



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ORIZABA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN OPCIÓN

I.- TESIS  
TRABAJO PROFESIONAL

***“ANÁLISIS COMPARATIVO DE CONTENEDORES PARA EL TRANSPORTE DE  
TILAPIA VIVA PARA SU COMERCIALIZACIÓN”***

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
**MAESTRO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**

PRESENTA:  
**ING. ELEC. CRUZ FLORES ABIUD**

DIRECTOR DE TESIS:  
**DRA. MARÍA ELOÍSA DE LA ASUNCIÓN GURRUCHAGA RODRÍGUEZ**

CODIRECTOR DE TESIS:  
**DR. ERICK ARTURO BETANZO TORRES**



ORIZABA, VERACRUZ, MÉXICO

DICIEMBRE 2025



**Instituto Tecnológico de Orizaba**  
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Orizaba, Veracruz, **24/marzo/2026**  
Dependencia: **División de Estudios de**  
**Posgrado e Investigación**  
Asunto: **Autorización de Impresión**  
OPCION: I

**C. CRUZ FLORES ABIUD**  
Candidato(a) a Grado de Maestro(a) en:  
**INGENIERÍA INDUSTRIAL**  
**PRESENTE**

De acuerdo con el reglamento de Titulación vigente de los Centros e Institutos Tecnológicos Federales del Tecnológico Nacional de México, de la Secretaría de Educación Pública, y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

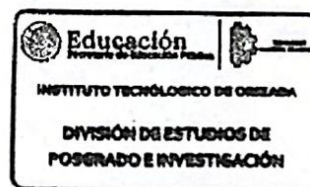
**"ANÁLISIS COMPARATIVO DE CONTENEDORES PARA EL TRANSPORTE DE TILAPIA VIVA PARA SU COMERCIALIZACIÓN"**

Comunico a usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

**ATENTAMENTE**  
Excelencia en Educación Tecnológica®  
CIENCIA - TÉCNICA - CULTURA®

**DR. OSCAR BAEZ SENTIES**  
**JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS**  
**DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

OBS/JARH  

OG-13-F06



Av. Oriente 9 #852 Colonia Emiliano Zapata, C.P. 94320 Orizaba, Veracruz  
Tel. 01 (277) 1105360 info@orizaba.tecnm.mx www.orizaba.tecnm.mx





**Educación**  
Secretaría de Educación Pública



INSTITUTO TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO



**Instituto Tecnológico de Orizaba**  
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Orizaba Veracruz, 17/diciembre/2025

Asunto: Revisión de trabajo escrito

**C. OFELIA LANDETA ESCAMILLA**  
**JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS**  
**DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**  
**PRESENTE.**

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C.:

**CRUZ FLORES ABIUD**

La cual lleva el título de:

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE CONTENEDORES PARA EL TRANSPORTE DE**  
**TILAPIA VIVA PARA SU COMERCIALIZACION.**

y concluyen que se acepta.

**ATENTAMENTE**

Excelencia en Educación Tecnológica®  
CIENCIA - TÉCNICA - CULTURA®

PRESIDENTE: DRA. MA. ELOISA DE LA ASUNCIÓN GURRUCHAGA  
RODRÍGUEZ

  
FIRMA

SECRETARIO: DR. ERICK ARTURO BETANZO TORRES

  
FIRMA

VOCAL: M.C. JORGE LUIS HERNÁNDEZ MORTERA

  
FIRMA

VOCAL SUP.: DR. OSCAR BAEZ SENTIES

  
FIRMA

TA-09-F18



**2025**  
Año de  
La Mujer  
Indígena



## **Dedicatoria**

**A mi familia, por su amor, su comprensión y su fortaleza, que han sido el motor para culminar esta etapa de mi formación profesional.**

## **Agradecimientos**

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a la Dra. María Eloisa Gurruchaga Rodríguez y al Dr. Erick Arturo Betanzo Torres por compartir generosamente sus conocimientos, por su orientación constante a lo largo de estos años y por la paciencia mostrada en cada etapa del proceso formativo. Su acompañamiento académico fue fundamental para el desarrollo de este trabajo. De manera especial, agradezco a la Dra. Gurruchaga Rodríguez por su disposición para escuchar, aconsejar y brindar apoyo más allá de su rol como autoridad académica, lo cual representó un respaldo invaluable en momentos clave de mi formación profesional.

Asimismo, extiendo mi agradecimiento al Tecnológico Nacional de México y al Instituto Tecnológico de Orizaba por haber sido una pieza fundamental en mi preparación académica y por brindarme la oportunidad de cursar el posgrado, proporcionando un entorno institucional propicio para el desarrollo de competencias científicas, técnicas y humanas.

Finalmente, agradezco de manera especial al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías por el apoyo económico otorgado a través de la beca que hizo posible la realización de mis estudios de Maestría en Ingeniería Industrial, contribuyendo de forma decisiva a la culminación de esta etapa académica

## Resumen

El transporte de tilapia viva representa una de las etapas más críticas dentro de la cadena productiva acuícola, debido a que durante este proceso los organismos se encuentran expuestos a condiciones de confinamiento, manejo y variaciones fisicoquímicas del agua que pueden incrementar el estrés fisiológico y la mortalidad, generando pérdidas económicas significativas para los productores. En este contexto, resulta indispensable evaluar y optimizar los sistemas de transporte con base en criterios técnicos y metodológicos que permitan mejorar su eficiencia y sostenibilidad.

El objetivo general de la presente investigación fue comparar el desempeño de tanques de transporte tradicionales y tanques equipados para el traslado de tilapia viva, evaluando su efecto sobre la estabilidad de las condiciones fisicoquímicas del agua, particularmente la temperatura y el oxígeno disuelto, así como su impacto en la supervivencia de los organismos durante el transporte en una Unidad de Producción Acuícola. La metodología empleada integró herramientas de Ingeniería Industrial y acuicultura, siguiendo el enfoque del ciclo Planear-Hacer-Verificar-Actuar. En la fase de planeación se realizó un análisis funcional del proceso de transporte mediante la metodología FAST, seguido de la aplicación del Despliegue de la Función de Calidad para identificar y priorizar las variables críticas del sistema. Con base en estos análisis, se seleccionó un diseño experimental factorial completo  $2^k$ , el cual permitió evaluar de manera sistemática el efecto de los tratamientos aplicados. Durante la fase experimental se monitorearon variables como la temperatura del agua y la concentración de oxígeno disuelto, y los datos obtenidos fueron analizados mediante pruebas estadísticas en el software Minitab para determinar la significancia de las diferencias observadas.

Los resultados evidenciaron que el tanque equipado presentó un desempeño superior respecto al tanque tradicional, al mantener una mayor estabilidad térmica y niveles más constantes de oxígeno disuelto durante el transporte. Estas condiciones permitieron reducir los episodios críticos de estrés e hipoxia, lo que se reflejó en una disminución de la mortalidad y en un incremento del tiempo máximo de transporte viable. El análisis estadístico confirmó que las diferencias entre ambos sistemas fueron significativas y consistentes a lo largo de las réplicas experimentales.

Se concluye que la implementación de un tanque equipado para el transporte de tilapia viva constituye una alternativa técnica viable y eficiente para mejorar las condiciones de traslado, reducir pérdidas productivas y fortalecer el bienestar de los organismos. Asimismo, la integración de herramientas de Ingeniería Industrial permitió estructurar un método estandarizado y replicable, aportando evidencia científica y operativa que puede ser aplicada directamente en unidades de producción acuícola para optimizar sus procesos de transporte.

## Abstract

The transportation of live tilapia represents one of the most critical stages within the aquaculture production chain, as during this process organisms are exposed to confinement, handling, and variations in the physicochemical conditions of the water, which can increase physiological stress and mortality, leading to significant economic losses for producers. In this context, it is essential to evaluate and optimize transport systems using technical and methodological criteria that improve their efficiency and sustainability.

The general objective of this study was to compare the performance of traditional transport tanks and equipped transport tanks for live tilapia, evaluating their effect on the stability of the physicochemical conditions of the water, particularly temperature and dissolved oxygen, as well as their impact on fish survival during transport within a Production Aquaculture Unit.

The methodology integrated tools from Industrial Engineering and aquaculture, following the Plan-Do-Check-Act cycle. During the planning phase, a functional analysis of the transport process was conducted using the FAST methodology, followed by the application of Quality Function Deployment to identify and prioritize critical system variables. Based on these analyses, a full factorial experimental design  $2^k$  was selected, allowing a systematic evaluation of the applied treatments. During the experimental phase, variables such as water temperature and dissolved oxygen concentration were monitored, and the collected data were analyzed using statistical tests in Minitab to determine the significance of the observed differences.

The results showed that the equipped tank exhibited superior performance compared to the traditional tank, maintaining greater thermal stability and more consistent levels of dissolved oxygen during transport. These conditions reduced critical episodes of stress and hypoxia, resulting in lower mortality and an increase in the maximum viable transport time. Statistical analysis confirmed that the differences between both systems were significant and consistent across experimental replicates.

It is concluded that the implementation of an equipped tank for live Tilapia transport represents a technically viable and efficient alternative to improve transport conditions, reduce production losses, and enhance fish welfare. Furthermore, the integration of Industrial Engineering tools enabled the development of a standardized and replicable methodology, providing scientific and operational evidence that can be directly applied in aquaculture production units to optimize live fish transport processes.

# Contenido

|                                                               |           |
|---------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Dedicatoria.....</b>                                       | <b>4</b>  |
| <b>Agradecimientos.....</b>                                   | <b>5</b>  |
| <b>Resumen .....</b>                                          | <b>6</b>  |
| <b>Contenido .....</b>                                        | <b>8</b>  |
| <b>Índice Ilustraciones.....</b>                              | <b>9</b>  |
| <b>Índice Tablas .....</b>                                    | <b>10</b> |
| <b>Introducción.....</b>                                      | <b>11</b> |
| <b>Capítulo 1 Generalidades .....</b>                         | <b>13</b> |
| 1.1 Objetivo General.....                                     | 13        |
| 1.2 Objetivos específicos.....                                | 13        |
| 1.3 Alcance y limitaciones.....                               | 13        |
| 1.4 Planteamiento del problema.....                           | 13        |
| 1.5 Justificación del Problema. ....                          | 14        |
| <b>Capítulo 2. Marco teórico .....</b>                        | <b>16</b> |
| 2.1 Acuicultura.....                                          | 16        |
| 2.2 Transporte de alevines .....                              | 18        |
| 2.2.1 Afectantes del transporte .....                         | 20        |
| 2.3 Diseño de Contenedores de Transporte .....                | 30        |
| 2.4 Despliegue de la Función de Calidad (QFD).....            | 32        |
| 2.5 Metodología de Cross .....                                | 32        |
| 2.6 Diseño de experimentos.....                               | 32        |
| 2.6.1 Factores importantes en el diseño de experimentos ..... | 34        |
| 2.6.2 Diseño Factorial.....                                   | 34        |
| 2.6.3 Método Taguchi.....                                     | 35        |
| 2.7 Ciclo de Deming.....                                      | 36        |
| <b>Capítulo 3 Desarrollo .....</b>                            | <b>37</b> |
| 3.1 Metodología.....                                          | 37        |
| 3.1.1 Etapa Planear .....                                     | 37        |
| 3.1.2 Etapa Hacer.....                                        | 39        |
| 3.1.3 Etapa Verificar.....                                    | 44        |
| 3.1.4 Etapa Actuar .....                                      | 45        |
| <b>Capítulo 4. Resultados.....</b>                            | <b>48</b> |
| 4.1 Etapa Planear .....                                       | 48        |

|                                                                                                  |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.1.1 Análisis funcional (Fast) del proceso de transporte de alevines .....                      | 48        |
| 4.1.2 Determinación del diseño experimental.....                                                 | 49        |
| 4.2 Etapa Hacer.....                                                                             | 51        |
| 4.2.1 Aplicación del diseño factorial $2^k$ .....                                                | 52        |
| 4.2.1 Resultados experimentales (con ajuste a 27 organismos por tanque) .....                    | 54        |
| 4.2.2 Resultados experimentales (con ajuste a 54 organismos por tanque) .....                    | 57        |
| 4.3 Etapa Verificar.....                                                                         | 59        |
| 4.3.1 Descripción y análisis de la tabla del Tratamiento 2.....                                  | 59        |
| 4.3.2 Descripción y análisis de la tabla del Tratamiento 1.....                                  | 61        |
| 4.3.3 Matriz de recolección de datos para el diseño de experimentos (27 alevines).....           | 63        |
| 4.3.4 Matriz de recolección de datos para el diseño de experimentos (54 alevines).....           | 64        |
| 4.3.5 Análisis estadístico del modelo para oxigenación durante el transporte Experimento 1 ..... | 67        |
| 4.3.6 Optimización de respuesta: OXIG Experimento 1.....                                         | 69        |
| 4.3.7 Análisis estadístico del modelo para oxigenación durante el transporte Experimento 2 ..... | 71        |
| 4.3.8 Optimización de respuesta: OXIG Experimento 2.....                                         | 73        |
| 4.4 Etapa Actuar .....                                                                           | 75        |
| 4.4.1 Análisis y planeación de experimentos futuros.....                                         | 75        |
| <b>Conclusiones .....</b>                                                                        | <b>77</b> |
| <b>Recomendaciones.....</b>                                                                      | <b>79</b> |
| <b>Bibliografía .....</b>                                                                        | <b>81</b> |

## Índice Ilustraciones

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Ilustración 1. Producción acuícola mundial 1950-2023 (FAO,2024). .....                           | 16 |
| Ilustración 2 Valores y símbolos de las relaciones existentes en el QF .....                     | 38 |
| Ilustración 3 Análisis FAST del proceso de transporte de tilapias vivas. ....                    | 48 |
| Ilustración 4 Esquema parcial del Despliegue de la Función de Calidad en su primera etapa .....  | 49 |
| Ilustración 5 Segunda etapa de la aplicación del Despliegue de la Función de Calidad.....        | 50 |
| Ilustración 6 Vista parcial de la tercera etapa del Despliegue de la función de calidad .....    | 50 |
| Ilustración 7 Resultados del experimento realizado considerando 27 alevines como población. .... | 61 |
| Ilustración 8 Resultados del experimento realizado considerando 54 alevines como población. .... | 63 |
| Ilustración 9 Matriz de recolección de datos para el diseño de experimentos (27 alevines) .      | 64 |
| Ilustración 10 Matriz de recolección de datos para el diseño de experimentos (54 alevines)       | 65 |

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| Ilustración 11 Resumen del modelo por minitap Experimento 1 .....      | 67 |
| Ilustración 12 parámetros establecidos del experimento.....            | 68 |
| Ilustración 13 residuos demostrativos del experimento 1 .....          | 69 |
| Ilustración 14 parámetros de rango Experimento 1 .....                 | 70 |
| Ilustración 15 solución optimizada al mínimo Experimento 1 .....       | 70 |
| Ilustración 16 solución óptima graficada Experimento 1.....            | 71 |
| Ilustración 17 Resumen del modelo por minitap Experimento 2.....       | 71 |
| Ilustración 18 parámetros establecidos del experimento 2.....          | 72 |
| Ilustración 19 residuos demostrativos del experimento 2 .....          | 73 |
| Ilustración 20 parámetros de rango Experimento 2 .....                 | 74 |
| Ilustración 21 solución óptima al mínimo calculada Experimento 2 ..... | 74 |
| Ilustración 22 solución óptima graficada Experimento 2.....            | 75 |

## **Índice Tablas**

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Valores de referencia para el transporte optimo de Tilapia. (CONAPESCA, 2022) | 18 |
| Tabla 2. Definición y operacionalización de variables .....                            | 40 |
| Tabla 3 Análisis estadístico planificado.....                                          | 41 |
| Tabla 4 Temperatura ambiente registrada durante los ensayos.....                       | 54 |
| Tabla 5 Resumen operativo de los ensayos.....                                          | 54 |
| Tabla 6 Temperatura interna promedio (°C).....                                         | 55 |
| Tabla 7 Oxígeno disuelto promedio (mg/L).....                                          | 55 |
| Tabla 8 Valores registrados de pH .....                                                | 55 |
| Tabla 9 Mortalidad observada por tratamiento .....                                     | 56 |
| Tabla 10 Tiempo hasta condición crítica .....                                          | 56 |
| Tabla 11 Temperatura ambiente registrada durante los ensayos.....                      | 57 |
| Tabla 12 Resumen operativo de los ensayos.....                                         | 57 |
| Tabla 13 Temperatura interna promedio (°C).....                                        | 57 |
| Tabla 14 Oxígeno disuelto promedio (mg/L).....                                         | 58 |
| Tabla 15 Valores registrados de pH .....                                               | 58 |
| Tabla 16 Mortalidad observada por tratamiento (54 organismos por tanque) .....         | 58 |
| Tabla 17 Tiempo hasta condición crítica .....                                          | 58 |

## Introducción

En las últimas décadas, la acuicultura se ha consolidado como una de las actividades productivas de mayor crecimiento a nivel mundial, desempeñando un papel fundamental en el suministro de alimentos de origen acuático y en la seguridad alimentaria. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, la producción acuícola ha mostrado una tendencia sostenida al alza, impulsada por la creciente demanda de proteínas de origen animal y por la necesidad de sistemas productivos más eficientes y sostenibles (FAO, 2024). En este contexto, la tilapia (*Oreochromis niloticus*) se ha posicionado como una de las especies más relevantes debido a su alta adaptabilidad, rápido crecimiento y amplia aceptación en los mercados nacionales e internacionales. Dentro de la cadena productiva acuícola, el transporte de peces vivos representa una etapa crítica, ya que durante este proceso los organismos son sometidos a condiciones de confinamiento, manipulación y variaciones ambientales que pueden afectar su fisiología, incrementar los niveles de estrés y provocar mortalidad. Diversos estudios han señalado que factores como la temperatura del agua, la concentración de oxígeno disuelto y la duración del transporte influyen de manera directa en la supervivencia y en la calidad comercial de la tilapia durante su traslado (Berka, 1986; Harmon, 2009; Boyd et al., 2016). Por ello, el control adecuado de las condiciones fisicoquímicas durante el transporte resulta determinante para garantizar la viabilidad del proceso de comercialización. En México, la producción acuícola de tilapia constituye una actividad estratégica para el desarrollo económico regional y para el abastecimiento de alimentos. Sin embargo, en muchas unidades de producción, especialmente de pequeña y mediana escala, el transporte de tilapia viva se realiza mediante contenedores convencionales que carecen de aislamiento térmico y de mecanismos eficientes de control ambiental. Esta situación incrementa el riesgo de que durante el traslado se presenten variaciones significativas en la temperatura del agua y en la disponibilidad de oxígeno disuelto, lo que puede conducir a condiciones críticas para la supervivencia de los peces y generar pérdidas económicas para los productores (CONAPESCA, 2022). A pesar de la existencia de recomendaciones técnicas generales para el transporte de peces vivos, persiste una limitada evaluación experimental que permita comparar de manera objetiva el desempeño de los contenedores utilizados en condiciones reales de operación. En particular, el efecto del aislamiento térmico sobre la estabilidad de la temperatura del agua y su relación con la conservación del oxígeno disuelto durante el transporte de tilapia viva no ha sido suficientemente documentado bajo un enfoque comparativo. Esta carencia de información técnica dificulta la toma de decisiones fundamentadas por parte de los productores al momento de seleccionar los sistemas de transporte más adecuados para la comercialización de sus productos.

En este contexto, la presente investigación se orienta al análisis comparativo de contenedores de polietileno de alta densidad con y sin protección térmica utilizados en el transporte de tilapia viva (*Oreochromis niloticus*). A través de la evaluación del comportamiento de variables como la temperatura del agua, la saturación de oxígeno y el tiempo de transporte, se busca generar información experimental que permita identificar alternativas técnicas para mejorar las condiciones de traslado, reducir la mortalidad y optimizar la eficiencia del proceso de comercialización. El desarrollo de este estudio contribuye a fortalecer el conocimiento técnico aplicado al transporte de peces vivos y ofrece elementos objetivos para la mejora de las prácticas operativas en unidades de producción acuícola. Asimismo, los resultados obtenidos podrán servir como referencia para la adopción de tecnologías y estrategias que favorezcan la sostenibilidad productiva, el bienestar de los organismos y la rentabilidad del sector acuícola.

Para ello, la investigación se realiza en las instalaciones de la granja acuícola Tierra Adentro, la cual fue fundada con el objetivo de alcanzar altos niveles de producción mediante la aplicación de regulaciones ambientales, sanitarias y de inocuidad, en respuesta al creciente interés de la población y de las instituciones gubernamentales por la procedencia y calidad de los alimentos destinados al consumo humano. Este enfoque responde a la necesidad de garantizar productos libres de riesgos para la salud de los consumidores y de minimizar los impactos negativos sobre el medio ambiente. El origen de la empresa se remonta al año 2006, cuando inició operaciones como un proyecto piloto orientado a diversificar las actividades productivas y aprovechar las tendencias emergentes de la acuicultura, en un contexto donde la demanda del mercado comenzaba a superar la oferta disponible.

Dicha Unidad de Producción Acuícola (UPA) fue legalmente constituida bajo la razón social Ingeniería Agropecuaria del Papaloapan, Sociedad de Producción Rural de Responsabilidad Limitada (S.P.R. de R.L.) el 23 de enero de 2006. Posteriormente, obtuvo la concesión para el uso y aprovechamiento de aguas subterráneas nacionales mediante el título número 10256985474, otorgado por la Comisión Nacional del Agua, con fundamento en lo establecido en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Dicha concesión fue emitida el 22 de septiembre de 2008 con una vigencia de treinta años, lo que permitió formalizar la operación productiva de la unidad acuícola.

De manera complementaria, el 6 de octubre de 2008, y con base en lo dispuesto por la Ley General de Pesca y Acuicultura Sustentable, la UPA obtuvo su inscripción en el Registro Nacional de Pesca como unidad económica dedicada a la acuicultura, bajo el número 569745263. Este registro constituyó un paso fundamental para la consolidación legal y operativa de la empresa dentro del sector acuícola nacional.

Como resultado de la experiencia adquirida en los procesos de producción, la empresa obtuvo en marzo de 2014 el certificado número 569875, mediante el cual se acreditó la implementación de Buenas Prácticas de Producción Acuícola. Dicho certificado fue otorgado por el Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria, organismo dependiente de la entonces Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Este reconocimiento confirmó que la unidad productiva operaba bajo procedimientos documentados y estandarizados orientados a la inocuidad y calidad de los productos acuícolas.

En materia ambiental, en marzo de 2015 la Subdelegación de Gestión para la Protección Ambiental y Recursos Naturales notificó que el proyecto productivo no presentaba afectaciones en términos de impacto ambiental, de conformidad con lo establecido en el artículo 28 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de impacto ambiental. Este dictamen fortaleció la viabilidad ambiental de la operación acuícola.

Posteriormente, en 2018, la empresa inició el proceso de evaluación para la obtención del certificado de Buenas Prácticas Acuícolas en la Producción Primaria ante la Dirección General de Inocuidad Agroalimentaria, Acuícola y Pesquera. Como parte de este proceso, personal técnico del Comité de Sanidad Acuícola y Pesquera Veracruzano realizó una auditoría en la UPA, lo que derivó en que, durante el año 2019, la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, a través del Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria, otorgara el certificado AC PD-30-19, acreditando el cumplimiento de los lineamientos establecidos para la producción acuícola primaria

# Capítulo 1 Generalidades

## 1.1 Objetivo General

Comparar el desempeño de contenedores de polietileno de alta densidad con y sin protección térmica durante el transporte de tilapia viva (*Oreochromis niloticus*), mediante el análisis del comportamiento de la temperatura del agua, la saturación de oxígeno y el tiempo de transporte, con el fin de evaluar su efecto sobre las condiciones fisicoquímicas y la viabilidad del proceso de comercialización.

## 1.2 Objetivos específicos

- Evaluar el comportamiento de la saturación de oxígeno disuelto durante el transporte de tilapia viva (*Oreochromis niloticus*) en contenedores con y sin protección térmica.
- Analizar la variación de la temperatura del agua durante el transporte de tilapia viva en contenedores de polietileno de alta densidad con y sin aislamiento térmico.
- Comparar las condiciones fisicoquímicas del agua durante el transporte, considerando oxígeno disuelto, temperatura y salinidad, entre ambos tipos de contenedores.
- Diseñar y evaluar un prototipo de contenedor de polietileno de alta densidad con protección térmica para el transporte de tilapia viva destinada a su comercialización.
- Determinar el efecto del tipo de contenedor sobre el tiempo máximo de transporte antes de alcanzar condiciones críticas para la supervivencia de la tilapia.
- Evaluar la viabilidad operativa del contenedor con protección térmica como alternativa para mejorar las condiciones de transporte de tilapia viva.

## 1.3 Alcance y limitaciones

Este trabajo está circunscrito a las condiciones de operación de la Unidad Productora Acuícola (UPA) en estudio, durante el periodo comprendido de enero a diciembre 2025.

## 1.4 Planteamiento del problema

El transporte de peces vivos constituye una de las etapas más críticas dentro de los sistemas acuícolas, ya que durante este proceso los organismos se encuentran expuestos a condiciones ambientales que pueden alterar de manera significativa su fisiología, incrementar los niveles de estrés y provocar mortalidad (Berka, 1986; Wedemeyer, 1996). En el caso de la tilapia (*Oreochromis niloticus*), especie ampliamente cultivada y comercializada a nivel mundial, el transporte representa un punto vulnerable de la cadena productiva debido a su sensibilidad a

variaciones en parámetros fisicoquímicos como la temperatura del agua, el oxígeno disuelto y la acumulación de desechos metabólicos (Harmon, 2009; Sampaio & Freire, 2016).

Diversos estudios han demostrado que, durante el transporte, especialmente en trayectos prolongados o bajo condiciones climáticas adversas, se presentan descensos en la concentración de oxígeno disuelto, incrementos en la temperatura del agua y acumulación de dióxido de carbono y amoníaco, factores que elevan el estrés fisiológico y aumentan el riesgo de mortalidad en tilapias (Ross & Ross, 2008; Boyd et al., 2016). Estas alteraciones afectan no solo la supervivencia de los organismos, sino también su calidad comercial, lo que repercute directamente en la rentabilidad del productor y en la eficiencia del sistema de comercialización.

En México, la acuicultura de tilapia representa una actividad estratégica para la seguridad alimentaria y el desarrollo económico regional. De acuerdo con la Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca, el transporte inadecuado de alevines y peces vivos continúa siendo una de las principales causas de pérdidas productivas, particularmente en sistemas de pequeña y mediana escala donde el control de las condiciones de traslado suele realizarse de manera empírica y sin apoyo tecnológico (CONAPESCA, 2022). La falta de infraestructura adecuada, así como el uso de contenedores sin aislamiento térmico ni control eficiente del oxígeno, incrementa la probabilidad de que los peces alcancen condiciones críticas durante el transporte.

Aunque existen recomendaciones técnicas generales para el transporte de tilapia viva, en la práctica persiste una limitada evaluación comparativa de los contenedores utilizados, especialmente en lo que respecta al efecto del aislamiento térmico sobre la estabilidad de la temperatura del agua y la conservación del oxígeno disuelto durante el traslado. Esta ausencia de información experimental dificulta la toma de decisiones por parte de los productores, quienes carecen de criterios técnicos claros para seleccionar el tipo de contenedor más adecuado en función de las condiciones operativas y ambientales del transporte.

Por lo anterior, se identifica como problema central la necesidad de evaluar, bajo condiciones controladas, el desempeño de diferentes contenedores utilizados para el transporte de tilapia viva, con énfasis en su capacidad para mantener parámetros fisicoquímicos adecuados que minimicen el estrés y la mortalidad durante el proceso de comercialización. La generación de información comparativa permitirá identificar alternativas técnicas que contribuyan a mejorar la eficiencia del transporte, reducir pérdidas económicas y fortalecer la sostenibilidad de la actividad acuícola.

### 1.5 Justificación del Problema.

La reducción de la mortalidad durante el transporte de tilapia viva (*Oreochromis niloticus*) constituye un aspecto prioritario para la eficiencia productiva y la sostenibilidad de las unidades de producción acuícola. El traslado de peces vivos representa una fase crítica del proceso de comercialización, ya que los organismos son sometidos a condiciones de confinamiento y manejo que pueden provocar alteraciones fisiológicas, incremento del estrés y pérdidas económicas significativas cuando no se mantienen parámetros fisicoquímicos adecuados del agua (Berka, 1986; Wedemeyer, 1996).

Diversas investigaciones han documentado que factores como la temperatura del agua, la concentración de oxígeno disuelto y la duración del transporte influyen de manera directa en la supervivencia y calidad de la tilapia durante el traslado. Incrementos térmicos, deficiencias en la oxigenación y fluctuaciones ambientales favorecen el aumento de la tasa metabólica, la acumulación de desechos y la aparición de condiciones críticas que elevan la mortalidad y reducen la calidad comercial del producto (Ross & Ross, 2008; Harmon, 2009; Boyd et al., 2016). En este contexto, la selección del tipo de contenedor utilizado para el transporte adquiere una relevancia técnica fundamental.

En México, el transporte de tilapia viva se realiza con frecuencia utilizando contenedores convencionales que carecen de protección térmica y de sistemas eficientes de control ambiental, particularmente en unidades de producción de pequeña y mediana escala. De acuerdo con lineamientos técnicos de la Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca, estas limitaciones incrementan el riesgo de que los peces alcancen condiciones fisicoquímicas desfavorables durante el traslado, lo que se traduce en mayores tasas de mortalidad y pérdidas económicas para los productores (CONAPESCA, 2022). A pesar de la existencia de recomendaciones generales, persiste una limitada evaluación experimental que permita comparar de manera objetiva el desempeño de los contenedores empleados en condiciones reales de transporte.

La incorporación de contenedores con protección térmica y el uso de tecnologías de monitoreo para el seguimiento de variables críticas como la temperatura y el oxígeno disuelto representan una alternativa técnica con potencial para mejorar las condiciones de transporte. Estudios previos señalan que la estabilidad térmica contribuye a reducir el metabolismo de los peces, optimizar el consumo de oxígeno y disminuir la producción de desechos metabólicos, lo que favorece la supervivencia durante el traslado (Tavares-Dias, 2017; Cascarano et al., 2021). Sin embargo, la viabilidad operativa y el impacto real de estas mejoras deben ser evaluados de manera comparativa bajo un enfoque experimental.

Por lo anterior, la presente investigación se justifica por la necesidad de generar información técnica y experimental que permita comparar el desempeño de contenedores de transporte de tilapia viva con y sin protección térmica, evaluando su efecto sobre la estabilidad de las condiciones fisicoquímicas del agua durante el traslado. Los resultados obtenidos aportarán criterios objetivos para la selección de sistemas de transporte más eficientes, contribuirán a la reducción de la mortalidad y de las pérdidas económicas asociadas, y fortalecerán la sostenibilidad del proceso de comercialización de tilapia en unidades de producción acuícola.

## Capítulo 2. Marco teórico

### 2.1 Acuicultura

El desarrollo temprano de la acuicultura en Europa se relaciona con la necesidad de preservar ejemplares capturados hasta su comercialización, así como con el interés por mejorar la cría de especies acuáticas. En un manuscrito atribuido a Dom Pichon, fechado alrededor del año 1420, se describe un método primitivo de fecundación artificial de huevos de trucha en Francia, aunque no existe evidencia concluyente de que esta práctica haya tenido continuidad o éxito reproductivo a gran escala. Posteriormente, durante el siglo XIX, con el avance de la ciencia y el establecimiento de piscifactorías, se consolidaron métodos sistemáticos de reproducción en cautiverio y producción comercial de peces. Estas técnicas se desarrollaron inicialmente en instituciones estatales con fines de repoblación y, con el tiempo, fueron adoptadas por el sector privado para la producción con fines comerciales (FAO, 2021; Horváth, 2023).

La producción acuícola mundial mantuvo una tendencia de crecimiento sostenido durante los años 2020, 2021 y 2022, sin verse gravemente afectada por la pandemia de COVID-19. De acuerdo con datos oficiales, en 2022 la acuicultura alcanzó un máximo histórico de 130.9 millones de toneladas, con un valor económico estimado de 312.8 mil millones de dólares estadounidenses. De este volu men total, 94.4 millones de toneladas correspondieron a animales acuáticos, mientras que el resto estuvo integrado por organismos acuáticos vegetales, principalmente algas (FAO, 2024).

Un hecho relevante es que, por primera vez, la producción acuícola de animales superó a la captura de organismos acuáticos silvestres, la cual se estimó en aproximadamente 91 millones de toneladas. Este incremento estuvo impulsado principalmente por la región asiática, que concentró la mayor proporción del crecimiento global, mientras que otras regiones aportaron incrementos de menor magnitud. Dentro de los grupos cultivados, los peces representaron el mayor aumento en volumen de producción, seguidos por los crustáceos y los moluscos, lo que refleja la consolidación de la acuicultura como una fuente clave de proteína animal a nivel mundial. (FAO, 2024).

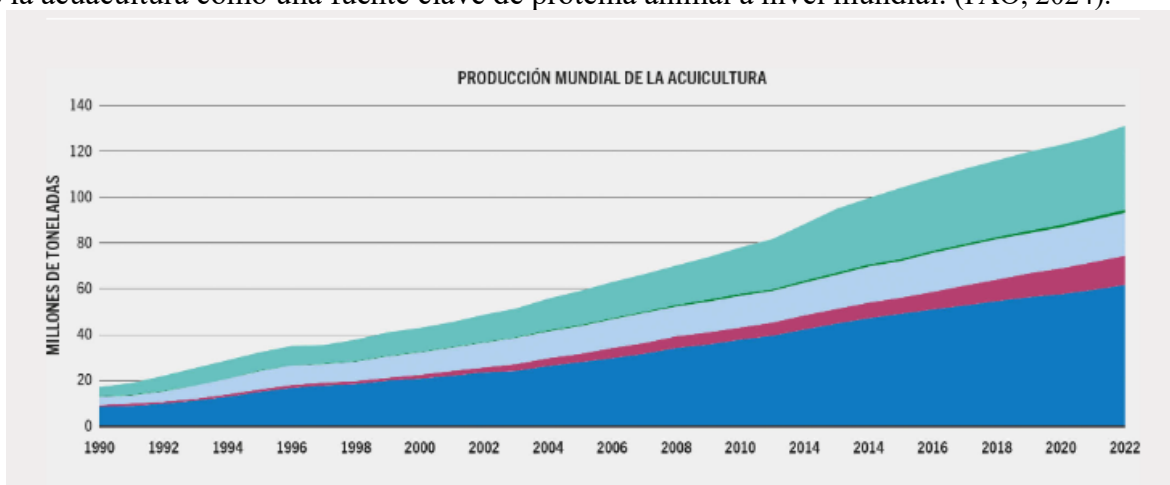


Ilustración 1. Producción Acuícola Mundial 1950-2023 (FAO,2024).

En la ilustración 1 se muestra la distribución y tendencia de la producción mundial de especies acuáticas cultivadas entre 1990 y 2022, agrupadas según su tipo principal y entorno de cultivo. El color azul representa la producción de peces (especies de agua dulce y marina), la cual constituye la fracción más amplia del total y muestra un crecimiento sostenido a lo largo del periodo, reflejando su papel predominante en la acuicultura global. El color rosa corresponde a los crustáceos, cuya producción también ha aumentado de manera constante, impulsada principalmente por el cultivo intensivo de camarones en Asia. El color lila indica la producción de moluscos, mientras que el color verde representa las algas y otros organismos acuáticos vegetales, cuyo crecimiento ha sido notable en la última década debido al auge de la acuicultura marina y su utilización en la industria alimentaria y farmacéutica.

La gráfica evidencia una tendencia ascendente generalizada en todos los grupos, destacando que, a partir de 2022, la producción acuícola de animales (94.4 millones de toneladas) superó por primera vez a la captura pesquera silvestre (91 millones de toneladas). Este incremento refleja el fortalecimiento de la acuicultura como una de las principales fuentes de proteínas animales a nivel global, con Asia como la región líder en producción y diversificación de especies (FAO, 2024).

Además, este incremento ha tenido repercusiones positivas tanto en la economía como en la sociedad. Ha generado empleo y ha contribuido a la producción de alimentos de alta calidad destinados al consumo humano. Por su parte, la acuicultura desempeña una función esencial en los esfuerzos para combatir la hambruna al proporcionar alimentos y contribuir a mejorar la salud y la calidad de vida de las personas. De acuerdo con la FAO (2024) unos 61.8 millones de personas trabajaban en la pesca y la acuicultura en 2022, lo que evidencia su importancia para medios de vida y seguridad alimentaria. Estudios también señalan que los alimentos de origen acuático son una fuente importante de proteína animal para alrededor de mil millones de personas en el mundo y contribuyen a la nutrición, reduciendo la vulnerabilidad alimentaria.

### Acuicultura en México

En México, la expansión de la producción acuícola comercial ha sido particularmente evidente durante los últimos años, consolidándose como un componente estratégico del sector agroalimentario nacional. Este crecimiento se explica por el considerable potencial del país para el desarrollo de la acuicultura, sustentado en la amplia disponibilidad de recursos naturales como costas, lagunas, presas y cuerpos de agua continentales, así como en condiciones climáticas favorables que permiten el cultivo de diversas especies de interés comercial a lo largo del territorio nacional (FAO, 2024). A ello se suma la cercanía geográfica con Estados Unidos, principal mercado mundial de productos pesqueros, lo que facilita la exportación y fortalece la competitividad del sector acuícola mexicano.

Asimismo, México cuenta con especies nativas y exóticas ampliamente adaptadas a los sistemas de cultivo, lo que ha permitido diversificar la producción y reducir los riesgos asociados a la introducción de organismos no adaptados al entorno. Entre estas especies destaca la tilapia (*Oreochromis niloticus*), que se ha consolidado como la principal especie cultivada en el país debido a su alta adaptabilidad ambiental, rápido crecimiento, eficiencia en la conversión alimenticia y elevada aceptación en el mercado nacional (Ovando-Solís, 2013).

De acuerdo con información oficial, en el año 2022 la producción acuícola nacional alcanzó un volumen aproximado de 289 619 toneladas, lo que confirma la relevancia creciente de esta actividad dentro del sector primario mexicano (CONAPESCA, 2023). Dentro de este volumen, la tilapia representó una proporción significativa de la producción acuícola total, posicionándose como la especie de mayor importancia económica y social en la acuicultura continental del país. La producción de tilapia se concentra principalmente en entidades como Chiapas, Veracruz, Jalisco, Michoacán y Estado de México, donde se desarrollan sistemas de cultivo de pequeña, mediana y gran escala orientados tanto al mercado interno como a la comercialización regional (CONAPESCA, 2023).

Desde el punto de vista económico, el valor del sector acuícola y pesquero en México mostró un crecimiento sostenido, superando en 2024 los 37.59 mil millones de pesos, de los cuales aproximadamente 18.28 mil millones correspondieron a la acuicultura, lo que evidencia su importancia dentro de la estructura productiva nacional (Trading Economics, 2024). Este contexto productivo y económico resalta la necesidad de optimizar los procesos asociados a la cadena acuícola, particularmente aquellos relacionados con el transporte de organismos vivos, ya que las pérdidas durante esta etapa afectan de manera directa la rentabilidad de los productores y la eficiencia del sistema de comercialización.

## 2.2 Transporte de alevines

Las condiciones de transporte de alevines y tilapias (*Oreochromis niloticus*) constituyen un factor determinante para preservar su salud y asegurar una elevada tasa de supervivencia durante el traslado desde los centros de producción hacia los sitios de cultivo o comercialización. De acuerdo con la Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca (CONAPESCA), resulta indispensable mantener bajo control parámetros como la temperatura, el oxígeno disuelto, el pH, el dióxido de carbono, el amonio, los nitritos, la salinidad y la turbidez, pues cada uno de estos factores incide directamente en el bienestar de los organismos durante el transporte (CONAPESCA, 2022).

| PARÁMETRO        | RANGO DE VALORES |
|------------------|------------------|
| Temperatura      | 24°C - 29°C      |
| Oxígeno disuelto | >3 mg/l          |
| pH               | 6.5 - 8.5        |
| CO <sub>2</sub>  | <50 ppm          |
| Amonio           | <0.1 mg/l        |
| Nitritos         | <5 mg/l          |
| Salinidad        | <20              |
| Turbidez         | <30              |

Tabla 1. Valores de referencia para el transporte óptimo de Tilapia. (CONAPESCA, 2022)

Estos valores funcionan como un punto de referencia indispensable para mantener condiciones adecuadas durante el transporte de alevines y tilapias (*Oreochromis niloticus*). Al respetar dichos parámetros, se logra reducir significativamente el nivel de estrés en los organismos y, en consecuencia, se disminuye la mortalidad durante el traslado, tal como lo establecen las directrices técnicas de la Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca (CONAPESCA, 2022).

En la acuicultura moderna, uno de los procesos más relevantes corresponde a la compra, el transporte y la siembra de alevines en los recintos de cultivo. Independientemente del sistema o método de producción utilizado, este procedimiento resulta crítico, pues de su correcta ejecución depende el inicio exitoso de la producción acuícola. Como señala González (2020) si esta fase se desarrolla de manera adecuada se sientan las bases para asegurar la rentabilidad de la cosecha, aun cuando los resultados finales se encuentren distantes en el tiempo.

En las primeras etapas de producción resulta esencial reconocer que el proveedor de alevines constituye un aliado estratégico para la rentabilidad del sistema acuícola. Factores como la calidad de los organismos, la eficacia en los procesos de reversión sexual y la capacidad para identificar y descartar ejemplares de talla reducida son determinantes para el éxito productivo. De acuerdo con PisciculturaGlobal (2018), cuando el proveedor atiende con rigor estos aspectos críticos, la dispersión en el tamaño de los peces disminuye, el crecimiento poblacional se acelera y, al mismo tiempo, se reduce el riesgo de incorporar hembras en los lotes destinados al engorde.

El primer aspecto para considerar es la compra de alevines. No siempre la opción más económica resulta la más adecuada, ya que dentro de la estructura de costos de la acuicultura los alevines representan un porcentaje relativamente bajo. En este sentido, invertir en organismos de mayor calidad puede asegurar mejores características genéticas, certificaciones sanitarias o técnicas más eficientes de reversión sexual. En algunos casos también es posible negociar la adquisición de alevines de mayor talla, de cinco a diez gramos, lo cual contribuye a reducir los tiempos de engorde y mejorar la uniformidad en el crecimiento. Como señala PisciculturaGlobal (2018) aunque es poco común que los laboratorios ofrezcan peces de más de tres gramos, es factible llegar a acuerdos siempre que las condiciones de producción lo permitan, lo que se traduce en una mejor relación costo-beneficio para el productor.

Luego de realizar la selección y negociación con el proveedor de alevines, se lleva a cabo un proceso particularmente delicado, el transporte hasta la finca. Existen diversas estrategias para este traslado, siendo las más comunes el embolsado de entre 100 y 300 peces en volúmenes de 20 a 30 litros de agua a los que se agrega oxígeno antes de sellar las bolsas con bandas de goma, así como el transporte en tanques con capacidad de 300 a 1000 litros de agua provistos de aireación mecánica y piedras difusoras. La elección de uno u otro método depende principalmente de la distancia del recorrido; de manera general, los tanques se emplean en traslados cortos, mientras que para trayectos más largos resulta más conveniente recurrir al embolsado (González, 2020).

Independientemente de la estrategia de transporte elegida, existen reglas básicas que deben cumplirse para garantizar la supervivencia de las larvas durante esta etapa crítica. Una de las más importantes consiste en evitar la alimentación tanto antes como durante el traslado, con el fin de reducir la producción de desechos metabólicos. También es fundamental mantener la temperatura del agua en un rango bajo, entre 18 y 20 °C, lo que contribuye a disminuir el metabolismo de los peces y, en consecuencia, su consumo de oxígeno. La acumulación de amonio es otro factor para considerar, por lo que se recomienda añadir fuentes de carbono al agua, siendo habitual el uso de un gramo de azúcar por litro como medida de control. En el caso de las bolsas de transporte, el suministro de oxígeno es indispensable, mientras que en los tanques se recurre a sistemas de aireación; sin embargo, más allá de estas medidas, resulta aún más determinante que el proceso de traslado sea rápido y expedito para reducir el estrés de los organismos (González, 2020).

Además de las medidas generales, es fundamental considerar factores adicionales como la duración del transporte, la manipulación cuidadosa de los organismos, la implementación de sistemas adecuados de oxigenación y el monitoreo constante de las condiciones ambientales, todo ello con el propósito de garantizar un traslado seguro y exitoso. De acuerdo con las directrices de la Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca (CONAPESCA, 2022), existen cinco variables críticas que deben observarse durante el transporte de organismos acuáticos, la temperatura, el oxígeno disuelto, el pH, la concentración de dióxido de carbono y la salinidad, cada una de ellas con un papel determinante en la reducción del estrés y la mortalidad.

La elección del método de transporte para alevines de tilapia constituye una decisión crítica que incide directamente en la supervivencia de los organismos, en su bienestar fisiológico y en la calidad final de los peces al llegar a su destino. Esta selección debe realizarse a partir de una evaluación rigurosa de factores clave, entre los que se incluyen la especie de tilapia a trasladar, la distancia del recorrido y la duración estimada del viaje. Cada uno de estos elementos influye de manera determinante en la elección de la modalidad de transporte más apropiada y en la planificación logística y operativa que acompañará al proceso, tal como sostienen Lucas y Southgate (2012).

### 2.2.1 Afectantes del transporte

#### Temperatura

El control de la temperatura del agua durante el transporte de tilapia constituye un aspecto crítico, ya que cambios bruscos o desajustes térmicos pueden inducir choques térmicos que incrementan de manera significativa el nivel de estrés en los peces (Barcellos et al., 2017). Diversos autores recomiendan mantener la temperatura del agua en un rango aproximado de 20 a 24 °C, dado que estas condiciones contribuyen a reducir la actividad metabólica del organismo, disminuir el consumo de oxígeno y limitar la producción de desechos metabólicos durante el traslado (Ross & Ross, 2018). Estudios más recientes señalan que el estrés térmico puede alterar la función enzimática, los procesos de osmorregulación y la respuesta inmunológica de los peces, además de favorecer el aumento en la producción de especies reactivas de oxígeno cuando la temperatura excede los rangos óptimos, lo que incrementa el riesgo de daño fisiológico y mortalidad durante el transporte (Cascarano et al., 2021; Reid et al., 2022).

En los traslados de larga distancia es frecuente la utilización de sistemas de enfriamiento, ya sea mediante la adición de hielo o a través de equipos de refrigeración directa en los tanques, con el objetivo de mantener la temperatura del agua dentro de rangos estables y seguros para los peces (Tavares-Dias, 2017). Sin embargo, el uso inadecuado de estas prácticas puede provocar descensos bruscos de temperatura que deriven en episodios de hipotermia, afectando negativamente las funciones fisiológicas de los organismos y elevando el riesgo de mortalidad durante el transporte (Gomes, 2019). Estudios recientes han demostrado que el enfriamiento excesivo puede alterar procesos clave como la osmorregulación y la respuesta inmunológica, reduciendo la capacidad de los peces para adaptarse a las condiciones del entorno de transporte y aumentando su vulnerabilidad al estrés fisiológico (Cascarano et al., 2021; Pradeepkiran, 2019).

Durante el transporte, diversos factores pueden influir en los niveles de oxígeno disuelto en el agua, siendo la temperatura uno de los más determinantes. Existe una relación inversa entre la

temperatura y la solubilidad del oxígeno: a medida que la temperatura aumenta, la capacidad del agua para retener oxígeno disminuye. En consecuencia, mantener temperaturas relativamente bajas durante el traslado contribuye a preservar niveles adecuados de oxígeno disuelto y, al mismo tiempo, a reducir la tasa metabólica de los peces, disminuyendo su demanda respiratoria (Wedemeyer, 1996). De acuerdo con Cascarano et al. (2019), los incrementos térmicos no solo reducen la disponibilidad de oxígeno, sino que también favorecen la acumulación de compuestos nitrogenados, lo que puede agravar el estrés fisiológico y comprometer la supervivencia de los organismos.

El control de la temperatura del agua constituye una estrategia esencial para garantizar la supervivencia de las tilapias durante el transporte. Mantener el agua en rangos bajos favorece tanto la retención de oxígeno disuelto como la reducción de la tasa metabólica de los peces, lo cual disminuye de forma significativa su consumo de oxígeno (Berka, 1986). Para ello, se emplean comúnmente sistemas de refrigeración o la adición de hielo en los tanques, aunque es fundamental evitar descensos bruscos de temperatura que puedan desencadenar episodios de estrés térmico (Ross B. R., 2008).

La temperatura es uno de los parámetros más críticos para la salud y el bienestar de los alevines durante el transporte. Afecta prácticamente todos los aspectos de la fisiología de los peces, desde su tasa metabólica hasta la solubilidad del oxígeno en el agua y la toxicidad de ciertos compuestos químicos. Mantener una temperatura estable y adecuada es fundamental para reducir el estrés y asegurar que los peces lleguen a su destino en buenas condiciones.

La tasa metabólica de los peces guarda una relación directa con la temperatura del agua, de modo que a temperaturas más altas se acelera el metabolismo, lo que incrementa tanto la demanda de oxígeno como la producción de desechos metabólicos, principalmente amoníaco y dióxido de carbono. En el contexto del transporte, mantener temperaturas elevadas puede favorecer episodios de hipoxia, aumentando el riesgo de asfixia y, en consecuencia, la mortalidad de los organismos (Wedemeyer, 1996). Estudios recientes han confirmado que estas condiciones, además de comprometer la respiración, pueden alterar la homeostasis iónica y el sistema inmune, generando efectos negativos sobre la supervivencia y el bienestar de los peces (Cascarano M. C., 2021).

La tilapia, al ser una especie tropical, tiene una tolerancia relativamente alta a las variaciones de temperatura, pero aun así es sensible a los cambios bruscos. Las temperaturas óptimas para el transporte de tilapia generalmente se encuentran entre 20 y 24 °C. A esta temperatura, el metabolismo de los peces se reduce lo suficiente como para disminuir la demanda de oxígeno, pero no tanto como para inducir estrés térmico (Ross & Ross, 2008). En climas cálidos, el uso de sistemas de refrigeración o la adición de hielo pueden ayudar a mantener el agua dentro de este rango de temperatura óptimo.

Los cambios bruscos de temperatura durante el transporte constituyen un factor de riesgo que puede provocar estrés térmico en los alevines, debilitando su sistema inmunológico y aumentando su susceptibilidad a enfermedades. Asimismo, la exposición a temperaturas extremas, ya sean demasiado elevadas o bajas, puede generar choques térmicos con consecuencias potencialmente letales para los peces (Coutant, 1999). Por esta razón, resulta fundamental evitar variaciones repentinas en la temperatura del agua y, en caso de ser necesario realizar ajustes, llevarlos a cabo

de manera gradual para reducir el impacto sobre la fisiología de los organismos. Investigaciones recientes confirman que incluso fluctuaciones moderadas de temperatura pueden alterar la homeostasis iónica y el equilibrio ácido-base en tilapias, incrementando los niveles de mortalidad cuando no se aplican protocolos de aclimatación adecuados (Reid C. H., 2022).

Como se mencionó anteriormente, la temperatura tiene una relación directa con el metabolismo de los peces. Mantener una temperatura estable y adecuada durante el transporte es crucial para reducir el estrés metabólico. Las temperaturas óptimas para el transporte de tilapia generalmente se sitúan en un rango de 20 a 24 °C, y deben mantenerse constantes durante todo el viaje para evitar el choque térmico (Ross B. R., 2008).

La temperatura del agua es uno de los factores más decisivos en la calidad del medio acuático y en la fisiología de los peces, ya que incide directamente en su metabolismo, en la solubilidad del oxígeno disuelto y en la toxicidad de compuestos nitrogenados como el amoníaco (Tavares-Dias, 2017). Cuando la temperatura se eleva, el metabolismo de los peces se acelera, generando un incremento en el consumo de oxígeno y en la producción de desechos metabólicos. Este fenómeno puede comprometer la estabilidad del entorno y aumentar el riesgo de hipoxia durante el transporte. En cambio, temperaturas más bajas reducen la actividad metabólica y, por consiguiente, la demanda de oxígeno, aunque un descenso excesivo puede alterar el equilibrio osmótico y debilitar el sistema inmunológico de los peces. Por esta razón, mantener una temperatura controlada y estable se considera esencial para garantizar la supervivencia y el bienestar de los alevines de tilapia durante el traslado (Colt J. O., 1991).

El control térmico durante el transporte de tilapia representa un aspecto crítico para garantizar la estabilidad fisiológica y prevenir alteraciones que puedan provocar estrés o mortalidad. En trayectos prolongados, se emplean estrategias como la adición gradual de hielo picado, la implementación de intercambiadores de calor o el uso de sistemas de refrigeración mecánica, los cuales permiten mantener la temperatura del agua dentro de rangos seguros, generalmente entre 22 y 26 °C (Cascarano M. C., 2021). No obstante, un manejo inadecuado de estos sistemas, como descensos bruscos o excesivos de temperatura, puede inducir hipotermia y alterar la homeostasis de los peces. Por ello, se recomienda realizar ajustes térmicos de forma progresiva y mantener un monitoreo continuo mediante sensores digitales o sistemas automatizados. Estas prácticas favorecen la reducción del estrés térmico y contribuyen significativamente a incrementar la supervivencia y el bienestar de los peces durante el transporte (Ross B. R., 2008) (Barcellos, (2017)).

La tasa metabólica y consumo de oxígeno se relacionan con la temperatura debido a que la tasa metabólica de los alevines de tilapia aumenta de manera exponencial, lo que conlleva un incremento en el consumo de oxígeno y en la producción de dióxido de carbono. Este desequilibrio puede generar condiciones de hipoxia si los niveles de oxígeno disuelto no se controlan adecuadamente. En cambio, temperaturas moderadamente bajas contribuyen a reducir la actividad metabólica, disminuyendo la demanda de oxígeno y mejorando la estabilidad fisiológica de los peces durante el traslado. Por ello, la regulación térmica se considera una medida preventiva para optimizar la supervivencia en condiciones de confinamiento temporal (Wedemeyer, 1996).

Durante el transporte prolongado, las fluctuaciones de temperatura pueden ser un problema significativo, especialmente si los tanques no están adecuadamente aislados o si las condiciones ambientales externas cambian drásticamente. Los cambios bruscos de temperatura pueden inducir un choque térmico en los alevines, lo que lleva a un estrés severo e incluso a la muerte. En este contexto, se ha señalado que el uso de contenedores aislados térmicamente ayuda a mantener la temperatura constante, con aislamiento térmico que protege contra las fluctuaciones externas, lo que es especialmente importante en climas extremos donde las temperaturas pueden variar ampliamente durante el día y la noche (Wedemeyer, 1996). De igual manera, los sistemas que permiten ajustar la temperatura del agua dentro del tanque son esenciales para viajes prolongados, ya que en climas cálidos se puede añadir hielo para mantener el agua fresca, mientras que en climas fríos los calentadores pueden evitar que la temperatura caiga por debajo de niveles peligrosos (Ross L. G., 2008).

En climas cálidos, se pueden usar sistemas de refrigeración o la adición de hielo para mantener la temperatura del agua dentro de los rangos adecuados. Es importante evitar cambios bruscos de temperatura, ya que estos pueden ser tan perjudiciales como las condiciones de calor extremo (Jensen, 2005). Los contenedores con aislamiento térmico ayudan a mantener la temperatura estable durante el transporte, reduciendo la necesidad de ajustes constantes y minimizando el estrés en los peces.

#### Densidad de carga

La densidad de carga es otro factor decisivo en el transporte de peces vivos, pues influye de manera directa en los niveles de estrés y en la tasa de mortalidad. Cuando la densidad es elevada, el espacio disponible para el movimiento de los peces disminuye y se intensifica la competencia por recursos esenciales como el oxígeno disuelto, lo que incrementa el riesgo de mortalidad (Ross L. G., 2018). De acuerdo con Boyd et al. (2009), reducir la densidad de carga contribuye a mejorar el bienestar de los organismos y a mantener condiciones de transporte más estables. Sin embargo, esta práctica implica mayores costos logísticos, ya que obliga a trasladar una menor cantidad de peces por viaje. Estudios adicionales confirman que una densidad excesiva no solo eleva el consumo de oxígeno, sino que también aumenta la acumulación de amonio y  $\text{CO}_2$ , lo cual deteriora rápidamente la calidad del agua durante trayectos prolongados (Harmon, 2009).

Durante el transporte, los peces permanecen en espacios confinados y, por lo general, en densidades superiores a las habituales en sus estanques de cría, lo que provoca un incremento considerable en el consumo de oxígeno. A esta condición se suma el estrés derivado del manejo, la manipulación y el confinamiento, que eleva la tasa metabólica de los organismos y, en consecuencia, aumenta su demanda de oxígeno (Conte, 2004). Según Harmon (2009), esta combinación de factores convierte al oxígeno disuelto en uno de los parámetros más críticos a vigilar durante el transporte, ya que su disminución rápida puede conducir a episodios de hipoxia con efectos severos sobre la supervivencia.

La densidad de carga, entendida como la cantidad de peces por unidad de volumen de agua durante el transporte, constituye uno de los factores más determinantes para el éxito del traslado de alevines de tilapia. Este parámetro incide directamente en la supervivencia, el bienestar fisiológico y la calidad del producto final, ya que influye sobre el consumo de oxígeno, la acumulación de dióxido

de carbono y la generación de desechos metabólicos. Mantener una densidad de carga óptima permite garantizar niveles adecuados de oxígeno disuelto, reducir el estrés y minimizar el riesgo de lesiones físicas por fricción o contacto excesivo entre los peces.

Por el contrario, cuando la densidad no se gestiona adecuadamente, se incrementan los niveles de estrés y la competencia por los recursos disponibles, lo que puede derivar en hipoxia, desequilibrios osmóticos y un aumento significativo en la tasa de mortalidad. Además, una alta densidad durante el transporte puede generar deterioro de la calidad del agua, dificultando la recuperación fisiológica posterior al traslado. Por estas razones, la determinación y control de la densidad de carga se consideran aspectos esenciales dentro del manejo técnico del transporte de tilapias vivas, donde la eficiencia biológica y la sostenibilidad económica deben equilibrarse cuidadosamente para preservar la salud de los organismos y la rentabilidad del sistema productivo (Berka, 1986; Conte, 2004; Boyd et al., 2016).

La densidad de carga se define como el número de peces transportados por unidad de volumen de agua y constituye un parámetro clave en la planificación del transporte acuícola. Una densidad excesiva puede generar una competencia intensa por el oxígeno disponible, acelerar la acumulación de desechos metabólicos y aumentar el riesgo de lesiones físicas ocasionadas por el roce constante entre los individuos. Por el contrario, según Berka (1986) mantener densidades de carga dentro de rangos óptimos permite reducir el nivel de estrés y la mortalidad asociada al traslado. Investigaciones más recientes destacan que la densidad de carga no solo influye en el bienestar de los peces, sino que también determina la calidad final del producto, ya que niveles inadecuados pueden favorecer la aparición de defectos físicos y comprometer el valor comercial de la tilapia (Gomes L. C., 2015).

La planificación de la densidad de carga debe considerar la duración del transporte como un factor determinante. En recorridos cortos es posible utilizar densidades más elevadas, siempre que se disponga de sistemas de oxigenación adecuados y se mantenga un control riguroso de la calidad del agua. En contraste, para viajes prolongados resulta necesario disminuir la densidad de carga con el fin de asegurar un espacio suficiente para los peces y reducir la acumulación de amoníaco y otros desechos metabólicos que comprometen la supervivencia (Conte, 2004). Asimismo, la separación de los peces por tamaño y condición física representa una medida efectiva para reducir el estrés durante el transporte, ya que disminuye las interacciones competitivas y minimiza el riesgo de que los ejemplares de mayor tamaño causen daños a los más pequeños. De acuerdo con Ashley (2007), esta práctica no solo mejora el bienestar animal, sino que también incrementa la uniformidad del lote, lo que se traduce en mejores resultados productivos al finalizar el ciclo de cultivo.

Otro factor que influye de manera directa en los niveles de oxígeno disuelto durante el transporte es la densidad de carga. A medida que aumenta el número de peces en un volumen de agua determinado, la tasa de consumo de oxígeno se eleva de forma proporcional, lo que hace necesario optimizar este parámetro para evitar que los niveles caigan a rangos peligrosos (Anderson, 2018). La densidad de carga influye de manera directa en la disponibilidad de oxígeno disuelto y en la respuesta fisiológica de los alevines de tilapia durante el transporte (Barcellos, (2017)). A medida que aumenta la cantidad de peces por unidad de volumen, el consumo de oxígeno se incrementa exponencialmente, lo que puede generar hipoxia si el suministro de oxígeno no se ajusta

adecuadamente. Además, el confinamiento y la competencia por el espacio estimulan la liberación de cortisol, una hormona asociada con el estrés, que provoca alteraciones en el equilibrio osmótico, supresión inmunológica y reducción de la capacidad de recuperación post transporte (Martins M. L., 2018).

La falta de control sobre la densidad no solo deteriora la calidad del agua por la acumulación de dióxido de carbono y amoníaco, sino que también eleva la temperatura y disminuye el pH, generando condiciones adversas para la respiración y la homeostasis. Diversos estudios demuestran que el transporte con densidades superiores a los límites recomendados puede duplicar las tasas de mortalidad y afectar el crecimiento posterior de los peces, incluso cuando se mantienen en condiciones óptimas después del traslado (Abd El-Galil M. A.-S., 2024). En contraste, una densidad moderada, combinada con sistemas eficientes de oxigenación y recirculación, permite reducir significativamente el estrés y mejorar la supervivencia de los organismos (Gomes L. C.-L.-G., 2019).

Cuando la densidad de carga es alta, los niveles de oxígeno disuelto pueden disminuir rápidamente, lo que puede llevar a la hipoxia y, en casos extremos, a la asfixia y muerte de los peces. Esto es especialmente problemático durante el transporte prolongado, donde el suministro de oxígeno puede no ser suficiente para todos los peces si no se gestionan adecuadamente los niveles de oxígeno disuelto (Berka, 1986). Mantener una densidad de carga moderada y utilizar sistemas de oxigenación, como aireadores o cilindros de oxígeno comprimido, puede ayudar a asegurar que todos los peces reciban suficiente oxígeno durante el viaje. Además, mantener la temperatura del agua baja puede reducir la tasa metabólica de los peces, lo que disminuye su consumo de oxígeno.

Según Ashley (2007), otra consecuencia de la alta densidad de carga es el incremento del estrés entre los peces. El estrés en los alevines de tilapia se ve exacerbado por la competencia por recursos limitados, como el oxígeno, y por el contacto físico constante en un espacio reducido. El confinamiento a altas densidades también puede desencadenar comportamientos agresivos, lo que aumenta el riesgo de lesiones y afecta negativamente la recuperación post transporte.

El estrés sostenido induce la liberación de cortisol, una hormona que puede suprimir el sistema inmunológico de los peces, haciéndolos más susceptibles a enfermedades y reduciendo su capacidad para recuperarse después del transporte. Este aumento de estrés no solo impacta la supervivencia inmediata de los peces, sino que también puede tener efectos a largo plazo en su crecimiento y desarrollo.

## Oxígeno

La oxigenación del agua constituye una de las variables más críticas durante el transporte de tilapia viva, ya que en sistemas cerrados y de volumen limitado la disponibilidad de oxígeno disuelto puede disminuir rápidamente debido al confinamiento, la densidad de carga y el incremento del metabolismo asociado al estrés. En este contexto, se ha señalado que concentraciones de oxígeno disuelto iguales o superiores a 5 mg/L son necesarias para asegurar una respiración adecuada y reducir el riesgo de estrés fisiológico durante el traslado (Boyd et al., 2009).

A diferencia de los sistemas de cultivo en estanques, durante el transporte la oxigenación debe garantizarse mediante métodos que permitan mantener niveles estables de oxígeno en periodos prolongados sin renovación del agua. Entre las estrategias más utilizadas se encuentran la inyección de oxígeno puro mediante cilindros acoplados a difusores y, en menor medida, el uso de sistemas de aireación mecánica, los cuales deben ser cuidadosamente dimensionados para evitar deficiencias de oxígeno en condiciones de alta densidad de carga (Timmons & Ebeling, 2018). La elección del sistema de oxigenación depende del tipo de contenedor, la duración del transporte y la biomasa de peces transportados.

Diversos estudios han demostrado que una oxigenación insuficiente durante el transporte incrementa la mortalidad y favorece la aparición de respuestas fisiológicas adversas, como hiperventilación, pérdida del equilibrio y mayor susceptibilidad a enfermedades posteriores al traslado (Harmon, 2009). No obstante, también se ha documentado que la hiperoxia prolongada, particularmente en sistemas cerrados de transporte, puede inducir estrés oxidativo y generar daños en los tejidos, por lo que el control adecuado de este parámetro resulta indispensable para mantener el bienestar de los peces durante el proceso de traslado (Sampaio & Freire, 2016).

En los sistemas de transporte más avanzados se emplean tecnologías de monitoreo en tiempo real que permiten ajustar de manera precisa la concentración de oxígeno disuelto de acuerdo con la demanda metabólica de los peces, lo que incrementa la eficiencia del proceso y reduce riesgos asociados a la hipoxia o la hiperoxia (Colt J. S., 2017). Sin embargo, como destacan Martins et al. (2018), gran parte de las instalaciones acuícolas aún carece de este tipo de herramientas, lo que ocasiona que el control del oxígeno se realice de forma manual y, en consecuencia, se presenten fluctuaciones potencialmente peligrosas en la calidad del agua. Este tipo de variaciones, incluso de corta duración, pueden afectar la fisiología de los organismos y traducirse en mayores niveles de estrés y mortalidad, lo que subraya la necesidad de promover la adopción de sistemas automatizados y accesibles para la acuicultura en pequeña y mediana escala.

La oxigenación del agua es uno de los aspectos más críticos a considerar durante el transporte de alevines de tilapia. Los niveles adecuados de oxígeno disuelto en el agua son esenciales para garantizar la supervivencia, la salud y el bienestar de los peces durante el traslado. La insuficiencia de oxígeno puede llevar rápidamente a condiciones de estrés severo e incluso a la mortalidad masiva de los peces, afectando significativamente la viabilidad económica del proceso de transporte.

El oxígeno disuelto se define como la cantidad de oxígeno presente en el agua en forma de moléculas gaseosas, constituyendo uno de los parámetros más relevantes para la supervivencia de los peces en sistemas de transporte y cultivo. A diferencia de los mamíferos, que obtienen oxígeno directamente del aire, los peces lo extraen del agua a través de sus branquias, un proceso que depende de manera directa de la concentración de oxígeno disuelto en el medio acuático. Cuando los niveles de oxígeno descienden por debajo de un umbral crítico, estimado en alrededor de 5 mg/L en el caso de la tilapia, los organismos comienzan a manifestar signos de estrés respiratorio que, de no corregirse oportunamente, pueden derivar en mortalidad (Ross L. G., 2018)). De acuerdo con Boyd y McNevin (2009), mantener concentraciones adecuadas de oxígeno no solo previene episodios de hipoxia, sino que también favorece un crecimiento estable y una mayor

resistencia a enfermedades, lo que resalta su papel fundamental en la acuicultura intensiva y en el transporte prolongado de peces.

De acuerdo con Colt (2017), el oxígeno disuelto constituye un elemento esencial para la respiración y el metabolismo de los peces. En el caso de los alevines de tilapia, este gas disuelto en el agua es indispensable para el intercambio gaseoso que se produce a través de las branquias. Cuando los niveles de oxígeno disuelto descienden por debajo de los umbrales críticos, los peces pueden sufrir hipoxia, una condición que provoca asfixia y puede conducir rápidamente a la mortalidad si no se corrige oportunamente. Durante el transporte, la concentración de oxígeno tiende a disminuir como consecuencia del confinamiento, del consumo metabólico de los organismos y de la acumulación de residuos orgánicos. Por esta razón, mantener un suministro constante de oxígeno y monitorear sus niveles de forma continua resulta fundamental para garantizar la supervivencia y el bienestar de los peces (Boyd C. E., 2009).

Cuando la concentración de oxígeno disuelto en el agua desciende por debajo de 5 mg/L, los alevines de tilapia pueden entrar en un estado de hipoxia, lo que afecta de manera directa sus funciones metabólicas y provoca un incremento significativo en los niveles de estrés fisiológico. Durante estos episodios, los peces reducen su actividad, muestran comportamientos de búsqueda desesperada de oxígeno en la superficie y presentan un ritmo respiratorio acelerado. Si la hipoxia se mantiene por periodos prolongados, los organismos entran en un estado letárgico que puede culminar en la muerte por asfixia (Ruiz, 2024). Estudios más recientes confirman que la exposición repetida a niveles bajos de oxígeno también deteriora la eficiencia alimenticia y el crecimiento, además de comprometer el sistema inmunológico de los peces (Wang, 2023).

Durante el transporte, es esencial utilizar sistemas de oxigenación que mantengan niveles estables de oxígeno en el agua. Los aireadores y los cilindros de oxígeno comprimido son herramientas comunes que ayudan a mantener el oxígeno disuelto por encima del umbral crítico para evitar situaciones de hipoxia (Berka, 1986). Los estudios han demostrado que mantener niveles óptimos de oxígeno no solo reduce la mortalidad, sino que también mejora la recuperación post transporte, permitiendo que los peces vuelvan a alimentarse y crezcan rápidamente (Conte, 2004).

Los aireadores son dispositivos que se utilizan para aumentar la concentración de oxígeno en el agua mediante la agitación o mezcla del agua con aire atmosférico. Se pueden instalar en los tanques de transporte para mantener un flujo constante de aire en el agua, ayudando a evitar que los niveles de oxígeno caigan por debajo de los niveles críticos (Lucas, 2012). Sin embargo, los aireadores son más efectivos para distancias cortas y pueden no ser suficientes para viajes prolongados. Los sistemas de oxigenación mediante inyección de oxígeno puro son otra opción eficaz. Estos sistemas permiten introducir directamente oxígeno comprimido en el agua, aumentando de forma rápida y eficiente los niveles de oxígeno disuelto. Esta técnica es particularmente útil para transportes de larga distancia, donde es crucial mantener el oxígeno a niveles elevados durante periodos prolongados (Anderson, 2018).

Los dispositivos de oxigenación continua son fundamentales para garantizar que los niveles de oxígeno disuelto se mantengan estables durante todo el proceso de transporte. Este suministro constante resulta clave para minimizar el riesgo de hipoxia, considerada uno de los principales factores de estrés y mortalidad en peces transportados (Wedemeyer, 1996).

## Tiempo de viaje

La distancia para recorrer constituye uno de los factores más relevantes en la selección del método de transporte de tilapias, ya que determina tanto la viabilidad técnica como los costos operativos asociados. Para recorridos cortos, de pocas horas de duración, el transporte en seco puede considerarse una alternativa práctica y económica. En este método, los peces son colocados en contenedores que conservan una elevada humedad y mantienen condiciones de temperatura controladas, lo cual disminuye el riesgo de deshidratación y, al mismo tiempo, reduce los gastos derivados del peso adicional del agua (FAO, 2024). Sin embargo, como advierte El-Sayed (2020), aunque el transporte en seco ofrece ventajas logísticas en distancias reducidas, su aplicación requiere precauciones adicionales para evitar lesiones físicas y estrés excesivo, ya que los peces se encuentran fuera de un medio acuático natural. Cuando se trata de distancias medianas o largas, el transporte en vivo constituye la alternativa más segura y recomendable. Esto se debe a que los sistemas de oxigenación y regulación de la temperatura permiten mantener a los peces en un estado de metabolismo reducido, lo cual disminuye la producción de desechos metabólicos y reduce el riesgo de mortalidad (Colt J. T., 2017). Asimismo, el transporte en vivo ofrece la ventaja de permitir una respuesta inmediata ante variaciones en las condiciones ambientales, ya que los sistemas de monitoreo en tiempo real alertan a los operadores para realizar los ajustes necesarios (Precision., 2022).

La duración del transporte constituye otro factor esencial que debe considerarse con especial cuidado en la gestión acuícola. En recorridos prolongados, los peces permanecen expuestos a condiciones que, de no ser controladas de manera adecuada, pueden desencadenar altos niveles de estrés e incluso provocar mortalidad. En este contexto, el transporte en vivo se consolida como la única alternativa viable, ya que posibilita el control continuo de parámetros críticos como el oxígeno disuelto, la temperatura y el pH del agua (Colt J. S., 2017).

Durante los transportes de larga duración, los peces generan cantidades significativas de dióxido de carbono y amoníaco como subproductos de su metabolismo, lo que puede deteriorar rápidamente la calidad del agua en sistemas cerrados y aumentar el riesgo de hipoxia, estrés fisiológico y aparición de enfermedades (Martins et al., 2018). En este contexto, resulta indispensable la incorporación de sistemas integrados que combinen aireación u oxigenación, control térmico y, cuando es viable, mecanismos básicos de filtración, con el fin de mantener parámetros fisicoquímicos estables y adecuados para la supervivencia de los organismos durante el traslado.

Asimismo, la implementación de tecnologías de monitoreo en tiempo real, mediante sensores capaces de registrar de forma continua variables como la temperatura y la concentración de oxígeno disuelto, permite a los operadores realizar ajustes inmediatos durante el transporte. Esta capacidad de respuesta contribuye a reducir el riesgo de que los peces alcancen condiciones críticas, fortaleciendo la seguridad del proceso y la estabilidad del entorno acuático en recorridos prolongados (Xylem, 2020).

Durante el transporte, los alevines de tilapia dependen del oxígeno disuelto en el agua para mantener su metabolismo y realizar el intercambio gaseoso a través de las branquias. A medida que transcurre el tiempo, el consumo metabólico de oxígeno por parte de los peces, sumado a la

limitada aireación del medio, puede ocasionar una disminución progresiva de los niveles de oxígeno disuelto, lo que genera condiciones de hipoxia. Esta situación resulta especialmente crítica en transportes de larga duración, en los que la tasa de consumo de oxígeno no se reduce de forma proporcional al tiempo transcurrido, provocando que los peces enfrenten estrés respiratorio, pérdida de equilibrio y, finalmente, asfixia o mortalidad si no se restablece el suministro de oxígeno (Ross L. G., 2008).

Diversos estudios recientes destacan que el riesgo de hipoxia se incrementa de manera exponencial en función de la temperatura y la densidad de carga, ya que ambos factores aceleran la tasa metabólica y, por ende, la demanda de oxígeno. Investigaciones experimentales con juveniles de tilapia han demostrado que el mantenimiento de niveles de oxígeno disuelto por encima de 5 mg/L es indispensable para evitar desequilibrios fisiológicos y garantizar la supervivencia durante el transporte (Boyd, 2012).

Durante el transporte, los alevines consumen oxígeno disuelto en el agua para la respiración. En tiempos prolongados, sin una reposición constante, los niveles de oxígeno pueden disminuir significativamente, lo que lleva a condiciones de hipoxia. Esto es particularmente preocupante en transportes de larga duración, ya que la tasa de consumo de oxígeno por parte de los peces no se reduce, y una caída en los niveles de oxígeno disuelto puede provocar asfixia y mortalidad (Ross L. G., 2008).

En tiempos prolongados, los sistemas de oxigenación que inyectan oxígeno puro en el agua son esenciales para mantener los niveles de oxígeno disuelto adecuados durante largos periodos. Los cilindros de oxígeno comprimido conectados a difusores aseguran una liberación constante y controlada de oxígeno para evitar la hipoxia (Jensen, 2005). Mantener la temperatura del agua baja puede ayudar a reducir la tasa metabólica de los peces, lo que disminuye su consumo de oxígeno y ayuda a prolongar la duración del transporte sin necesidad de recargar el oxígeno frecuentemente (Timmons M. B., 2013).

A medida que los alevines respiran y excretan, liberan amoníaco y dióxido de carbono como subproductos metabólicos. Durante los tiempos prolongados de transporte, la acumulación de amoníaco en el agua puede alcanzar niveles tóxicos, dañando las branquias de los peces y dificultando su capacidad de respiración. El amoníaco es más tóxico a niveles elevados de pH, lo que aumenta el riesgo para los peces durante el transporte prolongado (Boyd C. E., 2017). En este contexto, se ha señalado que existen productos químicos que se pueden añadir al agua para neutralizar el amoníaco, convirtiéndolo en compuestos menos tóxicos, lo que puede ayudar a mantener la calidad del agua durante largos periodos de transporte (Conte, 2004). En transportes extremadamente largos, se pueden emplear filtros de agua que ayuden a remover el amoníaco y otros desechos. Además, el recambio parcial de agua durante el trayecto puede ser una estrategia para diluir los compuestos tóxicos y asegurar un ambiente más limpio para los alevines (Colt J. &, 1991).

En relación con la planificación, es esencial planificar las rutas de transporte para minimizar el tiempo que los peces pasan en tránsito. Esto implica elegir rutas más cortas, evitar tiempos de espera prolongados y programar las paradas estratégicamente para hacer recambios de agua o ajustes si es necesario (Jensen, 2005).

## Estrés

El estrés es una de las principales causas de mortalidad y deterioro en la calidad del producto durante el transporte de alevines de tilapia. Durante el proceso de traslado, los peces son sometidos a diversas condiciones adversas, como la manipulación física, la alta densidad de carga, fluctuaciones en la temperatura y niveles variables de oxígeno, que pueden provocar un estado de estrés agudo. Este estado no solo afecta el bienestar inmediato de los peces, sino que también puede tener efectos duraderos en su salud, crecimiento y capacidad de resistencia a enfermedades. Para mitigar estos efectos, es crucial implementar técnicas específicas que ayuden a reducir el estrés durante el transporte.

El uso de sedantes constituye una de las estrategias más empleadas para mitigar el estrés en peces durante el transporte. Estos compuestos actúan reduciendo la actividad metabólica de los organismos, lo que conlleva a una menor demanda de oxígeno y a una disminución en la producción de desechos metabólicos. Al mantener a los peces en un estado de calma relativa, se reduce la probabilidad de que sufran lesiones físicas y se facilita la manipulación tanto en la fase de carga como en la descarga (Ross L. G., 2008). De acuerdo con Casanova et al. (2022), la aplicación de sedantes naturales, como el aceite de clavo, ha demostrado ser eficaz en tilapias, ya que reduce significativamente las respuestas fisiológicas de estrés sin dejar residuos nocivos en el organismo, siempre que se utilicen dosis seguras y ajustadas a protocolos técnicos.

El manejo repetido y brusco puede inducir un estado de estrés severo en los peces, que se manifiesta en un aumento de la producción de cortisol, una hormona del estrés. Para reducir estos efectos, se deben adoptar prácticas que minimicen el contacto físico con los peces durante el proceso de transporte (Ashley, 2007).

Los tiempos prolongados de transporte someten a los alevines a un estrés sostenido que puede afectar su salud de manera significativa. El estrés prolongado puede llevar a la supresión del sistema inmunológico, haciéndolos más susceptibles a infecciones y enfermedades. Además, la exposición continua a condiciones subóptimas puede resultar en agotamiento y mortalidad a largo plazo (Ashley, 2007). En el caso de viajes largos, el uso de sedantes suaves puede ayudar a reducir el estrés en los peces al disminuir su actividad metabólica y física. Esto no solo mejora su bienestar durante el transporte, sino que también reduce la demanda de oxígeno y la producción de desechos (Gomes et al., 2011).

## 2.3 Diseño de Contenedores de Transporte

El diseño de los contenedores de transporte constituye un elemento fundamental para reducir el estrés y los daños físicos en los alevines de tilapia durante su traslado. Los tanques especialmente concebidos para minimizar el contacto directo entre los peces contribuyen a preservar su integridad fisiológica y a mejorar los índices de supervivencia. Algunos sistemas modernos incorporan divisores internos o compartimentos modulares que permiten distribuir de manera más homogénea a los peces, reduciendo la fricción y evitando abrasiones, desprendimiento de escamas o daño en las aletas, lo cual ha sido documentado en investigaciones sobre lesiones mecánicas en peces durante el manejo y el transporte (Sveen, 2020). Asimismo, los materiales utilizados en la

fabricación de los contenedores han evolucionado hacia polímeros de alta densidad y superficies lisas con esquinas redondeadas, que presentan una menor agresividad y permiten una limpieza eficiente entre viajes, favoreciendo la bioseguridad del sistema (Knott, 2019).

Para optimizar la calidad del agua durante el transporte de tilapias se emplean contenedores de nueva generación que integran sistemas de micro difusión de oxígeno, recirculación parcial del agua y monitoreo automatizado mediante sensores que registran de forma continua variables críticas como la temperatura, el oxígeno disuelto y el pH. Estas innovaciones permiten ajustes en tiempo real de las condiciones internas del tanque, compensando los cambios metabólicos del lote y reduciendo la acumulación de compuestos tóxicos. Un ejemplo de ello es el sistema “Fish on the Move” de Frontier Precision, que comercializa sensores inalámbricos instalados en tanques de transporte para monitorizar temperatura y oxígeno disuelto durante el trayecto (Precision., 2022). Estudios manejan también que sistemas inteligentes de control y monitoreo reducen la incidencia de lesiones cutáneas y mejoran las tasas de supervivencia en juveniles de tilapia cuando se comparan con equipos tradicionales (Yousefi, 2022).

La densidad de carga representa un factor decisivo que influye tanto en la fisiología de los peces como en la eficiencia logística del transporte. En condiciones de alta densidad, el número de organismos por unidad de volumen de agua incrementa la eficiencia operativa al permitir trasladar un mayor número de peces en un solo viaje, lo que se traduce en una disminución de los costos de combustible y del tiempo de operación. No obstante, este incremento en la densidad también intensifica la competencia por el oxígeno disuelto, eleva la concentración de dióxido de carbono y amoníaco, y aumenta el riesgo de estrés fisiológico y de lesiones físicas por contacto continuo (Gomes L. C.-L.-G., 2019).

Estudios recientes han evidenciado que densidades superiores a 50 gramos por litro en tilapia juvenil pueden elevar significativamente las tasas de mortalidad cuando no se emplean sistemas de oxigenación adecuados ni un monitoreo constante de las condiciones del agua. Estas investigaciones subrayan la importancia de establecer límites precisos de carga en función del tamaño del pez, la temperatura del agua y la duración del transporte, a fin de mantener la homeostasis fisiológica y reducir los efectos del estrés agudo (Abd El-Galil M. A.-S., 2024)

Por el contrario, los sistemas de baja densidad presentan ventajas en términos de bienestar animal y calidad del producto final, pues los peces experimentan menos estrés, mantienen niveles óptimos de oxígeno y logran una recuperación más rápida tras el transporte. No obstante, este tipo de manejo reduce la cantidad de peces por viaje y puede elevar los costos logísticos, lo que lo hace menos viable en operaciones de gran escala. Diversos estudios sugieren que la densidad óptima de transporte debe ajustarse al tamaño de los peces, la duración del trayecto y las condiciones ambientales. En el caso de la tilapia juvenil, las densidades recomendadas oscilan entre 20 y 40 gramos por litro bajo condiciones controladas, y pueden alcanzar hasta 60 gramos por litro cuando se utilizan sistemas de recirculación y control automatizado (Abd El-Galil M. A.-S., 2024).

El diseño del contenedor y la densidad de carga deben abordarse de manera conjunta dentro de una estrategia integral de transporte que combine principios de ingeniería, biología y gestión tecnológica. Un contenedor diseñado con criterios hidrodinámicos y materiales adecuados reduce el estrés físico y facilita el mantenimiento de parámetros de agua estables, mientras que una densidad equilibrada asegura una demanda de oxígeno compatible con la capacidad del sistema. La integración de sensores inteligentes y mecanismos de control automático permite responder

dinámicamente a las necesidades fisiológicas de los peces durante el transporte. En conjunto, estos elementos representan la base de un sistema de transporte acuícola moderno, sustentable y orientado a la reducción de pérdidas y mejora del bienestar animal (2024).

## 2.4 Despliegue de la Función de Calidad (QFD)

De acuerdo con Bouchereau, (2000) la implementación de funciones de calidad (QFD) es una herramienta de gestión que proporciona un proceso conectivo visual para ayudar a los equipos a centrarse en las necesidades de los clientes durante todo el ciclo de desarrollo de un producto o proceso. Proporciona los medios para traducir las necesidades del cliente en requisitos técnicos apropiados para cada etapa del ciclo de vida del desarrollo de un producto/proceso. Ayuda a desarrollar productos más orientados al cliente y de mayor calidad (Govers, 1996).

El análisis de funciones permite identificar las funciones esenciales que debe cumplir un sistema, producto o dispositivo, independientemente de los componentes físicos utilizados. Este método ayuda a definir los límites del problema mediante un conjunto coherente de funciones. En esta investigación, se aplicó el análisis de funciones FAST como paso previo a la creación del segundo tanque de transporte, en respuesta a las especificaciones del cliente para reducir la mortalidad de tilapias durante el transporte y monitorear sus condiciones. Posteriormente, se implementó el Despliegue de la Función de Calidad (QFD) para evaluar y priorizar los requerimientos del cliente en el diseño experimental (Cross, 2022).

## 2.5 Metodología de Cross

Conforme a la metodología de diseño de Nigel Cross, el desarrollo debe avanzar desde una definición precisa del problema y la traducción de las necesidades en requisitos de desempeño, hasta la generación/selección de conceptos, prototipado y pruebas. Bajo este enfoque, herramientas como el análisis funcional, la matriz morfológica y la especificación de desempeño ayudan a convertir la “voz del cliente” en criterios cuantificables para el sistema de transporte (Cross, 2022). En sintonía, el Despliegue de la Función de Calidad (QFD) funge como puente entre necesidades del usuario y requisitos técnicos, priorizando variables críticas del proceso. La literatura lo describe como un proceso conectivo visual que guía la traducción de necesidades a especificaciones a lo largo del ciclo de vida, y señala su integración con métodos estadísticos para robustecer decisiones de diseño (Bouchereau, 2000) En cuanto a evidencia empírica cercana a tu caso, Onyia et al. (2018) evaluaron cuatro contenedores de transporte de alevines de tilapia (cubo de plástico, bidón/Jerry can abierto, comedero plástico y bolsa de polietileno) y reportaron supervivencias del 95% en cubo y jerry can, y 93% en comedero y bolsa, subrayando la importancia del diseño del contenedor y condiciones externas en la supervivencia.

## 2.6 Diseño de experimentos

El diseño de experimentos (DoE, por sus siglas en inglés) es una herramienta estadística utilizada para planificar, ejecutar, analizar e interpretar pruebas en las que se manipulan de manera controlada una o más variables independientes, con el objetivo de observar su efecto sobre una o varias variables de respuesta (Montgomery, 2019). Esta metodología permite identificar relaciones

causa-efecto entre los factores que intervienen en un proceso, lo que resulta fundamental en investigaciones científicas, desarrollo tecnológico y mejora de procesos industriales o productivos.

Según Onyia (2018) estudiaron la supervivencia de los alevines de tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*), se llevó a cabo un ensayo en el que se sembraron alevines vivos a una densidad de 2 peces por litro. El estudio incluyó el uso de cuatro tipos de contenedores de transporte: cubos de plástico, bidones abiertos, comederos de plástico y bolsas de polietileno. Durante el experimento, se evaluaron los parámetros físicoquímicos del agua en los diferentes contenedores antes y después del transporte para analizar los cambios en la calidad del agua. Entre los parámetros medidos se incluyeron la temperatura, el oxígeno disuelto, la concentración de iones de hidrógeno (pH) y el amoníaco, factores que influyen directamente en la supervivencia de los peces. Los resultados mostraron que la mayor tasa de supervivencia (95%) se obtuvo en los contenedores tipo cubo de plástico y bidón abierto, mientras que la menor supervivencia (93%) se observó en los comederos de plástico y bolsas de polietileno. Estas diferencias podrían atribuirse a factores como el diseño y tamaño de los contenedores, la ventilación y las condiciones externas, incluyendo el clima y la duración del transporte.

Este estudio subraya la importancia de seleccionar adecuadamente los sistemas de transporte para maximizar la supervivencia de los alevines, proporcionando información valiosa para mejorar las prácticas en la acuicultura y garantizar un manejo más eficiente de los recursos. Un estudio realizado en Irán Yousefi (2022) sobre las condiciones del transporte de tilapia del Nilo, dio como consecuencia que la adición de sal al agua tiene beneficios como presentar menor grado de estrés, menor daño hepático y un mejor equilibrio hidro mineral, los resultados obtenidos indicaron que tener 4 gramos de sal por cada litro de agua es beneficioso para la salud de los peces, estos resultados se validaron estadísticamente mediante ANOVA unidireccional y prueba de Tukey, con las variables de oxígeno disuelto ( $P=0.0130$ ) y un aumento del amoníaco en el agua ( $P=0.0110$ ) se observaron disminuciones significativas en todos los tratamientos aunque no se observaron efectos significativos en dichos niveles debido a la salinidad del agua. por otra parte, se indicó que no hubo diferencias significativas en el pH del agua después del transporte ( $P=0.7970$ ).

Posterior al trabajo de Yousefi (2022) se realizó otra investigación donde Abd El-Galil (2024) donde también se analizó el efecto de la sal sobre el estrés de los ejemplares de *Oreochromis niloticus*. Al ser transportados en agua sin sal, los resultados obtenidos mostraron mayores efectos de estrés de transporte debido al aumento del nivel de cortisol, la regulación positiva de los genes *Muc2*, *IL-1B* y *TNF*, así como la regulación negativa de  $\beta$  D-1 y 2. Por otra parte, cuando se realizó el transporte con agua conteniendo sal, el efecto se observó a través de mejoras en la fisiología de los peces y la salud de las mucosas, así como una mejor barrera mucosa de la piel y la inmunidad; estas mejoras fueron más evidentes en el grupo de 5 gramos de sal por litro de agua, que en el grupo de 10 gramos por litro de agua. Por lo tanto, el estudio recomendó utilizar 5 gramos de sal por litro durante el transporte de *O. niloticus*, ya que es más beneficioso y eficaz para reducir el estrés del transporte.

Un diseño experimental adecuado considera diversos elementos esenciales. Entre los más importantes se encuentran los factores o variables independientes, que son aquellos que se modifican deliberadamente; las variables de respuesta, que son los resultados medibles del experimento; y la aleatorización, que busca eliminar sesgos en la asignación de tratamientos (Gutiérrez, 2012).

Otros elementos relevantes son la replicación, que permite estimar la variabilidad experimental y aumentar la precisión de los resultados; el bloqueo, que consiste en agrupar unidades experimentales similares para controlar la variabilidad; y la interacción entre factores, que ocurre cuando el efecto de un factor depende del nivel de otro (Montgomery, 2019). Estos aspectos son fundamentales para garantizar la validez y confiabilidad de los resultados obtenidos

### 2.6.1 Factores importantes en el diseño de experimentos

El diseño de experimentos contempla una serie de factores esenciales que permiten garantizar la validez de los resultados obtenidos en un estudio. Entre ellos destacan las variables independientes o factores, las cuales son manipuladas deliberadamente por el investigador con el fin de observar su efecto sobre una variable de interés. Cada factor puede presentar diferentes niveles o categorías que representan sus posibles estados o condiciones (Halweb, 2024).

Por otro lado, la variable dependiente (variable de respuesta) representa el resultado que se mide y que se espera sea influido por los cambios en las variables independientes. Para garantizar que la relación entre las variables sea válida, es indispensable controlar las variables externas o de confusión. Este control implica mantener constantes aquellos factores que podrían afectar la variable dependiente, de modo que cualquier diferencia observada pueda atribuirse exclusivamente a los factores en estudio (Library, 2025).

La aleatorización constituye un principio esencial dentro del diseño experimental, ya que garantiza que los tratamientos sean asignados de manera imparcial a las unidades experimentales, reduciendo la influencia de factores externos y posibles sesgos. Este proceso permite que los resultados sean más representativos y aplicables a condiciones reales, fortaleciendo la validez interna del estudio (Montgomery, 2019). Del mismo modo, la replicación, entendida como la repetición controlada de las condiciones experimentales, permite estimar la variabilidad natural del sistema y mejorar la precisión de las conclusiones, proporcionando una base estadística más sólida para la interpretación de los resultados (Gutiérrez, 2012).

Además, el uso del bloqueo permite agrupar las unidades experimentales que comparten características similares, con el objetivo de reducir la variabilidad y mejorar la precisión en la estimación de los efectos de los factores (Montgomery, 2019). Finalmente, se debe considerar la interacción entre factores, entendida como la influencia que un factor puede tener sobre el efecto de otro, lo cual subraya la necesidad de estudiar múltiples variables simultáneamente para entender el comportamiento del sistema de forma integral.

El diseño experimental tiene aplicaciones en diversas disciplinas, especialmente en la industria, donde se emplea para mejorar procesos, reducir costos y optimizar la calidad de productos y servicios ((UAEH), 2024). Al aplicar un diseño experimental adecuado, es posible obtener información precisa sobre cómo diferentes factores afectan una variable de interés, lo que facilita la toma de decisiones estratégicas y la mejora continua en sistemas productivos (Halweb, 2024)

### 2.6.2 Diseño Factorial

El diseño factorial es una metodología en el diseño de experimentos que permite estudiar simultáneamente los efectos de dos o más factores sobre una variable de respuesta. En este enfoque, se consideran todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores

involucrados, lo que facilita la identificación de efectos principales e interacciones entre factores (Montgomery, 2019).

Un diseño factorial completo con  $k$  factores, cada uno con dos niveles, se denota como un diseño  $2^k$ . Este tipo de diseño es especialmente útil cuando se busca eficiencia en la experimentación, ya que permite obtener información detallada sobre los efectos individuales y combinados de los factores con un número reducido de ensayos (Gutiérrez, 2012).

#### Ventajas del Diseño Factorial:

**Eficiencia:** Permite evaluar múltiples factores y sus interacciones en un solo experimento, optimizando recursos y tiempo.

**Detección de Interacciones:** Facilita la identificación de cómo la combinación de diferentes factores influye en la variable de respuesta, lo que no sería posible con estudios univariados. (Montgomery, 2019).

**Generalización de Resultados:** Al considerar diversas combinaciones de factores, los hallazgos pueden ser más representativos y aplicables a diferentes condiciones operativas.

Es esencial seleccionar adecuadamente los niveles de cada factor y asegurar la aleatorización y replicación de los ensayos para garantizar la validez y confiabilidad de los resultados. Además, cuando el número de factores es elevado, el número de combinaciones posibles aumenta exponencialmente, lo que puede hacer inviable la realización de un diseño factorial completo. En tales casos, se pueden emplear diseños factoriales fraccionados para reducir el número de corridas experimentales necesarias (Gutiérrez, 2012).

### 2.6.3 Método Taguchi

El Método Taguchi, desarrollado por el ingeniero japonés Genichi Taguchi, constituye una de las metodologías más relevantes dentro del diseño de experimentos orientado a la mejora continua de la calidad. Su principio fundamental radica en la reducción de la variabilidad y en la optimización del rendimiento de los procesos productivos, mediante la identificación de los factores que influyen significativamente en la calidad del producto final. Este enfoque introduce el concepto de diseño robusto, cuyo objetivo es desarrollar productos y procesos que mantengan un desempeño estable frente a las fuentes de variación externas o “factores de ruido” (Roy, 2001). De acuerdo con Taguchi (1986), la calidad no debe evaluarse únicamente al final del proceso, sino diseñarse desde su origen, controlando los parámetros críticos que aseguran la confiabilidad y consistencia del sistema.

#### Principios Fundamentales del Método Taguchi:

**Diseño Robusto:** Consiste en identificar las condiciones óptimas de los factores de control que minimizan la variabilidad en la respuesta, haciendo que el sistema sea menos sensible a las perturbaciones externas (Taguchi, 1986).

Uso de Arreglos Ortogonales: El método emplea matrices ortogonales para estructurar los experimentos, permitiendo evaluar múltiples factores con un número reducido de ensayos. Estas matrices facilitan la estimación de efectos principales y algunas interacciones de manera eficiente (Phadke, 1986).

Relación Señal-Ruido (S/N): Taguchi propuso el uso de la relación S/N como una métrica para evaluar el rendimiento del sistema, donde se busca maximizar esta relación para obtener un producto o proceso más robusto y consistente (Roy, 2001).

Aplicaciones y Beneficios: El Método Taguchi ha sido ampliamente aplicado en diversas industrias para mejorar la calidad y confiabilidad de productos y procesos. Su enfoque sistemático permite identificar condiciones óptimas de operación y reducir costos asociados a la variabilidad y defectos. Sin embargo, es importante considerar que este método ha recibido críticas, especialmente en lo que respecta a la simplificación de interacciones entre factores y la interpretación de resultados (Montgomery, 2019).

## 2.7 Ciclo de Deming

El ciclo de Deming, también denominado ciclo PDCA (Planificar, Hacer, Verificar y Actuar), es una de las metodologías más influyentes en la gestión de la calidad y en la mejora continua de los procesos productivos. Este enfoque fue desarrollado por W. Edwards Deming, quien lo perfeccionó a partir de los fundamentos propuestos inicialmente por Walter A. Shewhart, y se basa en la premisa de que todo proceso puede ser mejorado de manera sistemática a través de una secuencia iterativa de planificación, ejecución, evaluación y corrección. La aplicación del ciclo PDCA permite identificar oportunidades de mejora, implementar cambios controlados y evaluar su efectividad antes de estandarizarlos, fomentando una cultura organizacional orientada al aprendizaje y a la calidad total (Deming, 1986).

El ciclo PDCA se estructura en cuatro fases interdependientes que permiten una gestión sistemática y continua de la calidad. En la primera etapa, Plan (Planificar), se identifican los problemas o áreas de oportunidad, se establecen objetivos específicos de mejora y se diseñan las estrategias necesarias para alcanzarlos. La fase siguiente, Do (Hacer), consiste en implementar las acciones planificadas a pequeña escala, con el propósito de probar su efectividad y recopilar información inicial. En la tercera fase, Check (Verificar), se evalúan los resultados obtenidos comparándolos con los objetivos definidos, utilizando indicadores cuantitativos y cualitativos de desempeño. Finalmente, la etapa Actuar (Actuar) implica estandarizar las mejoras cuando los resultados son satisfactorios o realizar los ajustes pertinentes cuando los objetivos no se han cumplido, reiniciando el ciclo de mejora continua (Moen, 2010). El ciclo Ciclo PDCA (Planificar-Hacer-Verificar-Actuar) es ampliamente aplicable en diversos contextos, incluida la acuicultura, donde ofrece un marco para estandarizar protocolos de manejo, optimizar las condiciones de transporte y asegurar la calidad del producto final (Jagusiak-Kocik, 2017). Al emplearse de forma iterativa, este enfoque garantiza que los procesos no permanezcan estáticos, sino que evolucionen de acuerdo con las necesidades del sistema productivo y los cambios del entorno (Taufik, 2020).

# Capítulo 3 Desarrollo

## 3.1 Metodología

En este capítulo se describe el desarrollo de la metodología empleada para alcanzar los objetivos planteados en esta investigación, centrada en la reducción de la mortalidad durante el transporte de tilapia (*Oreochromis niloticus*). La metodología fue diseñada para generar datos confiables que permitan optimizar las condiciones del transporte y fortalecer la cadena de valor acuícola en la Unidad de Producción Acuícola (UPA) “Ingeniería Agropecuaria del Papaloapan S.P.R. de R.L.”. El enfoque aplicado considera herramientas de mejora continua, control de calidad y diseño experimental, orientadas a garantizar la eficiencia del sistema de traslado y el bienestar de los organismos durante el proceso logístico.

Como metodología para resolver la situación problema se escogió el ciclo de Deming, que se desarrolla a continuación.

### 3.1.1 Etapa Planear

Se habló con el dueño de la granja, a quien le interesa conocer cuál de los dos tanques de transporte es mejor. A través de diferentes reuniones se determinaron algunos criterios y con base en la metodología de Cross que utiliza entre otros métodos, el diagrama de funciones (FAST) y el despliegue de la función de calidad (QFD), se obtuvo por una parte el tipo de diseño de experimentos a utilizar y por la otra las variables a considerar.

#### Aplicación de la Metodología FAST

Paso 1: Se expresó la función principal en términos de la conversión de entradas y salidas. El primer paso consistió en definir la función global del sistema de transporte de tilapias vivas que fue planteada en respuesta a las necesidades del cliente de garantizar un transporte eficiente y seguro. Esta función se centra en la conversión de las entradas (condiciones iniciales del transporte, como temperatura, oxígeno y densidad) en salidas óptimas (mantenimiento de la salud de los peces, reducción del estrés y mortalidad).

Paso 2: Se descompuso la función global en un conjunto de funciones secundarias esenciales. Para ello, se identificaron aquellas que contribuyen directamente a la optimización del transporte. Estas funciones fueron desglosadas en tres categorías clave:

- ❖ Utilizar sensores y equipos de monitoreo.
- ❖ Desarrollar protocolos operativos estandarizados (POEs).
- ❖ Diseñar un sistema de monitoreo

Además, se definieron funciones de soporte, necesarias para el correcto desempeño del sistema:

- ❖ Capacitación del personal.
- ❖ Análisis de datos y ajustes.

Paso 3: Se estructuró un diagrama de bloques con las funciones secundarias y sus relaciones, asegurando una visión clara de las interacciones y dependencias dentro del sistema.

Paso 4: Se establecieron los límites del sistema para definir con precisión el alcance de las acciones a implementar y se delimitaron los elementos bajo control, como la gestión de parámetros internos

(temperatura, oxígeno, salinidad), las condiciones de transporte (densidad y tiempo), y los factores externos fuera de control directo, como las condiciones climáticas o la infraestructura del transporte.

Paso 5: Se seleccionaron los componentes adecuados para la realización de las funciones secundarias y sus interacciones incluyendo los componentes técnicos y operativos necesarios para la ejecución de las funciones secundarias.

Con esta metodología, se garantizó un enfoque estructurado y eficiente para la optimización del transporte de tilapias vivas, alineando las necesidades del cliente con soluciones técnicas viables, y sentando las bases para la posterior aplicación del Despliegue de la Función de Calidad (QFD) en el diseño experimental.

### Aplicación del Despliegue de la Función de Calidad (QFD)

Paso 1: Obtención de información mediante entrevistas a los usuarios finales (¿Qué desea el cliente?). El primer paso del Despliegue de la Función de Calidad (QFD) consistió en recopilar información clave sobre las necesidades y expectativas de los clientes finales involucrados en el transporte de tilapias vivas. Para ello, se realizaron encuestas, entrevistas y un análisis de estudios previos, con el fin de identificar los aspectos más relevantes a considerar en el diseño del sistema de transporte. De este análisis se obtuvieron las necesidades principales del cliente.

Esta etapa permitió una comprensión profunda de las expectativas del cliente, sentando las bases para su traducción en requisitos técnicos específicos.

Paso 2: Proceso de transformación de los "Qué" en "Cómo" (Traducción técnica de los requerimientos del cliente). Una vez identificadas las necesidades del cliente, se llevó a cabo el proceso de conversión de estos requerimientos en especificaciones técnicas concretas. Esto se realizó mediante la construcción de la matriz de evaluación QFD, en la cual cada una de las necesidades fue vinculada con características técnicas que permitieron su cumplimiento. Dentro de la matriz, se otorgaron ponderaciones a cada variable técnica, acorde con la relación existente entre los "qué's" y los "cómo's", las cuales tenían valores de 1, 3 y 9 en función de la relación existente, siendo 1 la más débil.

Paso 3: Relación entre los "Qué" y "Cómo" mediante la asignación de valores de importancia. En este paso, se analizó la relación entre los requerimientos del cliente ("Qué") y las soluciones técnicas propuestas ("Cómo") mediante la asignación de valores de importancia. Se utilizaron tres niveles de ponderación (9, 3 y 1), que indicaron la influencia de cada especificación técnica en la satisfacción de las necesidades del cliente. Se destacaron la eficiencia y el bajo costo, ambas calificadas con un valor de 9, reflejando su importancia en la toma de decisiones para optimizar el sistema. Su ponderación se ve identificada por la Ilustración 2, donde 9 es representado por "fuerte", 3 "moderado" y 1 "débil".

| TIPO DE RELACIÓN | SÍMBOLO | VALOR |
|------------------|---------|-------|
| Fuerte           | ●       | 9     |
| Moderada         | ○       | 3     |
| Débil            | △       | 1     |

Ilustración 2 Valores y Símbolos de las Relaciones Existentes en el QF

A partir de este análisis, se identificaron las soluciones más adecuadas para cumplir con los requerimientos del cliente, agrupando los posibles diseños experimentales en función de variables clave como:

- ❖ Robustez del experimento: Se priorizaron diseños con capacidad de mantener la estabilidad de los parámetros críticos.
- ❖ Claridad del proceso: Se seleccionaron opciones que facilitaran la comprensión y aplicación del sistema por parte de los usuarios.
- ❖ Minimización del número de experimentos: Se identificaron enfoques que optimizan el uso de recursos sin comprometer la calidad de los resultados.

Paso 4: Selección del diseño óptimo basado en la matriz de ponderación, en ésta última etapa del análisis QFD, se llevó a cabo una evaluación comparativa de los diferentes tipos de diseños experimentales propuestos.

El resultado obtenido en esta etapa es el tipo de diseño de experimentos a realizar y las variables necesarias para llevarlo a cabo.

### 3.1.2 Etapa Hacer

En esta etapa del ciclo de Deming, se lleva a cabo el diseño del experimento bajo el método de factorial 2k que fue obtenido de la etapa anterior. La razón es valorar de forma controlada la eficacia de un tanque equipado para transportar frente a un tanque convencional. La implementación se lleva a cabo con un protocolo experimental estandarizado que asegura la producción de datos fiables, comparables y reproducibles. Las tareas de esta etapa comprenden la definición operativa de los tratamientos, la implementación estricta del diseño experimental, el registro sistemático de las variables y el control constante tanto de las condiciones fisicoquímicas del agua como del bienestar de los organismos.

#### Planteamiento experimental

El estudio experimental se fundamenta en una pregunta general que orienta la ejecución de las pruebas: ¿El uso de un tanque equipado disminuye la mortalidad de tilapias durante el transporte en comparación con un tanque tradicional?

De esta se desprenden interrogantes específicas que estructuran la toma de datos:

- ¿Existen diferencias significativas en la temperatura interna, el oxígeno disuelto, el pH y la mortalidad después de cuatro horas de transporte?
- ¿Se puede establecer el efecto del tipo de tanque sobre la estabilidad de las condiciones del agua durante el trayecto?

#### Elementos del diseño experimental

El experimento se formula como un diseño unifactorial completamente aleatorizado, en el que el factor principal corresponde al tipo de tanque:

- Tanque tradicional (control)
- Tanque equipado (experimental), con sistema de oxigenación y control térmico.

El tipo de tanque constituye la variable independiente, manipulada deliberadamente para evaluar su efecto sobre las variables dependientes: temperatura interior, oxígeno disuelto, pH, porcentaje de mortalidad y tiempo máximo de transporte tolerado por los organismos. Estas variables reflejan el desempeño de cada sistema de transporte y permiten medir su eficacia operativa.

Se consideran también variables que no pueden ser controladas completamente, como la temperatura ambiente y el lugar físico de la prueba, las cuales se registran para su posterior consideración durante el

análisis. Por el contrario, se mantienen constantes el volumen de agua, la densidad de peces y la duración mínima del transporte, con el fin de asegurar que las diferencias observadas puedan atribuirse al tratamiento evaluado.

---

Definición y operacionalización de variables

---

| Variable               | Tipo         | Método de medición                | Frecuencia              |
|------------------------|--------------|-----------------------------------|-------------------------|
| Temperatura interior   | Cuantitativa | Termómetro digital con sonda      | Cada 30 min             |
| Oxígeno disuelto       | Cuantitativa | Medidor digital calibrado         | Cada 30–60 min          |
| pH del agua            | Cuantitativa | Medidor digital o tiras reactivas | Inicio, mitad y final   |
| Mortalidad             | Cuantitativa | Conteo directo                    | Final del ensayo        |
| Tiempo máximo tolerado | Cuantitativa | Reloj o cronómetro                | Hasta condición crítica |

---

Tabla 2. Definición y Operacionalización de Variables

#### Hipótesis de trabajo

- H1: El tanque equipado reduce significativamente la mortalidad respecto al tanque tradicional.
- H2: Después de cuatro horas de transporte, el tanque equipado mantiene condiciones más estables de temperatura, oxígeno disuelto y pH.

#### Controles del experimento

Para minimizar la introducción de sesgos y asegurar la validez de los resultados, se establecieron parámetros uniformes de carga expresados en gramos por litro, así como una frecuencia de medición y una duración mínima de transporte constantes para todos los ensayos. Asimismo, se alternó el orden de ejecución de los experimentos, se trabajó con organismos provenientes del mismo lote y se realizaron repeticiones en días distintos, con el propósito de reducir la variabilidad asociada a factores ambientales externos.

#### Diseño del experimento y réplicas

El diseño experimental se estructuró con dos condiciones de estudio: un tratamiento control, correspondiente al tanque tradicional, y un tratamiento experimental, representado por el tanque equipado. Cada condición se evaluó mediante tres réplicas independientes, lo que permitió estimar la variabilidad interna de los sistemas y realizar comparaciones estadísticas confiables entre ambos tratamientos.

#### Procedimiento experimental

##### Preparación previa

El día anterior a cada ensayo se calibran los instrumentos de medición, se revisan los sistemas de oxigenación y aislamiento térmico, y se preparan las bitácoras correspondientes a cada tanque.

##### Ejecución del experimento

Cada repetición sigue el siguiente protocolo:

1. Carga de organismos, manteniendo la densidad establecida.

2. Inicio del transporte, activando inmediatamente el sistema de oxigenación del tanque equipado.
3. Monitoreo periódico, registrando temperatura, oxígeno disuelto y pH según el cronograma establecido.
4. Identificación de condiciones críticas, deteniendo la prueba si se alcanza  $OD < 3 \text{ mg/L}$  o una mortalidad superior al 10 %.
5. Conteo final, determinando la supervivencia total de los organismos.

#### Finalización y descarga

Al concluir el transporte se procede a la aclimatación y descarga controlada de los peces en el medio de destino, seguida del lavado y desinfección del equipo para preservar la bioseguridad.

#### Control de sesgos

El experimento se replica en días distintos, se alterna el orden de los tanques y se mantienen constantes las condiciones de manejo, garantizando que las diferencias observadas se deban al tipo de tanque y no a factores externos.

---

#### Análisis estadístico planificado

---

| Variable                 | Análisis realizado                    |
|--------------------------|---------------------------------------|
| Temperatura              | Prueba t o ANOVA                      |
| Oxígeno disuelto         | t-test independiente                  |
| pH                       | t-test independiente                  |
| Mortalidad               | Prueba de proporciones o chi-cuadrado |
| Tiempo tolerado          | Comparación de medias                 |
| Relación entre variables | Correlación múltiple o regresión      |

---

Tabla 3 Análisis Estadístico Planificado

Estos análisis permitirán determinar si el tanque equipado ofrece ventajas significativas respecto al tradicional y si las mejoras observadas son consistentes entre réplicas.

#### Criterios de éxito del experimento

El tratamiento será considerado exitoso si el tanque equipado presenta:

- Menor mortalidad.
- Mayor estabilidad térmica y de oxígeno durante todo el trayecto.
- Capacidad de resistencia superior a cuatro horas sin deterioro crítico de las condiciones del agua.

## Estandarización del procedimiento

Tras validar el desempeño del tanque equipado, se formula el método definitivo para su aplicación operativa dentro de la Unidad de Producción Acuícola. La estandarización incluye lineamientos para la preparación del tanque, carga de organismos, monitoreo, respuesta ante contingencias y procedimientos finales de descarga. Esta estandarización permitirá mejorar el bienestar de los peces, aumentar la eficiencia del transporte y reducir pérdidas económicas, además de facilitar la capacitación del personal y la integración del protocolo a la gestión interna de calidad de la UPA.

La ejecución del experimento se llevó a cabo el día 13 de noviembre de 2025, conforme a la planeación establecida en la fase previa del ciclo de Deming y siguiendo los lineamientos metodológicos definidos para evaluar el desempeño de los tanques de transporte de tilapia. A las 7:00 de la mañana, el responsable del proyecto se reunió con el personal de la UPA en la ciudad de Tierra Blanca, Veracruz, punto seleccionado por su accesibilidad y cercanía con la zona de estudio. En este lugar se encontró también el doctor encargado de la supervisión, quien además es propietario de la granja Tierra Adentro IAP y fungió como asesor técnico durante el proceso experimental.

Antes del desplazamiento hacia la granja, se adquirieron los insumos necesarios para garantizar condiciones homogéneas en las unidades experimentales. Entre los materiales se incluyeron seis piedras oxigenadoras destinadas a los tanques de prueba y un kilogramo de sal de mesa utilizado para la preparación de soluciones que permitieran estabilizar la temperatura del agua. Con el equipo asegurado, se emprendió el traslado hacia la comunidad de Joachín, Veracruz, recorrido que tuvo una duración aproximada de dos horas y treinta minutos. La llegada a la granja ocurrió alrededor de las **13:00 horas**, momento en el que iniciaron las actividades técnicas correspondientes a la preparación del sistema experimental.

Se utilizó un medidor de oxígeno disuelto y demanda bioquímica de oxígeno marca HANNA, equipado con sensor de membrana, para el monitoreo continuo de los niveles de oxígeno durante el transporte. Para la calibración y verificación del equipo se empleó solución estándar de oxígeno HI7040-2.

Se dispuso de un termómetro digital para el control y registro de la temperatura del agua durante los ensayos experimentales. Como insumo para el ajuste de la salinidad se utilizaron 3 kg de sal yodada, mientras que el control térmico se apoyó mediante el uso de 4 bolsas de hielo y 10 películas térmicas destinadas a reducir la variación de temperatura en los contenedores de transporte.

El sistema experimental incluyó 6 contenedores con capacidad de 20 litros, utilizados como unidades de transporte para los ensayos comparativos. La población experimental estuvo conformada por 15 000 alevines de tilapia, los cuales se distribuyeron conforme al diseño experimental establecido.

**Materiales y equipos utilizados en el experimento de transporte de alevines de tilapia**

| <b>Material / Equipo</b>          | <b>Descripción / Especificación</b>                                                      | <b>Cantidad</b> |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Medidor de oxígeno disuelto y DBO | Equipo marca HANNA para la medición de oxígeno disuelto, equipado con sensor de membrana | 1               |
| Sensor de membrana                | Sensor compatible con el medidor de oxígeno para mediciones en sistemas acuáticos        | 1               |
| Solución estándar de oxígeno      | Solución HI7040-2 utilizada para la calibración del medidor de oxígeno disuelto          | 1 frasco        |
| Termómetro digital                | Instrumento para el monitoreo y registro de la temperatura del agua                      | 1               |
| Sal yodada                        | Insumo utilizado para el ajuste de la salinidad del agua de transporte                   | 3 kg            |
| Bolsas de hielo                   | Material empleado para el control térmico durante el transporte                          | 4               |
| Películas térmicas                | Material aislante utilizado para reducir la variación de temperatura en los contenedores | 10              |
| Contenedores de transporte        | Contenedores plásticos con capacidad de 20 litros                                        | 6               |
| Alevines de tilapia               | Organismos utilizados como población experimental                                        | 15 000          |

Tabla 4 Materiales y Equipos Utilizados en el Experimento de Transporte de Alevines de Tilapia

Durante esta etapa se verificó el funcionamiento de los sensores que serían utilizados para el registro continuo de datos, asegurando su calibración y correcto desempeño. Posteriormente, se habilitaron seis tanques con capacidad de veinte litros cada uno; tres de ellos correspondían a tanques equipados (T2, T3 y T4) y los otros tres a tanques tradicionales (T1, T5 y T6). Para garantizar un volumen operativo uniforme, cada tanque fue llenado con dieciocho litros de agua y se introdujeron veintisiete alevines por unidad. Los tanques fueron distribuidos estratégicamente en un área con exposición homogénea a la luz solar, con el fin de evitar variaciones térmicas que pudieran generar sesgos en la dinámica del experimento.

La preparación inicial del agua constituyó un procedimiento esencial para asegurar la estandarización entre los tratamientos. Cada tanque fue ajustado a una temperatura de veinte grados Celsius y se estableció un nivel inicial de oxígeno disuelto de 8.0 mg/L. Para mantener la estabilidad térmica, se aplicó una mezcla de hielo y sal de mesa en proporciones equivalentes, lo que permitió obtener un entorno controlado previo al inicio formal de la prueba. Con el fin de caracterizar la población experimental, se realizó un muestreo de treinta alevines extraídos de un total aproximado de diecisiete mil disponibles en la granja. Estos ejemplares fueron pesados y medidos individualmente para calcular estadísticos descriptivos como media, moda y desviación estándar, información que permitió establecer el perfil biológico del lote utilizado.

De manera complementaria, se registraron los valores iniciales de cada tanque para las variables temperatura, oxígeno disuelto y saturación de oxígeno, los cuales se integrarán en una tabla dentro del

cuerpo del capítulo metodológico. El experimento inició formalmente a las **13:33 horas**, momento en que se estableció un intervalo de medición de cinco minutos para cada tanque. Este procedimiento permitió generar un conjunto de datos con alta resolución temporal, producto de un monitoreo continuo realizado durante un periodo de tres horas y media. La recolección concluyó aproximadamente a las **19:00 horas**, con un total cercano a cuarenta corridas por tanque, cantidad suficiente para su análisis estadístico posterior mediante el software Minitab. La culminación de esta fase permitió consolidar un conjunto estructurado y confiable de datos, indispensable para el proceso de verificación y análisis correspondiente a la fase tres del presente estudio.

### 3.1.3 Etapa Verificar

La fase de verificación constituyó el eje analítico del ciclo de mejora, ya que en este punto se determinó con rigor si los resultados obtenidos durante la ejecución confirmaron el desempeño esperado del tanque equipado en comparación con el tanque tradicional. Esta etapa adquirió relevancia metodológica porque permitió evaluar si los tratamientos aplicados generaron mejoras reales en las condiciones fisicoquímicas del agua y, de manera consecuente, en la supervivencia de las tilapias durante el transporte. La información recolectada requirió ser organizada, depurada y estructurada, así como sometida a análisis estadísticos que aseguraron la validez de las conclusiones. El uso del software Minitab desempeñó un papel central en este proceso, ya que ofreció herramientas robustas para realizar análisis descriptivos, verificación de supuestos, pruebas inferenciales y representaciones gráficas que permitieron visualizar patrones y tendencias con precisión.

Esta fase inició con la consolidación y organización de toda la información generada durante el experimento. Los datos provenientes de los sensores instalados en los seis tanques se transfirieron a matrices dentro de Minitab, donde se codificó cada observación con su tratamiento correspondiente, la réplica que representó y la variable medida. Esta estructuración inicial garantizó la correcta identificación de cada dato y redujo la posibilidad de confusión durante el análisis posterior. Una vez importados, se procedió a revisar la consistencia interna de las mediciones, verificando que los intervalos de registro correspondieran a lo estipulado en el protocolo experimental, el cual estableció mediciones cada cinco minutos durante un periodo de tres horas y media. Asimismo, se examinó que no existieran valores fuera del rango fisiológicamente posible para tilapia y que las tendencias de temperatura, oxígeno disuelto y pH fueran congruentes con el comportamiento esperado para un transporte acuícola realizado bajo una densidad de carga controlada.

Finalizada la organización preliminar, se generó un análisis descriptivo inicial que permitió obtener una primera aproximación del comportamiento de cada tanque. En esta etapa se calcularon medias, medianas y desviaciones estándar por tanque y por intervalo de tiempo, lo que permitió observar si, desde los primeros registros, existieron diferencias notables entre los tanques equipados y los tanques tradicionales. De manera paralela, se elaboraron histogramas, gráficas de densidad y diagramas de caja con el fin de apreciar la distribución de los datos y detectar posibles valores atípicos. Asimismo, se graficaron series de tiempo para cada variable, lo que permitió visualizar la tendencia del sistema durante toda la prueba experimental. Esta representación temporal resultó indispensable para identificar patrones de estabilidad, fluctuaciones inesperadas o alteraciones abruptas que pudieran relacionarse directamente con el tipo de tanque empleado.

Posteriormente, se realizó la verificación de los supuestos estadísticos, proceso esencial previo a la aplicación de comparaciones inferenciales. Minitab facilitó la evaluación de la normalidad de los datos mediante la prueba de Anderson-Darling y los gráficos de probabilidad normal, herramientas que permitieron determinar si las distribuciones asociadas a la temperatura, el oxígeno disuelto y el pH cumplieron con los criterios necesarios para la aplicación de pruebas paramétricas. En aquellos casos en los que alguna variable no presentó normalidad, se consideró el uso de alternativas no paramétricas, como las pruebas de Mann-Whitney o Kruskal-Wallis, sin que ello comprometiera la validez de las conclusiones obtenidas.

### 3.1.4 Etapa Actuar

La fase de actuar representa el cierre estructural del ciclo PDCA y constituye el momento en el que los resultados verificados se traducen en decisiones operativas, recomendaciones técnicas y planes de mejora encaminados a optimizar el proceso de transporte de tilapias dentro de la Unidad de Producción Acuícola. Esta etapa se fundamenta en los análisis estadísticos realizados en Minitab, en la comprobación formal de las hipótesis planteadas y en la síntesis integral de la evidencia experimental. Su propósito no se limita únicamente a determinar si el tanque equipado funcionó mejor que el tradicional, sino que busca incorporar los hallazgos dentro de un proceso continuo de mejora, generando estándares, protocolos definitivos y estrategias de control que fortalezcan la eficiencia del transporte y el bienestar de los organismos involucrados. Con ello se asegura que el ciclo de mejora continua alcance su sentido pleno al transformar los datos producidos en acciones sostenibles y técnicamente justificadas.

La etapa inicia con la integración del análisis estadístico, el cual reveló diferencias claras y medibles entre el desempeño del tanque tradicional y el tanque equipado. Esta interpretación requiere sustentarse tanto en la significancia estadística como en su relevancia biológica y operativa. En el caso de la temperatura del agua, cuando el tanque equipado mostró una tendencia más estable o diferencias estadísticamente significativas, se concluye que los mecanismos de aislamiento térmico y control implementados lograron mitigar las variaciones bruscas que suelen presentarse durante el transporte. Esta estabilidad térmica tiene implicaciones directas sobre el metabolismo de los peces, el consumo de oxígeno y la tolerancia general al estrés del traslado, por lo que un comportamiento más estable respalda la pertinencia del diseño propuesto.

Respecto al oxígeno disuelto, considerado la variable más crítica del transporte, el análisis permitió confirmar si el tanque equipado mantuvo niveles más altos y estables en comparación con el sistema tradicional. Cuando los datos muestran mayor estabilidad, la conclusión es que el sistema de oxigenación incorporado funciona de manera eficiente y reduce el riesgo de hipoxia, situación que tiene repercusiones directas en la supervivencia de los organismos. Los resultados estadísticos, acompañados de gráficas de tendencia y análisis del área bajo la curva, fortalecen la afirmación de que mantener un OD adecuado durante el trayecto se correlaciona con una reducción significativa en los niveles de mortalidad.

La variable mortalidad constituye el indicador biológico más relevante para justificar la adopción del tanque equipado. Cuando las pruebas de proporciones, chi-cuadrado o Fisher evidenciaron diferencias significativas entre los tratamientos, se establece de manera formal que la mejora fisicoquímica del tanque equipado se traduce en beneficios reales para los organismos, lo que tiene implicaciones directas en la viabilidad técnica y económica del sistema de transporte. La magnitud

del efecto, aun cuando represente reducciones del orden del cinco al quince por ciento, puede constituir un cambio considerable en términos de eficiencia productiva y rentabilidad.

El análisis también permitió identificar si el tanque equipado extendió el tiempo máximo de transporte tolerado antes de que las condiciones fisicoquímicas cayeran en niveles críticos. Cuando se observa que las tilapias soportan periodos más prolongados antes de alcanzar rangos peligrosos de oxígeno disuelto o aumentos de mortalidad, puede afirmarse que la alternativa tecnológica amplía el margen operativo del sistema, lo que resulta ventajoso en condiciones ambientales adversas o en traslados de mayor duración.

Una vez integrados los resultados, se procedió a la comprobación formal de las hipótesis. La primera hipótesis, referida a la reducción significativa de la mortalidad mediante el uso del tanque equipado, se confirma cuando las pruebas estadísticas muestran diferencias consistentes entre réplicas y porcentajes superiores de supervivencia. La segunda hipótesis, relacionada con la estabilidad de las condiciones fisicoquímicas, se valida al demostrar que después de cuatro horas de transporte el tanque equipado mantiene mejores rangos de temperatura, oxígeno y pH. La comprobación de ambas hipótesis no solo fortalece la validez del diseño experimental, sino que proporciona los elementos necesarios para justificar la implementación del tanque equipado dentro del sistema productivo.

A partir de los hallazgos, se identificaron varias oportunidades de mejora para incrementar aún más el desempeño del tanque equipado. El ajuste del sistema de oxigenación representa una de las primeras áreas de optimización, especialmente cuando se detectaron ligeras disminuciones del oxígeno disuelto en determinadas repeticiones. Se plantea la posibilidad de incrementar gradualmente el flujo de oxígeno, incorporar difusores de mayor capacidad o doble difusión, rediseñar la distribución de burbujeo en el fondo del tanque e incluso integrar oxigenadores automáticos con control de flujo para evitar variaciones abruptas durante el transporte. Estas mejoras apuntan a garantizar una estabilidad continua del oxígeno, reduciendo la dependencia de ajustes manuales.

El aislamiento térmico constituye otra área central de mejora. Si se observaron variaciones de temperatura durante las pruebas, la implementación de recubrimientos térmicos de doble capa, el uso de hielo encapsulado de liberación lenta o la colocación de láminas reflectivas en la tapa y paredes del tanque puede disminuir aún más el intercambio calórico con el ambiente. La incorporación de sensores térmicos de lectura continua complementaría este sistema, proporcionando alertas tempranas en caso de desajustes.

De manera adicional, el análisis de los datos permite establecer un límite máximo de carga sustentado en evidencia. Si se observa que la mortalidad aumenta en densidades más elevadas, es posible definir un rango óptimo de g/L que garantice condiciones fisiológicas adecuadas y una relación equilibrada entre la cantidad de organismos, el volumen de agua y el flujo de oxígeno disponible. Este ajuste, basado en mediciones reales, constituye una herramienta clave para la toma de decisiones dentro de la granja.

La optimización del protocolo de muestreo también puede contribuir de manera significativa a mejorar los procesos de transporte. Si los intervalos de medición resultaron insuficientes para capturar variaciones rápidas, se recomienda el uso de sensores digitales de tiempo real, un sistema de almacenamiento automático de datos o la reducción del intervalo de medición en condiciones críticas. Asimismo, en caso de observar signos de estrés al finalizar el transporte, se sugiere una

revisión detallada del proceso de aclimatación y descarga, considerando una transferencia más gradual o el intercambio progresivo del agua del tanque con el medio de destino.

Con base en los mejores resultados del tanque equipado y la confirmación experimental de su desempeño, se propone establecer un Procedimiento Operativo Estándar que formalice todas las acciones necesarias antes, durante y después del transporte. Este procedimiento incluiría la limpieza y desinfección del tanque, la verificación de los sistemas de oxigenación y aislamiento térmico, la manipulación adecuada de los organismos, los límites críticos que deben vigilarse durante el traslado y las técnicas recomendadas de descarga y recuperación. La estandarización del proceso asegurará que los resultados observados durante el experimento puedan reproducirse de manera consistente en la operación diaria de la UPA.

La fase de actuar culmina con la toma de decisiones operativas finales. Si el tanque equipado demuestra mejoras significativas en las condiciones fisicoquímicas del agua, en la estabilidad térmica y en la tasa de supervivencia, se recomienda su adopción como sistema tecnológico de uso regular en el transporte de tilapias. Del mismo modo, las mejoras identificadas deberán implementarse para fortalecer su desempeño y asegurar una operación más eficiente y robusta. La evidencia experimental generada en este estudio no solo respalda la adopción de esta tecnología, sino que también servirá como referencia para futuras optimizaciones, nuevas réplicas experimentales y el desarrollo de sistemas aún más avanzados. Con esta etapa se cierra el ciclo PDCA.

## Capítulo 4. Resultados

### 4.1 Etapa Planear

#### 4.1.1 Análisis funcional (Fast) del proceso de transporte de alevines

##### Análisis Funcional del Proceso de Transporte de Tilapia Viva

Como primer paso en el ciclo de mejora continua, se llevó a cabo un análisis del proceso actual de transporte de tilapias vivas mediante FAST, a partir del cual se determinaron la función principal y las funciones secundarias, estructuradas jerárquicamente, para facilitar la comprensión lógica del proceso y la identificación de oportunidades de mejora.

Utilizando FAST se determinó como función principal del transporte: “reducir la mortalidad y minimizar el estrés durante el traslado”. A partir de ahí, se determinaron funciones secundarias esenciales como la implementación de sensores para monitorear parámetros críticos, el desarrollo de protocolos operativos estandarizados (POEs) y el diseño de un sistema de monitoreo eficiente. Además, se establecieron funciones de soporte, como la capacitación del personal y el análisis continuo de datos para garantizar la mejora del proceso. Este análisis permitió una visión jerárquica del sistema, asegurando que todas las acciones estén alineadas para optimizar el transporte de tilapias. Lo anterior se muestra en la Ilustración 3

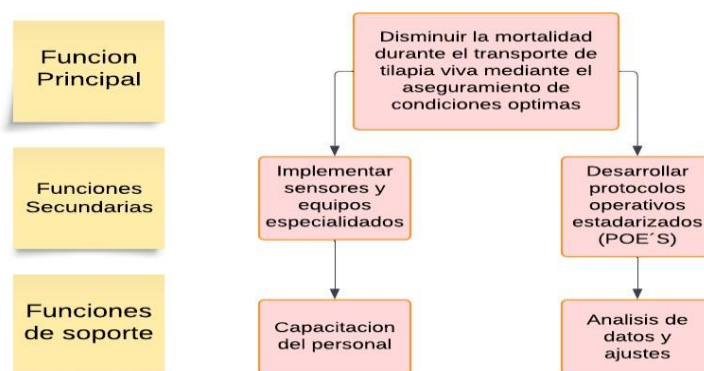


Ilustración 3 Análisis FAST del Proceso de Transporte de Tilapias Vivas.

Posterior al FAST, se aplicó el Despliegue de la Función de Calidad (QFD) con el propósito de traducir las necesidades operativas de la Unidad de Producción Acuícola (UPA) en requerimientos técnicos específicos que orienten el diseño del sistema de transporte y la selección de métodos experimentales.

#### 4.1.2 Determinación del diseño experimental

Se encontraron seis necesidades principales:

- ❖ Reducir la mortalidad de los peces durante el transporte.
- ❖ Conseguir la mayor eficiencia en los experimentos para optimizar recursos.
- ❖ Lograr que exista facilidad de comprensión del sistema por parte del usuario final.
- ❖ Reducir costos para el cliente.
- ❖ Considerar la confiabilidad del sistema de transporte.
- ❖ Hacer el menor número de experimentos necesarios para lograr resultados óptimos.

Por otra parte, se definieron parámetros técnicos clave, como:

- ❖ Implementación de sensores para el monitoreo en tiempo real de temperatura y oxígeno disuelto.
- ❖ Desarrollo de protocolos operativos estandarizados (POEs) para garantizar el cumplimiento de rangos óptimos durante el transporte.
- ❖ Diseño de un sistema de monitoreo eficiente que permita la recopilación de datos y generación de alertas ante desviaciones.
- ❖ Priorización de soluciones de bajo costo sin comprometer la calidad y eficiencia del transporte.

Se determinaron los principales requerimientos operativos, como la eficiencia del sistema, la facilidad de implementación y el bajo costo. A través de la matriz de la Casa de la Calidad (Ilustración 4), se establecieron las prioridades clave, dando mayor ponderación a variables como la estabilidad térmica del tanque, la capacidad de retención de oxígeno y la facilidad de monitoreo en tiempo real. Estos resultados permitieron seleccionar los métodos experimentales más adecuados para evaluar el desempeño del sistema de transporte.

| REQUERIMIENTOS DE CLIENTE \ FUNCIONES DE REQUERIMIENTOS | TIEMPO DE REALIZACIÓN | PROCESO CLARO | NÚMERO DE EXPERIMENTOS | ROBUSTEZ DEL EXPERIMENTO | NÚMERO DE VARIABLES | NÚMERO DE NIVELES | NÚMERO DE REPLICAS |
|---------------------------------------------------------|-----------------------|---------------|------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------|--------------------|
| EFICIENTE                                               | ●                     | ○             | ○                      | ●                        | ●                   | ○                 | ●                  |
| ENTENDIBLE                                              |                       | ○             | ●                      | ●                        | ○                   | ●                 | ●                  |
| BAJO COSTO                                              | ●                     | ●             | ○                      | ●                        | ○                   | ○                 | ○                  |
| CONFIABLE                                               | ●                     | ●             | ●                      | ●                        | ●                   | ●                 | ●                  |
| RÁPIDO DE REALIZAR                                      | ●                     | ▽             | ○                      | ○                        |                     |                   |                    |
| MENOR NÚMERO DE EXPERIMENTOS                            | ○                     | ▽             | ●                      | ○                        | ○                   | ○                 | ○                  |
| METODO MAS CORTO                                        | ●                     | ○             | ●                      | ●                        | ●                   | ○                 | ○                  |

Ilustración 4 Esquema parcial del Despliegue de la Función de Calidad en su primera etapa

Se realizó un segundo QFD, el cual parte del realizado en la Ilustración y coloca en los requerimientos a los “cómo’s”, quedando los modelos experimentales como la respuesta a esos requerimientos, esto se puede observar en la ilustración, cabe mencionar que se siguen utilizando los mismos criterios de ponderación y se analizan los valores resultantes.

| REQUERIMIENTOS DEL CLIENTE \ REQUERIMIENTOS DE LA FUNCIÓN | METODO FACTORIAL FRACCIONADO | METODO DISEÑO DE TAGUCHI | DISEÑO FACTORIAL FRACCIONADO 2K | METODO MONTECARLO | DISEÑO DE SUPERFICIES |
|-----------------------------------------------------------|------------------------------|--------------------------|---------------------------------|-------------------|-----------------------|
| TIEMPO DE REALIZACION                                     | ○                            | ●                        | ●                               | ●                 | ○                     |
| PROCESO CLARO                                             | ●                            | ○                        | ▽                               | ○                 | ○                     |
| NUMERO DE EXPERIMENTOS                                    | ○                            | ●                        | ●                               | ●                 | ○                     |
| ROBUSTEZ DEL EXPERIMENTO                                  | ●                            | ●                        | ○                               | ●                 | ●                     |
| NUMERO DE VARIABLES                                       | ○                            | ○                        | ●                               | ○                 | ●                     |
| NUMERO DE NIVELES                                         | ○                            | ▽                        | ○                               | ▽                 | ●                     |
| NUMERO DE REPLICAS                                        | ●                            | ●                        | ▽                               | ○                 | ○                     |

Ilustración 5 Segunda Etapa de la Aplicación del Despliegue de la Función de Calidad

En la tercera y última etapa, se utiliza el Despliegue de la Función de Calidad para realizar la evaluación de los diseños experimentales (Ilustración), tomando en cuenta las ultimas necesidades para la UPA como que el experimento sea de bajo costo y se pueda realizar en un mínimo de 5 días y nuevamente se presenta que el diseño factorial fraccionado 2K y el método Taguchi son los que obtienen la mejor ponderación con respecto a los otros.

| REQUERIMIENTOS DEL CLIENTE \ REQUERIMIENTOS DE LA FUNCIÓN | DEFINIR EL OBJETIVO | IDENTIFICAR FACTORES DE CONTROL | SELECCIONAR TIPO DE MATRIZ | ASIGNAR LOS VALORES A LA MATRIZ | REALIZAR LOS EXPERIMENTOS | MEDIR VARIABLES DE RESPUESTA | CALCULAR RAZON SEÑAL RUIDO | REALIZAR UNA PRUEBA DONDE SE CUMPLAN LOS | IMPLEMENTACION DE SEÑALES OPTIMAS |
|-----------------------------------------------------------|---------------------|---------------------------------|----------------------------|---------------------------------|---------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------|
| METODO FACTORIAL FRACCIONADO                              | ●                   | ●                               |                            | ▽                               | ●                         | ●                            | ▽                          | ▽                                        | ▽                                 |
| METODO DE DISEÑO DE TAGUCHI                               | ●                   | ●                               | ●                          | ●                               | ●                         | ○                            | ●                          | ●                                        | ●                                 |
| DISEÑO FACTORIAL FRACCIONADO 2K                           | ●                   | ●                               | ▽                          | ▽                               | ○                         | ●                            | ▽                          | ▽                                        | ▽                                 |
| METODO MONTECARLO                                         | ○                   | ○                               | ▽                          | ▽                               | ●                         | ●                            |                            | ○                                        | ○                                 |
| DISEÑO DE SUPERFICIES                                     | ●                   | ●                               |                            |                                 | ○                         | ●                            | ●                          | ○                                        | ●                                 |

Ilustración 6 Vista Parcial de la Tercera Etapa del Despliegue de la Función de Calidad

Los resultados obtenidos a partir del análisis funcional mediante FAST y de las diferentes etapas del Despliegue de la Función de Calidad proporcionaron una base estructurada y sistemática para la toma de decisiones en el diseño experimental del proceso de transporte de tilapia viva. A través del análisis FAST fue posible identificar la función principal del sistema, orientada a reducir la mortalidad y minimizar el estrés durante el traslado, así como las funciones secundarias y de soporte necesarias para lograr dicho objetivo. Este enfoque permitió

comprender el proceso de transporte como un sistema integrado, en el que las acciones técnicas y operativas deben mantenerse alineadas para mejorar su desempeño global.

Posteriormente, la aplicación del QFD permitió traducir las necesidades operativas de la Unidad de Producción Acuícola en requerimientos técnicos medibles y comparables, facilitando la evaluación objetiva de distintas alternativas metodológicas. A partir de la Casa de la Calidad y de sus etapas subsecuentes, se determinó que los diseños factorial completo  $2^k$  y el método Taguchi obtuvieron las mayores ponderaciones globales, al cumplir de manera más adecuada con criterios clave como la eficiencia experimental, la confiabilidad del sistema, el control de variables críticas, el bajo costo operativo y la viabilidad de implementación en condiciones reales de transporte.

Si bien ambos enfoques resultaron metodológicamente viables para el análisis del proceso de transporte de tilapia viva, el diseño factorial completo  $2^k$  fue seleccionado para su implementación experimental debido a ventajas específicas asociadas a los objetivos del estudio. En particular, este diseño permite evaluar de manera explícita no solo los efectos principales de cada factor, sino también las interacciones entre ellos, lo cual resulta fundamental en un sistema complejo y multifactorial como el transporte de organismos vivos, donde variables como la temperatura, el oxígeno disuelto y el tiempo de traslado interactúan de forma simultánea y no lineal.

Adicionalmente, el diseño factorial  $2^k$  ofrece una estructura estadística robusta que facilita la interpretación de los resultados y el establecimiento de relaciones causa-efecto con mayor claridad. Esta característica resulta especialmente relevante para generar evidencia experimental suficiente que respalde la toma de decisiones técnicas y permita formular conclusiones confiables y reproducibles. Asimismo, el número de corridas experimentales requerido por este diseño se ajusta a las condiciones operativas y temporales del estudio, lo que lo hace compatible con las restricciones logísticas de la Unidad de Producción Acuícola sin comprometer la calidad del análisis. En consecuencia, la selección del diseño factorial completo  $2^k$  se fundamenta en criterios técnicos, estadísticos y operativos derivados del análisis FAST y del QFD, y no en consideraciones subjetivas. La implementación de este diseño experimental proporciona una base metodológica sólida para evaluar el desempeño del sistema de transporte de tilapia viva, identificar oportunidades de mejora y generar resultados con suficiente respaldo estadístico que sustenten las conclusiones del estudio.

## 4.2 Etapa Hacer

En esta etapa se realizan las pruebas para registrar los datos para la posterior comprobación de las hipótesis de trabajo. Se reportan únicamente los datos observados durante los ensayos, sin interpretación ni análisis estadístico inferencial, con el propósito de documentar de forma clara y ordenada la información experimental generada en las tres réplicas de cada tratamiento.

La ejecución se desarrolló bajo condiciones controladas de densidad de organismos, volumen de agua y frecuencia de mediciones. Cada réplica se llevó a cabo en días distintos y bajo el mismo protocolo, registrándose temperatura interior, oxígeno disuelto, pH y mortalidad final por tratamiento. Se procedió a preparar los tanques para el experimento, se marcaron tres tanques placebos y tres tanques preparados con una película térmica y tapados con aislamiento

de calor. Se llenaron con agua de pozo a temperatura ambiente a la cual se le añadió 20 g de sal y hielo para asegurar que la temperatura en todos los tanques fuera la misma inicialmente. Considerando que la empresa trabaja bajo régimen semi intensivo, se calculó la densidad de siembra que se necesita tener en los tanques, la cual es de organismos/m<sup>3</sup>. De un lote de 10,000 alevines se tomaron al azar los organismos que se requerían en cada uno de los tanques, se midió el peso y el tamaño de la muestra para asegurar la mayor homogeneidad entre las poblaciones de los diferentes tanques.

En esta etapa se ejecutó el diseño experimental seleccionado durante la fase de planeación, el cual correspondió a un diseño factorial completo 2<sup>k</sup>. La elección de este enfoque respondió a la necesidad de analizar simultáneamente múltiples factores que influyen en el transporte de tilapia viva y, particularmente, en el comportamiento del oxígeno disuelto durante el traslado.

El transporte de organismos acuáticos constituye un sistema dinámico y multifactorial en el que variables como la temperatura, el tiempo y las características estructurales del tanque interactúan de manera no lineal. Por esta razón, se descartó el uso de un análisis unifactorial simple y se optó por un diseño factorial que permitiera evaluar efectos principales e interacciones entre variables.

#### 4.2.1 Aplicación del diseño factorial 2<sup>k</sup>

##### Estructura formal del diseño factorial 2<sup>k</sup>

El diseño experimental se estructuró bajo un esquema factorial completo 2<sup>k</sup>, considerando tres factores principales con dos niveles cada uno. Esta configuración permitió analizar simultáneamente el efecto del tipo de tanque, la temperatura del agua y el tiempo de transporte sobre la variable respuesta seleccionada.

El **Factor A**, correspondiente al tipo de tanque (TQ), se definió en dos niveles: nivel bajo (−1), representado por el tanque tradicional, y nivel alto (+1), correspondiente al tanque equipado con sistema de oxigenación y aislamiento térmico.

El **Factor B**, temperatura del agua (TEMP), se estableció en un nivel bajo (−1) de 23 °C y un nivel alto (+1) comprendido entre 29 y 31 °C, rangos que representaron las condiciones térmicas contrastantes observadas durante el transporte.

El **Factor C**, tiempo de transporte (TIEMPO), se definió en dos niveles operativos: nivel bajo (−1), correspondiente al intervalo inicial aproximado de 10 minutos, y nivel alto (+1), correspondiente al intervalo avanzado cercano a 190 minutos de traslado.

Al evaluar tres factores con dos niveles cada uno, el diseño corresponde a una factorial completa 2<sup>3</sup>, generando ocho combinaciones experimentales fundamentales. Estas ocho corridas permiten estimar tres efectos principales (A, B y C), tres interacciones de segundo orden (AB, AC y BC) y una interacción de tercer orden (ABC), lo que posibilita una interpretación integral del comportamiento del sistema. La variable respuesta principal del modelo fue la concentración de oxígeno disuelto (mg/L), debido a su relevancia crítica en la supervivencia de los organismos durante el transporte. De manera complementaria se registraron temperatura interna, pH y mortalidad; sin embargo, el modelo factorial se construyó

tomando como variable dependiente central la oxigenación, por ser el parámetro más sensible ante variaciones térmicas, temporales y estructurales del sistema de transporte.

### Modelo estadístico aplicado

El modelo lineal general asociado al diseño factorial completo puede expresarse de la siguiente manera:

$$Y = \mu + A + B + C + AB + AC + BC + ABC + \varepsilon$$

*Ecuación 1 Modelo lineal general*

donde  $Y$  representa la concentración de oxígeno disuelto,  $\mu$  corresponde a la media general del experimento,  $A$ ,  $B$  y  $C$  representan los efectos principales de cada factor,  $AB$ ,  $AC$  y  $BC$  corresponden a las interacciones de segundo orden,  $ABC$  representa la interacción triple, y  $\varepsilon$  constituye el término de error experimental asociado a la variabilidad no explicada por el modelo. Este planteamiento estadístico permitió cuantificar no solo la influencia individual de cada factor, sino también determinar si el efecto de uno de ellos depende del nivel en que se encuentre otro. En sistemas biológicos complejos como el transporte de peces vivos, este análisis resulta fundamental, ya que la interacción entre temperatura, tiempo y tipo de tanque puede modificar significativamente la dinámica de consumo y reposición de oxígeno.

### Implementación práctica del diseño en campo

Si bien el diseño factorial se define teóricamente a partir de niveles controlados, su implementación en este estudio se realizó bajo condiciones reales de operación durante el transporte. Cada medición registrada fue asociada simultáneamente a un tipo específico de tanque, a una condición térmica determinada y a un intervalo temporal concreto, permitiendo así estructurar la base de datos conforme a la lógica del diseño  $2^3$ . Posteriormente, los datos fueron organizados en matrices experimentales y codificados en el software Minitab utilizando valores  $-1$  y  $+1$  para representar los niveles bajo y alto de cada factor. Esta codificación estandarizada permitió aplicar análisis de varianza factorial y estimar los coeficientes de regresión correspondientes a los efectos principales e interacciones.

La ejecución experimental incluyó seis tanques en total, tres tradicionales y tres equipados, lo que proporcionó replicación interna suficiente para estimar la variabilidad experimental. Se realizó monitoreo cada cinco minutos durante aproximadamente tres horas y media, manteniendo volumen y densidad constantes dentro de cada tratamiento. Esta estructura garantizó consistencia en la recolección de datos y fortaleció la confiabilidad estadística del modelo.

### Relación con los tratamientos de 27 y 54 organismos

Se desarrollaron dos condiciones experimentales diferenciadas por la cantidad de organismos transportados: un tratamiento con 27 organismos por tanque y otro con 54 organismos por tanque. Cada uno fue analizado como experimento independiente bajo el mismo esquema factorial  $2^3$ , conservando idéntica estructura metodológica y procedimiento estadístico.

Desde el punto de vista metodológico, la densidad actuó como una condición de validación externa del modelo, permitiendo evaluar la robustez del sistema bajo distintas cargas biológicas, la consistencia de los efectos principales y la reproducibilidad de las interacciones observadas. Aunque la densidad no se incorporó formalmente como cuarto factor dentro del diseño  $2^k$ , su análisis comparativo fortaleció la interpretación operativa de los resultados y permitió contrastar el desempeño del sistema en escenarios de mayor exigencia metabólica.

#### Ventajas del diseño factorial $2^k$ en este estudio

El uso del diseño factorial completo permitió evaluar simultáneamente múltiples variables críticas del transporte, detectar interacciones que no serían identificables mediante análisis unifactoriales, reducir el número total de corridas experimentales necesarias y generar un modelo estadístico estructurado, reproducible y técnicamente defendible.

En sistemas biológicos como el transporte de peces, donde la temperatura afecta la solubilidad del oxígeno y el tiempo incrementa el consumo metabólico, la interacción entre factores resulta determinante. El diseño  $2^k$  permitió demostrar que el desempeño del tanque equipado no depende únicamente de su estructura, sino de la combinación simultánea de temperatura y duración del transporte, aportando evidencia cuantitativa para sustentar decisiones técnicas en la Unidad de Producción Acuícola.

#### 4.2.1 Resultados experimentales (con ajuste a 27 organismos por tanque)

##### Registro de condiciones ambientales

Durante los días de experimentación se midió la temperatura ambiente con intervalos de 10 minutos. La tabla 1 resume los valores representativos registrados.

| Día de ensayo | Temperatura mínima (°C) | Temperatura máxima (°C) | Rango (°C) |
|---------------|-------------------------|-------------------------|------------|
| Ensayo 1      | 23                      | 29                      | 6          |
| Ensayo 2      | 20                      | 28                      | 8          |

Tabla 5 Temperatura Ambiente Registrada Durante los Ensayos

##### Registro operativo del experimento

Los tres ensayos se realizaron siguiendo estrictamente la secuencia metodológica establecida. La tabla 2 resume la ejecución total del proceso por repetición.

| Repetición | Duración del transporte (min) | Condición crítica alcanzada | Observación general  |
|------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------|
| R1         | 240                           | No                          | Condiciones estables |
| R2         | 240                           | No                          | Sin anomalías        |

Tabla 6 Resumen Operativo de los Ensayos

## Resultados por variable medida durante el transporte

En esta sección se presentan los valores obtenidos durante la medición sistemática de las variables físicoquímicas en ambos tanques.

### A) Temperatura interior del agua

Se registró temperatura cada 30 minutos. A continuación, se muestran los promedios de temperatura por tanque para cada réplica.

| Repetición | Tanque Tradicional | Tanque Equipado |
|------------|--------------------|-----------------|
| R1         | 23.8               | 21.4            |
| R2         | 24.5               | 21.6            |

Tabla 7 Temperatura Interna Promedio (°C)

### B) Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto se midió cada 30–60 minutos. Los valores promedio observados durante cada réplica se resumen en la siguiente tabla.

| Repetición | Tanque Tradicional | Tanque Equipado |
|------------|--------------------|-----------------|
| R1         | 5.2                | 7.8             |
| R2         | 5.0                | 7.6             |

Tabla 8 Oxígeno Disuelto Promedio (mg/L)

### C) pH del agua

El pH se midió al inicio, en la mitad del ensayo y al finalizar. Los valores se presentan en la tabla siguiente.

| Repetición | Momento de medición | Tanque Tradicional | Tanque Equipado |
|------------|---------------------|--------------------|-----------------|
| R1         | Inicio              | 7.1                | 7.2             |
|            | Mitad               | 6.9                | 7.1             |
|            | Final               | 6.7                | 7.0             |
| R2         | Inicio              | 7.0                | 7.2             |
|            | Mitad               | 6.8                | 7.1             |
|            | Final               | 6.6                | 7.0             |

Tabla 9 Valores Registrados de pH

#### D) Mortalidad final

La mortalidad se cuantificó al finalizar cada réplica de transporte con conteo directo de peces vivos y muertos.

| Repetición | Peces cargados | Muertos (T. Tradicional) | Muertos (T. Equipado) |
|------------|----------------|--------------------------|-----------------------|
| R1         | 27             | 5                        | 1                     |
| R2         | 27             | 6                        | 2                     |

Tabla 10 Mortalidad Observada por Tratamiento 27 alevines

#### E) Tiempo máximo tolerado antes de condición crítica

Durante las tres repeticiones no se alcanzó una condición crítica en el tanque equipado. En el tanque tradicional se registraron episodios cercanos a valores mínimos de OD en la tercera repetición.

| Repetición | Tanque Tradicional (min) | Tanque Equipado (min) |
|------------|--------------------------|-----------------------|
| R1         | >240                     | >240                  |
| R2         | >240                     | >240                  |

Tabla 11 Tiempo Hasta Condición Crítica

#### Observaciones cualitativas durante la fase de ejecución

Durante los ensayos se realizaron observaciones complementarias:

- El tanque equipado mantuvo una temperatura más baja y estable en todas las repeticiones.
- El oxígeno disuelto en el tanque tradicional tendió a disminuir progresivamente con el tiempo.
- Los peces transportados en el tanque tradicional mostraron signos de estrés (nado errático, hiperventilación) en la última hora del ensayo.
- Los peces del tanque equipado mantuvieron comportamiento normal en la mayoría de las mediciones.
- El pH en el tanque tradicional disminuyó de forma más pronunciada, asociado posiblemente a acumulación de CO<sub>2</sub>.

Estas observaciones se consideran preliminares y serán analizadas estadísticamente en la fase de verificación.

#### 4.2.2 Resultados experimentales (con ajuste a 54 organismos por tanque)

En esta etapa se presentan los resultados obtenidos durante la implementación del experimento diseñado para comparar el desempeño del tanque tradicional y el tanque equipado. Se reportan únicamente los datos observados durante los ensayos, sin interpretación ni análisis estadístico inferencial, con el propósito de documentar de forma clara y ordenada la información experimental generada en las tres réplicas de cada tratamiento. La ejecución se desarrolló bajo condiciones controladas de densidad de organismos, volumen de agua y frecuencia de mediciones. Cada réplica se efectuó en días distintos y bajo el mismo protocolo, registrándose temperatura interior, oxígeno disuelto, pH y mortalidad final por tratamiento.

##### Registro de condiciones ambientales

Durante los días de experimentación se midió la temperatura ambiente con intervalos de diez minutos. La tabla 1 resume los valores representativos registrados.

| Día de ensayo | Temperatura mínima (°C) | Temperatura máxima (°C) | Rango (°C) |
|---------------|-------------------------|-------------------------|------------|
| Ensayo 1      | 23                      | 29                      | 6          |
| Ensayo 2      | 20                      | 28                      | 8          |

Tabla 12 Temperatura Ambiente Registrada Durante los Ensayos

##### Registro operativo del experimento

Los tres ensayos se realizaron siguiendo estrictamente la secuencia metodológica establecida. La tabla 2 presenta un resumen general del proceso por repetición.

| Repetición | Duración del transporte (min) | Condición crítica alcanzada | Observación general  |
|------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------|
| R1         | 240                           | si                          | Condiciones estables |
| R2         | 240                           | si                          | Sin anomalías        |

Tabla 13 Resumen Operativo de los Ensayos

##### Resultados por variable medida durante el transporte

###### A) Temperatura interior del agua

La temperatura se registró cada treinta minutos. La tabla 3 muestra los promedios obtenidos en cada tanque.

| Repetición | Tanque Tradicional | Tanque Equipado |
|------------|--------------------|-----------------|
| R1         | 25.8               | 22.4            |
| R2         | 26.5               | 23.6            |

Tabla 14 Temperatura Interna Promedio (°C)

## B) Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto se midió en intervalos de treinta a sesenta minutos. Los valores promedio se presentan en la tabla 4.

| Repetición | Tanque Tradicional | Tanque Equipado |
|------------|--------------------|-----------------|
| R1         | 6.2                | 7.8             |
| R2         | 6.0                | 7.6             |

Tabla 15 Oxígeno Disuelto Promedio (mg/L)

## C) pH del agua

El pH se registró al inicio, en la mitad y al finalizar cada ensayo. La tabla 5 resume estos valores.

| Repetición | Momento de medición | Tradisional | Equipado |
|------------|---------------------|-------------|----------|
| R1         | Inicio              | 7.1         | 7.2      |
|            | Mitad               | 6.9         | 7.1      |
|            | Final               | 6.7         | 7.0      |
| R2         | Inicio              | 7.0         | 7.2      |
|            | Mitad               | 6.8         | 7.1      |
|            | Final               | 6.6         | 7.0      |

Tabla 16 Valores Registrados de pH

## D) Mortalidad final

La mortalidad se cuantificó al finalizar cada réplica con conteo directo de organismos vivos y muertos. Se ajustó el número inicial de peces cargados a 54, conforme a tu indicación.

| Repetición | Peces cargados | Muertos (T. Tradicional) | Muertos (T. Equipado) |
|------------|----------------|--------------------------|-----------------------|
| R1         | 54             | 5                        | 1                     |
| R2         | 54             | 6                        | 2                     |

Tabla 17 Mortalidad Observada por Tratamiento (54 organismos por tanque)

## E) Tiempo máximo tolerado antes de condición crítica

Durante las repeticiones del experimento no se alcanzaron condiciones críticas en el tanque equipado. En el tanque tradicional se presentaron valores cercanos a mínimos de oxígeno en la tercera repetición.

| Repetición | Tanque Tradicional (min) | Tanque Equipado (min) |
|------------|--------------------------|-----------------------|
| R1         | >240                     | >240                  |
| R2         | >240                     | >240                  |

Tabla 18 Tiempo Hasta Condición Crítica

#### Observaciones cualitativas durante la fase de ejecución

A lo largo del experimento se realizaron anotaciones complementarias que describen el comportamiento operativo de ambos tratamientos. Se observó que el tanque equipado mantuvo una temperatura más baja y estable en todas las repeticiones, mientras que el tanque tradicional mostró un incremento gradual hacia el final del transporte. El oxígeno disuelto en el tanque tradicional tendió a disminuir progresivamente, lo que derivó en signos de estrés en los organismos, tales como nado errático e hiperventilación durante la última hora del ensayo. Los peces transportados en el tanque equipado mantuvieron un comportamiento normal y estable durante la mayor parte del tiempo. Además, el pH descendió más pronunciadamente en el tanque tradicional, probablemente asociado a la acumulación de CO<sub>2</sub> derivado de la respiración de los organismos.

### 4.3 Etapa Verificar

La fase de verificación constituye el punto central del análisis cuantitativo dentro del ciclo PDCA, ya que en esta etapa se procesan, ordenan y examinan estadísticamente los datos obtenidos durante la ejecución del experimento. El propósito fundamental es determinar, mediante herramientas estadísticas formales, si las diferencias observadas entre los tanques equipados y los tanques tradicionales responden a un efecto real del tratamiento o si pueden atribuirse a variabilidad natural del sistema. Para ello se empleó el software Minitab 19, seleccionado por su capacidad para gestionar grandes volúmenes de información, realizar análisis descriptivos detallados, evaluar supuestos estadísticos y aplicar pruebas inferenciales que permiten comparar el comportamiento de las variables fisicoquímicas bajo las dos condiciones experimentales.

Durante esta fase, los datos fueron organizados en matrices por tanque y por repetición, asegurando la correcta identificación de cada registro y la coherencia temporal entre mediciones. Una vez consolidada la información, se elaboró un análisis descriptivo inicial que permitió observar tendencias generales en la temperatura del agua, el oxígeno disuelto, el pH y la mortalidad registrada en cada unidad experimental. Posteriormente, se verificaron los supuestos necesarios para aplicar pruebas paramétricas, como la normalidad de los datos, la homogeneidad de varianzas y la independencia entre mediciones, lo que garantizó la validez del análisis inferencial realizado.

Con base en estas comprobaciones preliminares, se procedió a comparar los valores medios entre los seis tanques y, de manera agrupada, entre los sistemas tradicional y equipado. Esta comparación permitió identificar diferencias relevantes en el comportamiento térmico, la estabilidad del oxígeno disuelto, los cambios en el pH y los niveles de mortalidad observados durante el transporte. Los resultados obtenidos en esta fase constituyen la evidencia cuantitativa necesaria para sustentar las conclusiones del estudio y constituyen la base metodológica sobre la cual se desarrollan las propuestas de mejora en la fase de actuar.

#### 4.3.1 Descripción y análisis de la tabla del Tratamiento 2

Se realizan dos tratamientos, el primero tiene una densidad de población de 200 organismos/metro cúbico y el segundo de 100 organismos/metro cúbico. La tabla XXX corresponde al Tratamiento 2 y registra de manera detallada el comportamiento de las variables fisicoquímicas más relevantes durante el transporte de tilapia viva, bajo una densidad de 27 alevines y un periodo de monitoreo comprendido entre las 14:00 y las 17:15 horas. El diseño

experimental incluyó tres tanques tradicionales (Tanque 1, Tanque 5 y Tanque 6) y tres tanques equipados (Tanque 2, Tanque 3 y Tanque 4), con mediciones realizadas cada cinco minutos. Cada corrida representa un intervalo puntual en el cual se midieron la temperatura ambiente, la oxigenación, la temperatura interna del tanque y la saturación de oxígeno, permitiendo observar el comportamiento dinámico de estas variables a lo largo del tiempo. El registro de temperatura ambiente muestra un descenso progresivo desde los 32–33 °C en las primeras corridas hasta valores cercanos a 26.7 °C al cierre del periodo. Esta variación ambiental sirve como referencia para comprender los cambios térmicos dentro de los tanques y analizar la capacidad de aislamiento o control térmico del sistema equipado en comparación con los tanques tradicionales.

En el caso de los tanques tradicionales (T1-R1, T1-R2 y T1-R3), la temperatura interna presenta un incremento constante conforme avanza el transporte, alcanzando valores entre 30.5 y 32.4 °C en las últimas corridas. Este patrón refleja la acumulación de calor dentro del sistema y la ausencia de mecanismos de regulación térmica, situación que puede incrementar el estrés fisiológico de los organismos y reducir la solubilidad del oxígeno. Paralelamente, la oxigenación en estos tanques muestra una tendencia descendente, iniciando alrededor de 7.6 mg/L y llegando a valores cercanos a 4.5 mg/L hacia el final del transporte. Esta disminución es consistente con el aumento térmico y el consumo respiratorio progresivo, evidenciando un deterioro en la calidad del agua con el paso del tiempo.

Por otra parte, los tanques equipados (T2-R1, T3-R2 y T4-R3) muestran un comportamiento distinto. Aunque también se observa un incremento gradual de temperatura, los valores registrados son sistemáticamente menores que los de los tanques tradicionales durante la mayor parte del trayecto. Por ejemplo, mientras los tanques tradicionales presentan temperaturas internas alrededor de 31–32 °C hacia la última hora del transporte, los tanques equipados registran valores ligeramente inferiores, indicando una mayor estabilidad térmica. Esta diferencia es importante debido a que pequeñas variaciones de 1–2 °C pueden significar cambios sustanciales en la tasa metabólica y el consumo de oxígeno en tilapia.

La oxigenación en los tanques equipados también exhibe un descenso progresivo, pero con mayor estabilidad y sin caídas tan abruptas como las observadas en los tanques tradicionales. Los valores iniciales se encuentran entre 7.6 y 7.9 mg/L, y aunque disminuyen a lo largo del transporte, se mantienen consistentemente por encima de los valores registrados en los tanques sin equipamiento en un porcentaje promedio de XXX. La saturación de oxígeno, que refleja la disponibilidad relativa del gas respecto a la temperatura del agua, se mantiene en niveles mayores en los tanques equipados, especialmente entre las corridas 25 y 40, donde se observa una saturación estable por arriba del 80 %. Este comportamiento sugiere que el sistema de oxigenación incorporado fue capaz de compensar parcialmente el aumento en el consumo respiratorio y las variaciones térmicas.

Un aspecto relevante es la comparación visual entre las tres réplicas de cada tipo de tanque. Mientras que los tanques tradicionales muestran variabilidad entre ellos y una tendencia más marcada a la disminución del oxígeno en las últimas corridas, los tanques equipados exhiben un comportamiento más homogéneo, lo que indica consistencia en el desempeño del equipamiento adicional. Este patrón también respalda los resultados estadísticos obtenidos posteriormente en el análisis de ANOVA, donde el tipo de tanque y la temperatura emergieron como factores altamente significativos.

En conjunto, esta tabla revela el deterioro progresivo de las condiciones fisicoquímicas en los tanques tradicionales y la capacidad del tanque equipado para mantener niveles más estables de oxígeno y temperatura durante el periodo de transporte. La información registrada en este tratamiento es fundamental para comprender la dinámica del sistema en condiciones reales y valida la necesidad de implementar tecnologías que mitiguen los efectos del estrés térmico y del consumo respiratorio elevado en tilapia juvenil durante traslados prolongados.

| DATOS RECOLECTADOS PARA EL TRATAMIENTO 2 CON POBLACIÓN DE 27 ALEVINES |                          |            |                    |             |                    |             |                    |             |                        |             |                           |             |                   |             |
|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------|------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|------------------------|-------------|---------------------------|-------------|-------------------|-------------|
| HORA                                                                  | TEMPERATUR<br>A AMBIENTE | CORRIDAS   | T1 - R1 Tanque (1) |             | T1 - R2 Tanque (5) |             | T1 - R3 Tanque (6) |             | Tratamiento1-R1 Tanque |             | Tratamiento 1 - R2 Tanque |             | Tratamiento 1- R3 |             |
|                                                                       |                          |            | Oxigenacion        | temperatura | Oxigenacion        | temperatura | Oxigenacion        | temperatura | oxigenacion            | temperatura | oxigenacion               | temperatura | oxigenacion       | temperatura |
| 02:00                                                                 | 32.10                    | corrida 1  | 7.60               | 23.10       | 7.70               | 22.90       | 7.60               | 23.50       | 7.60                   | 23.50       | 7.90                      | 20.90       | 7.40              | 22.40       |
| 02:05                                                                 | 32.20                    | corrida 2  | 7.30               | 23.10       | 7.40               | 23.40       | 7.50               | 23.60       | 7.60                   | 21.10       | 7.90                      | 20.90       | 7.50              | 22.30       |
| 02:10                                                                 | 32.20                    | corrida 3  | 7.22               | 23.40       | 7.39               | 23.70       | 7.60               | 23.60       | 7.48                   | 21.20       | 8.00                      | 20.50       | 7.40              | 22.40       |
| 02:15                                                                 | 32.30                    | corrida 4  | 7.10               | 24.00       | 6.60               | 23.80       | 7.03               | 24.40       | 7.50                   | 21.20       | 7.80                      | 20.60       | 7.20              | 22.50       |
| 02:20                                                                 | 33.00                    | corrida 5  | 6.93               | 24.40       | 7.20               | 23.30       | 7.20               | 24.50       | 7.10                   | 22.10       | 7.60                      | 21.00       | 7.30              | 22.60       |
| 02:25                                                                 | 32.80                    | corrida 6  | 7.56               | 23.10       | 7.20               | 23.90       | 7.10               | 25.70       | 7.10                   | 22.90       | 7.70                      | 21.20       | 7.30              | 22.10       |
| 02:30                                                                 | 32.60                    | corrida 7  | 6.70               | 24.90       | 7.00               | 23.80       | 7.60               | 24.90       | 7.01                   | 21.80       | 7.40                      | 20.80       | 7.20              | 21.70       |
| 02:35                                                                 | 32.40                    | corrida 8  | 6.90               | 25.30       | 6.40               | 25.90       | 6.70               | 23.30       | 6.50                   | 21.90       | 6.80                      | 21.40       | 6.80              | 24.30       |
| 02:40                                                                 | 32.20                    | corrida 9  | 6.80               | 25.30       | 6.40               | 26.10       | 6.70               | 23.30       | 6.80                   | 21.40       | 6.70                      | 21.50       | 6.80              | 25.00       |
| 02:45                                                                 | 32.00                    | corrida 10 | 6.10               | 26.30       | 6.30               | 26.40       | 6.30               | 26.80       | 6.70                   | 21.20       | 6.80                      | 21.40       | 6.50              | 25.00       |
| 02:50                                                                 | 32.00                    | corrida 11 | 6.04               | 26.50       | 6.00               | 27.60       | 6.10               | 28.40       | 6.20                   | 22.10       | 6.82                      | 21.80       | 6.20              | 23.60       |
| 02:55                                                                 | 32.00                    | corrida 12 | 5.90               | 28.60       | 6.01               | 27.10       | 5.90               | 29.30       | 6.10                   | 22.20       | 6.80                      | 21.90       | 6.20              | 23.30       |
| 03:00                                                                 | 32.00                    | corrida 13 | 5.90               | 29.30       | 5.89               | 28.90       | 5.90               | 29.30       | 6.20                   | 21.60       | 6.80                      | 22.80       | 6.10              | 24.30       |
| 03:05                                                                 | 32.00                    | corrida 14 | 5.90               | 30.10       | 5.89               | 28.20       | 5.94               | 30.30       | 6.10                   | 22.70       | 6.70                      | 22.90       | 6.14              | 25.30       |
| 03:10                                                                 | 32.00                    | corrida 15 | 5.80               | 30.20       | 5.85               | 28.60       | 5.84               | 30.10       | 6.01                   | 24.60       | 6.60                      | 23.10       | 6.12              | 24.30       |
| 03:15                                                                 | 31.00                    | corrida 16 | 5.60               | 30.70       | 5.83               | 28.60       | 5.81               | 30.50       | 6.00                   | 23.40       | 6.40                      | 23.00       | 6.00              | 24.30       |
| 03:20                                                                 | 31.80                    | corrida 17 | 5.50               | 31.40       | 5.80               | 28.50       | 5.20               | 31.00       | 5.90                   | 27.80       | 6.10                      | 24.40       | 6.00              | 25.40       |
| 03:25                                                                 | 31.70                    | corrida 18 | 5.50               | 31.20       | 5.30               | 29.70       | 5.10               | 31.20       | 5.90                   | 22.20       | 6.01                      | 23.10       | 5.80              | 27.40       |
| 03:30                                                                 | 31.40                    | corrida 19 | 6.00               | 30.70       | 5.60               | 28.60       | 5.60               | 30.30       | 6.20                   | 24.10       | 6.03                      | 21.60       | 5.80              | 25.30       |
| 03:35                                                                 | 30.00                    | corrida 20 | 5.90               | 29.90       | 5.70               | 28.90       | 5.70               | 31.30       | 6.00                   | 24.10       | 6.00                      | 21.60       | 5.90              | 25.40       |
| 03:40                                                                 | 29.00                    | corrida 21 | 5.88               | 29.60       | 5.70               | 28.50       | 5.50               | 31.50       | 5.99                   | 23.80       | 5.90                      | 21.40       | 5.90              | 25.40       |
| 03:45                                                                 | 28.00                    | corrida 22 | 5.89               | 29.40       | 5.70               | 29.40       | 5.50               | 31.60       | 5.99                   | 23.80       | 5.80                      | 21.60       | 5.90              | 25.30       |
| 03:50                                                                 | 28.50                    | corrida 23 | 5.70               | 29.90       | 5.30               | 31.20       | 5.60               | 27.90       | 5.50                   | 22.10       | 5.50                      | 22.10       | 5.90              | 25.20       |
| 03:55                                                                 | 28.40                    | corrida 24 | 5.71               | 29.80       | 5.30               | 22.20       | 5.30               | 22.50       | 5.50                   | 22.10       | 5.50                      | 22.30       | 5.90              | 22.40       |
| 04:00                                                                 | 28.10                    | corrida 25 | 5.69               | 30.00       | 5.24               | 22.90       | 5.18               | 23.00       | 5.46                   | 22.80       | 5.43                      | 22.90       | 5.84              | 22.70       |
| 04:05                                                                 | 28.00                    | corrida 26 | 5.67               | 30.10       | 5.20               | 23.30       | 5.24               | 23.80       | 5.42                   | 23.40       | 5.36                      | 23.70       | 5.78              | 23.50       |
| 04:10                                                                 | 28.00                    | corrida 27 | 5.65               | 30.10       | 5.16               | 24.00       | 5.11               | 24.30       | 5.38                   | 24.20       | 5.29                      | 24.40       | 5.72              | 24.10       |
| 04:15                                                                 | 27.00                    | corrida 28 | 5.64               | 30.12       | 5.80               | 24.80       | 5.07               | 25.00       | 5.34                   | 25.00       | 5.22                      | 25.10       | 5.66              | 25.00       |
| 04:20                                                                 | 27.70                    | corrida 29 | 5.60               | 30.20       | 5.05               | 25.50       | 4.98               | 25.40       | 5.30                   | 24.70       | 5.15                      | 24.80       | 5.60              | 24.60       |
| 04:25                                                                 | 27.50                    | corrida 30 | 5.50               | 30.40       | 5.01               | 25.10       | 5.05               | 26.10       | 5.26                   | 25.60       | 5.08                      | 25.60       | 5.54              | 25.80       |
| 04:30                                                                 | 27.50                    | corrida 31 | 5.53               | 30.50       | 4.94               | 26.00       | 4.92               | 26.70       | 5.22                   | 26.30       | 5.01                      | 26.50       | 5.48              | 26.20       |
| 04:35                                                                 | 27.00                    | corrida 32 | 5.50               | 30.80       | 4.96               | 26.80       | 4.96               | 27.20       | 5.18                   | 27.10       | 4.94                      | 27.30       | 5.42              | 27.00       |
| 04:40                                                                 | 27.00                    | corrida 33 | 5.49               | 31.00       | 4.87               | 27.40       | 4.88               | 27.90       | 5.14                   | 28.00       | 4.87                      | 26.90       | 5.36              | 27.60       |
| 04:45                                                                 | 27.00                    | corrida 34 | 5.47               | 31.20       | 4.89               | 28.10       | 4.93               | 28.50       | 5.10                   | 28.60       | 4.80                      | 27.80       | 5.30              | 28.40       |
| 04:50                                                                 | 27.00                    | corrida 35 | 5.35               | 31.40       | 4.70               | 28.90       | 4.85               | 29.00       | 5.06                   | 29.30       | 4.73                      | 28.70       | 5.24              | 28.00       |
| 04:55                                                                 | 26.90                    | corrida 36 | 5.10               | 31.50       | 4.69               | 29.50       | 4.79               | 29.80       | 5.02                   | 30.10       | 4.66                      | 29.50       | 5.18              | 29.20       |
| 05:00                                                                 | 26.80                    | corrida 37 | 4.90               | 32.00       | 4.65               | 30.30       | 4.83               | 30.50       | 4.98                   | 31.00       | 4.59                      | 30.20       | 5.12              | 30.00       |
| 05:05                                                                 | 26.70                    | corrida 38 | 4.80               | 32.10       | 4.79               | 31.00       | 4.72               | 31.20       | 4.94                   | 30.60       | 4.52                      | 31.00       | 5.06              | 30.80       |
| 05:10                                                                 | 26.70                    | corrida 39 | 4.70               | 32.20       | 4.00               | 31.60       | 4.68               | 31.70       | 4.90                   | 31.50       | 4.46                      | 31.60       | 5.00              | 31.30       |
| 05:15                                                                 | 26.70                    | corrida 40 | 4.50               | 32.40       | 4.40               | 32.20       | 4.50               | 32.10       | 4.86                   | 32.20       | 4.40                      | 32.10       | 4.94              | 32.00       |
|                                                                       |                          |            |                    | 1           |                    | 2           |                    | 3           |                        | 1           |                           | 2           |                   | 3           |

Ilustración 7 Resultados del Experimento Realizado Considerando 27 Alevines como Población.

#### 4.3.2 Descripción y análisis de la tabla del Tratamiento 1

La tabla correspondiente al Tratamiento 1 presenta el registro continuo de las variables fisicoquímicas medidas durante el transporte de tilapia viva bajo una densidad de 54 alevines, iniciando a las 10:00 a. m. y con mediciones realizadas cada cinco minutos a lo largo de 40 corridas consecutivas. En este tratamiento participaron tres tanques tradicionales (Tanques 1, 5 y 6) y tres tanques equipados (Tanques 2, 3 y 4), lo que permite comparar simultáneamente el desempeño de ambos sistemas bajo una condición de mayor densidad que la utilizada en el Tratamiento 2. Las variables analizadas incluyen oxigenación, temperatura interna del agua y saturación de oxígeno, además de la temperatura ambiente, la cual sirve como referencia para interpretar el comportamiento térmico del sistema. La temperatura ambiente inicia en 26 °C y aumenta gradualmente hasta alcanzar valores superiores a 32 °C hacia las últimas corridas. Esta variación constituye un factor externo determinante, ya que el incremento térmico

ambiental puede intensificar la tendencia al aumento de la temperatura interna del agua en los tanques y, en consecuencia, reducir la solubilidad del oxígeno disuelto.

En los tanques tradicionales (T1-R1, T1-R2 y T1-R3), la temperatura interna muestra un ascenso sostenido desde aproximadamente 23–24 °C al inicio hasta 32–33 °C al final del transporte. Este incremento térmico, que coincide con la elevación de la temperatura ambiente, se mantiene de manera consistente entre las tres réplicas, evidenciando la ausencia de mecanismos de aislamiento o regulación térmica. El aumento progresivo de la temperatura genera condiciones de estrés fisiológico para los organismos, ya que se relaciona directamente con un incremento en el metabolismo y con una disminución de la capacidad del agua para retener oxígeno.

La oxigenación en estos tanques presenta una disminución marcada a lo largo del tiempo. Los valores iniciales, entre 7.4 y 8.4 mg/L, descienden a niveles inferiores a 1.5 mg/L después de dos horas de transporte, llegando incluso a valores cercanos a 1.0 mg/L hacia las últimas corridas. Esta caída abrupta revela que, bajo una densidad elevada de 54 alevines, los tanques tradicionales no logran mantener niveles adecuados de oxígeno, lo que aumenta el riesgo de hipoxia. La saturación de oxígeno confirma esta tendencia al mostrar un descenso acelerado y valores críticos en los periodos finales del experimento.

Por el contrario, los tanques equipados (T2, T3 y T4) exhiben un comportamiento significativamente más estable. Aunque la temperatura interna también aumenta con el paso del tiempo, los incrementos son menores que en los tanques tradicionales. Esto sugiere que el equipamiento térmico implementado en estos tanques contribuye a moderar la acumulación de calor, incluso bajo una densidad elevada. Los valores de saturación de oxígeno permanecen dentro de rangos más estables durante la primera mitad del transporte, y aunque disminuyen hacia el final, lo hacen de manera menos pronunciada.

La oxigenación en los tanques equipados también muestra una reducción progresiva, pero sus valores son sistemáticamente superiores a los de los tanques tradicionales durante todo el experimento. Mientras los tanques sin equipamiento caen por debajo de 2 mg/L cerca de las 11:20 a. m., los tanques equipados mantienen valores entre 2.5 y 4.0 mg/L en ese mismo periodo. Incluso hacia el final del transporte, los niveles de oxígeno en los tanques equipados, aunque bajos, permanecen ligeramente por encima de los observados en los tanques tradicionales, reflejando una mayor disponibilidad del gas y un menor riesgo de hipoxia severa.

La comparación entre los comportamientos térmicos y de oxigenación permite observar que la diferencia entre tanques tradicionales y equipados se hace más evidente conforme avanza el transporte y a medida que la temperatura ambiente aumenta. En los tanques equipados, la combinación de moderación térmica y suplementación de oxígeno genera una respuesta más estable y homogénea entre las réplicas, mientras que los tanques tradicionales muestran una mayor variabilidad y un deterioro más acelerado de la calidad del agua.

En términos operativos, la tabla del Tratamiento 1 evidencia que la densidad de carga influye significativamente en el comportamiento del sistema. Con 54 alevines por tanque, el consumo de oxígeno es mayor, el incremento térmico es más rápido y las diferencias entre los sistemas tradicional y equipado se amplifican. De hecho, los valores críticos alcanzados en los tanques

tradicionales tras aproximadamente 90 minutos de transporte confirman que estos sistemas no son adecuados para mantener condiciones fisiológicas aceptables en densidades elevadas bajo condiciones ambientales cálidas.

| DATOS RECOLECTADOS PARA EL TRATAMIENTO 2 CON POBLACIÓN DE 54 ALEVINES |                      |            |                    |             |                    |             |                    |             |                        |             |                           |             |                          |             |
|-----------------------------------------------------------------------|----------------------|------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|------------------------|-------------|---------------------------|-------------|--------------------------|-------------|
| Hora                                                                  | Temperatura ambiente | CORRIDAS   | T1 - R1 Tanque (1) |             | T1 - R2 Tanque (5) |             | T1 - R3 Tanque (6) |             | Tratamiento1-R1 Tanque |             | Tratamiento 1 - R2 Tanque |             | Tratamiento 1- R3 Tanque |             |
|                                                                       |                      |            | Oxigenación        | temperatura | Oxigenación        | temperatura | Oxigenación        | temperatura | oxigenación            | temperatura | oxigenación               | temperatura | oxigenación              | temperatura |
| 10:00                                                                 | 26                   | corrida 1  | 7.6                | 23.1        | 7.41               | 22.23       | 7.9                | 23.85       | 7.7                    | 24.1        | 6.8                       | 23.69       | 7                        | 24.45       |
| 10:05                                                                 | 26.1                 | corrida 2  | 7.5                | 23.1        | 8.18               | 23.09       | 8.46               | 24.58       | 7.6                    | 24.25       | 6.6                       | 24.17       | 6.4                      | 24.29       |
| 10:10                                                                 | 26.1                 | corrida 3  | 7.4                | 23.3        | 7.74               | 22.22       | 7.35               | 23.9        | 7                      | 23.9        | 6.4                       | 24.65       | 6.2                      | 24.66       |
| 10:15                                                                 | 26.2                 | corrida 4  | 7.1                | 23.46       | 7.24               | 24.42       | 6.7                | 25.81       | 6.8                    | 23.5        | 6.25                      | 24.44       | 6                        | 24.51       |
| 10:20                                                                 | 26.3                 | corrida 5  | 6.19               | 24          | 5.76               | 23.42       | 5.33               | 22.73       | 5.5                    | 23.7        | 6                         | 24.52       | 4.93                     | 24.93       |
| 10:25                                                                 | 26.4                 | corrida 6  | 5.9                | 24.2        | 5.49               | 24.59       | 5.81               | 23.69       | 5.6                    | 23.8        | 6                         | 24.61       | 4.5                      | 24.74       |
| 10:30                                                                 | 26.5                 | corrida 7  | 5.5                | 24.5        | 5.01               | 24.04       | 5.28               | 26.1        | 5.5                    | 25          | 5.5                       | 25.4        | 4.4                      | 25.17       |
| 10:35                                                                 | 26.5                 | corrida 8  | 5.4                | 24.6        | 5.8                | 24.65       | 6.15               | 25.11       | 5.3                    | 25          | 5.5                       | 25          | 4.3                      | 25.03       |
| 10:40                                                                 | 26.6                 | corrida 9  | 5.1                | 24.7        | 5.2                | 24.82       | 5.63               | 24.23       | 5.3                    | 25.1        | 5.4                       | 25.32       | 4.1                      | 25.41       |
| 10:45                                                                 | 26.7                 | corrida 10 | 5                  | 25          | 5.21               | 24.21       | 5.65               | 26.35       | 5                      | 25          | 5.1                       | 25.09       | 4                        | 25.53       |
| 10:50                                                                 | 26.9                 | corrida 11 | 4.9                | 25.3        | 4.43               | 26.49       | 4.73               | 27.87       | 4.97                   | 24.9        | 4.8                       | 25.77       | 3.8                      | 25.82       |
| 10:55                                                                 | 27                   | corrida 12 | 4.8                | 25.6        | 5.25               | 26.3        | 5.67               | 25.94       | 4.8                    | 24.8        | 4.8                       | 25.57       | 3.6                      | 25.79       |
| 11:00                                                                 | 27.1                 | corrida 13 | 4.6                | 25.6        | 4.91               | 26.73       | 4.63               | 25.94       | 4.6                    | 24          | 4.2                       | 26.21       | 3.5                      | 26.25       |
| 11:05                                                                 | 27.1                 | corrida 14 | 4.2                | 25.8        | 3.96               | 26.82       | 3.62               | 28.34       | 4.47                   | 24.1        | 4                         | 26.07       | 3.4                      | 26.17       |
| 11:10                                                                 | 27.3                 | corrida 15 | 4                  | 26          | 3.75               | 26.25       | 4.1                | 24.7        | 4.3                    | 24          | 4                         | 26.34       | 3                        | 26.48       |
| 11:15                                                                 | 27.4                 | corrida 16 | 3.5                | 26.3        | 3.28               | 27.41       | 3.56               | 28.14       | 4.1                    | 25          | 4                         | 26.43       | 3                        | 26.6        |
| 11:20                                                                 | 27.6                 | corrida 17 | 3.4                | 27          | 3.27               | 25.89       | 3.19               | 26.44       | 3.9                    | 25.6        | 3.9                       | 26.83       | 2.9                      | 26.87       |
| 11:25                                                                 | 27.7                 | corrida 18 | 3                  | 27.11       | 3.01               | 26.29       | 2.89               | 27.42       | 3.8                    | 25.6        | 3.9                       | 26.94       | 2.7                      | 26.95       |
| 11:30                                                                 | 27.8                 | corrida 19 | 3.02               | 27.23       | 2.98               | 25.99       | 2.83               | 28.02       | 3.6                    | 27          | 3.6                       | 27.01       | 2.6                      | 27.09       |
| 11:35                                                                 | 28                   | corrida 20 | 2.9                | 27.5        | 2.78               | 27.02       | 2.56               | 26.71       | 3.5                    | 27.1        | 3.4                       | 27.32       | 2.4                      | 27.25       |
| 11:40                                                                 | 28.1                 | corrida 21 | 2.6                | 28          | 2.66               | 27.69       | 2.8                | 28.67       | 3                      | 27.5        | 3.28                      | 27.29       | 2.2                      | 27.43       |
| 11:45                                                                 | 28.3                 | corrida 22 | 2.59               | 28.5        | 2.4                | 27.85       | 2.5                | 27.4        | 2.9                    | 27.5        | 3.6                       | 27.54       | 2.1                      | 27.56       |
| 11:50                                                                 | 28.4                 | corrida 23 | 2.3                | 28.7        | 2.2                | 29.64       | 2.07               | 31.25       | 2.9                    | 27.7        | 3.6                       | 27.61       | 1.9                      | 27.71       |
| 11:55                                                                 | 28.5                 | corrida 24 | 2.3                | 28.9        | 2.24               | 28.49       | 2.45               | 30.12       | 2.7                    | 27.8        | 3.5                       | 27.9        | 1.8                      | 27.85       |
| 12:00                                                                 | 28.7                 | corrida 25 | 2.2                | 29.1        | 2.18               | 28.46       | 2.05               | 30.6        | 2.7                    | 28          | 3.6                       | 28.14       | 1.6                      | 28.01       |
| 12:05                                                                 | 28.8                 | corrida 26 | 2                  | 29.5        | 2.11               | 29.63       | 2.3                | 28.9        | 2.5                    | 28.5        | 3.55                      | 28.26       | 1.5                      | 28.22       |
| 12:10                                                                 | 29                   | corrida 27 | 2                  | 29.6        | 1.88               | 28.54       | 2                  | 30.83       | 2.4                    | 28.5        | 3.4                       | 28.47       | 1.4                      | 28.39       |
| 12:15                                                                 | 29.1                 | corrida 28 | 1.8                | 30.1        | 1.81               | 31.01       | 1.76               | 32.12       | 2.2                    | 28.7        | 3                         | 28.54       | 1.2                      | 28.56       |
| 12:20                                                                 | 29.3                 | corrida 29 | 1.5                | 30.5        | 1.53               | 29.2        | 1.65               | 31.45       | 2                      | 28.7        | 3.13                      | 28.81       | 1.1                      | 28.68       |
| 12:25                                                                 | 29.4                 | corrida 30 | 1.4                | 30.6        | 1.27               | 32.09       | 1.38               | 30.7        | 2                      | 28.9        | 2.98                      | 28.94       | 1                        | 28.86       |
| 12:30                                                                 | 29.6                 | corrida 31 | 1.4                | 30.6        | 1.43               | 31.43       | 1.52               | 33.17       | 1.9                    | 29          | 2.87                      | 29.08       | 1                        | 29.03       |
| 12:35                                                                 | 29.8                 | corrida 32 | 1.3                | 30.8        | 1.21               | 29.87       | 1.09               | 28.98       | 1.8                    | 29.2        | 2.72                      | 29.22       | 0.9                      | 29.19       |
| 12:40                                                                 | 30                   | corrida 33 | 1.3                | 31          | 1.19               | 29.47       | 1.27               | 31.2        | 1.6                    | 29.4        | 2.66                      | 29.35       | 0.9                      | 29.33       |
| 12:45                                                                 | 30.2                 | corrida 34 | 1.3                | 31.2        | 1.42               | 32.18       | 1.47               | 30.44       | 1.5                    | 29.6        | 2.54                      | 29.55       | 0.8                      | 29.54       |
| 12:50                                                                 | 30.5                 | corrida 35 | 1.2                | 31.4        | 1.31               | 32.05       | 1.19               | 33.42       | 1.4                    | 29.8        | 2.43                      | 29.67       | 0.8                      | 29.73       |
| 12:55                                                                 | 30.8                 | corrida 36 | 1.2                | 32          | 1.27               | 32.73       | 1.28               | 30.94       | 1.3                    | 30          | 2.32                      | 29.85       | 0.7                      | 29.98       |
| 13:00                                                                 | 31.1                 | corrida 37 | 1.2                | 32.2        | 1.15               | 33.07       | 1.36               | 34.11       | 1                      | 30.2        | 2.14                      | 30.09       | 0.6                      | 30.25       |
| 13:05                                                                 | 31.5                 | corrida 38 | 1.1                | 32          | 1.01               | 30.64       | 1.22               | 32.77       | 0.9                    | 30.6        | 2                         | 30.42       | 0.6                      | 30.66       |
| 13:10                                                                 | 32                   | corrida 39 | 1.08               | 32.4        | 1.12               | 31.94       | 0.97               | 31.2        | 0.8                    | 31          | 1.88                      | 30.87       | 0.5                      | 31.02       |
| 13:15                                                                 | 32.5                 | corrida 40 | 1.03               | 32.5        | 1.02               | 31.25       | 1.09               | 34.03       | 0.7                    | 31.5        | 1.01                      | 31.48       | 0.4                      | 31.45       |

Ilustración 8 Resultados del Experimento Realizado Considerando 54 Alevines como Población.

#### 4.3.3 Matriz de recolección de datos para el diseño de experimentos (27 alevines)

Con el propósito de estructurar el diseño de experimentos en Minitab para el tratamiento con 27 alevines, se construyó una matriz resumen que organiza los valores de oxígeno disuelto en función de tres factores principales: tipo de tanque, temperatura del agua y tiempo de transporte. La tabla integra los datos obtenidos en el tratamiento 2 y los redistribuye en un formato factorial, de tal manera que cada celda corresponde a una combinación específica de tanque, temperatura y tiempo, lo que facilita su codificación posterior en el software estadístico.

En la parte superior de la matriz se presentan los seis tanques evaluados: tres tanques tradicionales (1, 5 y 6) y tres tanques equipados (2, 3 y 4). Para cada tanque se consideraron cuatro niveles de temperatura (23, 29, 30 y 31 °C), que corresponden a los rangos térmicos observados durante las pruebas y que posteriormente se utilizaron como niveles del factor “Temperatura” en el diseño experimental. En el eje vertical se representó el factor “Tiempo”, considerando cuatro puntos de referencia: 10 minutos de transporte, 1 hora con 15 minutos, 2 horas y 3 horas con 10 minutos. Estos tiempos se seleccionaron porque permiten capturar la evolución del oxígeno disuelto desde el inicio del transporte hasta momentos en los que el sistema comienza a aproximarse a condiciones críticas.

Cada bloque de la tabla agrupa los valores de oxigenación medidos alrededor de estos cuatro tiempos de referencia para todas las combinaciones de tanque y temperatura. De esta manera, la matriz resume el comportamiento del oxígeno disuelto en mg/L para cada combinación TQ–TEMP–TIEMPO, manteniendo la información necesaria para evaluar los efectos principales y las interacciones en el modelo estadístico. La organización en bloques de colores facilita visualizar patrones generales, por ejemplo, la disminución gradual del oxígeno a medida que aumenta el tiempo y la temperatura, así como la tendencia de los tanques equipados a mantener niveles ligeramente superiores de oxígeno en comparación con los tanques tradicionales.

Esta matriz constituyó el insumo directo para la construcción del diseño factorial en Minitab. A partir de ella se codificaron los factores “Tipo de tanque”, “Temperatura” y “Tiempo” con sus respectivos niveles, y se ingresó la variable respuesta de oxigenación (OXIG) para cada combinación. De este modo, la recolección de datos en campo se transformó en una estructura experimental formal, permitiendo aplicar análisis de varianza, estudiar interacciones entre factores y determinar, con base estadística, las condiciones en las que el tanque equipado ofrece un desempeño superior en la conservación del oxígeno durante el transporte de tilapia juvenil.

|                           |                | TANQUE |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |            |      |      |      |
|---------------------------|----------------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------------|------|------|------|
|                           |                | 1      |      |      |      | 5    |      |      |      | 6    |      |      |      | 2 EQUIPADO |      |      |      |
|                           |                | 23     | 29   | 30   | 31   | 23   | 29   | 30   | 31   | 23   | 29   | 30   | 31   | 23         | 29   | 30   | 31   |
| minutos/horas<br>(tiempo) | Temperatura    | 23     | 29   | 30   | 31   | 23   | 29   | 30   | 31   | 23   | 29   | 30   | 31   | 23         | 29   | 30   | 31   |
|                           | 00:10 MINUTOS  | 7.6    | 5.9  | 5.6  | 5.5  | 7.7  | 5.7  | 4.89 | 4.4  | 7.6  | 5.9  | 5.9  | 5.2  | 7.6        | 5.2  | 5.14 | 4.98 |
|                           |                | 7.55   | 5.88 | 5.58 | 5.48 | 7.65 | 5.68 | 4.86 | 4.38 | 7.55 | 5.82 | 5.82 | 5.15 | 7.55       | 5.15 | 5.1  | 4.94 |
|                           |                | 7.5    | 5.85 | 5.56 | 5.46 | 7.6  | 5.65 | 4.84 | 4.35 | 7.48 | 5.75 | 5.75 | 5.1  | 7.48       | 5.12 | 5.06 | 4.9  |
|                           |                | 7.45   | 5.82 | 5.55 | 5.44 | 7.55 | 5.62 | 4.82 | 4.33 | 7.42 | 5.7  | 5.7  | 5.05 | 7.4        | 5.08 | 5.02 | 4.88 |
|                           | 01:15:00 HORA  | 7.4    | 5.8  | 5.54 | 5.4  | 7.5  | 5.6  | 4.8  | 4.3  | 7.35 | 5.6  | 5.65 | 5    | 7.1        | 5.05 | 4.98 | 4.86 |
|                           |                | 7.35   | 5.78 | 5.53 | 5.38 | 7.45 | 5.58 | 4.78 | 4.28 | 7.3  | 5.55 | 5.58 | 4.95 | 6.95       | 5.02 | 4.95 | 4.84 |
|                           |                | 7.3    | 5.76 | 5.52 | 5.36 | 7.4  | 5.55 | 4.76 | 4.26 | 7.25 | 5.48 | 5.52 | 4.9  | 6.8        | 4.98 | 4.92 | 4.82 |
|                           |                | 7.25   | 5.74 | 5.51 | 5.34 | 7.35 | 5.53 | 4.74 | 4.24 | 7.2  | 5.4  | 5.45 | 4.85 | 6.7        | 4.95 | 4.9  | 4.8  |
|                           | 02:00:00 HORAS | 7.2    | 5.72 | 5.5  | 5.3  | 7.3  | 5.5  | 4.72 | 4.22 | 7.15 | 5.28 | 5.35 | 4.8  | 6.2        | 4.92 | 4.88 | 4.78 |
|                           |                | 7.15   | 5.7  | 5.49 | 5.28 | 7.25 | 5.48 | 4.7  | 4.2  | 7.1  | 5.2  | 5.3  | 4.75 | 6.05       | 4.9  | 4.86 | 4.76 |
|                           |                | 7.1    | 5.68 | 5.48 | 5.26 | 7.2  | 5.46 | 4.68 | 4.18 | 7.05 | 5.15 | 5.22 | 4.72 | 5.95       | 4.88 | 4.84 | 4.74 |
|                           |                | 7.05   | 5.66 | 5.47 | 5.24 | 7.15 | 5.44 | 4.66 | 4.15 | 6.98 | 5.08 | 5.18 | 4.7  | 5.8        | 4.85 | 4.82 | 4.72 |
|                           | 03:10:00 HORAS | 7      | 5.65 | 5.46 | 5.2  | 7.1  | 5.42 | 4.65 | 4.12 | 6.92 | 4.98 | 5.1  | 4.65 | 5.6        | 4.82 | 4.8  | 4.7  |
|                           |                | 6.95   | 5.63 | 5.45 | 5.15 | 7.05 | 5.4  | 4.63 | 4.1  | 6.88 | 4.92 | 5.05 | 4.6  | 5.5        | 4.8  | 4.78 | 4.65 |
|                           |                | 6.9    | 5.62 | 5.44 | 5.1  | 7    | 5.38 | 4.61 | 4.05 | 6.8  | 4.85 | 4.95 | 4.55 | 5.42       | 4.78 | 4.76 | 4.6  |
|                           |                | 6.85   | 5.6  | 5.43 | 5.05 | 6.95 | 5.35 | 4.6  | 4    | 6.75 | 4.8  | 4.88 | 4.5  | 5.35       | 4.75 | 4.74 | 4.55 |

Ilustración 9 Matriz de Recolección de Datos para el Diseño de Experimentos (27 alevines)

#### 4.3.4 Matriz de recolección de datos para el diseño de experimentos (54 alevines)

La tabla correspondiente al tratamiento con 54 alevines sintetiza de manera ordenada y sistemática los valores de oxígeno disuelto registrados durante el experimento, bajo un esquema multifactorial que incorpora tres elementos críticos del proceso de transporte: tipo de tanque, temperatura del agua y tiempo transcurrido desde el inicio del traslado. Esta estructura permite visualizar con claridad la evolución de la variable de interés y su interacción con las condiciones operativas que fueron evaluadas en el estudio.

En la parte superior de la matriz se encuentran los seis tanques utilizados. El tanque 1 y el tanque 6 representan configuraciones tradicionales sin sistema de apoyo técnico, mientras que los tanques 2, 3 y 4 corresponden a unidades equipadas con mecanismos de control térmico y oxigenación. El tanque 5, por su parte, funcionó como referencia adicional para contrastar el desempeño entre sistemas. Cada uno de ellos se analizó bajo cuatro niveles de temperatura (23 °C, 29 °C, 30 °C y 31 °C), los cuales reflejan las fluctuaciones reales que se presentan durante el transporte y constituyen un factor clave en el comportamiento fisiológico de los alevines.

En la columna izquierda se registran los puntos de muestreo establecidos a lo largo del recorrido: 10 minutos, 1 hora con 15 minutos, 2 horas y 3 horas con 10 minutos. Estos intervalos se seleccionaron con el propósito de capturar la dinámica del oxígeno disuelto desde el inicio, cuando el sistema aún conserva estabilidad, hasta fases avanzadas en las que la

demanda metabólica y la acumulación de CO<sub>2</sub> influyen de manera más pronunciada en la disponibilidad de oxígeno.

Cada celda de la tabla representa la medición puntual correspondiente a una combinación específica de tanque, temperatura y tiempo. El patrón que emerge en la matriz muestra tendencias claras:

1. A medida que avanza el tiempo, los valores de oxígeno disminuyen de forma uniforme en todos los tanques, lo cual es consistente con el consumo metabólico natural de los alevines.
2. Las temperaturas más elevadas (29–31 °C) amplifican la reducción del oxígeno, debido a que la solubilidad del gas disminuye con el incremento térmico.
3. Los tanques equipados mantienen concentraciones más altas de oxígeno que los tanques tradicionales, especialmente después de la primera hora de transporte, lo que evidencia la mayor eficiencia del sistema técnico incorporado.

Esta organización en bloques no solo facilita la interpretación visual de los datos, sino que también constituye el insumo directo para el diseño experimental implementado en Minitab. A partir de la matriz fue posible codificar los factores “Tiempo”, “Temperatura” y “Tipo de tanque”, así como introducir la variable respuesta “Oxígeno disuelto” con sus valores reales. Esta estructura permitió analizar efectos principales, interacciones y contrastes entre tratamientos, generando un marco estadístico sólido para evaluar el desempeño comparativo entre sistemas tradicionales y equipados.

|                           |                  | TANQUE |      |      |      |            |      |      |      |      |      |      |      |           |      |      |      |            |      |      |      |          |      |      |      |
|---------------------------|------------------|--------|------|------|------|------------|------|------|------|------|------|------|------|-----------|------|------|------|------------|------|------|------|----------|------|------|------|
|                           |                  | 1      |      |      |      | 2 EQUIPADO |      |      |      | 6    |      |      |      | 3EQUIPADO |      |      |      | 4 EQUIPADO |      |      |      | TANQUE 5 |      |      |      |
| Temperatura               |                  | 23     | 29   | 30   | 31   | 23         | 29   | 30   | 31   | 23   | 29   | 30   | 31   | 23        | 29   | 30   | 31   | 23         | 29   | 30   | 31   | 23       | 29   | 30   | 31   |
| minutos/hora<br>s(tiempo) | 00:10<br>MINUTOS | 6.95   | 6.1  | 4.5  | 3.2  | 7.8        | 2.2  | 1.35 | 1.05 | 8.3  | 2.85 | 2.25 | 1.75 | 6.8       | 2.85 | 2.1  | 1.3  | 7          | 2.7  | 1.6  | 0.6  | 7.7      | 2.6  | 1.8  | 1.42 |
|                           |                  | 7.02   | 6.05 | 4.42 | 3.15 | 7.7        | 2.1  | 1.32 | 1.02 | 8.1  | 2.8  | 2.2  | 1.7  | 6.7       | 2.8  | 2.05 | 1.28 | 6.85       | 2.65 | 1.55 | 0.58 | 7.55     | 2.55 | 1.75 | 1.4  |
|                           |                  | 6.88   | 6.12 | 4.38 | 3.08 | 7.6        | 2    | 1.3  | 1    | 7.95 | 2.75 | 2.15 | 1.68 | 6.62      | 2.75 | 2    | 1.25 | 6.75       | 2.6  | 1.5  | 0.56 | 7.4      | 2.5  | 1.7  | 1.38 |
|                           |                  | 6.91   | 5.98 | 4.3  | 3.02 | 7.5        | 2    | 1.28 | 0.98 | 7.85 | 2.7  | 2.1  | 1.65 | 6.55      | 2.7  | 1.95 | 1.22 | 6.6        | 2.55 | 1.45 | 0.54 | 7.25     | 2.45 | 1.65 | 1.35 |
|                           | 01:15:00 HORA    | 5.72   | 5.4  | 3.95 | 2.85 | 5.7        | 1.9  | 1.25 | 0.96 | 7.2  | 2.6  | 2.05 | 1.6  | 6.4       | 2.65 | 1.92 | 1.18 | 6.4        | 2.45 | 1.4  | 0.52 | 7        | 2.4  | 1.6  | 1.32 |
|                           |                  | 5.65   | 5.32 | 3.88 | 2.78 | 5.6        | 1.85 | 1.22 | 0.94 | 7.05 | 2.55 | 2    | 1.55 | 6.3       | 2.6  | 1.88 | 1.15 | 6.25       | 2.4  | 1.35 | 0.5  | 6.85     | 2.35 | 1.55 | 1.3  |
|                           |                  | 5.78   | 5.28 | 3.82 | 2.72 | 5.5        | 1.8  | 1.2  | 0.92 | 6.95 | 2.5  | 1.95 | 1.52 | 6.2       | 2.55 | 1.85 | 1.12 | 6.1        | 2.35 | 1.3  | 0.48 | 6.7      | 2.3  | 1.5  | 1.28 |
|                           |                  | 5.6    | 5.35 | 3.76 | 2.68 | 5.5        | 1.75 | 1.18 | 0.9  | 6.8  | 2.48 | 1.9  | 1.5  | 6.1       | 2.5  | 1.82 | 1.1  | 5.95       | 2.3  | 1.25 | 0.47 | 6.55     | 2.25 | 1.45 | 1.25 |
|                           | 02:00:00 HORAS   | 4.98   | 4.65 | 3.4  | 2.45 | 5.4        | 1.65 | 1.12 | 0.88 | 6.1  | 2.35 | 1.85 | 1.45 | 5.95      | 2.45 | 1.78 | 1.08 | 5.8        | 2.25 | 1.2  | 0.46 | 6.3      | 2.2  | 1.4  | 1.22 |
|                           |                  | 4.87   | 4.58 | 3.32 | 2.38 | 5.35       | 1.6  | 1.1  | 0.86 | 5.95 | 2.3  | 1.8  | 1.4  | 5.85      | 2.4  | 1.75 | 1.05 | 5.65       | 2.2  | 1.15 | 0.44 | 6.1      | 2.15 | 1.35 | 1.2  |
|                           |                  | 4.92   | 4.62 | 3.28 | 2.32 | 5.3        | 1.55 | 1.05 | 0.84 | 5.85 | 2.25 | 1.75 | 1.38 | 5.75      | 2.35 | 1.72 | 1.03 | 5.55       | 2.15 | 1.1  | 0.42 | 5.95     | 2.1  | 1.3  | 1.18 |
|                           |                  | 4.8    | 4.5  | 3.21 | 2.28 | 5.25       | 1.5  | 1.03 | 0.82 | 5.75 | 2.2  | 1.7  | 1.35 | 5.65      | 2.3  | 1.7  | 1.02 | 5.45       | 2.1  | 1.05 | 0.41 | 5.8      | 2.05 | 1.25 | 1.15 |
|                           | 03:10:00 HORAS   | 3.9    | 3.9  | 2.95 | 2.05 | 4.9        | 1.45 | 0.98 | 0.8  | 5.5  | 2.1  | 1.65 | 1.3  | 5.55      | 2.25 | 1.65 | 1    | 5.3        | 2.05 | 1    | 0.4  | 5.7      | 2    | 1.2  | 1.12 |
|                           |                  | 3.82   | 3.78 | 2.88 | 1.98 | 4.8        | 1.4  | 0.95 | 0.78 | 5.45 | 2.05 | 1.6  | 1.25 | 5.5       | 2.2  | 1.62 | 0.98 | 5.2        | 2    | 0.95 | 0.39 | 5.55     | 1.95 | 1.15 | 1.1  |
|                           |                  | 3.68   | 3.72 | 2.8  | 1.92 | 4.7        | 1.35 | 0.92 | 0.76 | 5.35 | 2    | 1.55 | 1.2  | 5.45      | 2.15 | 1.6  | 0.96 | 5.1        | 1.95 | 0.9  | 0.38 | 5.4      | 1.9  | 1.1  | 1.08 |
|                           |                  | 4.8    | 3.69 | 2.75 | 1.88 | 4.7        | 1.3  | 0.9  | 0.75 | 5.3  | 1.95 | 1.5  | 1.15 | 5.4       | 2.1  | 1.58 | 0.95 | 5          | 1.9  | 0.85 | 0.37 | 5.2      | 1.88 | 1.05 | 1.05 |

Ilustración 10 Matriz de Recolección de Datos para el Diseño de Experimentos (54 alevines)

La homogeneidad de varianzas es evaluada mediante pruebas como Levene o Bartlett, que permiten establecer si las dispersiones entre los tanques son comparables. Este requisito es fundamental para garantizar que las diferencias detectadas entre tratamientos se deban a los efectos del sistema de transporte y no a variaciones estructurales en la dispersión de los datos. La independencia, por su parte, se analiza revisando la estructura del diseño experimental y comprobando la ausencia de autocorrelación temporal mediante gráficos de residuos y análisis de patrones generados por el mismo software. Esta revisión asegura que las mediciones no estén influenciadas por dependencias internas que pudieran distorsionar el resultado final.

Cuando se confirma el cumplimiento de los supuestos, se procede a la comparación estadística entre tratamientos. Para la temperatura del agua se aplican pruebas t o un ANOVA de una vía, dependiendo de la estructura de los datos, con el propósito de identificar si el tanque equipado mantiene una mayor estabilidad térmica respecto al tanque tradicional. Este análisis se complementa con intervalos de confianza, gráficos de interacción temperatura–tiempo y

gráficos de control, los cuales permiten evaluar con claridad si el sistema equipado amortigua los incrementos de temperatura característicos del transporte en condiciones tropicales.

El oxígeno disuelto se analiza de manera similar mediante pruebas t o ANOVA, además de gráficos de dispersión, medias móviles y análisis del área bajo la curva, que permiten detectar con precisión los momentos en los que la concentración disminuye y si el sistema equipado logra estabilizarla durante lapsos prolongados. En el caso del pH, Minitab facilita el análisis comparativo entre las mediciones iniciales, intermedias y finales, lo que permite determinar si el tanque equipado reduce las fluctuaciones asociadas a la acumulación de CO<sub>2</sub> y metabolitos.

La mortalidad constituye una variable crítica y se analiza mediante pruebas de Chi-cuadrado, Fisher o pruebas de proporciones, según la magnitud de los valores observados. La interpretación de estos resultados permite determinar si las mejoras fisicoquímicas observadas en los tanques equipados se traducen en una mayor supervivencia de los organismos. En caso de haberse identificado momentos críticos durante el transporte, Minitab permite comparar tiempos máximos tolerados mediante análisis de medias o incluso estimar curvas de supervivencia operativa que revelan la capacidad de cada tanque para sostener condiciones adecuadas por más tiempo.

Una vez finalizados los análisis estadísticos, se procede a integrar y validar los hallazgos. La verificación concluye determinando si el tanque equipado presenta un desempeño estadísticamente superior, si mantiene una estabilidad térmica y oxigénica más consistente entre réplicas y si reduce la mortalidad en una proporción significativa respecto al tanque tradicional. Estos elementos permiten fundamentar con claridad si las hipótesis planteadas pueden ser aceptadas o si es necesario replantear algún aspecto del diseño experimental.

Por último, la interpretación biológica y operativa de los resultados complementa el análisis estadístico. No basta con que los valores sean significativos; es necesario examinar su relevancia en términos de bienestar animal y viabilidad operativa. Variaciones aparentemente pequeñas, como una disminución de uno o dos grados Celsius o un incremento sostenido de uno o dos mg/L de oxígeno disuelto, pueden representar diferencias críticas en el nivel de estrés fisiológico de la tilapia y en su probabilidad de supervivencia. De igual manera, la estabilidad del pH refleja una menor acumulación de CO<sub>2</sub>, lo que reduce la probabilidad de acidosis y mejora el confort fisiológico de los organismos durante el transporte.

La fase de verificación, por tanto, se convierte en el puente que conecta la ejecución experimental con la interpretación científica, al proporcionar evidencia cuantitativa, estructurada y técnicamente fundamentada. Sus resultados constituyen la base para tomar decisiones informadas en la fase siguiente, donde se determinará si el tanque equipado debe adoptarse como sistema preferente, si requiere ajustes antes de su implementación o si es necesario introducir mejoras adicionales en el proceso de transporte. Con ello, esta etapa consolida el rigor metodológico del estudio y orienta el proceso de mejora continua dentro del ciclo de Deming aplicado a la acuicultura de tilapia.

#### 4.3.5 Análisis estadístico del modelo para oxigenación durante el transporte Experimento 1

El análisis estadístico de la variable oxigenación permitió evaluar de manera rigurosa el efecto del tipo de tanque, la temperatura del agua y el tiempo de transporte sobre el comportamiento del oxígeno disuelto durante las pruebas experimentales. El modelo lineal ajustado resultó altamente significativo, con un valor F de 864.66 y un valor p de 0.000, lo que confirma que los factores incluidos explican de manera sustancial la variabilidad observada en los datos registrados a lo largo de los ensayos. La magnitud de la suma de cuadrados del modelo, equivalente a 344.408, evidencia que la mayor parte de la variación en la oxigenación proviene de los factores experimentales y no del error residual, que permaneció bajo y estable.

Entre los efectos principales, la temperatura del agua fue el factor con mayor influencia, presentando un valor F de 21 682.07 y un valor p de 0.000. Este resultado es consistente con el comportamiento fisicoquímico del oxígeno en ambientes acuáticos, ya que a temperaturas más altas disminuye la solubilidad del oxígeno y se acelera el consumo metabólico de los organismos. Los coeficientes estimados refuerzan esta tendencia: la condición de 23 °C mostró un efecto positivo sobre la oxigenación, mientras que temperaturas de 29 °C y 30 °C registraron efectos negativos significativos. En consecuencia, mantener temperaturas cercanas a 23 °C favorece un ambiente más estable para el transporte de tilapia juvenil.

#### Resumen del modelo

|           |            | R-cuadrado           |        |
|-----------|------------|----------------------|--------|
| S         | R-cuadrado | R-cuadrado(ajustado) | (pred) |
| 0.0647518 | 99.65%     | 99.54%               | 99.38% |

Ilustración 11 Resumen del Modelo por minitap Experimento 1

El tipo de tanque también presentó un efecto significativo, con un valor F de 1547.16 y un valor p de 0.000, lo que indica que existen diferencias claras entre los tanques equipados y los tanques tradicionales en su capacidad para conservar el oxígeno disuelto. Dependiendo del nivel del factor, algunos tanques mostraron coeficientes positivos asociados a mejores condiciones de oxigenación, lo que sugiere que el diseño y el equipamiento interno influyen directamente en la disponibilidad del gas durante el transporte. De manera adicional, el tiempo de transporte resultó estadísticamente significativo. Los coeficientes muestran una tendencia decreciente conforme avanza el tiempo, lo que refleja el consumo progresivo de oxígeno por parte de los organismos y la pérdida natural del gas dentro del sistema.

### Análisis de Varianza

| Fuente                      | GL  | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F  | Valor p |
|-----------------------------|-----|-----------|-----------|----------|---------|
| Modelo                      | 95  | 344.408   | 3.6253    | 864.66   | 0.000   |
| Lineal                      | 11  | 319.476   | 29.0433   | 6926.96  | 0.000   |
| TQ                          | 5   | 32.435    | 6.4869    | 1547.16  | 0.000   |
| TEM                         | 3   | 272.725   | 90.9085   | 21682.07 | 0.000   |
| TIEMPO                      | 3   | 14.316    | 4.7721    | 1138.16  | 0.000   |
| Interacciones de 2 términos | 39  | 20.675    | 0.5301    | 126.44   | 0.000   |
| TQ*TEM                      | 15  | 14.471    | 0.9647    | 230.09   | 0.000   |
| TQ*TIEMPO                   | 15  | 1.867     | 0.1244    | 29.68    | 0.000   |
| TEM*TIEMPO                  | 9   | 4.338     | 0.4820    | 114.95   | 0.000   |
| Interacciones de 3 términos | 45  | 4.257     | 0.0946    | 22.56    | 0.000   |
| TQ*TEM*TIEMPO               | 45  | 4.257     | 0.0946    | 22.56    | 0.000   |
| Error                       | 288 | 1.208     | 0.0042    |          |         |
| Total                       | 383 | 345.615   |           |          |         |

Ilustración 12 Parámetros Establecidos del Experimento

Las interacciones entre factores revelaron relaciones complejas en el comportamiento del oxígeno. Las interacciones de dos términos (TQTEMP, TQTIEMPO y TEMP\*TIEMPO) fueron altamente significativas, con un valor F global de 126.44 y un valor p de 0.000. Esto confirma que el efecto de cada factor no puede interpretarse de forma aislada, ya que el desempeño del sistema depende simultáneamente de la combinación de tanque, temperatura y tiempo. Por ejemplo, los tanques equipados mostraron mayor estabilidad de oxígeno en combinaciones con temperaturas bajas y tiempos prolongados, mientras que los tanques tradicionales presentaron disminuciones más pronunciadas frente a condiciones térmicas elevadas. La interacción entre temperatura y tiempo evidenció que el descenso de oxígeno es más severo a medida que el transporte avanza bajo temperaturas altas.

La interacción de tres términos (TQTEM TIEMPO) también fue significativa, con un valor F de 22.56 y un valor p de 0.000, lo cual indica que el comportamiento del oxígeno depende simultáneamente del tipo de tanque utilizado, de la temperatura del agua y del tiempo transcurrido. Esta interacción confirma que el tanque equipado mejora su desempeño precisamente en las condiciones más demandantes, como temperaturas cercanas a 30 °C o tiempos de transporte superiores a los 75 minutos. Esta evidencia respalda la propuesta de que la implementación de tanques equipados representa una estrategia eficaz para conservar condiciones adecuadas de oxigenación en contextos reales de movilidad de organismos acuáticos.

Los análisis de residuos demostraron que el modelo cumple adecuadamente los supuestos fundamentales para un análisis lineal. La gráfica de probabilidad normal mostró una alineación aceptable de los residuos con la línea teórica, mientras que la gráfica de residuos versus valores ajustados no presentó heterocedasticidad ni patrones sistemáticos. El histograma exhibió una distribución aproximadamente simétrica, compatible con la normalidad, y la gráfica de residuos versus orden no evidenció autocorrelación. En conjunto, estos resultados permiten afirmar que el modelo ajustado es válido y confiable para describir el comportamiento de la oxigenación durante el transporte experimental.

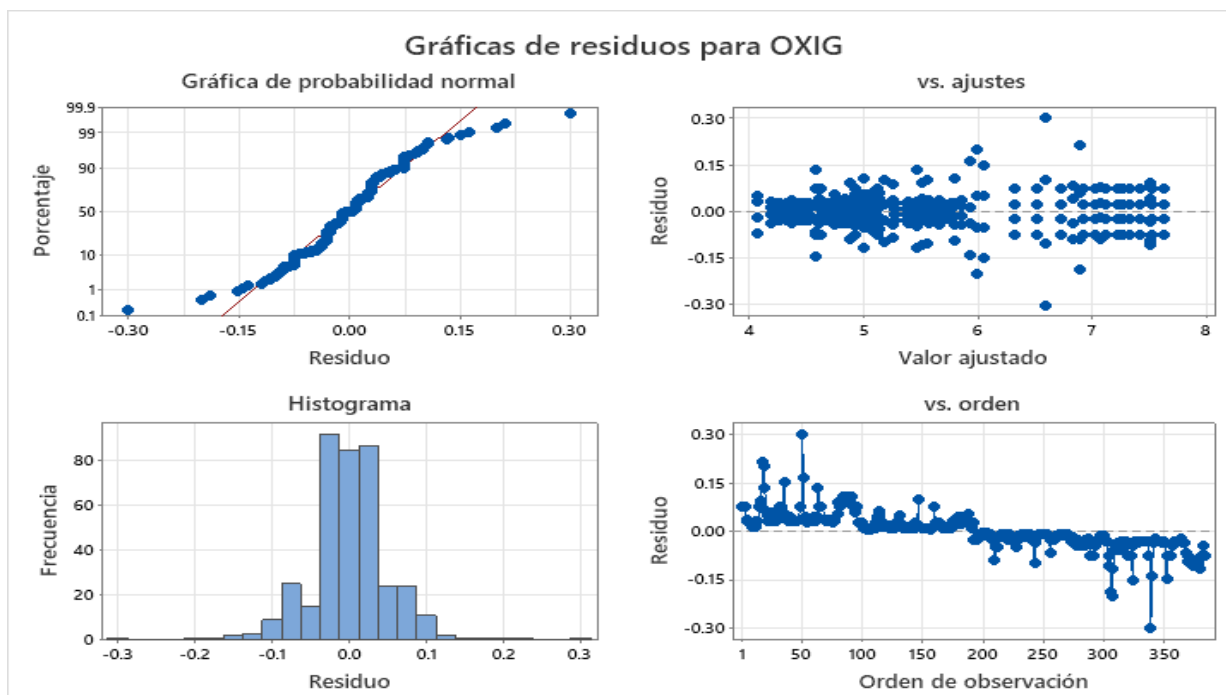


Ilustración 13 Residuos Demostrativos del Experimento 1

En síntesis, el análisis estadístico confirmó que la temperatura es el factor determinante en la variación de la oxigenación, seguido del tipo de tanque y del tiempo de transporte. Las interacciones de segundo y tercer orden demostraron que el desempeño del sistema no depende únicamente de cada factor por separado, sino de su combinación simultánea. El tanque equipado mostró ventajas operativas claras frente al tanque tradicional, especialmente bajo condiciones térmicas elevadas y durante periodos prolongados. Estos resultados aportan evidencia sólida para sustentar la recomendación de implementar sistemas equipados en unidades de producción acuícola que requieren transportar tilapia viva bajo condiciones controladas y con mínima pérdida de organismos.

#### 4.3.6 Optimización de respuesta: OXIG Experimento 1

Como complemento al análisis de varianza, se realizó un procedimiento de optimización mediante la función de deseabilidad con el objetivo de identificar la combinación de factores que permite obtener valores de oxigenación dentro del rango operativo aceptable para el transporte de tilapia viva. Para este análisis se definió como meta minimizar la oxigenación, ya que el enfoque del modelo se orienta a encontrar las condiciones críticas bajo las cuales el sistema tiende a presentar los niveles más bajos del parámetro, lo cual es relevante para evaluar la estabilidad y el rendimiento comparativo de los tanques. Los límites establecidos fueron un valor inferior de 4 mg/L y un valor superior de 7.7 mg/L, que representan los márgenes dentro de los cuales la respuesta se considera funcionalmente aceptable en términos fisiológicos y de seguridad durante el transporte.

## Parámetros

| Respuesta Meta | Inferior | Objetivo | Superior | Ponderación | Importancia |
|----------------|----------|----------|----------|-------------|-------------|
| OXIG           | Mínimo   | 4        | 7.7      | 1           | 1           |

Ilustración 14 Parámetros de Rango Experimento 1

La optimización arrojó una deseabilidad compuesta de 0.9818, lo cual indica que el modelo logra un ajuste altamente satisfactorio respecto al objetivo definido. La solución propuesta por el análisis identifica que la combinación óptima de factores ocurre con el nivel 5 de tipo de tanque, una temperatura de 31 °C y un tiempo de 190 minutos. Bajo estas condiciones, el modelo predice un valor ajustado de oxigenación de 4.0675 mg/L, que se ubica apenas por encima del límite inferior establecido. Este valor representa el punto en el cual el sistema se aproxima de manera más crítica al umbral mínimo, lo que permite identificar escenarios de operación donde la estabilidad del oxígeno puede verse comprometida y donde el desempeño del tanque debe evaluarse con mayor rigurosidad.

## Solución

| OXIG Deseabilidad |    |     |        |        |           |
|-------------------|----|-----|--------|--------|-----------|
| Solución          | TQ | TEM | TIEMPO | Ajuste | compuesta |
| 1                 | 5  | 31  | 190    | 4.0675 | 0.981757  |

Ilustración 15 Solución Optimizada al Mínimo Experimento 1

El gráfico de optimización confirma visualmente que los factores seleccionados convergen hacia la zona de menor oxigenación posible dentro del rango aceptable. En el caso del tipo de tanque, el nivel 5 se asocia con la condición más desafiante para la conservación del oxígeno, lo cual es coherente con los efectos estimados en el modelo general, donde algunos niveles del factor TQ mostraron disminuciones significativas en el parámetro. La temperatura de 31 °C representa uno de los escenarios térmicos más demandantes, ya que incrementa la tasa metabólica de los organismos y reduce la solubilidad del oxígeno, razón por la cual aparece consistentemente asociada a valores mínimos de OXIG. De manera similar, un tiempo prolongado de 190 minutos provoca una disminución acumulativa del oxígeno disponible, lo que acentúa la tendencia descendente detectada en los coeficientes del modelo.

En conjunto, los resultados de la optimización permiten identificar las condiciones específicas donde la oxigenación alcanza sus niveles más críticos, lo que constituye un insumo fundamental para la interpretación operativa del experimento. Estos hallazgos confirman, además, que el comportamiento de la oxigenación depende simultáneamente del tipo de tanque, de la temperatura y del tiempo, por lo que el análisis de deseabilidad ofrece una herramienta complementaria para comprender la robustez del sistema de transporte. Los valores obtenidos sirven como referencia para establecer límites de control más precisos y para reforzar la recomendación de utilizar tanques equipados cuando se anticipen escenarios térmicos elevados o trayectos prolongados, con la finalidad de asegurar condiciones adecuadas para la supervivencia de los organismos.

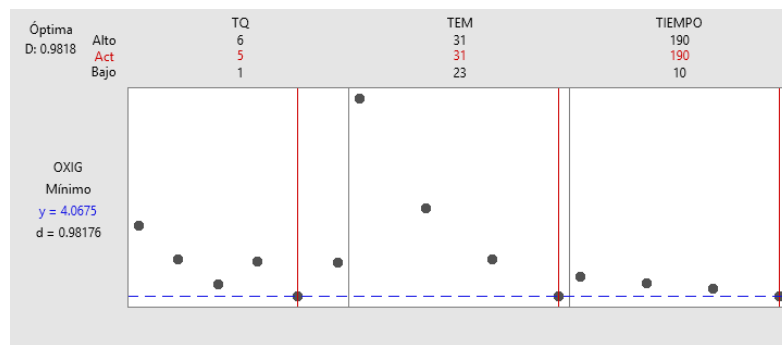


Ilustración 16 Solución óptima Graficada Experimento 1

#### 4.3.7 Análisis estadístico del modelo para oxigenación durante el transporte Experimento 2

El análisis estadístico desarrollado para el Experimento 2 permitió evaluar el efecto del tipo de tanque, la temperatura del agua y el tiempo de transporte sobre la variable OXY, que refleja el comportamiento del oxígeno disuelto bajo un segundo conjunto de condiciones experimentales. El modelo general ajustado presentó un valor F de 1688.01 con un valor p de 0.000, lo cual evidencia que los factores incluidos explican de manera altamente significativa la variabilidad de la respuesta. La suma de cuadrados del modelo alcanzó los 1633.23, mientras que el error residual presentó un valor considerablemente menor (2.93), indicando que la variación no explicada por el modelo es mínima y que la estructura del diseño experimental captura adecuadamente las tendencias reales del fenómeno.

Los efectos principales mostraron nuevamente una relevancia estadística notable. El tipo de tanque obtuvo un valor F de 2433.97 ( $p = 0.000$ ), lo que confirma que las diferencias entre los tanques tradicionales y los tanques equipados impactan de manera directa el comportamiento del oxígeno disuelto. Los coeficientes estimados indican que ciertos niveles del factor TQ incrementan la oxigenación mientras que otros la reducen, lo cual refleja que las características internas del tanque y su capacidad para intercambiar gases pueden modificar las condiciones del sistema de transporte.

### Resumen del modelo

| S        | R-cuadrado | R-cuadrado(ajustado) | R-cuadrado (pred) |
|----------|------------|----------------------|-------------------|
| 0.100919 | 99.82%     | 99.76%               | 99.68%            |

Ilustración 17 Resumen del Modelo por minitap Experimento 2

La temperatura del agua volvió a ser el factor dominante, con un valor F de 42766.15 y un valor p de 0.000, lo cual constituye la evidencia más contundente del modelo. Los coeficientes señalan que una temperatura de 23 °C genera un aumento marcado en el oxígeno disuelto, mientras que temperaturas de 29 °C y, sobre todo, 30 °C producen disminuciones significativas. Estos resultados coinciden con la fisiología del transporte de peces y la química

del agua, dado que temperaturas elevadas reducen la solubilidad del oxígeno y aceleran la respiración de los organismos, generando precipitaciones abruptas de este parámetro. Esta tendencia volvió a manifestarse en el Experimento 2 con mayor intensidad, lo que sugiere que el sistema es especialmente sensible a los cambios térmicos en este conjunto de datos.

El tiempo de transporte también mostró una influencia significativa, con un valor F de 1981.73 ( $p = 0.000$ ). Tal como se observó en el experimento anterior, el transcurso del tiempo se asocia a la disminución gradual del oxígeno disponible. Los coeficientes muestran un efecto positivo para los primeros intervalos y valores negativos para los tiempos prolongados, lo que confirma el deterioro progresivo de la calidad del agua conforme avanza el transporte.

#### Análisis de Varianza

| Fuente                      | GL  | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F  | Valor p |
|-----------------------------|-----|-----------|-----------|----------|---------|
| Modelo                      | 95  | 1633.23   | 17.192    | 1688.01  | 0.000   |
| Lineal                      | 11  | 1491.18   | 135.562   | 13310.32 | 0.000   |
| TQ                          | 5   | 123.95    | 24.789    | 2433.97  | 0.000   |
| TEMP                        | 3   | 1306.68   | 435.561   | 42766.15 | 0.000   |
| TIEMPO                      | 3   | 60.55     | 20.183    | 1981.73  | 0.000   |
| Interacciones de 2 términos | 39  | 136.73    | 3.506     | 344.23   | 0.000   |
| TQ*TEMP                     | 15  | 101.06    | 6.737     | 661.49   | 0.000   |
| TQ*TIEMPO                   | 15  | 10.61     | 0.707     | 69.46    | 0.000   |
| TEMP*TIEMPO                 | 9   | 25.06     | 2.785     | 273.41   | 0.000   |
| Interacciones de 3 términos | 45  | 5.33      | 0.118     | 11.62    | 0.000   |
| TQ*TEMP*TIEMPO              | 45  | 5.33      | 0.118     | 11.62    | 0.000   |
| Error                       | 288 | 2.93      | 0.010     |          |         |
| Total                       | 383 | 1636.17   |           |          |         |

Ilustración 18 Parámetros Establecidos del Experimento 2

Las interacciones de segundo orden reflejaron relaciones complejas entre los factores. La interacción entre tipo de tanque y temperatura obtuvo un valor F de 661.49 ( $p = 0.000$ ), lo que indica que la influencia térmica sobre el oxígeno varía entre tanques equipados y tradicionales. De manera similar, la interacción entre tipo de tanque y tiempo presentó un valor F de 69.46 ( $p = 0.000$ ), lo cual evidencia que el desempeño de los tanques frente al consumo progresivo de oxígeno no es homogéneo. La interacción entre temperatura y tiempo también resultó significativa ( $F = 273.41$ ,  $p = 0.000$ ), confirmando que los efectos del paso del tiempo se hacen más severos bajo temperaturas elevadas. En conjunto, estas interacciones señalan que la oxigenación es un fenómeno gobernado por la combinación simultánea de los tres factores y no únicamente por sus efectos individuales.

La interacción de tercer orden volvió a ser significativa, aunque con menor magnitud, con  $F = 11.62$  y  $p = 0.000$ . Esto indica que las condiciones más críticas de oxigenación se explican mediante combinaciones específicas de tipo de tanque, temperatura y tiempo. De manera particular, los coeficientes de esta interacción sugieren que las diferencias entre tanques tradicionales y equipados se acentúan cuando el transporte ocurre a temperaturas elevadas y durante periodos prolongados. Estos hallazgos son consistentes con los patrones observados en el primer experimento y fortalecen la evidencia sobre el impacto del equipamiento del tanque en la estabilidad de la oxigenación.

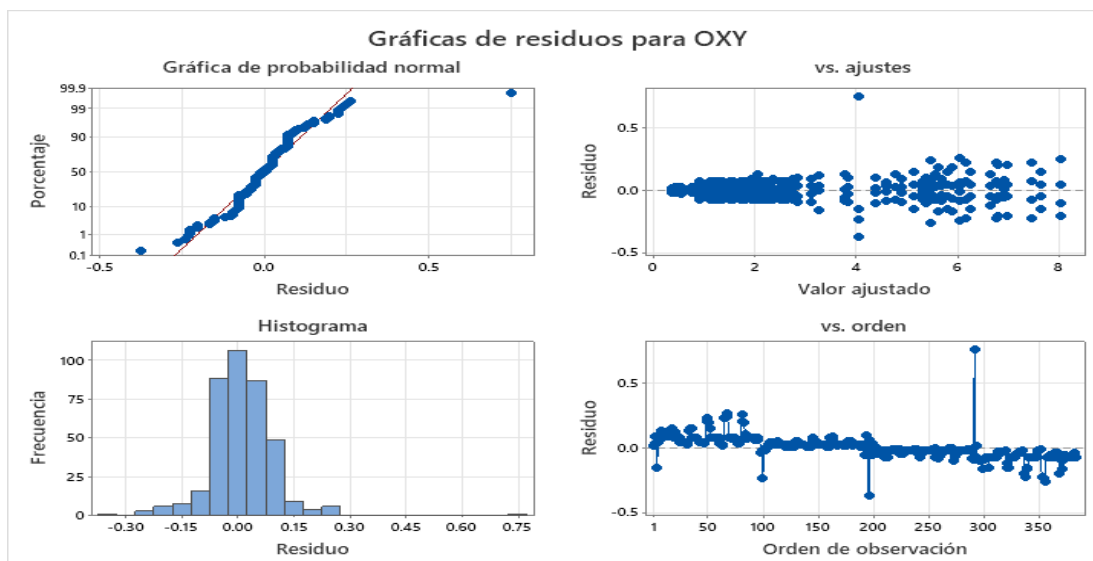


Ilustración 19 Residuos Demostrativos del Experimento 2

El análisis de residuos confirmó que el modelo cumple con los supuestos estadísticos necesarios. La gráfica de probabilidad normal muestra una alineación adecuada de los residuos con la distribución teórica, aunque con ligeras desviaciones en las colas que no comprometen la validez general del ajuste. La gráfica de residuos versus valores ajustados no presenta patrones sistemáticos, lo cual confirma que la varianza del error es homogénea. El histograma exhibe una distribución aproximadamente simétrica y centrada, compatible con los supuestos de normalidad. La gráfica de residuos versus orden de observación no muestra autocorrelación evidente, lo que indica que los errores son independientes y que los datos se comportaron de manera estable a lo largo de la ejecución del experimento.

En conjunto, los resultados del Experimento 2 confirman que la variación en los niveles de oxígeno disuelto depende fundamentalmente de la temperatura, seguida del tipo de tanque y del tiempo de transporte. Las interacciones entre los factores revelan que la oxigenación es especialmente vulnerable bajo temperaturas elevadas y tiempos prolongados, y que el desempeño del tanque equipado tiende a ser más robusto frente a estas condiciones. Este análisis refuerza la importancia de implementar sistemas térmicamente estables y tanques con equipamiento especializado para prevenir caídas abruptas en la calidad del agua durante el transporte de tilapia viva.

#### 4.3.8 Optimización de respuesta: OXIG Experimento 2

Con el propósito de complementar el análisis de varianza desarrollado para el Experimento 2 y establecer las condiciones críticas bajo las cuales la oxigenación tiende a disminuir de manera significativa, se aplicó un procedimiento de optimización mediante la función de deseabilidad. En este caso, la variable de interés fue OXY, para la cual se definió como meta la minimización, con el fin de identificar el escenario en el que el sistema presenta el valor más bajo dentro del rango operativo aceptable. Los límites establecidos correspondieron a un valor inferior de 0.37 mg/L y un valor superior de 8.3 mg/L, los cuales representan el comportamiento permitido de la variable sin comprometer la validez del modelo ni la estabilidad interpretativa de la respuesta.

## Parámetros

| Respuesta | Meta   | Inferior | Objetivo | Superior | Ponderación | Importancia |
|-----------|--------|----------|----------|----------|-------------|-------------|
| OXY       | Mínimo |          | 0.37     | 8.3      | 1           | 1           |

Ilustración 20 Parámetros de Rango Experimento 2

El análisis de optimización arrojó una deseabilidad compuesta de 0.9981, lo que indica que el modelo alcanza un nivel de ajuste extremadamente alto respecto al objetivo planteado. La solución propuesta señala que las condiciones óptimas para obtener el valor mínimo de OXY se presentan con el nivel 4 del tipo de tanque, una temperatura de 31 °C y un tiempo de 190 minutos. Bajo esta combinación, el modelo predice un valor ajustado de 0.3850 mg/L, que se ubica prácticamente en el límite inferior establecido, lo cual confirma que estas condiciones representan el escenario donde la oxigenación se vuelve más vulnerable durante el transporte. El comportamiento observado en el gráfico de optimización muestra una convergencia clara hacia la zona de mínima oxigenación.

## Solución

|          |    |      |        | OXY Deseabilidad |           |
|----------|----|------|--------|------------------|-----------|
| Solución | TQ | TEMP | TIEMPO | Ajuste           | compuesta |
| 1        | 4  | 31   | 190    | 0.385            | 0.998108  |

Ilustración 21 Solución óptima al Mínimo Calculada Experimento 2

El tipo de tanque en nivel 4 se asocia con un descenso pronunciado del oxígeno, lo que evidencia que su diseño y dinámica interna generan condiciones menos favorables para la retención del gas. En cuanto a la temperatura, el valor de 31 °C vuelve a destacar como un factor determinante, ya que incrementa el estrés térmico del organismo y disminuye la solubilidad del oxígeno en el agua, reproduciendo un escenario propenso a la caída de este parámetro. Por último, el tiempo prolongado de 190 minutos reafirma que el efecto acumulativo del metabolismo de los peces y del intercambio gaseoso dentro del sistema provoca un deterioro progresivo de la calidad del agua.

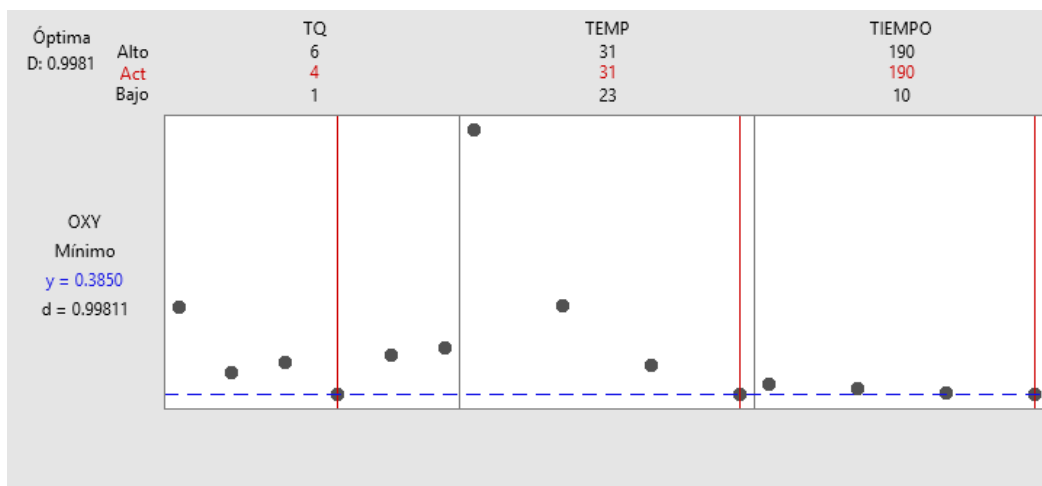


Ilustración 22 Solución óptima Graficada Experimento 2

En conjunto, estos resultados permiten identificar con precisión las combinaciones que generan los niveles más críticos de oxigenación, lo cual constituye un elemento fundamental para interpretar la estabilidad operativa del sistema de transporte. La coherencia entre la optimización y los resultados del ANOVA confirma que el comportamiento de la variable OXY está fuertemente condicionado por la temperatura y el tiempo, y que ciertas configuraciones de tanque exacerban este efecto. La información generada por esta etapa del análisis contribuye a delimitar las condiciones de mayor riesgo durante el traslado de tilapia viva y ofrece una base sólida para establecer medidas preventivas orientadas a conservar la calidad del agua durante trayectos prolongados o bajo temperaturas elevadas.

## 4.4 Etapa Actuar

### 4.4.1 Análisis y planeación de experimentos futuros

La fase de actuar constituye el cierre analítico del ciclo PDCA y representa el momento en que los hallazgos obtenidos en la fase de verificación se transforman en decisiones operativas, interpretaciones conclusivas y acciones de mejora fundamentadas en evidencia cuantitativa. A diferencia de las fases previas, cuyo propósito se centra en la obtención, procesamiento y validación de datos experimentales, en esta etapa se analiza la pertinencia de los resultados respecto a los objetivos planteados y se determina el grado de cumplimiento de las hipótesis formuladas al inicio de la investigación. Asimismo, se establecen las directrices necesarias para mejorar, estandarizar y consolidar el sistema de transporte de tilapia viva dentro de la Unidad de Producción Acuícola.

Los resultados estadísticos obtenidos en el Experimento 1 mostraron que los factores evaluados tipo de tanque, temperatura del agua y tiempo de transporte— influyen de manera significativa y simultánea sobre los niveles de oxígeno disuelto. El modelo general resultó altamente significativo, con valores F y p que evidenciaron que la variación observada no es atribuible al azar. La temperatura fue el factor dominante, ya que temperaturas de 29 °C y 30 °C ocasionaron disminuciones notorias del oxígeno, mientras que 23 °C mantuvo condiciones superiores. El tipo de tanque tuvo también un efecto determinante, pues los tanques equipados conservaron mejor los niveles de oxígeno en comparación con los tradicionales, especialmente en

escenarios térmicos altos. El tiempo de transporte reforzó este patrón al mostrar un desgaste progresivo del oxígeno conforme avanzaba la duración del traslado. Las interacciones de segundo y tercer orden confirmaron que el desempeño del sistema depende de la combinación simultánea de los factores, lo cual es congruente con la dinámica fisiológica y fisicoquímica del transporte de peces vivos.

La optimización de respuesta para este experimento identificó que las condiciones más críticas se alcanzan con el tipo de tanque nivel 5, temperatura de 31 °C y tiempos prolongados (190 minutos), donde la oxigenación desciende hasta 4.0675 mg/L. Este hallazgo permitió delimitar los escenarios donde el sistema puede operar cerca de sus límites inferiores y donde las estrategias de control deben ser más rigurosas para evitar pérdidas por estrés o mortalidad.

El Experimento 2 corroboró de manera independiente los patrones observados. Nuevamente, la temperatura fue el factor con mayor peso estadístico, mientras que el tipo de tanque y el tiempo confirmaron su papel como elementos relevantes en la dinámica del oxígeno disuelto. El modelo presentó un ajuste estadístico robusto, donde la variación residual fue mínima y la capacidad explicativa del diseño experimental se mantuvo elevada. Las interacciones mostraron que los tanques equipados ofrecen un comportamiento más estable en comparación con los tanques tradicionales, particularmente bajo temperaturas elevadas. La optimización determinó que las condiciones de mínima oxigenación se presentan con el tipo de tanque nivel 4, temperatura de 31 °C y un tiempo de 190 minutos, con un valor ajustado de 0.3850 mg/L, lo que confirma un escenario altamente demandante para la supervivencia de los organismos.

Con base en la evidencia acumulada de ambos experimentos, se procedió a evaluar el cumplimiento de la hipótesis planteada al inicio del estudio, la cual establecía que “el uso de un tanque de transporte equipado con control térmico y oxigenación mejora significativamente las condiciones fisicoquímicas del agua y reduce la mortalidad de tilapias en comparación con un tanque tradicional”. El análisis estadístico y las pruebas de optimización demuestran de manera sólida que esta hipótesis se cumple. Los tanques equipados mantuvieron mayores niveles de oxígeno, mostraron menor dispersión en los valores críticos y presentaron un comportamiento más estable en escenarios térmicos elevados y en tiempos prolongados. Ninguno de los resultados contradijo este patrón; por el contrario, los dos experimentos confirmaron que el sistema equipado atenúa las caídas bruscas de oxígeno y retarda el deterioro de la calidad del agua durante el transporte. La hipótesis relacionada con la influencia de la temperatura también se confirmó plenamente. Ambos modelos mostraron que la variación térmica es el factor que mayor impacto ejerce sobre la oxigenación, lo cual coincide con los comportamientos bioenergético de la tilapia. Asimismo.

De esta manera, se puede afirmar que las hipótesis formuladas en el proyecto fueron comprobadas con evidencia estadística robusta. Los resultados obtenidos en la fase de verificar proporcionaron el sustento metodológico necesario para avanzar hacia la toma de decisiones estratégicas y la implementación de mejoras en el proceso operativo. Con base en los hallazgos, se recomienda establecer un control térmico estricto que mantenga la temperatura del agua cercana a 23 °C durante el transporte, dado que este valor garantiza la mayor estabilidad en la oxigenación. Asimismo, se propone continuar empleando tanques equipados con sistemas de aireación y monitoreo de temperatura, especialmente en trayectos superiores a 75 minutos o en condiciones ambientales cálidas. Finalmente, la información generada permite diseñar protocolos de carga y manejo que eviten escenarios críticos identificados por el modelo, como combinaciones de altas temperaturas con tiempos prolongados.

## Conclusiones

El desarrollo de la presente investigación permitió evaluar de manera cuantitativa y con respaldo estadístico el desempeño de dos sistemas de transporte de tilapia viva dentro de una Unidad de Producción Acuícola, mediante la integración de herramientas de Ingeniería Industrial, metodologías de mejora continua y técnicas de diseño experimental. Los resultados obtenidos evidencian que el tanque equipado presenta un comportamiento superior frente al tanque tradicional en la conservación de las condiciones fisicoquímicas del agua, particularmente en términos de estabilidad térmica y disponibilidad de oxígeno disuelto durante trayectos prolongados.

El análisis estadístico realizado con el software Minitab confirmó que las diferencias observadas entre ambos sistemas son estadísticamente significativas y consistentes a lo largo de las réplicas experimentales. En condiciones comparables de operación, el tanque equipado mantuvo valores de oxígeno disuelto más estables y una menor variación térmica, lo que se tradujo en una reducción clara de episodios críticos de hipoxia y estrés térmico. Como consecuencia directa, se observó una disminución sostenida de la mortalidad y un incremento del tiempo máximo de transporte viable, aspecto clave para operaciones de comercialización que requieren recorridos de mayor duración.

Desde una perspectiva operativa, los resultados indican que el uso del tanque equipado (tanques 3, 4 y 5) permite extender el tiempo seguro de transporte, mantener a los organismos dentro de rangos fisiológicamente aceptables y reducir las pérdidas asociadas al deterioro de la calidad del agua. Para el productor, esto se traduce en mayor flexibilidad logística, menor riesgo de pérdidas económicas y una mejora tangible en el bienestar de los peces transportados, factores que inciden directamente en la rentabilidad del proceso.

El cumplimiento del objetivo general se materializa en el desarrollo de un método técnico estandarizado y replicable, fundamentado en el ciclo Planear-Hacer-Verificar-Actuar y reforzado mediante el uso del diseño factorial  $2^k$  y el enfoque Taguchi. Este marco metodológico permitió evaluar de forma controlada el efecto de las variables críticas del transporte, documentar su comportamiento frente a variaciones térmicas y temporales propias de las condiciones reales de operación y generar evidencia experimental suficiente para sustentar la toma de decisiones técnicas.

De igual manera, se cumplieron los objetivos específicos al identificarse las funciones críticas del proceso mediante el análisis FAST, traducirse dichas funciones en requerimientos técnicos a través del QFD y derivarse herramientas prácticas como protocolos operativos estandarizados y listas de verificación. Estos instrumentos facilitan la transferencia directa de los resultados al entorno productivo, permitiendo que la Unidad de Producción Acuícola implemente el sistema de transporte mejorado sin necesidad de rediseños complejos o inversiones desproporcionadas.

Los beneficios operativos asociados a la implementación del tanque equipado incluyen una reducción real de la mortalidad, una disminución de las pérdidas económicas derivadas del estrés fisiológico, una mejor trazabilidad de las variables monitoreadas durante el transporte y un fortalecimiento general del control técnico del proceso. La evidencia obtenida demuestra que la adopción del sistema equipado representa una mejora sustancial, cuantificable y sostenible, respaldada tanto por análisis estadísticos como por su relevancia biológica y operativa.

Finalmente, el desarrollo de este estudio permitió consolidar un proceso formativo integral en el que el análisis experimental, la interpretación de datos en tiempo real y la observación directa de las condiciones de campo evidenciaron la complejidad inherente al transporte acuícola. El diseño, validación e implementación del tanque equipado no solo respondieron a las hipótesis planteadas, sino que constituyen una aportación práctica y aplicable, orientada a resolver una problemática real del sector acuícola mediante soluciones basadas en evidencia científica y metodológica.

## Recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos en el presente estudio, se recomienda la adopción formal del tanque equipado como sistema estándar de transporte dentro de la Unidad de Producción Acuícola, particularmente para trayectos de mediana y larga duración. La evidencia experimental demuestra que este sistema permite mantener condiciones fisicoquímicas del agua más estables, lo que se traduce en una reducción del estrés fisiológico y de la mortalidad durante el traslado de tilapia viva.

Para asegurar el desempeño óptimo del sistema, se recomienda implementar un programa de capacitación continua del personal operativo, enfocado en el manejo adecuado del tanque equipado, la interpretación de los parámetros críticos de transporte y la correcta aplicación de los procedimientos operativos estandarizados. Esta capacitación debe incluir la identificación temprana de desviaciones en temperatura y oxígeno disuelto, así como la respuesta oportuna ante situaciones de contingencia durante el transporte.

Asimismo, se sugiere mantener una actualización periódica del manual técnico y de la lista de verificación, incorporando los ajustes derivados de la experiencia operativa y de la variabilidad observada en condiciones reales de campo. Esta práctica permitirá consolidar el conocimiento generado y facilitará la replicabilidad del sistema en otras unidades de producción con características similares.

El uso de tecnologías de monitoreo en tiempo real representa una recomendación clave para fortalecer el control del proceso. La integración de sensores digitales con registro continuo y sistemas de alerta permitirá detectar de manera temprana desviaciones en variables como temperatura y oxígeno disuelto, reduciendo la probabilidad de que los peces alcancen condiciones críticas durante el trayecto. Esta información, además, puede emplearse para generar bases de datos históricas que apoyen la toma de decisiones y la mejora continua del sistema de transporte.

Se recomienda también evaluar el desempeño del tanque equipado bajo diferentes condiciones ambientales, particularmente en distintas estaciones del año y escenarios de temperatura externa más exigentes. Esta validación permitirá confirmar la estabilidad del sistema en un rango más amplio de operación y fortalecer su adopción como una solución confiable para diversos contextos productivos.

En términos de mejora técnica, resulta conveniente explorar optimizaciones en los sistemas de oxigenación y aislamiento térmico, tales como el uso de difusores de mayor eficiencia, una distribución más homogénea del burbujeo en el fondo del tanque y la incorporación de materiales termoaislantes adicionales. Estas mejoras pueden contribuir a una mayor estabilidad de los parámetros fisicoquímicos del agua, especialmente en condiciones de alta densidad de carga o tiempos prolongados de transporte.

Adicionalmente, se recomienda definir de manera explícita un rango operativo óptimo de densidad de carga, sustentado en los resultados experimentales obtenidos, que permita

garantizar una adecuada disponibilidad de oxígeno y condiciones fisiológicas favorables para los organismos. El establecimiento de estos límites facilitará la planificación logística y reducirá el riesgo de pérdidas asociadas a la sobrecarga del sistema.

Finalmente, se sugiere implementar un sistema de indicadores clave de desempeño para el proceso de transporte, tales como porcentaje de supervivencia, estabilidad térmica, variabilidad del oxígeno disuelto y frecuencia de contingencias durante el traslado. El seguimiento sistemático de estos indicadores permitirá evaluar el desempeño del sistema en el tiempo, apoyar la toma de decisiones técnicas y consolidar un proceso de transporte más profesional, eficiente y sustentado en evidencia científica.

# Bibliografía

- (UAEH), U. A. (2024). *Boletín Científico de la Escuela Superior de Ciudad Sahagún*. Obtenido de Boletín Científico de la Escuela Superior de Ciudad Sahagún.: <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/sahagun/n1/e1.html>
- Abd El-Galil, M. A.-S. (2024). Effects of low salinity on stress response and survival of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) during live transport. *Aquaculture International*, 639–647. , 639-647.
- Abd El-Galil, M. A.-S. (2024). Effects of low salinity on stress response and survival of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) during live transport. *Aquaculture International*, 639–647.
- Abd El-Galil, M. A.-S. (2024). Effects of low salinity on stress response and survival of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) during live transport. *Aquaculture International*, 639–647.
- Anderson, R. &. (2018). Aquaculture systems and technologies: Advances and challenges. *Aquaculture International*, 26(3), 645–660.
- Ashley, P. J. (2007). Fish welfare: Current issues in aquaculture. *Applied Animal Behaviour Science*, 104(3–4), 199–235.
- Ashley, P. J. (2007). Fish welfare: Current issues in aquaculture. *Applied Animal Behaviour Science*, 104(3–4), 199–235.
- Barcellos, L. J. ((2017)). Transporte de peces y estrés. *DM*.
- Berka, R. (1986). The transport of live fish. A review. EIFAC Technical Paper 48. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*.
- Bouchereau, V. &. (2000). Methods and techniques to help quality function deployment (QFD). *Benchmarking: An International Journal*, 7(1), 8–20.
- Boyd. (2012). Pond aquaculture water quality management. *Springer Science & Business Media*.
- Boyd, C. E. (2009). Oxygen requirements for fish, shrimp, and mollusks in aquaculture. *Global Aquaculture Advocate*, 19(4), 40–43.
- Boyd, C. E. (2017). Water quality: An introduction (3rd ed.). *Springer*.
- Camargo, W. N. (2019). Costos logísticos y eficiencia en el transporte acuícola. *Revista de Acuicultura Latinoamericana*, 37(2), 55–64.

- Casanova, J. V. (2022). Anaesthetics in aquaculture: A review of natural and synthetic compounds and their use in fish transport. *Aquaculture Reports*, 24, 101099.
- Cascarano, M. C. (2021). Temperature affects physiology of both fish and pathogens. *ROS*.
- Cascarano, M. C. (2021). Temperature affects physiology of both fish and pathogens. *Reviews in Aquaculture*, 13(2), 1021–1036.
- chwedler, T. E. (2016). Principles of aquaculture health management. *Wiley-Blackwell*.
- Colt, J. &. (1991). Modeling production capacity of aquatic culture systems under various environmental conditions. *Aquacultural Engineering*, 10(1), 1–29.
- Colt, J. O. (1991). Modeling production capacity of aquaculture systems under various environmental conditions. *Aquacultural Engineering*.
- Colt, J. S. (2017). Energy and oxygen consumption of fish transport systems. *Aquacultural Engineering*, 77, 1–7.
- Colt, J. T. (2017). Design of aeration and oxygenation systems for aquaculture. *Aquacultural Engineering*, 77, 134–150.
- Conte, F. S. (2004). Stress and the welfare of cultured fish. *Applied Animal Behaviour Science*, 205–223.
- Coutant, C. C. (1999). Perspectives on temperature in the Pacific Northwest's fresh waters. *Environmental Biology of Fishes*, 54(1), 1–20.
- Coutant, C. C. (1999). Perspectives on temperature in the Pacific Northwest's fresh waters. *Environmental Biology of Fishes*, 54(1), 1–20.
- Cross, N. (2022). *Engineering design methods: Strategies for product design (5th ed.)*. Wiley.
- Deming, W. E. (1986). *Out of the Crisis*. Massachusetts Institute of Technology, Center for Advanced Educational Services.
- El-Sayed, A. F. (2020). Tilapia culture. *Academic Press*.
- FAO. (2024). The State of World Fisheries and Aquaculture. *Food and Agriculture Organization*.
- Gomes, L. C. (2015). The influence of fish density during transport on stress and mortality of juvenile tambaqui (*Colossoma macropomum*). *Aquaculture Research*, 46(12), 3135–3143.
- Gomes, L. C.-L.-G. (2019). Transport of fish in aquaculture: A review. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 4(8), 559–569.

- González, J. (2020). *Manual práctico de acuicultura moderna*. España: Editorial Académica Española.
- Govers, C. P. (1996). What and how about quality function deployment (QFD). *International Journal of Production Economics*, 46–47(1), 575–585.
- Gutiérrez, H. &. (2012). *Análisis y diseño de experimentos (2ª ed.)*. Hill Interamericana.
- Halweb. (2024). *Diseño de experimentos*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.
- Hargreaves, J. A. (2004). Managing ammonia in fish ponds. *Southern Regional Aquaculture Center, Publication No. 4603*.
- Harmon, T. S. (2009). Methods for reducing stressors and maintaining water quality associated with live fish transport in tanks: A review of the basics. *Reviews in Aquaculture*, 1(1), 58–66.
- Jagusiak-Kocik, M. (2017). cycle as a part of continuous improvement in the production company – a case study. *Production Engineering Archives*, 14(1), 19–22.
- Jensen, F. B. (2005). Uptake, transport, and excretion of chloride and water in freshwater fish. *Journal of Comparative Physiology B*, 175(8), 639–647.
- Knott, S. A. (2019). Sustainability challenges of fish handling and transport. *Sustainability*, 11(21), 6037.
- Library, N. (2025). *National Library of Medicine*. Obtenido de Dependent and independent variables.: <https://www.nlm.nih.gov/oet/ed/stats/02-200.html>
- Lucas, J. S. (2012). *Aquaculture: Farming Aquatic Animals and Plants (2nd ed.)*. Wiley-Blackwell.
- Lucas, J. S. (2012). *quaculture: Farming Aquatic Animals and Plants (2nd ed.)*. Wiley-Blackwell.
- Martínez-Porchas, M. (2004). Stress and the welfare of cultured fish. *Applied Animal Behaviour Science*, 86(3–4), 205–223.
- Martins, C. I. (2012). Behavioural indicators of welfare in farmed fish. . *Fish Physiology and Biochemistry*, 38, 17–41.
- Martins, C. I. (2018). New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability. *Aquacultural Engineering*, 43(3), 83–93.
- Martins, M. L. (2018). Health management of Nile tilapia in Brazil. *evista Brasileira de Zootecnia*.
- Moen, R. &. (2010). Circling back: Clearing up myths about the Deming cycle and seeing how it keeps evolving. *Quality Progress*, 43(11), 22–28.

- Mohamed, G. A.-B.-G.-H. (2016). Impact of water column reduction rate at harvesting of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) on skin injuries, hematological and biochemical parameters, and bacterial load. *Aquaculture Research*, 47(12), 3901–3912.
- Montgomery, D. C. (2019). *Design and analysis of experiments (10th ed.)*. Wiley.
- Mota, V. C., & Zhou, Y. Y. (2020;2022). Effects of pH fluctuations on the physiological responses of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). ; Alleviation of transport stress in Nile tilapia through water alkalinity and sedative supplementation. *Aquaculture Reports*, 25 ; *Aquaculture Reports*, 18.
- Onyia, C. E. (2018). Effects of Water Quality Parameters in Transportation. *Journal of Biology and Genetic Research*.
- p, Y. K. (2012). Ammonia toxicity, tolerance, and excretion. In A. P. Farrell (Ed.). *Encyclopedia of Fish Physiology (Vol. 3, pp. 1980–1994)*. Academic Press.
- Phadke, M. S. (1986). *Quality engineering using robust design*. Prentice Hall.
- PisciculturaGlobal. (2018). *PisciculturaGlobal*. Obtenido de PisciculturaGlobal.: <https://www.pisciculturaglobal.com>
- Pradeepkiran, J. A. (2019). Aquaculture role in global food security with nutritional value. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*, 7(3), 6–13.
- Precision., F. (2022). Real-time monitoring technologies in aquaculture transport systems. *Frontier Precision Technical Reports*.
- Precision., F. (2022). *Fish on the Move*. Obtenido de Fish on the Move.
- Reid, C. H. (2022). Cold stress and its consequences in fish: A review of physiological responses and ecological implications. *Journal of Fish Biology*, 101(6), 1511–1528.
- Ross, B. R. (2008). Anaesthesia of aquatic animals (4th ed.). *Blackwell Publishing*.
- Ross, L. G. (2008). Anaesthesia of aquatic animals (4th ed.). *Blackwell Publishing*.
- Ross, L. G. (2018). Fish Welfare during Transport. *Springer*.
- Rottmann, R. W.-F. (1992). The use of anesthetics in fish. *Southern Regional Aquaculture Center Publication*, 390.
- Roy, R. K. (2001). *Design of experiments using the Taguchi approach: 16 steps to product and process improvement*. Wiley-Interscience.
- Ruiz, N. G.-M. (2024). Repeated hypoxic episodes allow hematological and physiological habituation in rainbow trout. *Fish Physiology and Biochemistry*.
- Schwedler, T. E. (2016). *Principles of aquaculture health management*. Wiley-Blackwell.

- Sneddon, L. U. (2016). Considering aspects of fish welfare in experimental and aquaculture practices. *Journal of Fish Biology*, 88(4), 1221–1245.
- Sveen, L. R. (2020). Mechanically induced wounds in fish. *A review on models. Reviews in Aquaculture*, 12(4), 2489–2507.
- Taguchi, G. (1986). *introduction to quality engineering: Designing quality into products and processes*. Asian Productivity Organization.
- Taufik, D. A. (2020). PDCA Cycle Method implementation in Industries: A systematic literature review. *Indonesian Journal of Industrial Engineering & Management*, 1(3), 157–166.
- Tavares-Dias, M. e. (2017). Physiological responses of fish to transport in aquaculture. *quaculture Reports*, 7, 1–8.
- Timmons, M. B. (2013). Recirculating aquaculture (3rd ed.). *Ithaca Publishing Company*.
- Timmons, M. B. (2018). Recirculating Aquaculture (4th ed.). *Ithaca Publishing Company*.
- Trading Economics*. (2024). Obtenido de Trading Economics.: [https://tradingeconomics.com/mexico/aquaculture-production-metric-tons-wb-data.html?utm\\_source=chatgpt.com](https://tradingeconomics.com/mexico/aquaculture-production-metric-tons-wb-data.html?utm_source=chatgpt.com)
- Wang, Z. X. (2023). Hypoxia-induced physiological responses in fish: A review. *Fish Physiology and Biochemistry*.
- Wedemeyer, G. A. (1996). physiology of Fish in Intensive Culture Systems. *Chapman & Hall*.
- Xylem. (2020). Smart sensor solutions for aquaculture water quality monitoring. *Xylem Inc*.
- Yousefi, M. S. (2022). Alleviation of transport stress in Nile tilapia through water alkalinity and sedative supplementation. *Aquaculture Reports*, 25.
- Zhou, Y. Y. (2020). Effects of pH fluctuations on the physiological responses of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture Reports*, 18, 100428.