

# Optimización del consumo de agua durante la crianza de camarón *L. Vannamei*. Propuesta basada en simulación numérica



## Colaboración

Elena Elsa Bricio Barrios; Santiago Arceo Diaz Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Colima; Flabio Dario Mirelez Delgado, Instituto Politécnico Nacional campus Zacatecas; Ramona Evelia Chávez Valdez, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Colima

Fecha de recepción: 13 de marzo 2024

Fecha de aceptación: 3 de junio de 2024

**RESUMEN:** La camaronicultura, la crianza y comercio de camarón, se identifica como una actividad de alta viabilidad técnica, económica y financiera. Sin embargo, la producción de un kilogramo de camarón crudo requiere un promedio de 37 metros cúbicos de agua, equivalente al consumo mensual de 15 personas. Este estudio propone una estrategia para minimizar el consumo de agua en la camaronicultura mediante la identificación de rangos operativos óptimos para diversas técnicas de crianza artesanal. Utilizando datos experimentales de una granja camaronícola en Sonora, México, y un modelo matemático no lineal, se establecen relaciones entre la cantidad de camarones, el volumen del afluente y la generación de sedimentos. A partir de las relaciones entre estas variables, se construyeron diagramas de contorno para establecer el volumen de agua necesario que minimiza el riesgo de mortalidad del espécimen, además de identificar si es necesario sistemas de aireación. Esta propuesta contribuye al desarrollo de prácticas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente de este sector productivo.

**PALABRAS CLAVE:** Acuicultura sustentable, crianza intensiva, consumo de agua, diagrama de contorno, modelado matemático.

**ABSTRACT:** Shrimp farming, the cultivation and trade of shrimp, is recognized as an activity with high technical, economic, and financial viability. However, the production of one kilogram of raw shrimp requires an average of 37 cubic meters of water, equivalent to the monthly consumption of 15 people. This study proposes a strategy to minimize water consumption in shrimp farming by identifying optimal operational ranges for various artisanal breeding techniques. Using experimental data from a shrimp farm in Sonora, Mexico, and a nonlinear mathematical model, relationships between shrimp quantity, effluent volume, and sediment generation are established. Contour diagrams are constructed based on these relationships to determine the necessary water volume that minimizes specimen mortality risk and to identify whether aeration systems are needed. This proposal contributes to the development of more sustainable and environmentally friendly practices of this productive sector.

**KEYWORDS:** Contour diagram, sustainable aquaculture, intensive farming, Mathematical model, sustainable aquaculture.

## INTRODUCCIÓN

En México, la crianza de camarón es una actividad económica equiparable a la agricultura [1]. Para que este producto alimenticio cumpla con los requerimientos sanitarios, durante el crecimiento de los camarones, se debe supervisar los parámetros de calidad de agua de los estanques de crianza [2]. Por otro lado, es crucial el control de liberación del flujo de agua que es vertida de este proceso, conocido como afluente, para reducir el riesgo de intoxicación de los camarones durante su crianza [3].

Estos compuestos dañinos provienen de los residuos de alimentos no consumidos y excretados por los camarones pueden

acumularse en el fondo del estanque, formando sedimentos ricos en compuestos nitrogenados [4]. Los camarones suelen utilizar esta acumulación de sedimentos en el fondo para protegerse de la radiación solar [5]. Sin embargo, un exceso de estos residuos puede ser perjudicial para su salud y crecimiento de los especímenes [6]. Por lo tanto, el éxito del proceso de cosecha de los camarones está asociado con un control riguroso de estos sedimentos, como una estrategia para la reducción de la mortalidad asociada a la intoxicación de los especímenes.

Existen varios métodos para controlar los sedimentos en los estanques acuícolas como la remoción manual, la liberación controlada del afluente, los biofiltros y la incorporación de bacterias que degradan el nitrógeno a compuestos menos tóxicos [7].

En México, el control de sedimentos se realiza a través de la liberación del afluente de forma permanente, lo que requiere un recambio total del agua cada 3 a 4 días [4]. Esto implica un consumo considerable de agua, por lo que es imperativo buscar formas de hacer la cría de camarón más sostenible y respetuosa con el agua. El reducir este consumo ayudaría a garantizar tanto la soberanía alimentaria como la sostenibilidad de los recursos hídricos [8].

Además del compromiso social, en años recientes, se han reportado fuertes oscilaciones en los ciclos hídricos anuales, limitando a los acuicultores el acceso de agua dulce para la crianza de camarón [9]. Esta problemática fue abordada por la FAO en [4] e INAPESCA en [10] quienes establecieron los rangos de volumen de agua que permitirá a los camarones crecer sin riesgo de enfermarse a causa de exceso de compuestos nitrogenados en el agua.

Si bien, es posible establecer el consumo de agua por estanque de crianza de camarón, este proceso se realiza a prueba y error tornando esta problemática como un nicho de oportunidad para abordarlo desde una perspectiva de modelado matemático y posterior optimización.

De los modelos matemáticos disponibles en la literatura abierta, Lorenzen y Stuve en [11] reportaron el proceso de degradación del alimento dosificado al camarón en compuestos orgánicos como nitrógeno amoniacal total, que, en caso de que se encuentre en presencia de oxígeno reaccionan para formar nitratos. En caso que el medio donde está sucediendo la reacción química registre un pH superior a 8 iniciará la formación fitoplancton [3].

Burford y Lorenzen en [12] extendieron el modelo de Lorenzen y Steve en [11] con la formación de sedimentos a partir del fitoplancton. Estos organismos microscópicos, al realizar el proceso de fotosíntesis, convierten la

energía solar en materia orgánica y oxígeno, absorben nitratos y fosfatos en el cuerpo de agua [13].

Tomando en consideración la importancia de ofrecer un modelo matemático capaz de replicar el proceso de descomposición del alimento durante la etapa juvenil del camarón *L. Vannamei*. Este trabajo reporta, desde un enfoque de modelado matemático, la identificación del volumen de agua necesario que permita al camarón desarrollarse en los primeros 60 días en el interior de un estanque de crianza, aplicable a las técnicas de crianza extensiva, semi-intensiva e intensiva.

## MATERIAL Y MÉTODOS

Este trabajo se describe mediante un diagrama de flujo (Figura 1) mediante: i) la identificación de un banco de trabajo con registros históricos que reporta la tasa de ganancia de peso de camarón, el monitoreo de las variables de interés. ii) El modelo matemático que describe el proceso de crecimiento y generación de sedimentos y compuestos nitrogenados. iii) La evaluación del tipo de crianza, con base a la cantidad de camarones en su interior. iv) La construcción de los diagramas de contorno para identificar zonas seguras de crianza, de incorporación de aireación y de riesgo de mortaliad.

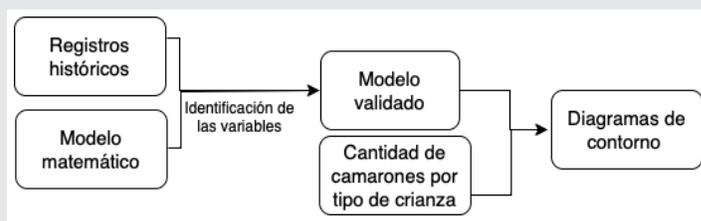


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología empleada. Fuente: Elaboración propia.

### Banco de trabajo

Para este estudio, se utilizaron los datos experimentales recopilados por Lara y colaboradores en [14] que abarcaron un período de 59 días. Estos datos incluyeron mediciones semanales de la ganancia de peso de los camarones en gramos, así como diversas variables fisicoquímicas del agua, como la temperatura en grados Celsius, el pH y la concentración de nitrógeno amoniacal total y nitritos (en  $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ). El experimento se llevó a cabo en un estanque artificial de dimensiones 50 x 8 x 1.2 metros, ubicado en la bahía de Kino, Sonora, México.

### Modelo matemático de generación de compuestos nitrogenados

Para este trabajo se eligió el modelo matemático propuesto por Burford y Lorenzen en [12] que describe, el ciclo de descomposición de la proteína del alimento para los camarones hasta la generación de algas. Dado que, en este estudio está centrado en el estudio de los sedimentos sólo se analizarán las ec. (1 a 4) correspondientes a la velocidad de generación de nitrógeno total CTAN, nitratos CNOX, fitoplancton CFITO y sedimentos CSKD:

$$\frac{dC_{TAN}}{dt} = q * (a * Nt * F^b) + r * C_{SED} * (n + v + f) * C_{TAN} - g * c * C_{FITO} * \left( \frac{C_{TAN}}{C_{TAN} + C_{NOX}} \right) \quad \text{Ec. (1)}$$

$$\frac{dC_{NOX}}{dt} = n * C_{TAN} - f * C_{NOX} - g * c * C_{FITO} * \left( \frac{C_{NOX}}{C_{NOX} + C_{TAN}} \right) \quad \text{Ec. (2)}$$

$$\frac{dC_{FITO}}{dt} = g * C_{FITO} - (f + s) * C_{FITO} \quad \text{Ec. (3)}$$

$$\frac{dC_{SED}}{dt} = s * c * C_{FITO} - r * C_{SED} \quad \text{Ec. (4)}$$

Las variables y valores de referencia usados por este modelo se reportan en la Tabla 1 que pueden consultarse en el trabajo de Burford y Lorenzen [12].

Las cantidades mínimas de Nitrógeno y Fósforo Ln y Lp, en mg-1, se definen a partir de las velocidades de generación de nitrógeno total y nitratos de la ec. 5 y 6:

$$L_n = \frac{C_{TAN} + C_{NOX}}{(C_{TAN} + C_{NOX}) + K_{sn}} \quad \text{Ec. (5)}$$

$$L_p = \frac{C_{drp}}{C_{drp} + K_{sp}} \quad \text{Ec. (6)}$$

La tasa de mortalidad, Nt está dada por la relación de la densidad media de camarones que fallecen en condiciones ideales NO y la velocidad de mortandad M durante el proceso de crianza. Esta relación se muestra en la Ec. 7.

$$Nt = N_0 * e^{-M*t} \quad \text{Ec. (7)}$$

El coeficiente de extinción del camarón, k, la velocidad de crecimiento del fitoplancton, g\*día-1, y la densidad de camarones en el interior del estanque, NT (en l-1), se calculan de acuerdo a las expresiones de las ec. 8 y 9:

$$k = k_{FITO} * C_{FITO} + k_{other} \quad \text{Ec. (8)}$$

$$g = g_{max} * \left[ \frac{e}{k * z} * e^{-\frac{I_0}{I_{sat}}} * e^{-z*k} - e^{-\frac{I_0}{I_{sat}}} \right] * L_n * L_p \quad \text{Ec. (9)}$$

**Transformación de tiempo discreto a continuo**

Dado que, el modelo matemático de Burford y Lorenzen en [12] se encuentra en tiempo continuo y los registros históricos de Lara en [14] lo realizaron en tiempo discreto, ya que el crecimiento de camarón requiere hasta 3 meses. En este trabajo se creó una ecuación de regresión polinomial para describir la tasa de ganancia de peso de los especímenes. Este procedimiento fue empleado por Meza y colaboradores en [15] para describir en tiempo continuo la ganancia de peso de

tilapia del Nilo en una granja acuícola mexicana. La ec. 10 reporta los coeficientes del modelo no lineal de los camarones empleados en este estudio.

$$F = 0,9286 - 0,0369 * t + 0,038 * t^2 - 0,00002 * t^3 \quad \text{Ec. (10)}$$

donde F es la ganancia de peso del camarón en la etapa juvenil, en gr, t es el tiempo de crecimiento en el interior del estanque de crianza, en días. Construcción de diagramas de contorno.

Se identificaron los parámetros de cada ecuación diferencial mediante el uso del comando "lsqnonlin" disponible en la versión 2021 de Matlab. Posteriormente, se generaron diagramas de contorno utilizando el comando "contour" para ilustrar la cría de camarones en modalidades de operación extensiva, semi-intensiva e intensiva.

**RESULTADOS**

Las Figuras 2, 3 y 4 muestran la relación de las variables de entrada el flujo volumétrico de afluente, cantidad de camarones en el interior del estanque de crianza y la concentración de sedimentos como variable de salida, así como las zonas de riesgo por ausencia de sedimento que puede ocasionar en los camarones estrés por carecer de una barrera protectora de la radiación solar.

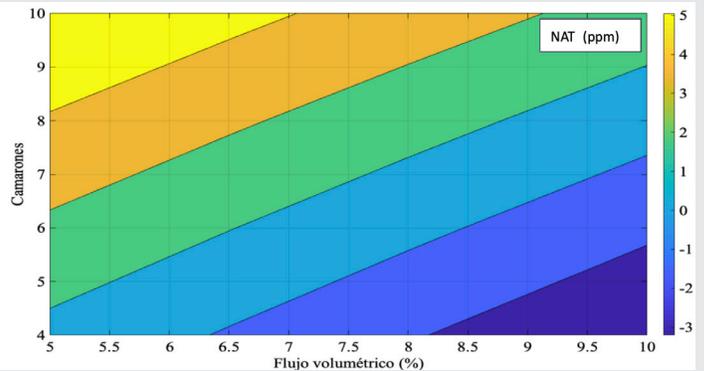


Figura 2. Diagrama de contorno de un proceso de crianza extensiva. Fuente: Elaboración propia.

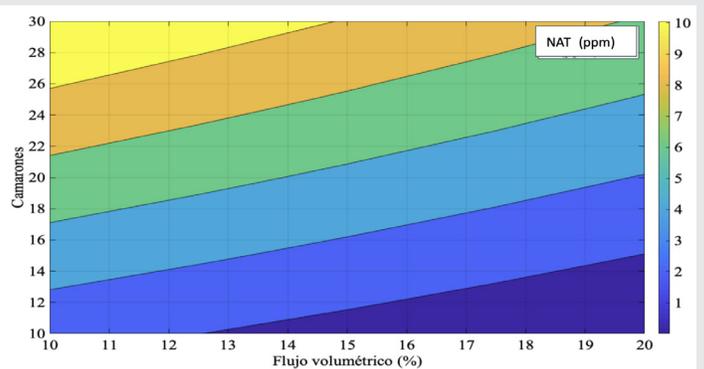


Figura 3. Diagrama de contorno de un proceso de crianza semi-intensivo. Fuente: Elaboración propia.

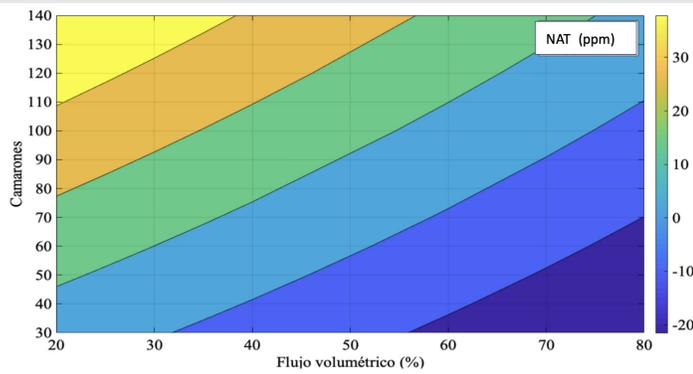


Figura 4. Diagrama de contorno de un proceso de crianza intensivo.

Fuente: Elaboración propia.

A partir de las Figuras 2, 3 y 4 se establece el rango de flujo volumétrico, concentración de sedimentos que se formarán y si requiere un sistema de aireación. Las magnitudes se reportan en la Tabla 1.

Tabla 1. Relación de variables optimizadas con base al tipo de crianza de 1 kg de camarón.

Crianza	Camarones	Flujo vol.	Sed.	Aireación
Extensiva	4 a 10	5 a 10	> 5	No
Semi-intensiva	10 a 30	10 a 20	< 1	Sí
Intensiva	60 a 110	32 a 56	> 15	Sí

Fuente. Elaboración propia.

En la operación Semi-intensiva e Intensiva se recomienda un sistema de aireación permanente si en el interior del estanque de crianza es de, al menos 26 camarones y superior a 70, respectivamente. Por otro lado, la Tabla 2 reporta el volumen de agua, en metros cúbicos, requerida para obtener un kilogramo de camarón en un periodo de 60 días, tomando como referencia el proceso tradicional propuesto por INAPESCA en [10] respecto a los diagramas de contorno de la Figura 1, 2 y 3 del proceso optimizado.

En la Tabla 2 se observa que, es posible minimizar el consumo de agua los primeros 60 días de crianza de camarón en el interior de estanques artificiales. A excepción de la operación Semi-intensiva se observa una reducción significativa de consumo de agua.

Tabla 2. Consumo de agua, en metros cúbicos, para la crianza de camarones mediante el modelo tradicional y optimizado.

Crianza	Camarones	Recomendado	Optimizado
Extensiva	4 a 10	37.5 a 70.0	33 a 37.5
Semi-intensiva	10 a 30	120 a 180	120 a 180
Intensiva	60 a 110	360 a 480	120 a 230

Fuente. Elaboración propia.

Un aspecto relevante a mencionar es que en la operación optimizada, si en el interior del estanque de crianza

Semi-intensiva se excede de 26 camarones será necesario una fuente externa de oxígeno siempre y cuando el afluente sea superior al 10 %. Este comportamiento se repite con la operación Intensiva durante la crianza de 70 o más especímenes con al menos 55 % del afluente.

## CONCLUSIONES

Este trabajo reporta el uso y validación de un modelo matemático que permite minimizar el consumo de agua, a través de la identificación de zonas seguras de operación durante el proceso de tres técnicas de crianza de camarón que realizan los acuicultores mexicanos.

Los resultados identificaron numéricamente que, al incrementar la cantidad de camarones en el interior del estanque de crianza es necesario incrementar el flujo del afluentes. Por otro lado, si la densidad de camarones es baja para la técnica de crianza, la liberación del afluente debe ser alrededor de la mitad a la cota inferior reportada en la literatura abierta.

Referente a las técnicas de crianza, las condiciones para el requerimiento de sistemas de aireación, donde el proceso intensivo no es necesario, para el semi-intensivo se recomienda cuando tenga baja liberación del afluentes y, para el extensivo, se requiere de forma permanente. Además, en la extensiva, se identificó la necesidad de la incorporación de sistemas mecánicos o biológicos para evitar riesgos de mortalidad por adherencia de sedimentos en las branquias de los camarones.

Como trabajo a futuro, se plantea evaluar registros históricos de todo el proceso de crecimiento de camarones. Posteriormente evaluar la viabilidad teórica y técnica de la incorporación de un esquema de control clásico que permita la liberación del afluente, con el objetivo de minimizar el consumo de agua y uso de sistemas de aireación favoreciendo la sustentabilidad de esta actividad primaria.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] CONAPESCA. (2021). *Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca. La Conapesca promueve la producción y consumo de tilapia en el país. Consultado el 2 de marzo del 2024. Consultado el 2 de marzo del 2024, <https://acortar.link/Mwtexq>.*
- [2] Rueda, F. (2011) *Breve historia de una gran desconocida: la acuicultura, Eubacteria, 26(1). Consultado el 7 de octubre del 2023, <https://acortar.link/iReHok>.*
- [3] Barajas ,J., Verduzco, J. Bricio, E. Figueroa, P., Arceo, S. (2019). *Sistema de notificación en tiempo real de la calidad del agua en granjas de camarón. Revista Mexicana de Agrosistemas, 7(1). Consultado el 15 de diciembre del 2023, <https://acortar.link/Of61eg>.*

- [4] FAO. (2008). Food and Agriculture Organization. *Penaeus vannamei*. In *Cultured aquatic species fact sheets*. Consultado el 1 de marzo del 2023, <https://acortar.link/df003q>.
- [5] Plascencia, A., Almada, D. (2012). La acuicultura y su impacto al medio ambiente. *Estudios Sociales. Revista de alimentación contemporánea y desarrollo regional*, 2(1). Consultado el 12 de diciembre del 2023, <https://acortar.link/qrV9M5>.
- [6] Boyd, C. Clay, W. (1998). Shrimp aquaculture and the environment. *Scientific American*, 278(6). Consultado el 2 de marzo del 2024, <https://acortar.link/TLfEJ5>.
- [7] Brown, M., Briones, A., Raskin, L. (2013). Ammonia-oxidizing archaea and nitrite-oxidizing nitrospiras in the biofilter of a shrimp recirculating aquaculture system. *FEMS microbiology ecology*, 83 (1). Consultado el 2 de marzo del 2024, <https://acortar.link/Zb2AWB>.
- [8] Salazar, O., Chinchilla, c., Santos, S., Benavides, L., Berriel, V. (2022). Consumo de agua por la agricultura en América Latina y el Caribe: impacto del cambio climático y aplicaciones de técnicas nucleares e isotópicas,” *International journal of agriculture and natural resources*”, 49(1). Consultado el 12 de diciembre del 2023, <https://acortar.link/qlLDcq>.
- [9] SMN. (2023). Servicio Meteorológico Nacional. México ha sido impactado por 270 ciclones tropicales en los últimos 50 años. Consultado el 4 de febrero del 2024, <https://acortar.link/yeYOWX>.
- [10] INAPESCA. 2013. Instituto Nacional de Pesca. Carta Nacional Acuicola. 2013. Consultado el 7 de enero del 2024, [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/117710/09092013\\_CARTA\\_NACIONAL\\_ACUICOLA.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/117710/09092013_CARTA_NACIONAL_ACUICOLA.pdf).
- [11] Lorenzen, K. Struve, J. (1997) et al., “Impact of farming intensity and water management on nitrogen dynamics in intensive pond culture: a mathematical model applied to Thai commercial shrimp farms. *Aquaculture Research*, 28(7). Consultado el 22 de octubre del 2023, <https://acortar.link/dbMvn0>.
- [12] Burford, M. Lorenzen, K. (2004). Modeling nitrogen dynamics in intensive shrimp ponds: the role of sediment remineralization. *Aquaculture*, 229(1). Consultado el 2 de abril del 2023, <https://acortar.link/2n-hw3C>.
- [13] Sonnenholzner, S., Rodríguez, J., Pérez, F., Betancourt, I., Echeverría, F. Calderón, J. (2002). Supervivencia y respuesta inmune de camarones juveniles lv desafiados por vía oral a wssv a diferentes temperaturas. *Revista de Producción animal*, 34(1). Consultado el 5 de diciembre del 2023, <https://acortar.link/eqZLHn>.
- [14] Lara, C., Espinosa, A., Rivera, M., Astorga, K., Acedo, E., Bermúdez, M. (2016). Desarrollo de camarón *Litopenaeus vannamei* en un sistema de cultivo intensivo con biofloc y nulo recambio de agua,” *Revista AquaTIC*, 43(1). Consultado el 12 de diciembre del 2023, <https://acortar.link/97XGeV>.
- [15] A. Meza, A., Bricio, E., Arceo, S.(2022). Modelado matemático de la influencia de la tasa de alimentación y parámetros fisicoquímicos, in situ, en relación con la ganancia de peso de tilapia,” *Ciencia y Tecnología Aplicada*, 4(2). Consultado el 6 de febrero del 2024, <https://acortar.link/Ux6gct>.

