

## DISEÑO DE MODELO MATEMÁTICO PARA EL CONTROL AUTOMÁTICO EN UN SISTEMA DE OXIGENACIÓN DE CONTENEDORES DE TRASLADO DE TILAPIA DEL NILO

Pablo A. Cota-Sánchez<sup>1</sup>, Elena E. Bricio-Barríos<sup>2</sup>, Santiago Arceo-Díaz<sup>2</sup>, Flabio D. Mirelez-Delgado<sup>3</sup>, Reyes Benavides-Delgado<sup>1</sup>

Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Colima, <sup>1</sup>Estudios de Posgrado e Investigación, Maestría en Sistemas Computacionales. <sup>2</sup>Departamento de Ciencias Básicas. Avenida Tecnológico no. 128, Villa de Álvarez, 28976 Villa de Álvarez, Col. México. e-mail: {g2146011, elena.bricio, santiago.arceo, rbenavides}@colima.tecnm.mx

<sup>3</sup>Instituto Politécnico Nacional campus Zacatecas, Facultad de Ingeniería Mecatrónica. Calle Circuito del Gato no. 202, Ciudad Administrativa, 98160 Zacatecas, Zac. e-mail:fmirelezd@ipn.mx

### RESUMEN.

Se propone un método para determinar la variación y potencial control basado en modelo de oxígeno en un contenedor de traslado de tilapia del nilo, considerando su concentración inicial, su consumo por parte de los peces y su inyección mediante un tanque de uso médico. Se tienen como bases las buenas prácticas en el transporte de peces vivos, que indica la concentración de oxígeno disuelto que debe existir en el agua del contenedor de traslado para mantener la salud de los especímenes. El modelo emplea ecuaciones para calcular el oxígeno que los peces consumen en función del peso, la temperatura del agua y la duración del traslado. Para determinar la cantidad de oxígeno efectiva que entra al sistema se emplea un modelo que contempla el flujo de oxígeno, la profundidad a la que se encuentra el difusor dentro del tanque de agua, la tasa de transferencia de masa y la eficiencia en general del sistema. Gracias a esto, es posible encontrar las zonas de seguridad para las tilapias durante su traslado y con ello la incorporación de un controlador clásico automático. A su vez, considerando oxigenación del sistema, es posible generar un modelo que propone una tasa de oxigenación para mantener la concentración dentro de un límite seguro. Esta tasa se compara con una distinta para comprobar su eficiencia.

**Palabras Clave:** modelado matemático, consumo de oxígeno, controlador automático

### ABSTRACT.

A method is proposed to determine the variation and potential control based on an oxygen model in a Nile tilapia transfer container, considering its initial concentration, its consumption by the fish and its injection through a tank for medical use. The bases are good practices in the transport of live fish, which indicate the concentration of dissolved oxygen that must exist in the water of the transport container to maintain the health of the specimens. The model uses equations to calculate the oxygen that the fish consume based on weight, water temperature and the duration of the transfer.

To determine the effective amount of oxygen that enters the system, a model is used that considers the oxygen flow, the depth at which the diffuser is located within the water tank, the mass transfer rate and the overall efficiency of the system. Thanks to this, it is possible to find safety zones for the tilapia during their transport and with it the incorporation of a classic automatic controller. In turn, considering the oxygenation of the system, it is possible to generate a model that proposes an oxygenation rate to maintain within a safe limit. This rate is compared with a different one to check its efficiency.

**Keywords:** mathematical modeling, oxygen consumption, automatic control

### 1. INTRODUCCIÓN

La determinación de la concentración de saturación de oxígeno ( $O_2$ ) en el interior de un tanque de agua es una de las aplicaciones de la mecánica de fluidos en el sector acuícola [1]. Esto permite asegurar que la condición del agua donde se encuentran los peces tenga la concentración adecuada para su mantener una buena salud [2], lo cual es vital para el cultivo de peces, que en el caso de este trabajo es la tilapia del Nilo.

La producción de tilapia es una actividad realizada a nivel global, a tal punto que en 2020 ocupó el segundo lugar como el pez justo debajo de la carpa china [3]. Para México también representa un mercado importante, tanto de manera nacional como regional, debido a que la tilapia es un pez que tiene una gran rentabilidad lo cual hace que sea posible su producción en todos los estados de la república [4]. Previo a la comercialización de la tilapia, es necesario trasladarlas con vida hasta el destino planeado [5], tradicionalmente se utilizan bolsas con aire y agua. Reducir la temperatura del agua para minimizar su actividad aeróbica [6] o el uso de sedantes [7], son prácticas empleadas para cuidar la salud de los peces durante el proceso. Estas técnicas tienen como desventaja su necesidad en la aplicación precisa de los sedantes, ajustando a tiempo de traslado, cantidad de peces, su tamaño y la cualidades del agua donde se transportan [8]. Para el caso de la

temperatura, los peces requieren una aclimatación previa y posterior al transporte [6]. Dado que, es de interés transportar mayor cantidad de peces sin poner en riesgo su supervivencia, se han integrados sistemas de oxigenación artificial que permiten realizar la dosificación de flujos de oxígeno (O<sub>2</sub>) en el tanque que contiene a las tilapias [7] mostrando ser una alternativa confiable. No obstante, el costo de adquisición del equipo es de 250 USD y llenado de O<sub>2</sub> por traslado es de 25 USD [9]. Aunado a esto, la eficiencia de oxigenación del agua, en condiciones ideales, es del 5 al 7 % [10], así como la necesidad de su revisión constante durante el traslado incrementando el riesgo de accidentes. A pesar de ser una estrategia funcional, su efectividad está limitada por el volumen de aire comprimido, los posibles retrasos durante el traslado e, incluso, por el aumento de la temperatura debido a la exposición al sol, lo que acelera el consumo de oxígeno disponible en el interior del tanque de transporte [11]. Por tanto, este trabajo propone el diseño y evaluación de un modelo predictivo para estimar la tasa de dosificación de oxígeno durante el traslado de tilapias, a través de tres etapas: i) la identificación de zonas de riesgo donde se compromete la supervivencia del espécimen en función de la cantidad de peces y tiempo, ii) la construcción de una ecuación de balance que relacione las fuentes de generación y consumo de O<sub>2</sub> contenido en el cuerpo de agua iii) evaluar el desempeño del sistema con base a dosificación de oxígeno a través de medio externo.

## 2. METODOLOGÍA

Del año 2021 al 2023 se realizaron entrevistas al personal de la Granja Acuícola de Occidente, ubicada en San Buenaventura, en el municipio de Manzanillo; Colima, donde se identificaron las principales problemáticas asociadas al traslado de tilapia previo a su comercialización. Las variables identificadas fueron un rango definido de especímenes de tilapia del nilo, con un peso fijo, en el interior de un tanque con un volumen de agua conocido, con diferentes tiempos de traslado, a una temperatura de 26 °C. Por otro lado, para reducir el consumo de oxígeno durante el traslado, se realiza una sobreoxigenación del cuerpo de agua de aproximadamente 8 mg \* l<sup>-1</sup> y así, durante el traslado la concentración se encuentre dentro de rangos considerados como seguros (4 a 6 mg \* l<sup>-1</sup>) [7]. A partir del balance de masa, se identificó las variables de generación y consumo de oxígeno, en mgO<sub>2</sub>m<sup>-3</sup>h<sup>-1</sup>, en este caso de estudio como (ecuación 1).

$$CO_A = CO_i + CO_{tanque} - CO_{peces}; \quad (1)$$

donde se considera la concentración inicial del tanque de traslado (CO<sub>i</sub>), la generación o dosificación de oxígeno empleando un tanque de uso médico (CO<sub>tanque</sub>) y el consumo por actividad anaerobia de la tilapia (CO<sub>peces</sub>). Dado que, CO<sub>tanque</sub> será la variable a manipular, su descripción se abordará al finalizar esta sección.

Dado que, este estudio es de carácter exploratorio, se tomó como la ecuación de consumo de oxígeno propuesta por Gomma [12].

$$CO_{FR} = 2014.45 + 2.7 * W - 165.2 * T_{agua} + W^2 + 3.93 * T_{agua}^2 - 0.21 * W * T_{agua}; \quad (2)$$

donde CO<sub>FR</sub> es el oxígeno disuelto consumido por la respiración del pez en mgO<sub>2</sub>(kg<sub>pez</sub>\*hora)<sup>-1</sup>, W es la masa individual en g, y T es la temperatura del agua en °C. Para calcular el consumo grupal de los peces durante el traslado en, O<sub>2</sub>m<sup>-3</sup>h<sup>-1</sup>, se incorporó la ecuación 3 propuesta por Khater [13],

$$CO_{peces} = \frac{CO_{FR} * SD}{1000}; \quad (3)$$

donde CO<sub>FR</sub> es el consumo de cada pez en mgO<sub>2</sub>(kg<sub>pez</sub> hora)<sup>-1</sup>, SD es la densidad de peces en el tanque, en kg \* m<sup>-1</sup>. Mientras que, la magnitud de 1000 corresponde a un factor de conversión de unidades de masa y peso. Finalmente, para identificar CO<sub>tanque</sub>, se empezó con la ecuación 4, que es la eficiencia del oxígeno proporcionado por el tanque de uso médico

$$E = \frac{S}{R} * 100\%; \quad (4)$$

en la que R representa la tasa de masa de oxígeno que ingresa al cuerpo de agua en kg \* h<sup>-1</sup> (ecuación 5):

$$R = K_{La20} * 8.842 * hd * 0.11 * V * 10^{-3}; \quad (5)$$

donde hd es la profundidad del difusor de oxígeno dentro del tanque de traslado, en m, y V es el volumen de agua contenido en el tanque de traslado en m<sup>3</sup>. Dado que, K<sub>La20</sub>, es una constante, que describe la tasa de transferencia de masa por unidad de tiempo, t, a 20 °C, en h<sup>-1</sup> la cual fue descrita en ASCE [14] en la ecuación 6:

$$K_{La20} = \ln \left[ \frac{C_{sat} - C_{ac}}{C_{sat} - C_i} \right] * \frac{1}{t}; \quad (6)$$

donde C<sub>sat</sub>, C<sub>ac</sub> y C<sub>i</sub> es la concentración de saturación, la presente en el cuerpo de agua e inicial, en mg\*L<sup>-1</sup>, respectivamente. Si la temperatura difiere a 20 °C, es necesario de una ecuación de corrección propuesta en [14] (ecuación 7) :

$$K_{La20} = K_{LA} * 1.024(20 - T); \quad (7)$$

Por otro lado, S es la tasa de masa de oxígeno suministrada por el tanque en kg\*h<sup>-1</sup>, se muestra en la ecuación 8:

$$S = 0.3 * Q_g ; \tag{8}$$

donde,  $Q_g$  es el flujo que aire proveniente del tanque de oxígeno en  $m^3 * h^{-1}$ . Para finalizar,  $CO_{tanque}$  se calcula con la ecuación 9:

$$CO_{tanque} = E * Q_g. \tag{9}$$

Dado que, es de interés identificar una estrategia de control que permita la regulación de oxigenación durante el traslado de tilapias, en este trabajo se pretende evaluar el esquema de control automático, en concreto los PID. Estos dispositivos que operan en sistemas de regulación y servocontrol, permiten mantener a la variable de control dentro de un rango deseado. Cuando la variable se encuentra por debajo de un valor predeterminado, el controlador enciende el actuador y cuando lo supera, se apagará [15].

Estos

controladores han mostrado gran desempeño en sistemas en regulación de oxígeno, debido al rango de operación de concentración adecuada para reducir el riesgo de daño o mortalidad del espécimen. Por ejemplo, Soto en [16] demostraron que los controladores PID mostraron un desempeño cercano a los fuzzy al controlar el flujo de aire en estanques de crianza de tilapia. Aunado a esto, los controladores on-off han sido acoplados a sistemas IoT para el monitoreo y control en tiempo real [17]. No obstante, no se han reportado estudios donde se evalúe, vía simulación, el diseño de modelos matemáticos que describen el traslado de tilapias, y con ello la viabilidad de un esquema de control automático durante el traslado de tilapias.

### 3. RESULTADOS

La validación del modelo de consumo de oxígeno de cada tilapia, con un peso de 200g, es un paso vital para determinar su viabilidad en este proyecto, es por eso que las ecuaciones se aplicaron en un programa creado con Matlab y se comprobaron los resultados obtenidos con los reportados por Gomaa [12], para temperaturas de 26, 28 y 30 ° C.

Como se muestra en las Figuras 1 a 3, el consumo de oxígeno calculado a partir del código de Matlab (puntos azules), elaborado en este trabajo, no muestra una diferencia significativa respecto a los valores reportados por Gomaa (línea roja), a excepción del cálculo a 26 ° C, donde se observa una pequeña variación a partir de los 150 gramos.

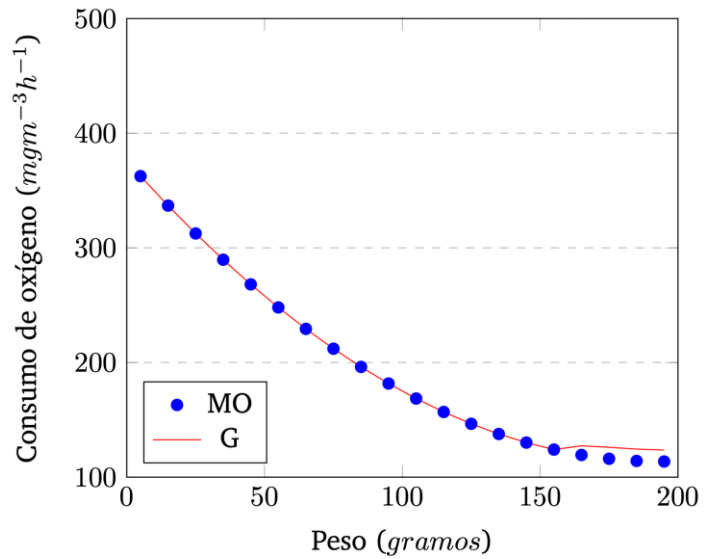


Figura 1. Validación del modelo de Gomma al evaluar la temperatura de 26 °C.

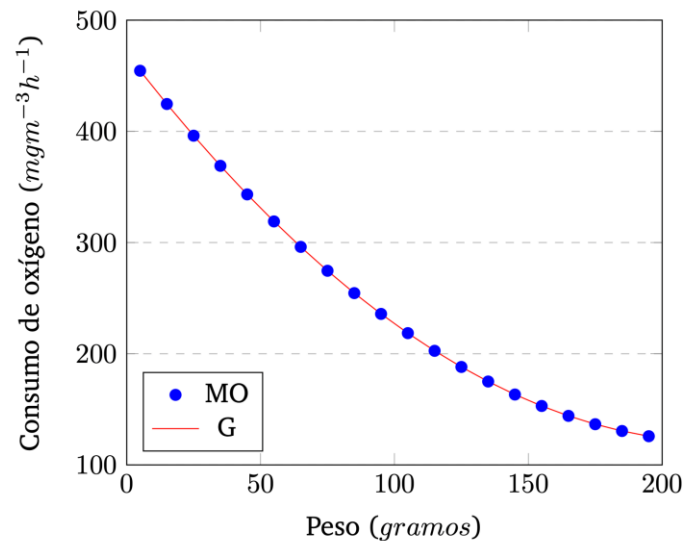


Figura 2. Validación del modelo de Gomma al evaluar la temperatura de 28 °C.

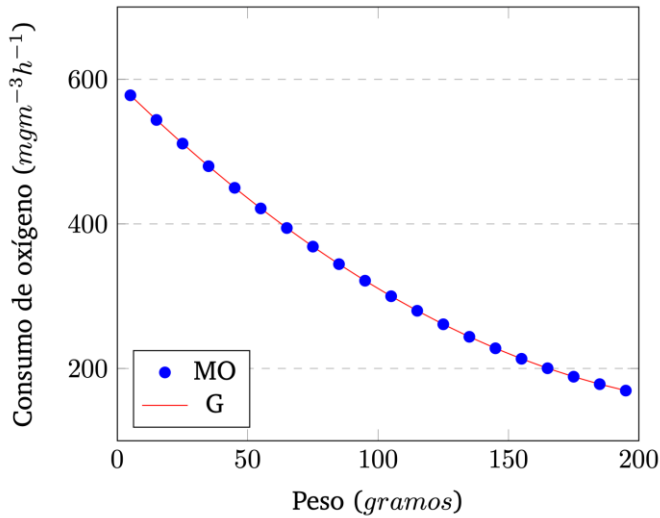


Figura 3. Validación del modelo de Gomma al evaluar la temperatura de 30 °C.

Como primera etapa, se realizó un análisis preliminar donde se evaluó la cantidad de peces (1 a 30), el tiempo de traslado (1 a 10 horas) y, a través de la ecuación 3, se cuantificó la concentración de oxígeno disponible en el cuerpo de agua, tomando una concentración inicial de  $8 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$  y como peso nominal de la tilapia 220 gramos. El diagrama de contorno se muestra en la Figura 4.

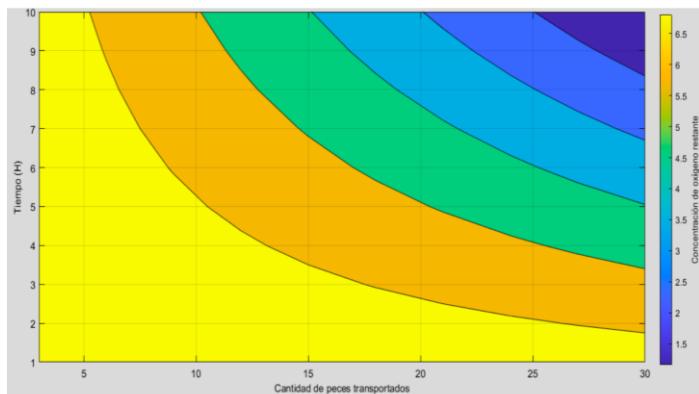


Figura 4. Diagrama de contorno que asocia cantidad de peces, tiempo de traslado y concentración de oxígeno disponible.

La Figura 4 reporta la relación de las variables de cantidad de peces y tiempo de traslado respecto a la concentración de oxígeno en el interior del tanque de agua. Este diagrama de contorno muestra, a través de un código de color el confort de los especímenes durante el traslado o riesgo de morir. Por ejemplo, el color amarillo y

naranja las zonas seguras, en verde el inicio de la zona de riesgo y en los tonos azules una baja concentración de OD y las zonas de peligro. Al evaluar las zonas de confort, amarillo, se identifica que es posible el traslado cortos de máximo 1.6 horas hasta 30 peces. Mientras que, para periodos extendidos, la cantidad máxima de peces es de 6 unidades. En el caso de la zona de riesgo, verde, es posible realizar un traslado de hasta 5 horas con 30 peces en el tanque, para periodos de 10 horas la cantidad se reduce hasta 15 peces. Finalizando, las zonas de peligro, tonos azules, se deben de evitar a toda costa, el transporte de 30 peces alcanza esta zona a las 5 horas de traslado, para periodos extendidos, 20 peces son suficientes.

Si bien, los acuicultores artesanales han identificado estas zonas de riesgo, y como acción de corrección han incorporado al sistema de traslado un cilindro de aire comprimido de uso médico con 682 litros el cual es activado manualmente por el transportista con una frecuencia de 2 o 3 horas. A pesar de ser una estrategia funcional, su efectividad es limitada por el volumen de aire comprimido, posibles retrasos durante el traslado e inclusive el incremento de la temperatura por acción del sol, acelerará el consumo de oxígeno disponible en el interior del tanque de traslado.

Identificada la zona de riesgo obtenida del diagrama de contorno de la Figura 4, se establece como caso de estudio de interés, el transporte de 30 peces, manteniendo fijas las variables de temperatura en el interior del tanque (26 C), actividad metabólica de los peces y suministro de oxígeno establecido, el cual se obtuvo tomando en cuenta un cilindro de aire comprimido de 682 L, con una capacidad de flujo de  $285 \text{ gO}_2 \cdot \text{m}^{-1}$ , la cual es equivalente al valor mínimo de  $0.25 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$  reportado por su fabricante [18].

Para la construcción de la relación de tiempo de traslado y concentración de oxígeno disponible para el consumo de las tilapias se utilizó la ecuación 1, que incorpora la ecuación. 3 y la ecuación 9. La relación de consumo de oxígeno durante el traslado, respecto a la generación obtenida de dosificación de aire, a través del cilindro con un flujo de 285 durante 1 y 5 minutos cada hora, se muestran en la Figura 5 y 6.

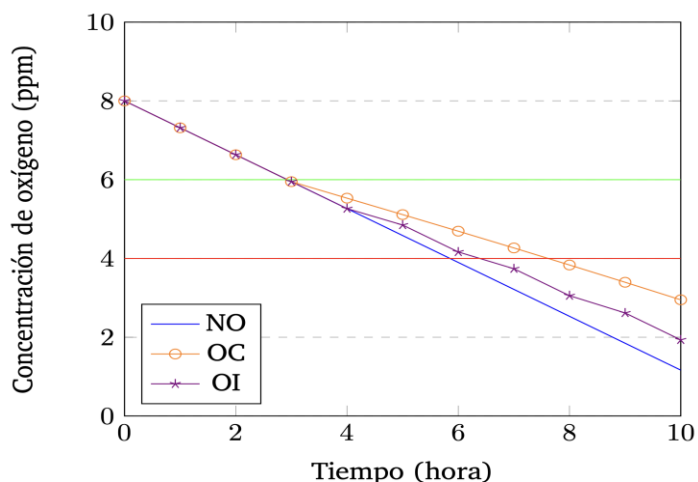


Figura 5. Concentración de OD durante el traslado con una oxigenación de 1 minuto.

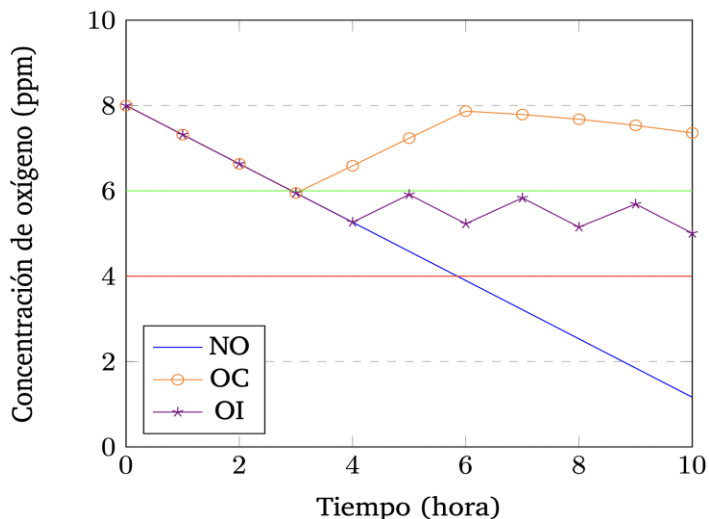


Figura 6. Concentración de OD durante el transporte con una oxigenación de 5 minutos.

La Figura 5 y 6 representan el balance de oxígeno disponible en el interior del tanque de traslado, donde NO, OC y OI significan sin oxigenación, oxigenación en cada hora de traslado y oxigenación intermitente, dejando una hora sin oxigenar después de cada oxigenación, respectivamente. En ambas Figuras se identifica la concentración de oxígeno disuelto considerado como seguro (4 a 6 ppm). También es posible observar que sin oxigenación de ningún tipo el OD restante en el tanque pondría en riesgo la salud de las tilapias, así como que, sin duda la entrada de oxígeno al sistema contribuye en prolongar el tiempo que las tilapias se encuentran en la zona segura.

Los distintos modelos de oxigenación presentados en ambas figuras muestran que, una oxigenación insuficiente no logra mantener en la zona segura el OD del sistema a durante todo el proceso de transporte, y que, una sobreoxigenación también pone en riesgo a

los especímenes, sin embargo, es posible encontrar un modelo que mantenga a los peces en la zona segura.

#### 4. CONCLUSIONES

Este trabajo reporta el comportamiento del oxígeno disuelto en un tanque de traslado de tilapia del nilo durante el proceso de transporte, e identifica las zonas de seguridad, riesgo y peligro, así como, un método de oxigenación que logra mantener el OD dentro de un rango seguro, por tanto, es viable la incorporación de un control automático y su potencial acoplamiento con sistemas de notificación en tiempo real al usuario.

A través del diseño de un modelo matemático, basado en un balance de masa, que describe la velocidad de consumo y generación de oxígeno en el interior de un tanque de traslado de tilapia, se encontró que la oxigenación durante un minuto a cada hora del traslado, tanto de manera constante como intermitente, no es suficiente para suplir las necesidades de OD de los peces. Por su parte, la oxigenación de 5 minutos en cada hora de manera constante demostró ser más que suficiente, a tal punto que, incrementa la concentración de oxígeno disuelto a niveles mayores al límite superior ideal. En cuanto a la oxigenación intermitente, también por 5 minutos en cada dos horas, esta tasa logró mantener la concentración de oxígeno dentro del rango recomendado.

Como trabajo a futuro, se plantea evaluar la actual propuesta a un prototipo que considere los cambios de temperatura, de comportamiento de los peces, el peso, volumen y traslado correspondiente a la situación real de la granja acuicola. Todo esto integrado a un sistema de control que permita la oxigenación del tanque de traslado de una manera óptima y de esta forma genere un ahorro para los productores.

#### Referencias.

- [1] K. Valdez et al., "Mathematical model and experimental validation for the prediction of dissolved oxygen saturation in water. Application to the aquaculture sector," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2153, 2022.
- [2] D. Meyer, "Introducción a la Acuicultura," *Escuela Agrícola Panamericana Zamorano*, Honduras, 2004.
- [3] R. Tveteras and D. Nystoyl, "GOAL 2019: Revisión y pronóstico de la producción mundial de peces," *Global Seafood Alliance*, 2020.
- [4] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, "Acuerdo mediante el cual se aprueba la actualización de la Carta Nacional," *Diario Oficial de la Federación*, Ciudad de México, 2021.
- [5] R. Espinoza, "Efecto de la densidad y el tiempo de transporte en la supervivencia de juveniles de sargo (*Anisotremus scapularis*) [Tesis de doctorado no publicada]," Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, 2019.
- [6] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, "Transporte de peces vivos," 2021.
- [7] F. Kubitz, "Manejo en la producción de peces: Buenas prácticas en el transporte de peces vivos", *Panorama de acuicultura*, vol. 13, no. 2, pp. 2007-3585, Mayo-Agosto 2019.

- [8] M. Rosado, "Evaluación de Diferentes Concentraciones de Tricaína (MS-222) en el Transporte de Chitas (*Anisotremus scapularis*) Juveniles," *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 2016.
- [9] PROFECO, "Programa Quién es Quién en los Precios, Tanque de oxígeno," 2021.
- [10] X. Cheng et al., "Modeling re-oxygenation performance of fine-bubble-diffusing aeration system in aquaculture ponds," *Aquaculture International*, 2019.
- [11] C. Boyd, "Temperatura del agua en acuicultura," *Global Seafood Alliance*, 2018.
- [12] E. Gomaa and E. Khater, "Simulation model for design and management of water recirculating systems in aquaculture [Tesis de doctorado no publicada]," Benha University, 2012.
- [13] E. Khater et al., "Mathematical model for predicting oxygen concentration in tilapia fish farms," *Scientific Reports*, 2021.
- [14] American Society of Civil Engineers, "Standard measurement of oxygen transfer in clean water," 2007.
- [15] G. M. Soto-Zarazúa, R. Peniche-Vera, E. Rico-García, M. Toledano-Ayala, R. Ocampo-Velázquez, and G. Herrera-Ruiz, "An automated recirculation aquaculture system based on fuzzy logic control for aquaculture production of tilapia (*Oreochromis niloticus*)," *Aquaculture International*, vol. 19, no. 4, pp. 797-808, 2011.
- [16] S. Sunardi, T. Thoharudin, F. A. K. Yudha, and P. Prayitno, "Monitoring and Control Systems for Tilapia Aquaculture based on Internet of Things (IoT)," in *Proceeding International Conference of Technology on Community and Environmental Development*, vol. 1, no. 1, pp. 24-29, July 2023.
- [17] M. Barbu, S. Caraman, C. Vlad, T. Nicolau, and E. Ceangă, "Hierarchical control system for recirculating aquaculture processes," in *2012 16th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, pp. 1-6, Oct. 2012.
- [18] Grupooxi, "Preguntas frecuentes," 2019.