color), y la similitud en color con los puntos de interés.



Figura 4.23: Imagen adquirida a través del SAI v2

En la Figura 4.24 se observó que aún con las condiciones antes mencionadas respecto a la calidad de la imagen, se obtuvieron resultados favorables al realizar el procesado. Realizando ajustes para mejorar la etapa de binarización, se lograron distinguir los puntos de interés de las larvas del resto de los objetos y manchas que contiene la image, lo que ayudó a mejorar el desempeño del algoritmo.

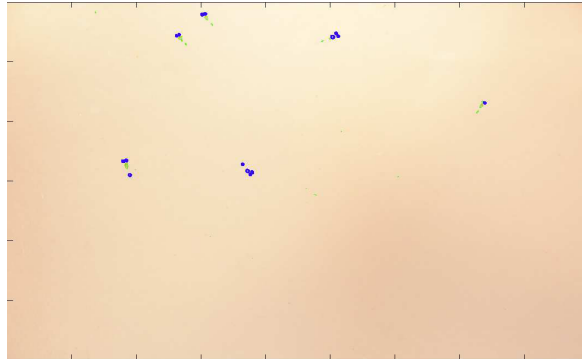


Figura 4.24: Imagen adquirida a través del SAI v2

La Figura 4.25 se eligió debido a la situación que se logró captar con la lente en esta imagen. Una de las siete larvas presentes en esta imagen se localiza justo en el borde superior de la imagen, además se observa incompleta ya que sólo se distingue un ojo y parte del sistema digestivo. El bajo contraste debido a la iluminación en esa región, la posición de la larva en la imagen, así como lo traslucido de su silueta, presentaron un reto importante para lograr distinguir esta larva en particular y al mismo tiempo, obtener la información del resto de las larvas que se encontraban en condiciones distintas para su procesado.

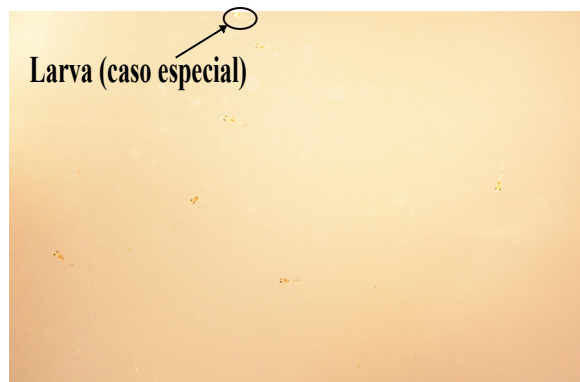


Figura 4.25: Imagen adquirida a través del SAI v2

En la Figura 4.26 se presentan en círculos (azules) los puntos de interés de las larvas, (ojos, sistema digestivo) y en bordes (verdes) las siluetas de los objetos de las larvas. En esta imagen se observan los objetos de interés que logró distinguir el algoritmo (v10) bajo estas condiciones en la imagen. Cabe resaltar que se realizaron multiples ensayos con diversas imágenes que presentaron casos y condiciones similares para corroborar el funcionamiento de los ajustes realizados.

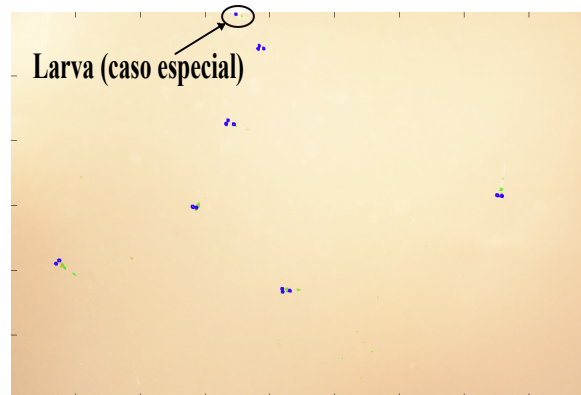


Figura 4.26: Imagen adquirida a través del SAI v2

#### 4.2.5. Algoritmo decimoctava version (v18)

En esta sección del trabajo se describen las imágenes capturadas con la versión final del sistema de adquisición de imágenes (SAI v5) así como, imágenes procesadas con la versión final del algoritmo de conteo. Cabe destacar que las imágenes que aquí se describen fueron seleccionadas debido a que presentan características propias de las larvas que fueron capturadas por la lente y que están directamente ligadas con el desempeño del algoritmo de conteo.

La Figura 4.27 tiene un fondo bastante uniforme que presenta un alto contraste con los puntos de interés, lo cual favorece a su detección. También se observó una buena distribución de larvas en la zona de muestreo aún cuando las larvas están en constante movimiento debido a la búsqueda de alimento. Esta distribución se debe en parte a la intensidad de la luz y el reducido tiempo de exposición necesario para capturar imágenes, lo que no altera su comportamiento. Esto se logró debido a modificaciones en la manera de distribuir la luz en el SAI (v5) que se describen en el capítulo 3.



Figura 4.27: Imagen limpia adquirida a través del SAI v5

La Figura 4.28 muestra los objetos y círculos resultantes del procesamiento de la imagen anterior con el algoritmo de conteo bajo estas condiciones específicas de imagen. Se observó que la detección tanto de objetos como de círculos se llevó al 100 % en todas las larvas presentes en la imagen.

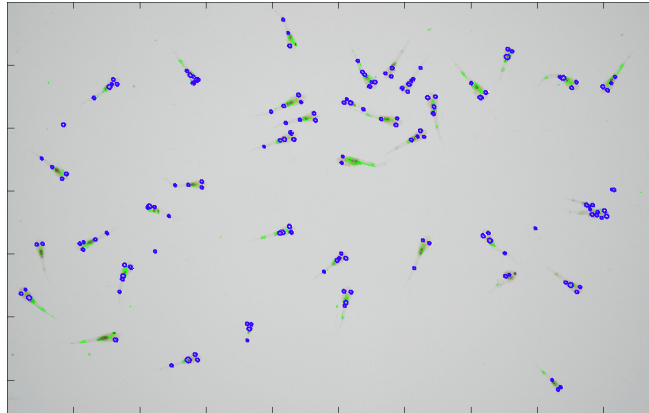


Figura 4.28: Imagen que muestra los puntos detectados después de procesar la Figura 4.27

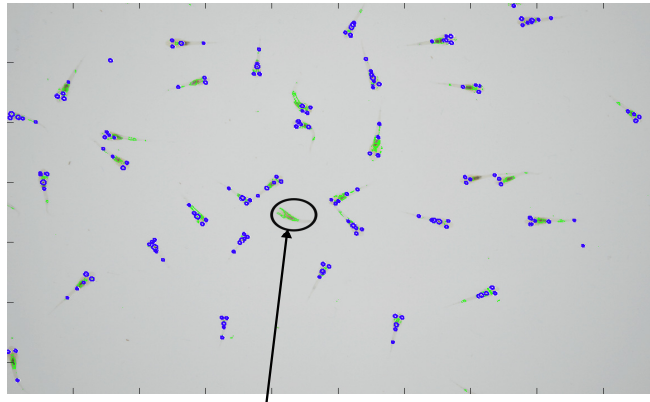
La Figura 4.29 presenta un comportamiento bastante común en larvas pero complicado de captar ante un lente. Este comportamiento es el de hacer un movimiento repentino de nado, lo cual ocasiona que salga del rango óptimo de velocidad de captura de la cámara teniendo como resultado una larva fuera de enfoque, complicando así su detección.



**Larva fuera de enfoque**

Figura 4.29: Imagen con larva fuera de enfoque a causa de su propio movimiento

La Figura 4.30 muestra la imagen resultante de procesar la imagen anterior que presenta un desenfoque en una larva en específico. Se observó que el algoritmo detecta la existencia de un objeto (color verde), sin embargo, no percibe los puntos de interés con claridad (color azul).



**Larva fuera de enfoque**

Figura 4.30: Imagen que muestra los puntos detectados después de procesar la Figura 4.29

También un fenómeno común es el de los traslapes, debido en parte al tipo de nado en todas direcciones principalmente por la búsqueda de alimento que realizan las larvas para su desarrollo. Además éste fenómeno se acentúa con el aumento del número de especímenes por área así como el nivel de agua en el que se encuentren. En la Figura 4.31 se ilustra este fenómeno, donde dos larvas son captadas por la lente al momento del traslape, además éste se presenta justo en los puntos de interés y debido a lo traslucido de sus siluetas se enmascara valiosa información.



Figura 4.31: Imagen que muestra un traslape en los puntos de interés de las larvas

En la Figura 4.32 se presentan los resultados derivados del procesado de la Figura 4.31. En términos generales la detección es bastante buena ya que se logran distinguir la mayoría de los puntos de interés de todas las larvas en la imagen. Como se menciono anteriormente, existe un traslape entre larvas donde el algoritmo detecta puntos repetidos así como objetos que pertenecen dichas larvas pero no a sus puntos de interés. Esto se debe al enmascaramiento de información que se produce en el traslape debido a lo traslucido de sus siluetas. Este tipo *casos especiales* deben de tratarse de manera separada para realizar un análisis más detallado y encontrar la forma de minimizar la

detección de errores y por consecuencia aumentar la efectividad del algoritmo de conteo.

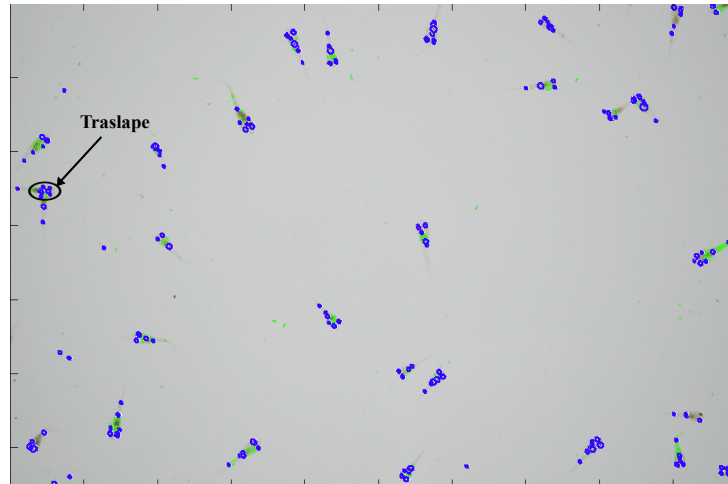


Figura 4.32: Imagen que muestra un traslape en los puntos de interés de las larvas

#### 4.2.6. Tablas de eficiencia de conteo

En este apartado se presentan cuatro tablas que concentran los datos obtenidos en diferentes ensayos realizados con las versiones del algoritmo más relevantes (version, imagen, umbrales, tiempo, tamaño de imagen, número de larvas contabilizadas y porcentaje de eficiencia). La selección de versiones se realizó en base a parámetros tales como: el tiempo de procesamiento, el nivel de binarización, la detección de puntos de interés, la eficiencia de conteo, etc. Además se realizan comparaciones de las diferentes versiones procesando la misma imagen para evaluar su desempeño. De la tabla 4.1 a la 4.4 se presentan los datos de seis versiones de algoritmos evaluados con distintas imágenes. La tabla 4.5 y 4.6 son seis versiones evaluadas con una única imagen respectivamente.

Tabla 4.1: Evaluación de eficiencia de algoritmos con distintas imágenes

| Version | Imagen | Ejemplares |           | T.(seg.) | Umbrales |           | Tamaño | Larvas-contadas |         |
|---------|--------|------------|-----------|----------|----------|-----------|--------|-----------------|---------|
|         |        | Totales    | Completos |          |          |           |        | Número          | %       |
| v3      | larva1 | 8          | 7         | 41 - 43  | .4       | 6000x4000 |        | 2               | Totales |
|         |        |            |           |          |          |           |        | 4.6             | 25%     |
|         |        |            |           |          |          |           |        | 6               | 57.5%   |
|         |        |            |           |          |          |           |        | 8.6             | 75%     |
|         |        |            |           |          |          |           |        | 5.3             | 92.5%   |
| v3      | 5835   | 9          | 7         | 3.6 - 4  | .3       | 2400x1600 |        | 7               | 58.8%   |
|         |        |            |           |          |          |           |        | 9.3             | 77.7%   |
|         |        |            |           |          |          |           |        |                 | 96.6%   |
|         |        |            |           |          |          |           |        |                 | 67.1%   |
|         |        |            |           |          |          |           |        |                 |         |
| v3      | vaso   | 12         | 11        | 3.6 - 4  | .3       | 2400x1600 |        | 12.3            | 97.5%   |
|         |        |            |           |          |          |           |        | **              | -%      |
|         |        |            |           |          |          |           |        | **              | -%      |
|         |        |            |           |          |          |           |        |                 | -%      |
|         |        |            |           |          |          |           |        |                 | -%      |
| v6      | 15     | 36         | 35        | 24       | .3       | 5000x3000 |        | 30              | 83.3%   |
|         |        |            |           |          |          |           |        | 35.6            | 98.8%   |
|         |        |            |           |          |          |           |        | 40              | 88.9%   |
|         |        |            |           |          |          |           |        | 40              | 88.9%   |
|         |        |            |           |          |          |           |        | 32.6            | 90.5%   |
|         |        |            |           |          |          |           |        | 36              | 100%    |
|         |        |            |           |          |          |           |        | 40              | 98.3%   |
|         |        |            |           |          |          |           |        | 39.6            | 99%     |
|         |        |            |           |          |          |           |        | 41.3            | 96.7%   |
|         |        |            |           |          |          |           |        | 40.3            | 99.2%   |
|         |        |            |           |          |          |           |        | 42.3            | 94.2%   |
|         |        |            |           |          |          |           |        | 32.3            | 97.8%   |
|         |        |            |           |          |          |           |        | 41.3            | 96%     |
|         |        |            |           |          |          |           |        | 40.3            | 92.5%   |
|         |        |            |           |          |          |           |        | 42.3            | 96.5%   |

\*\* La version del algoritmo no operó apropiadamente con la imagen completa.

Tabla 4.2: Continuación de evaluación de eficiencia de algoritmos con distintas imágenes

| Version | Imagen | Ejemplares |           | T.(seg.) | Umbrales                     | Tamaño    | Larvas-contadas                      |                                           | % Completas                               |
|---------|--------|------------|-----------|----------|------------------------------|-----------|--------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
|         |        | Totales    | Completos |          |                              |           | Número                               | % Totales                                 |                                           |
|         | 19     | 40         | 37        | 24       | .3<br>.33<br>.35<br>.4<br>.3 | 5000x3000 | 37<br>38.6<br>39.3<br>39<br>15       | 92.5%<br>96.5%<br>98.2%<br>97.5%<br>100%  | 100%<br>95.7%<br>94%<br>94.6%<br>92.8%    |
|         | 20     | 15         | 14        | 24       | .3<br>.33<br>.35             | 5000x3000 | 16<br>15                             | 93.3%<br>100%                             | 85.7%<br>92.8%                            |
|         | 31     | 19         | 18        | 24       | .3<br>.33<br>.35<br>.4<br>.3 | 5000x3000 | 17.6<br>17.6<br>18.3<br>18.6<br>19.3 | 92.6%<br>92.6%<br>96.3%<br>97.9%<br>64.3% | 97.8%<br>97.8%<br>98.3%<br>96.7%<br>74.2% |
|         | 44     | 30         | 26        | 25       | .3<br>.33<br>.35<br>.4       | 5000x3000 | 22.3<br>26<br>27.3                   | 74.3%<br>86.6%<br>91%                     | 85%<br>100%<br>95%                        |

| Tabla 4.3: Continuación de evaluación de eficiencia de algoritmos con distintas imágenes |        |            |           |          |          |        |                 |         |         |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------|--------|------------|-----------|----------|----------|--------|-----------------|---------|---------|--|
| Version                                                                                  | Imagen | Ejemplares |           | T.(seg.) | Umbrales |        | Larvas-contadas |         |         |  |
|                                                                                          |        | Totales    | Completos |          | ventana  | Número | %               | Total   | %       |  |
| v12                                                                                      | larva1 | 1          | 1         | 1-3      | .6       | 1      | 100 %           | 100 %   | 100 %   |  |
|                                                                                          |        | 2          | 2         | 1-3      | .6       | 2      | 100 %           | 100 %   | 100 %   |  |
|                                                                                          |        | 2          | 2         | 1-3      | .6       | 2      | 100 %           | 100 %   | 100 %   |  |
|                                                                                          |        | 1          | 1         | 1-3      | .6       | 1      | 100 %           | 100 %   | 100 %   |  |
|                                                                                          |        | 2          | 2         | 1-3      | .6       | 2      | 100 %           | 100 %   | 100 %   |  |
| v15                                                                                      | 4745   | 6          | -         | 12 - 13  | 4.5      | 1.6    | 26.6 %          | - %     | - %     |  |
|                                                                                          |        |            | -         | 12 - 13  | .55      | 5.3    | 88.3 %          | - %     | - %     |  |
|                                                                                          |        |            | -         | 12 - 13  | .6       | 8      | 66.7 %          | - %     | - %     |  |
| v15                                                                                      | 4749   | 7          | 6         | 11- 12   | .6       | 1      | 26.6 %          | - %     | - %     |  |
|                                                                                          |        |            |           | 11 - 12  | .6       | 1      | 100 %           | 100 %   | 100 %   |  |
|                                                                                          |        |            |           | 11 - 12  | .7       | 1      | 100 %           | 100 %   | 100 %   |  |
|                                                                                          |        |            |           | 11 - 12  | .6 - .7  | 2      | 100 %           | 100 %   | 100 %   |  |
|                                                                                          |        |            |           | 11 - 12  | .6       | 1      | 100 %           | 100 %   | 100 %   |  |
|                                                                                          |        |            |           | 11 - 12  | .6       | 1      | 100 %           | 100 %   | 100 %   |  |
|                                                                                          |        |            |           | 11 - 12  | .6       | 1      | 100 %           | 100 %   | 100 %   |  |
| v18                                                                                      | 14     | 36         | 35        | 95       | .3 a .7  | 34.6   | 96 %            | 98.8 %  | 98.8 %  |  |
|                                                                                          | 15     | 38         | 37        | 66       | .3 a .7  | 36.4   | 95.7 %          | 98.37 % | 98.37 % |  |
|                                                                                          | 16     | 35         | -         | 96       | .3 a .7  | 33     | 94.2 %          | - %     | - %     |  |
|                                                                                          | 17     | 40         | 38        | 100      | .3 a .7  | 41     | 97.5 %          | 92.1 %  | 92.1 %  |  |
|                                                                                          | 18     | 33         | -         | 93       | .3 a .7  | 34     | 97 %            | - %     | - %     |  |
|                                                                                          | 19     | 40         | 37        | 98       | .3 a .7  | 39     | 97.5 %          | 94.6 %  | 94.6 %  |  |
|                                                                                          | 20     | 15         | 14        | 92       | .3 a .7  | 15     | 100 %           | 92.8 %  | 92.8 %  |  |
|                                                                                          | 31     | 19         | 18        | 93.3     | .3 a .7  | 19     | 100 %           | 94.4 %  | 94.4 %  |  |
|                                                                                          | 44     | 30         | 26        | 108.5    | .3 a .7  | 27.5   | 91.7 %          | 94.2 %  | 94.2 %  |  |

Tabla 4.4: Continuación de evaluación de eficiencia de algoritmos con distintas imágenes

| Version | Imagen | Ejemplares |           | T.(seg.) | Umbrales |  | Tamaño  | Larvas-contadas |           | % | Completas |
|---------|--------|------------|-----------|----------|----------|--|---------|-----------------|-----------|---|-----------|
|         |        | Totales    | Completos |          |          |  |         | Número          | % Totales |   |           |
| v18     | 14     | 36         | 35        | 116      | .3 a .7  |  | 150x150 | 35.4            | 98.3%     |   | 98.8%     |
|         | 15     | 38         | 37        | 90       | .3 a .7  |  | 150x150 | 36.4            | 95.7%     |   | 98.4%     |
|         | 16     | 35         | -         | 105      | .3 a .7  |  | 150x150 | 35.4            | 98.9%     |   | -%        |
|         | 17     | 40         | 38        | 116      | .3 a .7  |  | 150x150 | 40.4            | 99%       |   | 93.7%     |
|         | 18     | 33         | -         | 112      | .3 a .7  |  | 150x150 | 32.8            | 99.4%     |   | -%        |
|         | 19     | 40         | 107       | 102      | .3 a .7  |  | 150x150 | 37.5            | 93.7%     |   | 98.6%     |
|         | 20     | 15         | 101       | 90       | .3 a .7  |  | 150x150 | 15.4            | 97.3%     |   | 90%       |
|         | 31     | 19         | 105       | 90       | .3 a .7  |  | 150x150 | 17.8            | 93.4%     |   | 98.9%     |
|         | 44     | 30         | 115       | 95       | .3 a .7  |  | 150x150 | 29.8            | 99.3%     |   | 85.4%     |

| Tabla 4.5: Evaluación de eficiencia de algoritmos con una sola imagen |        |            |           |          |          |           |        |                 |              |                |
|-----------------------------------------------------------------------|--------|------------|-----------|----------|----------|-----------|--------|-----------------|--------------|----------------|
| Version                                                               | Imagen | Ejemplares |           | T.(seg.) | Umbrales |           | Tamaño | Larvas-contadas |              |                |
|                                                                       |        | Totales    | Completos |          |          |           |        | Número          | %<br>Totales | %<br>Completas |
| v3                                                                    | 15     | 38         | 37        | 22.1     | .3       | 5000x3000 | 32.3   | 85 %            | 87.3 %       |                |
|                                                                       |        |            |           | 22       | .33      |           |        | 39              | 97.4 %       | 94.6 %         |
|                                                                       |        |            |           | 22.1     | .35      |           |        | 42              | 89.5 %       | 86.5 %         |
| v6                                                                    | 15     | 38         | 37        | 23.5     | .4       | 5000x3000 | 43     | 86.8 %          | 83.7 %       |                |
|                                                                       |        |            |           | 22.3     | .3       |           |        | 30              | 78.9 %       | 81 %           |
|                                                                       |        |            |           | 22.4     | .33      |           |        | 35.6            | 93.4 %       | 96.2 %         |
| v12                                                                   | 15     | 38         | 37        | 22.4     | .35      | 5000x3000 | 40     | 94.8 %          | 91.9 %       |                |
|                                                                       |        |            |           | 22.4     | .4       |           |        | 40              | 94.8 %       | 91.2 %         |
|                                                                       |        |            |           | 8.2      | .3       |           |        | 60              | 42.1 %       | 37.8 %         |
| v15                                                                   | 15     | 38         | 37        | -        | .33      | 5000x3000 | **     | - %             | - %          |                |
|                                                                       |        |            |           | -        | .35      |           |        | **              | - %          | - %            |
|                                                                       |        |            |           | -        | .4       |           |        | 51              | 65.8 %       | 62.1 %         |
| v18                                                                   | 15     | 38         | 37        | 24       | .3       | 5000x3000 | 30     | 83.3 %          | 85.7 %       |                |
|                                                                       |        |            |           |          | .33      |           |        | 35.6            | 98.8 %       | 101.7 %        |
|                                                                       |        |            |           |          | .35      |           |        | 40              | 88.9 %       | 85.7 %         |
| v18                                                                   | 15     | 38         | 37        |          | .4       | 5000x3000 | 40     | 88.9 %          | 85.7 %       |                |
|                                                                       |        |            |           | 41.8     | .3       |           |        | 30              | 79 %         | 81 %           |
|                                                                       |        |            |           | 50.8     | .33      |           |        | 32              | 84.2 %       | 86.5 %         |
| v18                                                                   | 15     | 38         | 37        | 66       | .35      | 5000x3000 | 36.4   | 98.7 %          | 98.7 %       |                |
|                                                                       |        |            |           | 94.1     | .4       |           |        | 36.4            | 94.8 %       | 91.8 %         |
|                                                                       |        |            |           |          |          |           |        |                 |              |                |

\*\* La version del algoritmo no operó apropiadamente con la imagen completa.

Tabla 4.6: Evaluación de eficiencia de algoritmos con una sola imagen

| Version | Imagen | Ejemplares |           | T.(seg.) | Umbrales |  | Tamaño    | Larvas-contadas |         | %         |
|---------|--------|------------|-----------|----------|----------|--|-----------|-----------------|---------|-----------|
|         |        | Totales    | Completos |          |          |  |           | Número          | Totales | Completas |
| v3      | 4749   | 7          | 6         | 18.6     | .4       |  | 5000x3000 | 2.6             | 37.1 %  | 43.3 %    |
|         |        |            |           | 18.7     | .43      |  |           | 2.6             | 37.1 %  | 43.3 %    |
|         |        |            |           | 18.8     | .55      |  |           | 3               | 42.8 %  | 50 %      |
|         |        |            |           | 18.6     | .5       |  | 5000x3000 | 4.3             | 61.4 %  | 71.6 %    |
|         |        |            |           | 11.8     | .4       |  |           | 3               | 42.8 %  | 50 %      |
|         |        |            |           | 11.7     | .43      |  |           | 3               | 42.8 %  | 50 %      |
| v6      | 4749   | 7          | 6         | 11.3     | .55      |  | 5000x3000 | 4.3             | 61.4 %  | 71.6 %    |
|         |        |            |           | 11.5     | .5       |  |           | 6               | 85.7 %  | 100 %     |
|         |        |            |           | 8.2      | .4       |  | 5000x3000 | 2.6             | 37.1 %  | 43.3 %    |
| v12     | 4749   | 7          | 6         | 8.9      | .43      |  |           | 2.6             | 37.1 %  | 43.3 %    |
|         |        |            |           | 9        | .55      |  |           | 3.6             | 42.8 %  | 60 %      |
|         |        |            |           | 7.2      | .5       |  |           | 4               | 57.1 %  | 66.7 %    |
| v15     | 4749   | 7          | 6         | 12.2     | .4       |  | 5000x3000 | 2.6             | 37.1 %  | 43.3 %    |
|         |        |            |           | 11.4     | .43      |  |           | 2.6             | 37.1 %  | 43.3 %    |
|         |        |            |           | 11.4     | .55      |  | 5000x3000 | 2.6             | 37.1 %  | 43.3 %    |
|         |        |            |           | 11.8     | .5       |  |           | 3.6             | 51.4 %  | 60 %      |
|         |        |            |           | 136      | .3       |  | 1500x150  | 6.8             | 97.1 %  | 86.6 %    |
|         |        |            |           | 91       | .33      |  |           | 6.3             | 90 %    | 95 %      |
| v18     | 4749   | 38         | 37        | 67.2     | .35      |  | 250x250   | 5.7             | 82.1 %  | 95.8 %    |
|         |        |            |           | 57.31    | .4       |  | 300x300   | 5.6             | 80 %    | 93. %     |
|         |        |            |           |          |          |  |           |                 |         |           |

### 4.2.7. Gráficas eficiencia de las principales versiones

Para la interpretación de los datos de las tabla anteriores se realizaron gráficas por versiones con imágenes capturadas con el SAI v1 y SAI v5 (Figuras 4.33 a la 4.42). Estas gráficas hacen un comparativo entre los umbrales utilizados y el porcentaje de eficiencia en el conteo. En el caso de la versión 18 la comparación se hace en tamaño de ventana y porcentaje de eficiencia en el conteo. Esto se debe a que ésta versión asigna automáticamente los umbrales para cada ventana, teniendo como valor fijo solo el tamaño de las ventana a explorar.

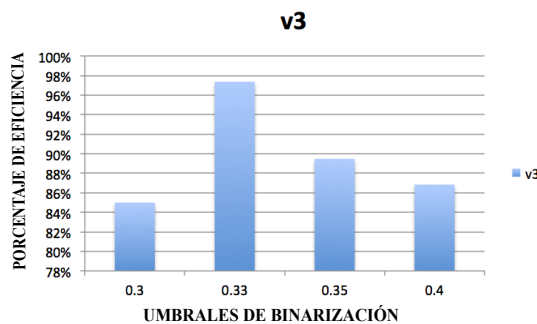


Figura 4.33: Desempeño evaluado con imagen 15 (SAI v5)

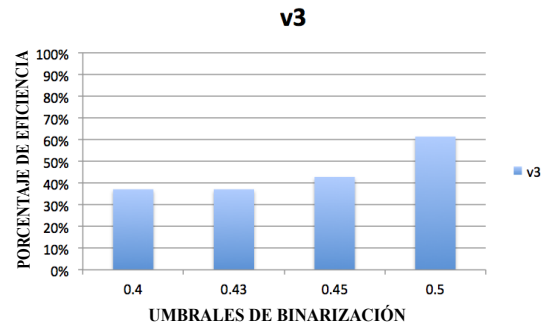


Figura 4.34: Desempeño evaluado con imagen 4749 (SAI v1)

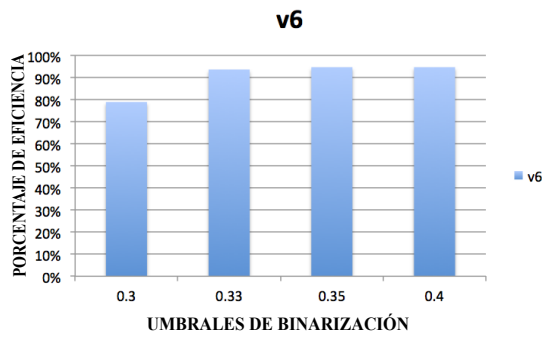


Figura 4.35: Desempeño evaluado con imagen 15 (SAI v5)

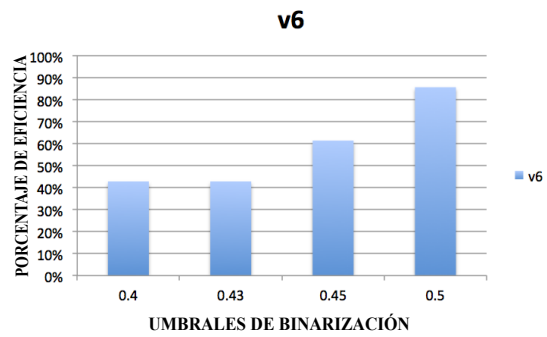


Figura 4.36: Desempeño evaluado con imagen 4749 (SAI v1)

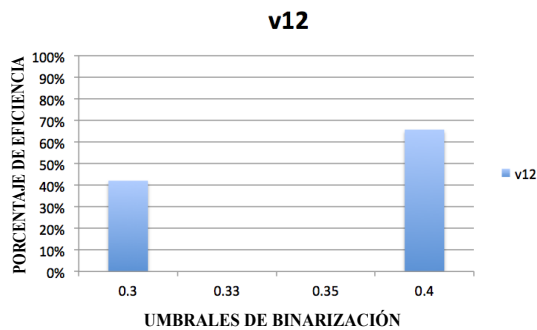


Figura 4.37: Desempeño evaluado con imagen 15 (SAI v5)

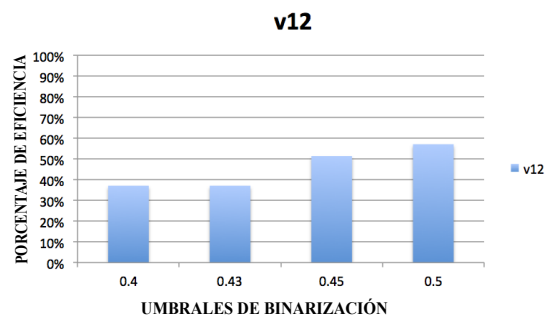


Figura 4.38: Desempeño evaluado con imagen 4749 (SAI v1)

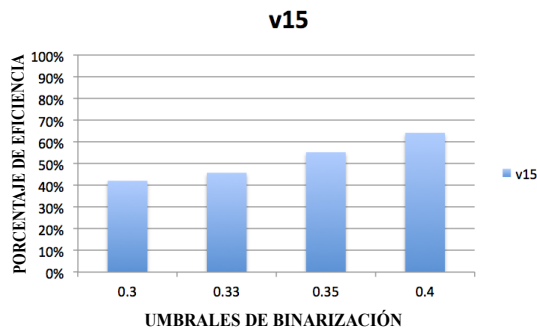


Figura 4.39: Desempeño evaluado con imagen 15 (SAI v5)

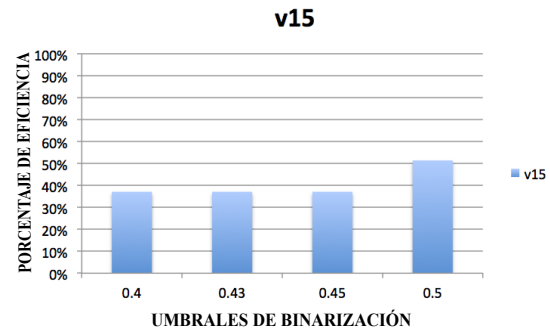


Figura 4.40: Desempeño evaluado con imagen 4749 (SAI v1)

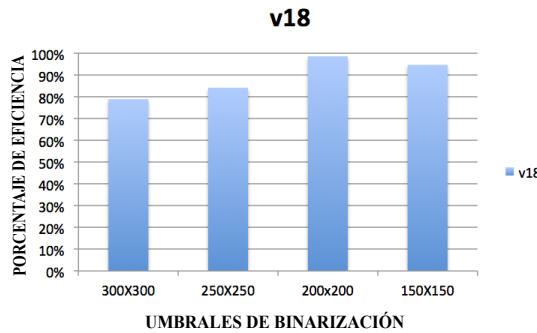


Figura 4.41: Desempeño evaluado con imagen 15 (SAI v5)

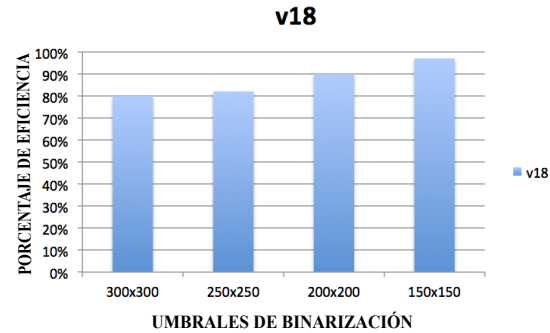


Figura 4.42: Desempeño evaluado con imagen 4749 (SAI v1)

Se observa en las gráficas que existe una relación importante entre el umbral de binarización y la eficiencia de conteo en cada versión. Lo cual indica la importancia de este valor. También, se observa que los porcentajes de eficiencia son notablemente más altos en las imágenes adquiridas con el SAI v5, lo cual fue constante para todas las versiones (\*\* v12 no operó con dos umbrales), lo cual se debe a la calidad de imágenes para procesamiento capturadas por el SAI v5.

#### 4.2.8. Mediciones de los puntos de interés

En ésta sección se presentan los resultados obtenidos al realizar el procesado de secciones (recortes) de imágenes que comprendían un único ejemplar. Estos ensayos se llevaron a cabo con el objetivo de evaluar a que grado de detalle era posible identificar los objetos de interés y que información valiosa era posible obtener de dicho procesado. Las Figuras 4.43 y 4.44, muestran la imagen de una silueta de larva procesa de dos maneras distintas respectivamente (bordes y círculos ), etiquetando en ambos casos los valores en pixeles de las distancias encontradas entre los centros de los objeto identificados. Además también se observó como estas distancias forman una figura triangular la cual pudiera favorecer a para establecer un posible patron para reconocimiento de las larvas.

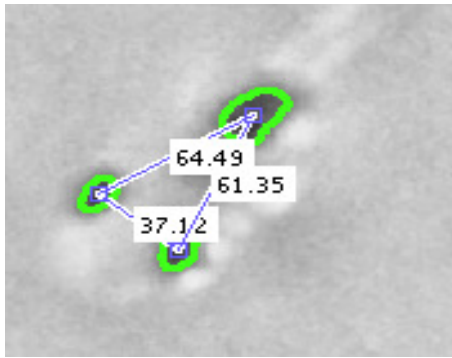


Figura 4.43: Medidas en pixeles resultado del procesado de la imagen con detección de bordes de objetos

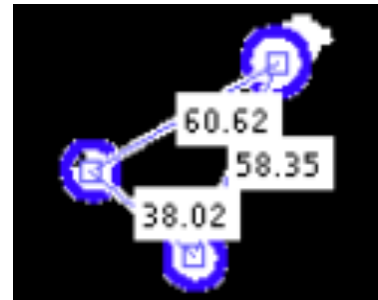


Figura 4.44: Medidas en pixeles resultado del procesado de la imagen con detección círculos.

Las distancias encontradas en ambos casos (Figuras 4.43 y 4.44 ) muestran una variación en cantidad de pixeles que buscan definí el mismo espacio. Esto se debe a que los dos procesos empleados se basan en encontrar un punto medio (centro) del objeto identificado para unirlo con el siguiente punto medio identificado, y así sucesivamente.

Sin embargo, para el caso del procesado con bordes que tiene una forma irregular, se obtiene el punto medio a través de un promedio de todos los puntos que conforman el perímetro o borde de dicho objeto. A diferencia de el método de encontrar círculos, el cual toma como punto medio el centro de dicha circunferencia.

Estos ensayos también arrojaron resultados que presentan un reto importante para identificar de manera apropiada la información valiosa, tal es el caso de la Figura 4.45, donde el algoritmo de detección de bordes detecta cinco objetos que pertenecen a la silueta de la larva, sin embargo, dos de estos objetos no son los que busca detectar este algoritmo en particular. Por lo que, debido a la asignación de etiquetas de objetos de manera automática, proceso en el cual se basa el algoritmo para establecer el orden para realizar las mediciones, se producen mediciones que podríamos llamar falsas. Por otro lado, el método de detección de círculos esta limitado a la cantidad y orden de círculos que se logran encontrar en la silueta, para el caso de la Figura 4.46 resultó favorable ya que se lograron identificar los 3 puntos de interés únicamente.

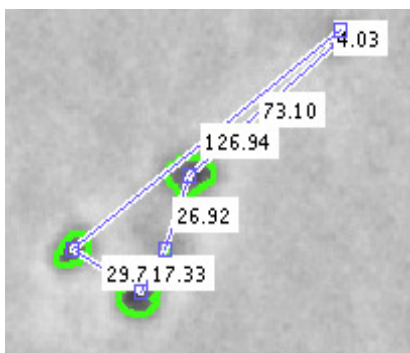


Figura 4.45: Silueta con 5 objetos que provoca mediciones falsas

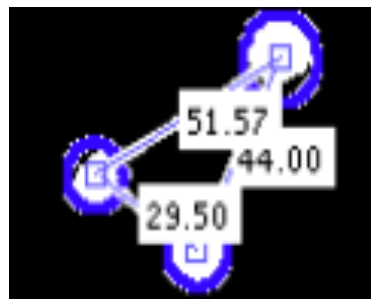


Figura 4.46: Imagen resultante del proceso de detección de círculos

Durante los múltiples ensayos realizados con distintas imágenes se observó que existe una relación en distancias (píxeles) de aproximadamente 1.8 entre la distancia entre los ojos y la distancia de los ojos al sistema digestivo. Como se mencionó en párrafos anteriores, la posibilidad de establecer un patrón para la detección de larvas se ve favorecida por esta relación de distancias.

Con ésta versión del algoritmo (v8) y bajo ciertas condiciones es viable también obtener información como el área en píxeles de los distintos objetos en la imagen. Tomando en cuenta que el área del sistema digestivo es claramente más grande que la de los ojos, y el área de los ojos es prácticamente igual, se cree que es factible usar dichos datos para generar una función de *clasificación de objetos* que permita etiquetar apropiadamente ojos así como el sistema digestivo de cada larva, de tal manera que combinado con la información de distancias se logrará obtener una distribución de tallas de las larvas, lo cual representa información de valor para los acuicultores.

## Capítulo 5

### Conclusiones Generales

En este trabajo de tesis se describe la implementación de un algoritmo para procesamiento digital de imágenes con el fin de contabilizar larvas de peces y de manera simultánea se muestra el desarrollo de un sistema automatizado de adquisición de imágenes. Las características del sistema desarrollado permiten su utilización en proyectos de investigación acuícola.

#### 5.1. Discusiones

Dentro de los objetivos de este trabajo esta el de diseñar un sistema para contabilizar larvas de peces basado en el procesamiento de imágenes. Los resultados de este estudio muestran la viabilidad de obtener información para realizar análisis más detallados de larvas de peces, lo que cumple con el objetivo general de este trabajo y aporta las bases para incursionar en establecer patrones de reconocimiento que puedan ser validados para las distintas posiciones de las larvas, además de extenderse a otras especies,

así como, conocer la distribución de tallas de la población lo cual ayudaría a evaluar el aprovechamiento del alimento y condiciones óptimas de parámetros físico-químicos. También el tener una trazabilidad en formato digital y un registro con los datos de cada muestra evaluada.

Los niveles de eficiencia en el conteo de larvas en algunos casos son similares a los encontrados por R. Labuguen en 2012 [32], donde se alcanzo un 95 % de eficiencia en poblaciones de 200, 400, 500 y 700 larvas por muestra. También declaran que este porcentaje es altamente dependiente al tamaño de las larvas y a lo profundo del contenedor (lamina de agua), así como que decaiga rápidamente al presentarse traslapes en las siluetas de las larvas. Cabe resaltar que en dicho trabajo se contabilizó únicamente empleando el área ocupada por la silueta de la larva, por lo que pueden existir errores en el conteo si el algoritmo detecta objetos de áreas similares. Sin embargo, para un conteo rápido con cierto nivel de tolerancia que se pueden permitir a nivel productivo se considera que contabilizar áreas de siluetas es una opción viable.

Por otro lado, los traslapes entre larvas representan un reto importante para elevar la eficiencia de los algoritmos de conteo [32], [33], para lo cual en éste trabajo proponemos establecer patrones validados para una variedad de posiciones de larvas. Así como combinar parámetros tales como: área, silueta (perímetro), distancia entre puntos, patron triangular, color de objetos, etc., para etiquetar por medio de una función de clasificación si en verdad se ha identificado una larva y que parte de la misma, haciendo posible, obtener medidas tales como: tamaño de ojos y sistema digestivo, distancias entre ojos, ojos a sistema digestivo, ancho y largo de la silueta de forma automática.

## 5.2. Conclusiones

Las larvas de totoaba (*Totoaba macdonali*) de entre dos y tres semanas de vida presentan una silueta traslúcida la cual puede ser procesada utilizando un sistema de visión por computadora. Este tipo de desarrollo larvario es similar a la de otros peces, por lo que cumpliendo con las condiciones propuestas en este trabajo para la adquisición de imágenes y haciendo las adecuaciones pertinentes al algoritmo es posible extender el proceso de detección a otras especies.

Se desarrollaron distintas funciones en este algoritmo, cada una enfocada a encontrar información específica dentro de la imagen, lo que de manera acumulada dio como resultado en una versión final que integra las distintas funciones que permiten obtener la mayor cantidad posible de información por imagen procesada.

El algoritmo desarrollado en este trabajo, es capaz de extraer información de imágenes que contienen objetos dentro de las siluetas de larvas de 1 cm. de longitud aproximadamente. Entre las propiedades de interés contenidas en las imágenes, se pueden mencionar: la detección de ojos y sistema digestivo (objetos de interés), el área (píxeles) de los objetos detectados, las distancias (píxeles) entre objetos, y la estimación de dichos objetos para realizar un conteo de larvas presentes en la imagen. Cabe resaltar, que el algoritmo es capaz de ajustarse automáticamente para procesar imágenes de distintos tamaños ( $m \times n$ ), con fondos poco homogéneos (debidos a la iluminación), pero que brinden suficiente contraste con los objetos de interés.

El conteo de larvas por imagen esta directamente relacionado con la cantidad y características de los objetos detectados, los cuales a su vez, son resultado de una serie de procesos relacionados con la binarización de la imagen, por lo tanto, la adecuada

binarización de las imágenes es una etapa fundamental para obtener un conteo más cercano al valor real de larvas presentes en la imagen. De igual manera, las distintas posiciones que adoptan las larvas debido a que están en constante movimiento, juegan un papel importante en la precisión del conteo, ya que provocan rotaciones, curvaturas, traslapes, etc. al momento de la captura de la imagen, dando como resultado un enmascaramiento de información, lo que dificulta la detección de objetos de interés.

Por otro lado, una ventaja ofrecida por este método es que el procedimiento no requiere una manipulación directa ni prolongada de los ejemplares. Debido a que una vez colocada la muestra frente a la lente de la cámara los parámetros de captura y el procesamiento de la imagen se realizan vía la computadora.

Durante el desarrollo de este sistema de visión se observó que una de las etapas más relevantes para realizar un adecuado procesamiento de imágenes es la captura de las imágenes, por lo que es deseable establecer las condiciones favorables para el tipo de procesamiento a realizar. Debido a lo anterior, adicionalmente al desarrollo del algoritmo de conteo de larvas se implementó un sistema de adquisición de imágenes con su sistema de iluminación, en donde toda la secuencia de captura (incluyendo el encendido y apagado de la iluminación) es realizada de forma automática, mientras que el almacenamiento de las imágenes se realiza de manera remota. Gran parte del tiempo de desarrollo de éste trabajo se invirtió en el diseño y evaluación de la etapa de adquisición de imágenes de manera que se pudiera obtener un sistema confiable con buenas características de robustez y capaz de operar ininterrumpidamente y sin contratiempos durante los prolongados periodos de duración de los experimentos.

### 5.3. Trabajo a futuro

Como trabajo a futuro sobre este proyecto, se plantean los siguientes aspectos para mejorar el desempeño del sistema:

- Trasladar el código del programa principal y de las distintas funciones de MatLab a un lenguaje abierto , como por ejemplo Open CV, el cual también se caracteriza por ser multiplataforma.
- Optimizar el código para mejorar los tiempos de respuesta del algoritmo, así como el manejo de la información para que pueda operar de manera confiable en equipos de computo de desempeño modesto.
- Extender al análisis de conteo a una clasificación por tallas de los ejemplares, y así obtener una distribución de tallas.
- Complementar el algoritmos con un ambiente gráfico intuitivo y de fácil de acceso a la información y procesamiento de datos para el usuario.
- Evaluar la captura de imágenes con cámaras menos sofisticadas para disminuir costos y conseguir un sistema más versátil.
- Realizar una validación de las distintas posiciones y enmascaramiento de las larvas para establecer un patron de detección que ayude a mejor el porcentaje de efectividad de conteo.
- Extender el análisis a detección por video.
- Diseñar y construir un prototipo para realizar el conteo al momento del traslado de ejemplares entre estanques.

# Bibliografía

- [1] B. Miranda, “La acuicultura y su entorno productivo, ambiental, socioeconómico y normativo,” Ph.D. dissertation, CICESE, Departamento de Acuicultura, 2004.
- [2] O. I. Lekang, *Aquaculture Engineering*. Blackwell Publishing., 2007, vol. Primera edición.
- [3] R. academia Española., *Diccionario de la lengua española*, 21st ed. Madrid, España: Epasa-Calpe, 1992.
- [4] R. R. Stickney, “Aquaculture and introductory tex,” *CABI Publishing*, p. 265, 2005.
- [5] M. B. Timmons, “Recirculationg aquaculture systems,” *Cayuga Aqua Ventures*, p. 767, 2002.
- [6] A. C. Bovik, *The Essential Guide to Image Processing*. Academic Press, 2009.
- [7] G. Hempel, *The Egg Stage*. Division of Marine Resources/University of Washington., 1979.

- [8] R. Civera-Cerecedo, C. Alvarez-González, and F. Moyano-López, “Nutrición y alimentación de larvas de peces marinos,” *Memorias del VII Simposium Internacional de Nutrición Acuícola*, pp. 8–94, 2004.
- [9] M. Omholt, “Automatic control of growth and density in rotifer cultures,” *Aquacultural Engineering*, vol. 43, pp. 6–13, 2010.
- [10] S. Kolkovski, “Intensive rearing system for fish larvae research: I. marine fish larval rearing system,” *Aquacultural Engineering*, vol. 31, pp. 295–308, 2004.
- [11] J. Tucker, “Marine fish culture,” *Kluwer Academic Publishers*, p. 750, 1998.
- [12] G. Barnabe, *Bases biológicas y ecológicas de acuicultura*. Editorial Acribia, S.A., 1996.
- [13] H. PJB and R. JD, *Handbook of fish biology and fisheries*. Blackwell, 2002.
- [14] R. Stickney, *Principles of Aquaculture*. Wiley, 1994.
- [15] P. et al., *Fish Hatchery Management*, 1st ed. Washington, D.C. :U.S. Dept. of the Interior, Fish and Wildlife Service, 1986., 1986.
- [16] D. Haskell, “Weight of fish per cubic foot of water in hatchery troughs and ponds,” *Progressive Fish Culturist*, 1955.
- [17] B. Hepher and R. P. Martínez, *Nutrición de peces comerciales en estanques*. Editorial Limusa S.A. De C.V., 1993.
- [18] V. G. Wheaton, F W F, *Acuicultura: diseño y construcción de sistemas*. AGT editors S.A. Progreso 202-Planta Alta, México 18, D.F, 1982.

- [19] M. S. R., “Sistema electrónico de monitoreo de temperatura, oxígeno disuelto y potencial hidrógeno para sistemas cerrados de cultivo acuícola,” Master’s thesis, Universidad Autónoma de Baja California, 2009.
- [20] B. Zion, “The use of computer vision technologies in aquaculture – A review,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 88, pp. 125–132, Oct. 2012.
- [21] B. Zion, N. Doitch, V. Ostrovsky, V. Alchanatis, R. Segev, A. Barki, and I. Karpus, “Ornamental fish fry counting by image processing.” *Agriculture Research Organization, Bet Dagan.*, 2006.
- [22] R. Fenaux, G. Malara, and H. Claustre, “A turbidostat driven and controlled by microcomputer,” *Aquaculture*, 1985.
- [23] D. West, R. K. Thompson, and J. Huron, “Opto-electronic counters for postlarvae and juveniles of *macrobrachium rosenbergii* (de man); design and tests of type a counter,” *Aquacultural Engineering*, 1983.
- [24] D. West, D.C. West and R. K. Thompson, “Opto-electronic counters for postlarvae and juveniles of *macrobrachium rosenbergii* (de man); design and tests of type b counter,” *Aquacultural Engineering*, 1983.
- [25] D. West and R. K. Thompson, “Opto-electronic counters for juveniles of *macrobrachium rosenbergii* (de man): Supporting equipment and use of counter b under commercial hatchery conditions,” *Aquacultural Engineering*, 1985.

- [26] B. Chatain, L. Debas, and a. Bourdillon, “A photographic larval fish counting technique: comparison with other methods, statistical appraisal of the procedure and practical use,” *Aquaculture*, vol. 141, no. 1-2, pp. 83–96, May 1996.
- [27] J. R. Mathiassen, E. Misimi, M. Bondø, E. Veliyulin, and S. O. Ø stvik, “Trends in application of imaging technologies to inspection of fish and fish products,” *Trends in Food Science and Technology*, vol. 22, no. 6, pp. 257–275, 2011.
- [28] J. Proakis and D. Manolakis, *Tratamiento Digital de Señales*, 3rd ed. Prentice-Hall Inc, Upper Saddle River, New Jersey, 1999.
- [29] R. Gonzalez and R. Woods, *Digital image processing*, 3rd ed. Prentice-Hall Inc, Upper Saddle River, New Jersey, 2008. [Online]. Available: <http://mirror.klausuwe.me/ctan/biblio/bibtex/contrib/persian-bib/Persian-bib-userguide.pdf>
- [30] D. Bouridane, A Crookes, “A high level fpga-based abstract machine for image processing,” *Journal of Systems Architecture*, vol. 45, p. 15, 1999.
- [31] D. H. Hubel, *Eye, Brain and Vision*. Freeman, 1988.
- [32] R. T. Labuguen, “Automated fish fry counting and schooling behavior analysis using computer vision,” *Proceedings - 2012 IEEE 8th International Colloquium on Signal Processing and Its Applications*, 2012.
- [33] L. Fan and Y. Liu, “Automate fry counting using computer vision and multi-class least squares support vector machine,” *Aquaculture*, vol. 380-383, pp. 91–98, 2013. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.10.016>