



CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS  
DEL NOROESTE, S.C.

---

---

Programa de Estudios de Posgrado

CULTIVO INTENSIVO FOTO-HETEROTRÓFICO DEL  
CAMARÓN BLANCO *Litopenaeus vannamei* (Boone,  
1931) EN ALTA SALINIDAD CON REPOSICIÓN  
MÍNIMA DE AGUA

TESIS

Que para obtener el grado de

Doctor en Ciencias

Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales  
(Orientación Acuicultura)

Presenta

**LUIS DANIEL MORENO FIGUEROA**

La Paz, Baja California Sur, diciembre de 2017

## ACTA DE LIBERACIÓN DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B. C. S., siendo las 11 horas del día 24 del Mes de Noviembre del 2017, se procedió por los abajo firmantes, miembros de la Comisión Revisora de Tesis avalada por la Dirección de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C., a liberar la Tesis de Grado titulada:

**"CULTIVO INTENSIVO FOTO-HETEROTRÓFICO DEL CAMARÓN BLANCO *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931) EN ALTA SALINIDAD CON REPOSICIÓN MÍNIMA DE AGUA"**

Presentada por el alumno:

**LUIS DANIEL MORENO FIGUEROA**

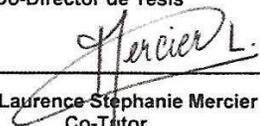
Aspirante al Grado de DOCTOR EN CIENCIAS EN EL USO, MANEJO Y PRESERVACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES CON ORIENTACIÓN EN ACUICULTURA

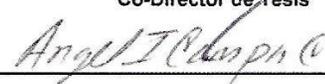
Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron su **APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

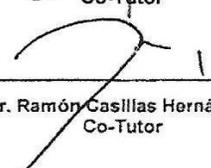
### LA COMISIÓN REVISORA

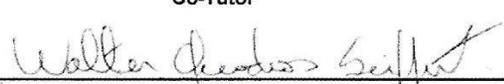
  
Dr. Humberto Villarreal Colmenares  
Co-Director de Tesis

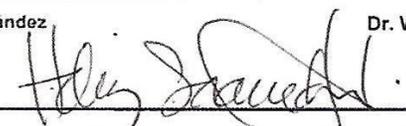
  
Dr. Alfredo Hernández Llamas  
Co-Director de Tesis

  
Dra. Laurence Stéphanie Mercier  
Co-Tutor

  
Dr. Ángel Isidro Campa Córdova  
Co-Tutor

  
Dr. Ramón Casillas Hernández  
Co-Tutor

  
Dr. Walter Quadros Seiffert  
Co-Tutor

  
Dra. Norma Yofanda Hernández Saavedra,  
Directora de Estudios de Posgrado y  
Formación de Recursos Humanos

### **Comité tutorial**

Dr. Humberto Villarreal Colmenares  
Co-Director de tesis  
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.

Dr. Alfredo Hernández Llamas  
Co-Director de tesis  
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C

Dra. Laurence Stephanie Mercier  
Co-Tutor  
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.

Dr. Ángel Isidro Campa Córdova  
Co-Tutor  
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.

Dr. Ramón Casillas Hernández  
Co-Tutor  
Instituto Tecnológico de Sonora

Dr. Walter Quadros Seiffert  
Co-Tutor  
Universidad Federal de Santa Catarina

### **Comité revisor de tesis**

Dr. Humberto Villarreal Colmenares  
Dr. Alfredo Hernández Llamas  
Dra. Laurence Stephanie Mercier  
Dr. Ángel Isidro Campa Córdova  
Dr. Ramón Casillas Hernández  
Dr. Walter Quadros Seiffert

### **Jurado de examen de grado**

Dr. Humberto Villarreal Colmenares  
Dr. Alfredo Hernández Llamas  
Dra. Laurence Stephanie Mercier  
Dr. Ángel Isidro Campa Córdova  
Dr. Ramón Casillas Hernández

### **Suplentes**

Dr. Walter Quadros Seiffert y Dr. Alberto Peña Rodríguez

## Resumen

La caída en la producción del camarón blanco en México está asociada principalmente a enfermedades, infraestructura deteriorada y el uso de tecnologías obsoletas. Para hacer frente al declive en la producción se requieren sistemas bioseguros y económicamente eficientes. El cultivo foto-heterotrófico es un sistema híbrido basado en el balance entre organismos heterotróficos y autotróficos que se presenta cuando existe un balance en los nutrientes, la concentración de oxígeno disuelto adecuada y la capacidad de transporte de partículas necesaria, resultado del uso de sistemas de aireación. El agregado bacteria-microalga además de ser utilizado como alimento del camarón, controla la calidad del agua al degradar los productos del alimento no consumido, plancton muerto y heces fecales, en compuestos no tóxicos, lo que conlleva a la estabilización del sistema, permitiendo que el recambio de agua sea mínimo o innecesario si los demás parámetros son controlados correctamente. El objetivo de la presente investigación fue caracterizar el cultivo intensivo foto-heterotrófico desde un punto de vista técnico, biológico y económico a partir de un análisis estocástico bioeconómico. Se llevaron a cabo dos ciclos de producción (primavera-verano y verano-otoño) con los que se generó información relativa a la calidad de agua, sobrevivencias, factores de conversión alimenticia, rendimientos y rentabilidades económicas. Se estableció como hipótesis, si durante el ciclo de primavera-verano la calidad del agua, particularmente la temperatura es inferior a la del ciclo de verano-otoño, entonces, tanto el desempeño productivo como el económico deberán ser mejores en este último. Para el ciclo primavera-verano se obtuvo un rendimiento de 13.5 t/ha, con organismos de 13 g y una sobrevivencia de 83% en 105 días de cultivo, mientras que para el ciclo verano-otoño, se obtuvo un rendimiento de 18 t/ha, con organismos de 18.5 g y una sobrevivencia del 80% en 92 días de cultivo. El modelo bioeconómico predijo que para una granja integrada por seis estanques de 0.1 ha, al tiempo de cosecha (105 días para el ciclo primavera-verano y 92 días para el ciclo verano-otoño), con 95% de confianza la utilidad neta variará entre \$115 550 y \$334 300/ha (promedio = \$222 930/ha) para el ciclo primavera-verano, y para el ciclo verano-otoño entre \$508 000 y \$814 000/ha (promedio = \$690 000/ha). Los resultados de una prueba t-Student indicaron que las utilidades en el ciclo verano-otoño son significativamente superiores ( $P < 0.05$ ). Anualmente, tomando en cuenta los dos ciclos de producción, con 95% de confianza el sistema podrá generar una utilidad neta entre \$616 100 y \$1 216 100/ha (promedio = \$916 100/ha) y una relación beneficio-costos entre 3.08 y 3.56 (promedio = 3.32). El cultivo foto-heterotrófico es una buena alternativa para la industria camaronera, ya que permite un alto rendimiento por unidad de área a la vez que se reducen costos en alimentación y bombeo de agua, minimizando la posible entrada de patógenos al sistema.

**Palabras clave:** Cultivo foto-heterotrófico, *L. vannamei*, bioeconomía, hipersalinidad.



Dr. Humberto Villarreal Colmenares  
Co-Director de tesis

Vo.Bo.



Dr. Alfredo Hernández Llamas  
Co-Director de tesis

## Summary

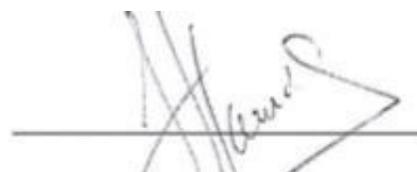
The fall in the production of the white-leg shrimp (*Litopenaeus vannamei*) in Mexico, is mainly associated with diseases outbreaks, deteriorated infrastructure and the use of obsolete technologies. To face the decline in the production, biosecure and economically efficient systems are required. The photo-heterotrophic technology is a hybrid system based on the balance between heterotrophic and autotrophic microorganisms, which occurs when there is stability in nutrients, an adequate dissolved oxygen concentration, and the necessary particle transport capacity, resulting from the use of aeration. The microalgae-bacteria aggregate serves as natural food source and controls water quality by degrading the products of uneaten food, dead plankton, and fecal feces, in non-toxic compounds, which leads to the stabilization of the system, allowing to eliminate the water exchange if the other parameters are controlled correctly. The objective of the present investigation was to characterize the intensive photo-heterotrophic system from a technical, biological, and economic perspective using a bioeconomic stochastic approach. Two production cycles were performed (spring-summer and summer-autumn) to produce information on, water quality, survival, FCR, yield and net profit. The hypothesis established was, if during the spring-summer cycle, the water quality is worse than the one registered for the summer-autumn cycle, then yields and the economic performance should be higher in the latter. For the spring-summer cycle, a yield of 13.5 ton/ha was obtained, with organisms of 13 g, and a survival of 83% in 105 days of cultivation, while for the summer-autumn cycle, a yield of 18 t/ha was obtained, with organisms of 18.5 g, and a survival of 80% in 92 days of cultivation. The bioeconomic model predicted that for a farm integrated by six ponds of 0.1 ha, at the end of the production cycles, with 95% confidence, the net profit will vary between \$MX 115 550 and \$MX 334 300/ ha (mean = \$MX 222 930/ha) for the spring-summer cycle, and for the summer-autumn cycle between \$MX 508,000 and \$MX 814,000/ha (mean = \$MX 690 000/ha). The results of a t-Student test indicated that the net profit in the summer-autumn cycle was significantly higher ( $P < 0.05$ ). Taking into account the two production cycles, with 95% confidence the system could annually generate a net profit between \$MX 616 100 and \$MX 1 216 100/ha (mean = \$MX 916 100/ha) and a benefit-cost ratio between 3.08 and 3.56 (mean = 3.32). The photo-heterotrophic system is a good and biosecure alternative for the shrimp farming industry since allows a high yield per area, reduces costs of feeding and pumping, minimizing the possible entry of pathogens into the system.

**Key words:** photo-heterotrophic technology, *L. vannamei*, bioeconomics, hyper-salinity.



Dr. Humberto Villarreal Colmenares  
Co-Director de tesis

Vo.Bo.



Dr. Alfredo Hernández Llamas  
Co-Director de tesis

**Dedicatoria**

**A mis padres: José Luis Moreno e Irma Yolanda Figueroa**

**A mi hermana: Alejandra Moreno**

**A la nueva integrante de la familia: Emma Catalina**

**“Sin una familia, el hombre solo en el mundo, tiembla con el frío”  
André Maurois**

## Agradecimientos

Al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. (CIBNOR) y en especial a la Dirección de Posgrado por las facilidades otorgadas durante mis estudios doctorales.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada (236053) durante la realización del presente trabajo.

Al Dr. Humberto Villarreal por su guía a través de cuatro años de arduo trabajo y por ser responsable del proyecto FINNOVA No. 192666, el cual financió el desarrollo de la presente investigación.

Al Dr. Alfredo Hernández por compartir sus conocimientos, experiencia y habilidades en materia de bioeconomía y enriquecer, sobremanera la presente tesis.

A los Dres. Laurence Mercier, Ángel Campa, Ramón Casillas y Walter Quadros por aceptar ser mis co-tutores y ofrecer diferentes puntos de vista, consejos y sugerencias para mejorar en el día a día del doctorado.

Al personal de BioHelis-Cibnor y especialmente al Dr. José Naranjo Páramo, Ing. Mayra Vargas Mendieta, M.C. José Andrés Hernández Gurrola, Biol. Jesús Antonio Aguilar Villavicencio, Tec. Víctor Polo, Biol. Alfonso Cervantes y M.C. Yazmín Sánchez, por su apoyo técnico y formar parte del proyecto.

Al personal del Laboratorio de Cómputo y biblioteca, en especial al Ing. Horacio Sandoval Gómez, Lic. Ana María Talamantes Cota y Tec. Susana Luna García.

A mis amigos de toda la vida: José Zavala, Ayanti Herrera y Mauricio Herrera, por estar siempre presentes aunque nos encontremos a miles de kilómetros de distancia.

A mis amigos: Eduardo Aguilera, Karol Ulate, José Villa, Saúl Zamora, Claudia Maytorena, Angélica Sarmiento, Laura Nájera, Paola Tenorio, Tomás López, David Gómez, Lilia López, Mario Rojas, Alejandro Aldana y Beatriz Meza.

Y por último pero no menos importante, a Leticia Cab por su paciencia, cariño y alegrías a lo largo de los últimos tres años.

## Contenido

<b>Resumen</b>	i
<b>Summary</b>	ii
<b>Dedicatoria</b>	iii
<b>Agradecimientos</b>	iv
<b>Contenido</b>	vi
<b>Lista de figuras</b>	ix
<b>Lista de tablas</b>	xii
<b>Abreviaturas</b>	xiii
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>2. ANTECEDENTES</b>	4
2.1 Biología y producción del camarón blanco	4
2.2 Uso de aireación en la acuicultura	9
2.3 Sistemas intensivos de producción de camarón	9
2.3.1 Sistemas Fototróficos	10
2.3.2 Sistemas Heterotróficos	11
2.3.3 Sistemas Foto-heterotróficos	13
2.4 Recambio de agua	15
2.5 Bioeconomía acuícola	16
<b>3. JUSTIFICACIÓN</b>	20
<b>4. HIPÓTESIS</b>	21
<b>5. OBJETIVOS</b>	21
5.1 Objetivo general	21
5.1 Objetivos específicos	21
<b>6. METODOLOGÍA</b>	22
6.1 Fertilización de los estanques de cultivo	22
6.2 Preparación y aplicación del probiótico en los estanques	23
6.3 Ensayo del cultivo	24
6.3.1 Parámetros de calidad de agua	24

6.3.2	Parámetros zootécnicos	25
6.3.3	Requerimiento eléctrico y de agua	26
6.3.4	Modelo bioeconómico	26
6.3.4.1	Sub-modelo biológico	26
6.3.4.2	Sub-modelo del factor de conversión alimenticia (FCA)	28
6.3.4.3	Sub-modelo económico	28
6.4.	Análisis estadístico	30
6.4.1	Simulación de Monte Carlo, análisis de sensibilidad y software	31
<b>7.</b>	<b>RESULTADOS</b>	32
7.1.1	Parámetros de calidad de agua (ciclo primavera-verano)	32
7.1.2	Parámetros de calidad de agua (ciclo verano-otoño)	38
7.2.1	Parámetros zootécnicos (ciclo primavera-verano)	40
7.2.2	Parámetros zootécnicos (ciclo verano-otoño)	41
7.3.1	Requerimiento eléctrico y de agua (ciclo primavera-verano)	42
7.3.2	Requerimiento eléctrico y de agua (ciclo verano-otoño)	43
7.4	Modelo bioeconómico (ciclo primavera-verano)	43
7.4.1	Sub-modelo biológico	43
7.4.2	Sub-modelo del factor de conversión alimenticia (FCA)	46
7.4.3	Sub-modelo económico	46
7.5	Modelo bioeconómico (ciclo verano-otoño)	50
7.5.1	Sub-modelo biológico	50
7.5.2	Sub-modelo del factor de conversión alimenticia (FCA)	52
7.5.3	Submodelo económico	52
7.6	Análisis económico de seis estanques y análisis anual de producción	56
7.7	Comparación de calidad de agua, producción y utilidades entre los ciclos de producción	57
<b>8.</b>	<b>DISCUSIÓN</b>	59
8.1	Parámetros de calidad de agua	59
8.2	Parámetros zootécnicos	65
8.3	Requerimiento eléctrico y de agua	67

8.4 Modelo bioeconómico	68
<b>9. CONCLUSIONES</b>	73
<b>10. LITERATURA CITADA</b>	74
<b>11. ANEXOS</b>	89

## Lista de figuras

<b>Figura 1.</b>	Producción mundial de camarón por acuicultura	1
<b>Figura 2.</b>	Ciclo de vida natural de <i>L. vannamei</i>	5
<b>Figura 3.</b>	Esquema de un sistema Foto-Heterotrófico (SFH)	13
<b>Figura 4.</b>	Modelo conceptual modificado del análisis bioeconómico	16
<b>Figura 5.</b>	Temperatura promedio en las unidades experimentales para el ciclo primavera-verano	32
<b>Figura 6.</b>	Salinidad promedio en las unidades experimentales para el ciclo primavera-verano	32
<b>Figura 7.</b>	Concentración de oxígeno disuelto promedio en las unidades experimentales para el ciclo primavera-verano	33
<b>Figura 8.</b>	Valor promedio de pH en las unidades experimentales para el ciclo primavera-verano	33
<b>Figura 9.</b>	Concentración promedio de N-NH <sub>4</sub> (±DE) en las unidades experimentales para el ciclo primavera-verano	34
<b>Figura 10.</b>	Concentración promedio de N-NH <sub>3</sub> (±DE) en las unidades experimentales para el ciclo primavera-verano	34
<b>Figura 11.</b>	Concentración promedio de N-NO <sub>2</sub> (±DE) en las unidades experimentales para el ciclo primavera-verano	35
<b>Figura 12.</b>	Concentración promedio de N-NO <sub>3</sub> (±DE) en las unidades experimentales para el ciclo primavera-verano	35
<b>Figura 13.</b>	Concentración promedio de PO <sub>4</sub> (±DE) en las unidades experimentales para el ciclo primavera-verano	35
<b>Figura 14.</b>	Concentración promedio de SiO <sub>2</sub> (±DE) en las unidades experimentales para el ciclo primavera-verano	36
<b>Figura 15.</b>	Concentración promedio de ALC (±DE) en las unidades experimentales para el ciclo primavera-verano	36
<b>Figura 16.</b>	Concentración promedio de DBO <sub>5</sub> (±DE) en las unidades experimentales para el ciclo primavera-verano	36
<b>Figura 17.</b>	Concentración promedio de SS (±DE) en las unidades experimentales para el ciclo primavera-verano	37
<b>Figura 18.</b>	Concentración promedio de <i>Vibrio</i> spp. (±DE) en las unidades experimentales para el ciclo primavera-verano	37
<b>Figura 19.</b>	Valor promedio de TUR (±DE) en las unidades experimentales para el ciclo primavera-verano	37

<b>Figura 20.</b>	Concentraciones promedio de clorofila-a ( $\pm$ DE) y bacterias heterótrofas ( $\pm$ DE) en las unidades experimentales para el ciclo primavera-verano	38
<b>Figura 21.</b>	Temperatura promedio en las unidades experimentales para el ciclo verano-otoño	38
<b>Figura 22.</b>	Salinidad promedio en las unidades experimentales para el ciclo verano-otoño	39
<b>Figura 23.</b>	Concentración de oxígeno disuelto promedio en las unidades experimentales para el ciclo verano-otoño	39
<b>Figura 24.</b>	Valor promedio de pH en las unidades experimentales para el ciclo verano-otoño	40
<b>Figura 25.</b>	Incremento en peso (g) ( $\pm$ DE) en un cultivo intensivo para el ciclo verano-otoño en 105 días de cultivo	40
<b>Figura 26.</b>	Incremento en peso (g) ( $\pm$ DE) en un cultivo intensivo para el ciclo verano-otoño en 92 días de cultivo	41
<b>Figura 27.</b>	Ajuste de la ecuación de crecimiento a los valores de la base de datos en el ciclo primavera-verano	44
<b>Figura 28.</b>	Distribución de probabilidad de la biomasa en 105 días de cultivo para el ciclo primavera-verano	45
<b>Figura 29.</b>	Biomasa inferida en el periodo de cultivo para el ciclo primavera-verano	45
<b>Figura 30.</b>	Ingresos, costos totales, utilidad neta y relación beneficio-costos durante el ciclo primavera-verano	47
<b>Figura 31.</b>	Variación del CV de la utilidad neta y relación beneficio-costos durante el final del cultivo del ciclo primavera-verano	47
<b>Figura 32.</b>	Distribución de probabilidad de la utilidad en el tiempo de cosecha para el ciclo primavera-verano	48
<b>Figura 33.</b>	Distribución de probabilidad de la relación beneficio-costos en el tiempo de cosecha para el ciclo primavera-verano	48
<b>Figura 34.</b>	Ajuste de la ecuación de crecimiento a los valores de la base de datos en el ciclo verano-otoño	50
<b>Figura 35.</b>	Distribución de probabilidad de la biomasa en 92 días de cultivo para el ciclo verano-otoño	51
<b>Figura 36.</b>	Biomasa inferida en el periodo de cultivo para el ciclo verano-otoño	51
<b>Figura 37.</b>	Ingresos, costos totales, utilidad neta y relación beneficio-costos durante el ciclo verano-otoño	53
<b>Figura 38.</b>	Variación del CV de la utilidad neta y relación beneficio-costos durante el final del cultivo del ciclo verano-otoño	54
<b>Figura 39.</b>	Distribución de probabilidad de la utilidad en el tiempo óptimo de cosecha para el ciclo verano-otoño	54

<b>Figura 40.</b>	Distribución de la relación beneficio-costos en el tiempo de cosecha para el ciclo verano-otoño	55
<b>Figura 41.</b>	Distribución de la utilidad neta anual y relación beneficio-costos anual al tiempo de cosecha	57

## Lista de tablas

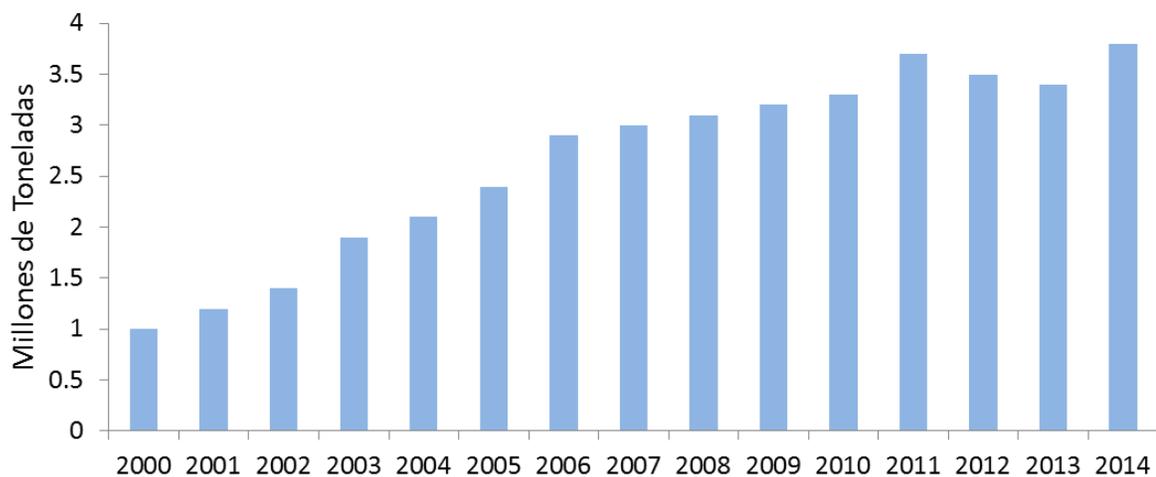
<b>Tabla I.</b>	Ración alimentaria en base al peso húmedo del camarón	23
<b>Tabla II.</b>	Costos operativos unitarios en los ciclos primavera-verano y verano-otoño	30
<b>Tabla III.</b>	Parámetros zootécnicos ( $\pm$ DE) para el ciclo primavera-verano	41
<b>Tabla IV.</b>	Parámetros zootécnicos ( $\pm$ DE) para el ciclo verano-otoño	42
<b>Tabla V.</b>	Análisis de sensibilidad de la biomasa después de 45, 75 y 105 días de cultivo para el ciclo primavera-verano	46
<b>Tabla VI.</b>	Costos operativos calculados con el modelo bioeconómico para el ciclo primavera-verano al día de cosecha	49
<b>Tabla VII.</b>	Análisis de sensibilidad de la utilidad después de 90 días de cultivo para el ciclo primavera-verano.	49
<b>Tabla VIII.</b>	Análisis de sensibilidad de la biomasa después de 32, 62 y 92 días de cultivo para el ciclo verano-otoño	52
<b>Tabla IX.</b>	Costos operativos calculados con el modelo bioeconómico para el ciclo verano-otoño al día de cosecha	55
<b>Tabla X.</b>	Análisis de sensibilidad de la utilidad después de 92 días de cultivo para el ciclo verano-otoño	56
<b>Tabla XI.</b>	Valores promedio ( $\pm$ error estándar) de los parámetros de calidad de agua, zootécnicos y económicos para los ciclos primavera-verano y verano-otoño	58
<b>Tabla XII.</b>	Densidad (D), salinidad, peso inicial ( $P_I$ ), tasa de crecimiento (TC) y promedios ( $\pm$ DE) de sobrevivencia (S), peso final ( $P_F$ ) para reportes específicos de cultivo de <i>L. vannamei</i> .	61

**Abreviaturas**

°C	Grado centígrado
μL	Microlitro
μm	Micrómetro
CLO-α	Clorofila- α
cm	Centímetro
CV	Coefficiente de variación
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
g	Gramo
h	Hora
ha	Hectárea
HP	Caballo de fuerza
kg	Kilogramo
kW	Kilowatt
L	Litro
m	Metro
mg	Miligramo
mL	Mililitro
NAT	Nitrógeno amoniacal total
nm	Nanómetro
N-NH <sub>4</sub>	Amonio
N-NO <sub>2</sub>	Nitrito
N-NO <sub>3</sub>	Nitrato
PL	Postlarva
PO <sub>4</sub>	Fosfato
SiO <sub>4</sub>	Silicato
t	Tonelada
UFC	Unidades formadoras de colonias

## 1. INTRODUCCIÓN

La acuicultura es la industria productora de alimentos de mayor expansión a nivel mundial en las últimas cuatro décadas y representa una actividad primordial en la producción de alimentos de origen marino y/o dulce-acuícola para el consumo humano (Martínez-Córdova *et al.*, 2015). El sector productivo acuícola participa con el 44.1% de la producción total de pescados y mariscos (FAO, 2016). Asimismo, el consumo aparente de pescados y mariscos a nivel mundial registró un aumento medio de 9.9 kg en el decenio de 1960 a 14.4 kg en el decenio de 1990 y 19.7 kg en 2013, con estimaciones preliminares que apuntan a un aumento todavía mayor, superior a 20 kg en 2015 (FAO, 2016). Particularmente la camaronicultura, a nivel mundial, produce anualmente alrededor de 4 millones de toneladas (Fig. 1) y en 2014 generó aproximadamente el 15% del valor de todos los productos pesqueros comercializados a nivel mundial, lo que convirtió al camarón en el producto acuícola-pesquero más importante, desde el punto de vista económico (GOAL, 2016).



**Figura 1.** Producción mundial de camarón por Acuicultura. GOAL 2016.

La camaronicultura, a pesar de sus innegables beneficios como son la creación de empleos, la obtención de divisas para los países en desarrollo y de ganancias económicas para las empresas dedicadas a la actividad, es una industria que enfrenta grandes retos y problemáticas. Entre ellos, los de mayor importancia se relacionan con el impacto

ambiental de los efluentes de las granjas sobre los ecosistemas receptores de las descargas, la aparición frecuente de epizootias y la dependencia de insumos de origen animal, especialmente de peces marinos, para la fabricación de alimentos balanceados (Martínez-Córdova *et al.*, 2015).

Para enfrentar dichos retos y problemáticas, las nuevas tecnologías de cultivo requiere la sustentabilidad, tanto ambiental como económica, proporcionando organismos con alta calidad nutricional y organoléptica. La tendencia acuícola mundial busca la intensificación, ya que existe una competencia creciente por espacios y recursos con otras industrias, aunado a la necesidad de disminuir costos de producción para incrementar el margen de ganancia y la competitividad (Villarreal *et al.*, 2016).

Un buen ejemplo de esta tendencia es el desarrollo de sistemas heterotróficos, en los que las bacterias dominan la comunidad microbiana del medio acuático. El conglomerado bacteriano, también conocido como “biofloc” asimila de 10 a 100 veces más los residuos nitrogenados que los sistemas basados en la productividad primaria (microalgas), generando a partir de dichos residuos proteína de alta digestibilidad que es aprovechada por los organismos cultivados (Bowen y McIntosh, 2006). Sin embargo, en las granjas camaronícolas a cielo abierto, este sistema debe usarse en combinación con el sistema basado en productividad primaria, lo que da surgimiento a los llamados sistemas híbridos o “foto-heterotrófico”. Los sistemas híbridos, buscan un manejo óptimo de los ciclos naturales de microalgas y bacterias heterótrofas, los nutrientes suplementarios, concentración de oxígeno disuelto y de la capacidad de transporte-suspensión de partículas mediante el uso de sistemas de aireación (Villarreal *et al.*, 2012).

Dentro del sistema de cultivo, el fitoplancton produce oxígeno durante el día, origina sombra que evita el crecimiento de algas filamentosas (nocivas para los organismos bajo cultivo) y absorbe directamente los productos metabólicos producidos en el estanque, como el bióxido de carbono y el amoníaco, que en altas concentraciones provocan disminución del pH y toxicidad, afectando negativamente la salud de los organismos (Yao *et al.*, 2001). Además, el fitoplancton constituye el primer escalón de la cadena alimenticia

del ecosistema del estanque, contribuye a la nutrición del camarón y es rico en aminoácidos esenciales, ácidos grasos poli-insaturados, ácido ascórbico (vitamina C) y riboflavina (vitamina B2) (Brown *et al.*, 1997).

El fitoplancton tiene una función importante en la regulación de los parámetros de calidad de agua (Alonso-Rodríguez *et al.*, 2004). Las microalgas son biofiltradores naturales y remueven efectivamente desperdicios nitrogenados solubles como el amonio. El fitoplancton y los sólidos suspendidos sombream la columna de agua creando un ambiente más favorable para los camarones (Treece, 2001). Los sistemas de cultivo basados en la productividad primaria (fitoplancton) alcanzaron producciones de 500 kg/ha durante la década de los ochenta en Sudamérica (Wasielesky *et al.*, 2006).

La principal tendencia actual en la camaronicultura es hacia la intensificación, lo que implica manejar altas densidades de organismos por superficie y enfrentar problemas relacionados con la alimentación y la sanidad en los estanques. Se han realizado investigaciones encaminadas a mantener y/o mejorar las condiciones fisicoquímicas del agua, empleando microorganismos con potencial probiótico, los cuales son definidos como microorganismos capaces de reducir la concentración de metabolitos tóxicos (compuestos nitrogenados) en la columna de agua y/o crear barreras biológicas en el huésped (colonización de tracto digestivo) para promover un adecuado crecimiento y de esta manera, mejorar la supervivencia de los organismos cultivados (Huys *et al.*, 2001; Torres-Beristain, 2005). Dichos microorganismos deben pertenecer, preferentemente, al ambiente natural del organismo a cultivar, presentar inocuidad, poseer rápida colonización en el huésped y tener un efecto antagónico en el desarrollo de bacterias potencialmente patógenas (p.e. *Vibrio* spp) (Rodríguez-Méndez *et al.*, 2006).

El efecto benéfico de los probióticos se atribuye, en general, a tres mecanismos (Irianto y Austin, 2002; Newman, 2000; Makridis *et al.*, 2000; Verschuere *et al.*, 2000; Villamil-Díaz y Martínez-Silva, 2009):

- 1.- Mejoramiento de la calidad del agua, tanto por la metabolización de la materia orgánica, como por interacción con algunas algas.
- 2.- Aislamiento de bacterias nocivas por:
  - a) Competencia por nutrientes.
  - b) Competencia por sitios de fijación en el intestino.
  - c) Aumento de la respuesta inmune del hospedero.
  - d) Producción de antibióticos y/o compuestos antivirales
- 3.- Producción de compuestos benéficos para el hospedero (ácidos grasos de cadena corta, aminoácidos, enzimas digestivas).

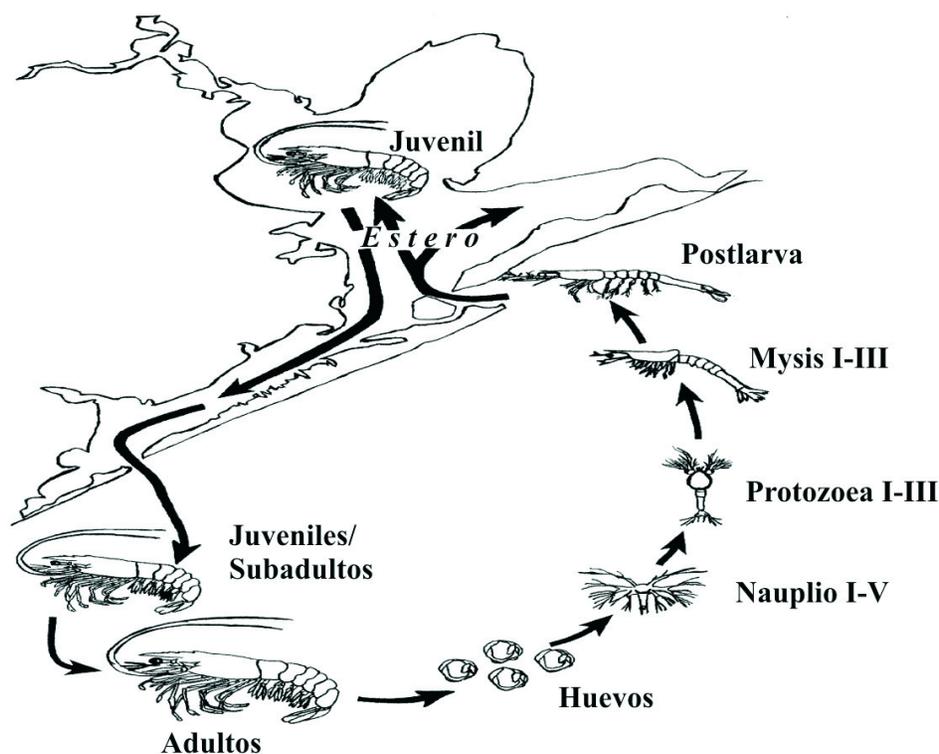
El uso de bacterias probióticas, basado en el principio de la exclusión competitiva de patógenos y el uso de la inmunoestimulación como forma natural de defensa, son dos de los métodos preventivos más prometedores contra las altas mortalidades registradas en granjas camaroneras alrededor del mundo (Burgens *et al.*, 2004). Como la microbiota en el tracto gastrointestinal de animales acuáticos puede ser modificada por la ingestión de otros microorganismos, la manipulación microbiana constituye una herramienta viable para reducir o eliminar la incidencia de patógenos oportunistas (Balcázar, 2002). Por lo tanto, el uso de un sistema foto-heterotrófico en el cultivo de camarón puede ayudar a la bioseguridad y a la vez reducir costos asociados al bombeo y alimento suplementario (Villarreal *et al.*, 2016).

## **2. ANTECEDENTES**

### **2.1 Biología y producción del camarón blanco *Litopenaeus vannamei***

De acuerdo a FAO (2011), el camarón blanco es nativo de la costa oriental del Océano Pacífico, y se encuentra en hábitats marinos tropicales y sub-tropicales desde Sonora, México, hasta Tumbes en Perú, en aguas cuya temperatura es normalmente superior a 20 °C durante todo el año. Los adultos viven y se reproducen en mar abierto, mientras que la postlarva migra a las costas a pasar la etapa juvenil, la etapa adolescente y pre-adulta en estuarios, lagunas costeras y manglares (Fig. 2).

Los machos maduran a partir de los 20 g y las hembras a partir de los 28 g en una edad de entre 6 y 7 meses. Cuando *L. vannamei* pesa entre 30 y 45 g libera entre 100,000 y 250,000 huevos de aproximadamente 0.22 mm de diámetro. La incubación ocurre aproximadamente 16 horas después del desove y la fertilización (FAO, 2011). En la primera etapa, la larva, denominada nauplio, nada intermitentemente y es fototáctica positiva. Los nauplios no requieren alimentación, sino que se nutren de su reserva embrionaria. Las siguientes etapas larvianas (protozoa, mysis y postlarva temprana) continúan siendo planctónicas por algún tiempo, se alimentan del fitoplancton y del zooplancton; y son transportados a la costa por las corrientes mareales. Las postlarvas (PL) cambian sus hábitos planctónicos unos 5 días después de haber alcanzado dicha etapa de desarrollo, se trasladan a la costa y empiezan a alimentarse de detritos bénticos, gusanos, bivalvos y crustáceos (FAO, 2011).



**Figura 2.** Ciclo de vida natural de *L. vannamei* (Fuente: FAO, 2011).

El camarón blanco es uno de los crustáceos peneidos que presenta mayores ventajas para el desarrollo comercial de su cultivo, ya que cuenta con la tecnología probada y

efectiva para su crianza en sistemas controlados o semi-controlados, tolera altas densidades por unidad de área, posee una resistencia innata a variaciones razonables de factores ambientales, además de contar con una alta sobrevivencia al final del cultivo y un buen mercado internacional (Arredondo-Figueroa, 2002). En 2010, México ocupó el séptimo lugar a nivel mundial en el cultivo de camarón, aportando 115 000 t de las 3 778 000 t de la producción mundial (CONAPESCA, 2011) y para el 2014 la producción se redujo a 70 450 t, mismas que se produjeron en cultivos de tipo semi-intensivos principalmente (ISAPESCA, 2017). Las granjas camaronerías en el Noroeste de México generalmente llevan a cabo uno o dos ciclos de producción, dependiendo del mercado, brote de enfermedades, precio de venta del camarón y las condiciones propias de la granja y del sistema (ISAPESCA, 2017).

Se ha reportado que generalmente el ciclo de verano (agosto-noviembre) permite obtener mejores rendimientos productivos en comparación con el ciclo de primavera (marzo-julio) debido, principalmente, a que la temperatura promedio en verano es superior a la registrada en primavera, incrementando el metabolismo del camarón y por ende su crecimiento (Estrada-Pérez *et al.*, 2015; Hernández-Llamas *et al.*, 2004; Ponce-Palafox *et al.*, 1997).

Por otro lado, la aparición constante de enfermedades como los del síndrome de mancha blanca y de Taura en América Latina, aunado al difícil mantenimiento de la calidad del agua han causado pérdidas económicas hasta del 100% del capital invertido en un ciclo de producción (FAO, 2011). Las enfermedades causadas por patógenos como protozoarios, bacterias, hongos y virus constituyen un factor limitante en el desarrollo del cultivo del camarón y de la acuicultura en general. Por lo que diversas investigaciones (Chamberlain, 2001; Crab *et al.*, 2007; Hewitt y Campbell, 2007; Schuur, 2003; Wasielesky *et al.*, 2006) se han enfocado a considerar alternativas de solución en el mejoramiento de la calidad del agua y que a su vez disminuyan la posibilidad de presencia de organismos patógenos e infecciosos, beneficiando así la supervivencia y el rendimiento productivo (Magallón-Barajas *et al.*, 2007).

La enfermedad emergente del camarón conocida como Síndrome de Mortalidad Temprana (EMS, por sus siglas en inglés), ha ocasionado pérdidas significativas entre los productores de camarón en China (2009), Vietnam (2010), Malasia (2011) y Tailandia (2012) (Leaño y Mohan, 2012). La enfermedad afecta a *Penaeus monodon* y *Litopenaeus vannamei* y se caracteriza por mortalidades masivas, alcanzando en algunos casos hasta un 100% en los estanques afectados, durante los primeros 10-30 días de cultivo y pocos días después de los primeros signos de la enfermedad (Navarro *et al.*, 2013). Debido al alto riesgo de pérdidas económicas asociadas a esta enfermedad, es necesario limitar el uso de recambio de agua al mínimo e implementar las buenas prácticas de manejo en las granjas acuícolas.

Por otro lado, se ha reportado que, para solucionar los problemas sanitarios y de producción en la camaronicultura, se debe manejar adecuadamente las interacciones de la microbiota en el sistema de cultivo, lográndose con el desarrollo de una cadena trófica bien estructurada, resultado de la interacción entre los nutrientes y el conglomerado microbiano bacterias-microalgas (Moriarty *et al.*, 1999). Esto es factible si se emplea aireación y un balance adecuado de carbono/nitrógeno (C:N) en el sistema. Avnimelech (1999) indicó que la proporción adecuada de C:N es de 15-20:1. Para mantener esta proporción, es fundamental limitar los niveles de N en la dieta, reduciendo el porcentaje de proteína, o aumentando la fuente de carbono en el agua, mediante la incorporación de fuentes ricas en este elemento. Esto se puede lograr con la adición de melaza, harina de trigo, maíz o soya (Samocha y Lawrence, 1992). Por su parte, Browdy *et al.* (2006) indicaron que al aplicar este balance C:N, es factible mejorar la calidad de agua y la tasa de crecimiento del camarón al promover el desarrollo de bacterias heterótrofas, que mantienen los niveles de metabolitos nitrogenados en niveles aceptables, a la vez que constituyen una fuente suplementaria de alimento.

En la camaronicultura tradicional, uno de los principales retos es lograr una óptima tasa de crecimiento con el mínimo costo posible, donde se obtenga como mínimo un crecimiento de 1.2 g/semana (Samocha *et al.*, 2007). Para ello, uno de los problemas más importantes a resolver es el manejo de una alimentación eficiente mediante la reducción en

el nivel de proteína en el alimento, con la finalidad de reducir la cantidad de harina de pescado y consecuentemente reducir costos de producción (Hari *et al.*, 2004), ya que, por cada kilogramo de camarón que se produce, se suministra entre 1 y 3 kg de alimento suplementario (Avnimelech, 2012), y la consecuente metabolización y lixiviación del mismo puede dar como consecuencia una alta generación de metabolitos tóxicos. Adicionalmente, el costo de alimentación puede llegar a significar más del 60% de los costos totales de producción en una granja acuícola (Villarreal *et al.*, 2012).

Otras de las variantes que se han estudiado para incrementar la producción es la inmunoestimulación de los organismos bajo diferentes estrategias (p.e. añadir bacterias probióticas al alimento y reducir la incidencia de bacterias patógenas debido al aumento de la actividad fagocítica inmuno dependiente) (Tseng *et al.*, 2009), el favorecer las condiciones ecológicas para evitar que los organismos se estresen (Moriarty *et al.*, 1999) y la estimulación del crecimiento de la microbiota benéfica para favorecer el valor proteico del detritus (Burford *et al.*, 2004) y de esta manera incrementar la calidad nutricional del alimento natural asequible en el estanque.

Una de las estrategias para mejorar la bioseguridad en la acuicultura es el aislamiento parcial de las granjas de sus fuentes de abastecimiento y descarga de agua, para lo cual, la aireación artificial y/o la disminución del recambio de agua, pueden resultar efectivos. La disminución de la demanda y descarga de agua de las granjas disminuye el riesgo de proliferación de patógenos e infección de granjas aledañas y el de eutrofización de los cuerpos de agua (Esparza-Leal *et al.*, 2010; McIntosh y Fitzsimmons, 2003; Samocha *et al.*, 2007). Además, se ha reportado que con el uso de aireación es posible reducir el nivel de recambio de agua, ya que es posible mantener una concentración de oxígeno disuelto estable en la columna de agua, mantener los sólidos sedimentables en suspensión y evitar zonas anóxicas en los estanques (Sandifer y Hopkins, 1996); por lo que han surgido nuevas tecnologías basadas en la oxidación de la materia orgánica dentro del sistema de cultivo incorporándola a la cadena trófica mediante la estimulación de crecimiento de las bacterias heterótrofas (Burford *et al.*, 2004).

## **2.2 Uso de aireación en la acuicultura**

La aireación es esencial en los cultivos de tipo intensivo para mantener la calidad de agua apropiada para los requerimientos fisiológicos de los organismos cultivados (Vinatea y Carvalho, 2007). Con la aireación es posible el mezclado y circulación del agua dentro del estanque, provocando que el oxígeno disuelto se incremente y evitando la estratificación de temperaturas y reduciendo las zonas anóxicas (Boyd, 1998).

Los aireadores forman parte esencial dentro del esquema intensivo de la acuicultura (Kumar *et al.*, 2010), y dos de los más utilizados en estanques menores o iguales a 1 ha son los que usan bombeo de aire por aspiración y los que emplean paletas (Boyd, 1998).

## **2.3 Sistemas intensivos de producción de camarón**

La intensificación acuícola implica, entre sus factores más importantes, el aumento de la densidad de cultivo. En sistemas de tipo intensivo se pueden obtener 100 000 kg/ha, mientras que en un sistema extensivo se pueden producir en promedio 10 kg/ha de camarón (Tidwell, 2012). La intensificación también implica la intervención humana y la entrada de insumos externos hacia el sistema de producción, como lo es el alimento suplementario y la aireación mecánica (Tidwell, 2012).

La producción nacional de camarón de cultivo reportada oficialmente para el 2013 fue de 50,000 toneladas (CONAPESCA, 2014); sin embargo, el Plan Rector Nacional de Pesca y Acuicultura sostiene que se tienen que producir cerca de 300,000 toneladas, únicamente para cubrir la demanda nacional que se tendrá para el año 2030 (CONAPESCA, 2008). Para lograr dichos desafíos y alcanzar los volúmenes de producción requeridos, la tendencia tanto nacional como mundial en la industria acuícola está dirigida hacia la intensificación, lo que permitirá optimizar áreas de cultivo, incrementando la productividad de los cultivos y los márgenes de ganancias económicas (Bosma y Verdegem, 2011; Gyalog *et al.*, 2011; Piedrahita, 2003).

### 2.3.1 Sistema Fototrófico

Sistema basado en la productividad natural de las microalgas, y requiere de fertilización ya sea orgánica y/o inorgánica para incrementar las concentraciones de nitrógeno y fósforo, facilitando el desarrollo de los organismos autótrofos en el sistema (Villarreal *et al.*, 2012). Generalmente son usados en estanques a cielo abierto recubiertos con membrana plástica o estanques de tierra entre 0.5 y 1 ha de superficie (Villarreal, 2005).

En los sistemas fototróficos o “verdes” es indispensable contar con días soleados, ya que la radiación solar es la fuente de energía de las microalgas para llevar a cabo la fotosíntesis y de esta manera producir oxígeno. Por las noches, la fotosíntesis se suspende y en días nublados, es muy común que disminuya la concentración de oxígeno disuelto, pudiendo causar la muerte de los organismos cultivados y consecuentemente pérdidas económicas (Avnimelech, 2012). Por otro lado, en este sistema, la concentración de amonio está regida por la concentración de microalgas, ya que son éstas las encargadas de su asimilación y remoción (Ebeling *et al.*, 2006).

Se ha reportado que las microalgas proporcionan una mezcla balanceada de sustancias nutritivas para alimentar a los crustáceos durante sus primeras etapas larvales, y alimentan al zooplancton que forma parte de la cadena alimenticia en sistemas acuícolas (Alonso-Rodríguez *et al.*, 2004). La cantidad de proteínas que proveen es variable y puede llegar a constituir el 50%, mientras que para carbohidratos y lípidos pueden llegar hasta el 23% de cada uno respectivamente (Brown, 1997).

La densidad de siembra en este tipo de cultivo varía entre 30-100 organismos/m<sup>2</sup>, y debido a la acumulación de metabolitos tóxicos así como para evitar problemas de anoxia, es común utilizar un recambio de agua de entre 15-30% diario, así como aireación mecánica dependiendo de los valores fisicoquímicos de la calidad de agua (Villarreal *et al.*, 2012). Los sistemas intensivos tradicionales fototróficos tienen una producción promedio de entre 5 y 10 t/ha por ciclo.

### 2.3.2 Sistemas heterotróficos

Conocidos como sistemas de “biofloc”, son principalmente desarrollados en invernaderos basados en la producción de microorganismos bacterianos o “flóculos”, que permiten intensificar la producción y reducir los problemas relacionados con la sanidad (Avnimelech, 2012). Este tipo de sistema, hace posible incrementar el tiempo de operación de cultivo al poder mantener temperaturas estables a lo largo del año, además de ser más eficientes en la remoción del nitrógeno amoniacal total (NAT) ( $\text{NH}_4 - \text{NH}_3$ ), al ser nitrificado y/o asimilado por los mismos microorganismos bacterianos antes de que lleguen a niveles tóxicos (Schrader *et al.*, 2011). Asimismo, es posible reducir, o incluso eliminar el recambio de agua y disminuir el costo de alimentación hasta en un poco más del 25% al utilizar la biomasa microbiana como fuente suplementaria de proteína, ya que el biofloc contiene entre un 31-43% de proteína cruda asimilable, 14-31% de carbohidratos y 0.1-10% de lípidos totales (Avnimelech, 2006; Avnimelech, 2012; Burford *et al.*, 2004; Crab *et al.*, 2010; Krummenauer, 2011).

El biofloc es un conglomerado de microalgas, protozoarios y bacterias que, junto con el detritus y partículas de materia orgánica muerta, forman el denominado “flóculo” (Avnimelech, 2012). El consumo del biofloc por los organismos ha demostrado numerosos beneficios, tales como el incremento en el crecimiento de los camarones (Wasielesky *et al.*, 2006) y decremento en el factor de conversión alimenticia (FCA), con la consiguiente reducción de costos en alimentación (Burford *et al.*, 2004). La comunidad de microorganismos en los flóculos es capaz de utilizar el nitrógeno disuelto lixiviado de las heces y alimento no consumido para convertirlo en proteína microbiana totalmente aceptada por los organismos cultivados. (Emerenciano *et al.*, 2013).

Las características sugeridas que debe poseer un sistema heterotrófico para su desarrollo son las siguientes: temperatura constante superior a los 30°C, aireación constante para mantener altos niveles de oxigenación, remoción del lodo sedimentado, movimiento constante de los flujos de agua y adición de carbohidratos (melaza, salvado de arroz o trigo) para estimular el crecimiento bacteriano y una relación C:N en el estanque que se acerque preferentemente a 20:1 (Avnimelech, 2006; Crab *et al.*, 2010; Monroy-Dosta *et al.*, 2013).

La formación de los agregados se debe a que el carbono orgánico es un sustrato limitante para la proliferación de las bacterias heterótrofas en sistemas acuícolas, mientras que el nitrógeno amoniacal total (NAT) y otros compuestos nitrogenados como los nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ) son generalmente abundantes y resultan ser tóxicos para los camarones (Avnimelech, 1999; Frías-Espericueta y Páez-Osuna, 2001). El NAT proviene del catabolismo de las proteínas por los organismos en cultivo y de la descomposición de materia orgánica (microalgas y bacterias muertas, heces y alimento no consumido) en el estanque de cultivo (Tucker y Hargreaves y 2004).

Al adicionar carbono orgánico, deja de ser un sustrato limitante, lo que lleva a la proliferación de las bacterias heterótrofas (*Pseudomonas* sp., *Bacillus* sp.) que incorporan los compuestos nitrogenados a su biomasa como proteína (Hargreaves, 2013), removiéndolos del agua de cultivo más rápidamente que las bacterias quimioautótrofas nitrificantes (*Nitrospira* sp., *Nitrobacter* sp.) que tienen un tiempo de generación más lento y son más susceptibles a cambios en el medio (Avnimelech, 2012; Ebeling *et al.*, 2006; Monroy-Dosta *et al.*, 2013). Además, los sistemas de flóculos bacterianos tienen la propiedad de servir como inmunestimulantes debido a que poseen polisacáridos que actúan directamente en el sistema inmune de los organismos en cultivo (Crab *et al.*, 2010).

Una de las principales características del biofloc es que cuenta con una estructura abierta, haciendo posible el libre tránsito de flujo de agua y nutrientes a través de la masa flocular. La alta porosidad provoca que su densidad sea baja, únicamente un poco mayor que la del agua, retrasando de esta manera su sedimentación en el fondo del estanque, manteniéndose de esta manera en la columna de agua (Avnimelech, 2012).

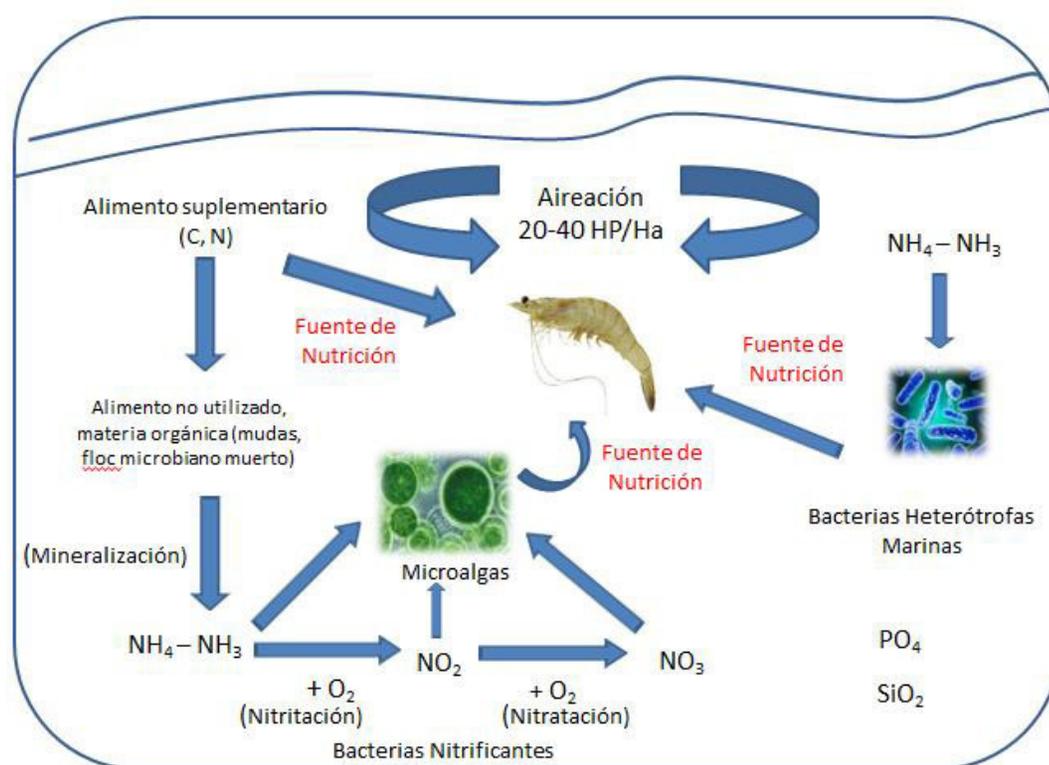
En la actualidad, los cultivos heterotróficos se llevan a cabo en invernaderos en todo el mundo, con densidades de siembra de hasta 500 organismos/m<sup>2</sup>, sobrevivencias superiores a 70% y crecimientos de 1.5 g/semana (Wasielesky *et al.*, 2006) y los rendimientos en los sistemas de biofloc pueden superar las 80 t/ha.

El control de poblaciones heterotróficas en sistemas intensivos a cielo abierto es muy complejo, y resulta muy complicado que, con la tecnología, infraestructura y personal

actuales, la mayoría de las granjas camaronícolas mexicanas, puedan operar con dicho sistema (Villarreal *et al.*, 2012).

### 2.3.3 Sistemas foto-heterotróficos (SFH)

En un sistema híbrido también llamado “semi-biofloc”, “mixotrófico”, “biofloc-verde” que nace del sistema heterotrófico (biofloc) adaptando el protocolo a las características locales geográficas y de infraestructura (Fig. 3) (Huda *et al.*, 2013; McIntosh, 2001; Shishehchian, 2012). Está basado en un cuidadoso balance entre organismos heterotróficos y autotróficos que se presentan cuando existe un balance en los nutrientes suministrados, la concentración de oxígeno disuelto adecuada y la capacidad de transporte de partículas necesaria, resultado del uso de sistemas de aireación (Huda *et al.*, 2013; Villarreal *et al.*, 2012).



**Figura 3.** Esquema de un sistema Foto-Heterotrófico (SFH).

Los microorganismos de este tipo de sistema crean un agregado compacto espumoso formado por algas verdes, bacterias, detritos, partículas orgánicas y protozoarios (Huda *et al.*, 2013). El agregado bacteria-microalga además de ser utilizado como alimento de la especie cultivada, controla la calidad del agua al degradar compuestos nitrogenados

(NH<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>), alimento no consumido, plancton muerto y heces fecales en compuestos no tóxicos, lo que conlleva a la estabilización del medio de cultivo, permitiendo que el recambio de agua sea mínimo o innecesario si los demás parámetros son controlados correctamente (Huda *et al.*, 2013).

Contrario a los sistemas biofloc, en donde hay una predominancia de organismos heterótrofos (mayor al 90%), el balance entre los microorganismos autotróficos y heterotróficos es de 30-40% fitoplancton y 60-70% de bacterias (Huda *et al.*, 2013). Los parámetros clave para el éxito de este tipo de cultivo son los siguientes: concentración de bacterias y microalgas, pH, alcalinidad, aireación (4 ppm de oxígeno disuelto como mínimo), circulación del agua para evitar estratificación (Huda *et al.*, 2013).

Al igual que los sistemas biofloc, la aireación y el mezclado del agua dentro de los estanques de cultivo es esencial para obtener una oxigenación adecuada, y para evitar la estratificación en la columna de agua, la sedimentación de materia orgánica, y la formación de zonas anóxicas (Huda *et al.*, 2013). El sistema híbrido microalga-bacteria es más eficiente en la biorremediación de la columna de agua en comparación con los sistemas verdes (microalgas) (Pérez-Rostro *et al.*, 2014), debido a que el aprovechamiento de los metabolitos nitrogenados es de 10-100 veces más acelerado en las bacterias heterótrofas que en las microalgas (Rosenberry, 2006).

Así mismo, la diversidad de alimento vivo disponible dentro del estanque es mayor en el sistema híbrido, lo que conlleva a mayores beneficios para los organismos en cultivo, incluyendo el poder reducir la cantidad de alimento suplementario necesaria para cubrir los requerimientos nutricionales bajo sistemas semi-intensivos e intensivos (Pérez-Rostro *et al.*, 2014).

Se pueden obtener altos niveles de producción a cielo abierto utilizando este tipo de sistema, limitado únicamente por el factor temperatura (Wasielesky *et al.*, 2006). En la actualidad granjas de Indonesia desarrollan de manera exitosa el cultivo foto-heterotrófico produciendo en promedio 17 t/ha de camarón en 90 días de cultivo, con un FCA de 1.4 y camarones con un peso final de 19 g (Huda *et al.*, 2013).

## 2.4 Recambio de agua

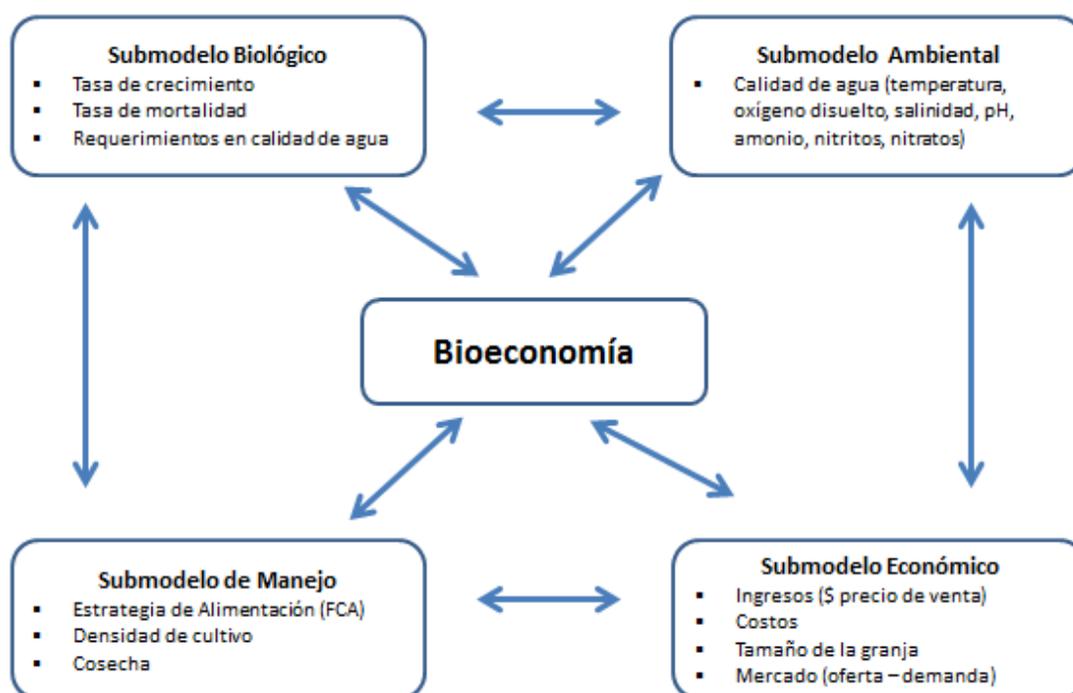
El éxito en el cultivo de camarón requiere del mantenimiento de buenas condiciones de calidad de agua en los estanques. Históricamente esto se ha alcanzado utilizando altas tasas de recambio de agua (Otoshi *et al.*, 2003), tanto para el control de florecimientos “blooms” de fitoplancton, como para prevenir el deterioro de otros parámetros de calidad de agua que resultan por la adición de alimentos con alto nivel de proteína (Burford *et al.*, 2003). En las regiones semiáridas del noroeste de México (incluida la región de La Paz, Baja California Sur), la reducción del recambio de agua puede representar un reto debido a que la alta tasa de evaporación puede incrementar la salinidad a niveles inadecuados para el cultivo del camarón (Martínez *et al.*, 1997).

El bombeo de agua representa un costo operativo considerable en los cultivos de camarón. Gutiérrez (2000) demostró que, en estanques rústicos de 500 m<sup>2</sup> sembrados con 37 PL/m<sup>2</sup> de *L. vannamei* durante 100 días se obtuvo un mayor rendimiento utilizando un 15% de recambio de agua diario y aireación. Sin embargo, las mayores ganancias económicas se obtuvieron utilizando 10% de recambio de agua diario sin aireación. Esto ha llevado a numerosos productores a preferir el uso de recambio de agua al de aireación para el cultivo semi-intensivo, con un consecuente impacto ambiental en estados como los de Sonora y Sinaloa, los principales productores de camarón en México (Barraza-Guardado *et al.*, 2014).

En los sistemas intensivos, la estrategia de no utilizar recambio de agua se ha utilizado como una alternativa a la fertilización continua durante todo el ciclo de cultivo, e inclusive para disminuir en cierta medida la tasa de alimentación de los camarones (Avnimelech, 2012). Además, altas tasas de recambio pueden eliminar los nutrientes y el fitoplancton, reduciendo la productividad natural en los estanques (Boyd, 2003). Entre los múltiples beneficios derivados de la reducción de la tasa de recambio en los estanques donde se cultiva camarón destacan: disminución de la energía utilizada para el bombeo, menores dosis de fertilizantes, prevención de la erosión en los estanques de tierra por la reducción del flujo de agua, y por último, mejor conservación de los cuerpos de agua adyacentes al evitar la contaminación de los mismos (Boyd, 1999).

## 2.7 Bioeconomía acuícola

La bioeconomía acuícola es una interdisciplina que permite, bajo el enfoque de análisis de sistemas, interrelacionar aspectos que son determinantes para el manejo de la producción. Los elementos que se consideran en el análisis bioeconómico son: biológicos, ecológicos, económicos y tecnológicos (Fig. 4). La interdependencia de estos elementos generan procesos dinámicos y probabilísticos que deben ser caracterizados, analizados y evaluados a través de modelos matemáticos estocásticos o deterministas para la toma de decisiones (Seijo, 2004). El éxito económico de un sistema de producción depende en gran medida de una óptima selección de alternativas posibles; la elección de estas opciones se encuentra sujeta a la información disponible del sistema de producción, a las condiciones en que opera y de las restricciones que limitan el mismo (Araneda, 2010; Seijo, 1995).



**Figura 4.** Modelo conceptual modificado del análisis bioeconómico (Pomeroy *et al.*, 2008).

De acuerdo con la definición de Allen *et al.* (1984), el concepto de modelos bioeconómicos hace referencia al uso de técnicas matemáticas para describir el desempeño de la producción de organismos vivos en un sistema de producción sujeto a restricciones del tipo económico, biológico y técnico. Cacho (1997) menciona que los modelos

bioeconómicos se dirigen a la integración sistemática del desempeño biológico y sistemas físicos relacionados a consideraciones económicas como: precios de mercado, recursos de regulación y restricciones institucionales. Este tipo de modelos generan un método para representar los procesos productivos de una manera diferente a la propuesta por un análisis de producción convencional (Pomeroy *et al.*, 2008).

Ruiz-Velazco (2011) llevó a cabo una revisión de los trabajos de bioeconomía sobre cultivo de camarón, entre los cuales destacan: Adams *et al.* (1980), quienes con un modelo que incluyó los componentes biológico, de ingeniería y económico, realizaron un análisis presupuestario para estudiar la producción de camarón. En dicho trabajo analizaron el efecto del tamaño de los estanques y el tamaño de la granja sobre los costos de producción. Pardy *et al.* (1983), mediante un modelo de simulación, analizaron el efecto de las densidades en el crecimiento de *L. vannamei* y *L. stylirostris*. Los autores evaluaron el impacto en los indicadores económicos a partir de diferentes estrategias de densidades de siembra y ciclos de producción. Hernández-Llamas y Magallón-Barajas (1991) presentaron un análisis para un cultivo experimental con tecnología semi-intensiva. En su trabajo utilizaron diferentes esquemas de alimentación – fertilización y realizaron un análisis de sensibilidad para determinar la importancia de los parámetros del modelo bioeconómico. Tian *et al.* (2000), analizaron la economía de producción de camarón bajo diferentes estrategias de siembras, cosechas programadas y tamaño de la granja. Keys *et al.* (2004) desarrollaron un modelo para cuantificar la viabilidad económica de la producción comercial de las dos especies de camarón más cultivadas en Australia, y estimaron la relación beneficio-costos que permitiera que *Penaeus esculentus* pudiera ser cultivado con rentabilidad similar a *Penaeus monodon*.

Por otro lado, dentro de los trabajos en los que han incluido elementos estocásticos o se ha analizado la variabilidad en los cultivos de camarón, se encuentra el de Griffin *et al.* (1981) quienes, con la finalidad de examinar el potencial económico del cultivo de camarón y contribuir en directrices de investigaciones futuras, introdujeron un modelo con elementos estocásticos que consideró las variables ambientales. Los autores estudiaron los efectos de las variables ambientales y de manejo sobre el rendimiento biológico y la rentabilidad económica. Sadeh *et al.* (1986) reportaron el uso de un modelo de simulación

estocástico para evaluar el efecto de la variación de la temperatura en el crecimiento del camarón cultivado (*L. stylirostris*) y sus resultados económicos. En dicho trabajo el número de cosechas por ciclo y fechas de siembras se consideraron como variables de control.

Karp *et al.* (1986) utilizaron un modelo de control óptimo para establecer tiempos de cosechas y resiembras. Con base en datos experimentales, presentaron un modelo determinista para el caso en que la producción ocurre en un ambiente controlado. En su trabajo incluyen también elementos estocásticos para el caso en que el ambiente no es controlado. Hochman *et al.* (1990) utilizaron datos de siete pruebas experimentales de producción de camarón, con la finalidad de desarrollar un modelo dinámico estocástico. Dicho modelo permitió evaluar el potencial de la tecnología del cultivo de camarón en estanques circulares, practicado en el Instituto Oceánico de Hawai. El modelo provee un programa de siembras y cosechas óptimas utilizando un calendario de decisiones semanales durante un año.

Martínez y Seijo (2001) construyeron un modelo para comparar el rendimiento económico de un sistema de cultivo con bajo recambio de agua con aireación, contra un sistema con bajo recambio sin aireación. Realizaron un análisis de riesgo para evaluar el efecto que tiene sobre la rentabilidad, la incertidumbre en el precio de la semilla, la tasa de crecimiento del camarón, la tasa de mortalidad y el precio comercial del camarón. Seijo (2004), basándose en una serie de indicadores bioeconómicos publicados en la literatura y bajo un caso hipotético de cultivo de camarón, llevó a cabo un análisis de riesgo, centrándose en aspectos de manejo relacionado con los tiempos de cosecha. Para el análisis se consideraron los efectos del tiempo de cosecha y la incertidumbre del precio y de la mortalidad natural, sobre el riesgo que se genera de exceder dos límites de puntos de referencia bioeconómicos (una producción de 8.0 t/ha y una utilidad de \$25,000 dólares/ha).

Hernández-Llamas *et al.* (2004) construyeron un modelo con datos de una granja comercial de Sinaloa, México. En dicho trabajo evaluaron la variación estocástica de los parámetros de crecimiento y mortalidad y el factor de conversión alimenticia (FCA) para la producción intensiva del camarón azul (*L. stylirostris*) e incluyeron un análisis de riesgo

correspondiente a dos ciclos de producción. En años recientes se ha estudiado el efecto que tienen las enfermedades (principalmente mancha blanca) en el rendimiento productivo y económico de las granjas semi-intensivas e intensivas en México (Hernández-Llamas *et al.*, 2013; Ruiz-Velazco *et al.*, 2010) así como el análisis del uso de cosechas parciales como estrategia en el cultivo de camarón blanco (Estrada-Pérez *et al.*, 2015).

No obstante, no se tienen antecedentes de trabajos que analicen, con un enfoque bioeconómico, la producción y la rentabilidad económica del cultivo intensivo foto-heterotrófico de camarón blanco.

El presente trabajo pretende contribuir a la optimización productivo – económica y al desarrollo sustentable para el cultivo del camarón blanco bajo condiciones foto-heterotróficas. Para ello se buscó reducir el recambio de agua, aprovechar el “floc” como fuente de alimento, mantener el FCA en niveles aceptables y elaborar un análisis bioeconómico del cultivo. Lo anterior contribuirá a la implementación de tecnologías de cultivo bioseguras, ecológicamente amigables y económicamente atractivas para la industria camaronícola nacional e internacional.

### **3. JUSTIFICACIÓN**

Debido a la problemática sanitaria actual de la camaronicultura tanto nacional como mundial y la consecuente caída en la producción, es necesaria la implementación de nuevas tecnologías bioseguras y económicamente eficientes. El cultivo intensivo foto-heterotrófico en alta salinidad es una estrategia innovadora capaz de producir elevados rendimientos por unidad de área en zonas semi-desérticas de nuestro país.

Al ser un sistema con reposición mínima de agua y que promueve el desarrollo de flóculos bacterianos, ofrece a los productores de la región una innovadora estrategia biosegura para hacer frente a los problemas sanitarios que se han tenido en el noroeste de México en los últimos años. No existen antecedentes de estudios que caractericen y propongan un manejo óptimo del sistema de cultivo, objeto de este estudio, y que permitan comparar desde el punto de vista biológico, técnico y económico los ciclos primavera-verano y verano otoño.

#### **4. HIPÓTESIS**

Si las condiciones de calidad de agua que prevalecen en un sistema foto-heterotrófico durante un ciclo de verano-otoño son más óptimas que las de un ciclo de primavera-verano, entonces se verá reflejado tanto en el desempeño productivo y económico del cultivo de camarón.

#### **5. OBJETIVOS**

##### **5.1 Objetivo general**

Caracterizar y comparar el cultivo intensivo foto-heterotrófico del camarón blanco *Litopenaeus vannamei* con reposición mínima de agua en alta salinidad, en términos de su calidad de agua y de su desempeño zootécnico-productivo y económico para los ciclos primavera-verano y verano-otoño.

##### **5.2 Objetivos Específicos**

- 1.- Caracterizar y comparar la calidad de agua del cultivo intensivo foto-heterotrófico para los ciclos primavera-verano y verano-otoño.
- 2.- Evaluar y comparar el desempeño zootécnico del camarón en un cultivo intensivo foto-heterotrófico para los ciclos primavera-verano y verano-otoño, a partir de análisis estocásticos de producción.
- 3.- Determinar y comparar la utilidad, la relación beneficio-costos y el tiempo óptimo de cosecha del cultivo intensivo foto-heterotrófico para los ciclos primavera-verano y verano-otoño, a partir de análisis bioeconómicos.

## 6. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se llevó a cabo en las instalaciones de BioHelis®, el Parque de Innovación Tecnológica de CIBNOR, en La Paz, Baja California Sur (24 ° 08'32 "N, 110 ° 18'39" W). Se llevó a cabo un ciclo de cultivo en las estaciones de primavera-verano (Mayo-Agosto), y otro ciclo en las estaciones de verano-otoño (agosto-noviembre). Para cada ciclo se utilizaron 6 estanques de 1,000 m<sup>2</sup> de espejo de agua (50 x 20 m) y 1.35 m de profundidad con recubierta de geo-membrana calibre 40,000. Cada estanque contó con suministro independiente de agua de mar filtrada a 20 micras (mediante filtros de arena), proveniente del sistema de bombeo de BioHelis®, estableciendo un suministro de reposición de pérdidas por evaporación aproximado entre 6-9%/semana.

Para llevar a cabo los cultivos, se adquirieron postlarvas (PL) de camarón blanco, *Litopenaeus vannamei*, de la empresa Larvas Gran Mar, S.A. perteneciente al Grupo Acuícola Mexicano (GAM), con certificado de sanidad acuícola, libres de WSSV, TSV, YHV, IMNV y NHP. La densidad de siembra fue de 120 PL/m<sup>2</sup>. Previamente a la siembra, los organismos fueron aclimatados a la temperatura y la salinidad de los estanques por un periodo de 1 hora. La siembra se realizó directamente del transportador a los estanques mediante mangueras de 1.5 pulgadas. Para la aireación, se usó un sistema de inyección por difusión (Aire-O<sub>2</sub>) de 2 HP y/o un sistema de aireación por paletas de 2 HP las 24 horas del día.

El alimento utilizado contuvo 35% de proteína cruda y fue suministrado 4 veces al día (8, 12, 16 y 20 horas). La tasa de alimentación fue calculada con base en el peso promedio del camarón y la biomasa estimada. La tasa inicial fue del 10% de la biomasa total y progresivamente fue descendiendo hasta el 2% hacia el final del cultivo (Tabla I).

### 6.1 Fertilización de los estanques de cultivo

Dos semanas antes de iniciar los experimentos se añadió, cada dos días, fertilizante de uso agrícola (nitrato 15%, SiO<sub>2</sub> 3.5% y Na 25%) a razón de 10 kg/ha. Adicionalmente, se agregó una mezcla de 2 kg/ha de fosfato monoamónico y 10 kg/ha de urea, con la finalidad de promover el desarrollo fotótrofo (microalgas) en los estanques experimentales.

**Tabla I.** Ración alimentaria con base en el peso húmedo del camarón.

Peso del camarón (g)	% de la biomasa estimada
< 0.49	10
0.5 – 1.9	8
2.0 – 4.9	6
5.0 – 6.9	4
7.0 – 9.9	3
>10.0	2

## 6.2 Preparación y aplicación del probiótico en las unidades experimentales

Se utilizaron las mezclas ALIBIO AC®, ALIBIO 2135® y ALIBIO BIONUTRE® como probióticos. Los primeros dos productos son mezclas con bacterias y levaduras pertenecientes a los géneros *Bacillus*, *Lactobacillus*, *Thiobacillus*, *Nitrosomonas*, *Nitrobacter* y *Sacharomyces*, en forma de esporas encapsuladas que ayudan en la conversión de materia orgánica en nutrientes inorgánicos, y por otro lado, actúan como inmunoestimulantes a la especie en cultivo. El tercer producto, es la fuente de nutrientes esenciales, como carbohidratos simples, aminoácidos solubles en agua de rápida absorción, vitaminas y oligoelementos, que potencializan el desarrollo de los microorganismos durante la fermentación *in-situ*.

Se preparó un total de 70 L/ha de fermento siguiendo el siguiente protocolo:

- A) Se esterilizaron 70 L de agua marina utilizando cloro comercial, añadiendo 0.1 mL/L de agua marina a tratar y se dejó reposar por 24 h.
- B) Se inactivó el cloro remanente utilizando tiosulfato de sodio a razón de 0.02 g/L de agua marina tratada y se dejó reposar con aireación constante por 5 h.
- C) Se añadieron 100 g de ALIBIO AC®, 100 g de ALIBIO 2135®, 50 g de ALIBIO BIONUTRE® al agua marina tratada, mezclando los solutos con aireación constante y dejando fermentar por 24 h antes de su aplicación a los estanques.

De acuerdo a las especificaciones del proveedor, a cada estanque experimental se le aplicó 7 L de la mezcla probiótica en cada dosificación. Durante la primera semana de inoculación, a cada estanque se añadió una dosis diaria; posteriormente, se inoculó 2 veces por semana hasta finalizar el cultivo.

### **6.3 Ensayo del cultivo**

#### **6.3.1 Parámetros de calidad de agua**

La medición de la calidad de agua se realizó directamente, o mediante muestras tomadas en el centro de cada estanque y a una profundidad de 70 cm. La temperatura, salinidad, pH y oxígeno disuelto se midieron diariamente (8 a.m., 12:00 p.m. y 6:00 p.m.) mediante una sonda multi-paramétrica YSI Professional Plus ®. Las concentraciones de amonio, nitritos, nitratos, fosfatos, alcalinidad total se evaluaron semanalmente utilizando un fotómetro YSI® y muestras de 500 mL. La determinación de amonio está basada en el método indofenol, donde el amonio reacciona con el salicilato alcalino en presencia de cloro, para formar el complejo indofenol azul-verde. El nitrato es primeramente reducido a nitrito usando una solución de zinc. La determinación de nitrito es lograda con la reacción el ácido sulfanílico en presencia de N-(1-naftil)-etileno diamina para formar un complejo rojizo. El análisis de fosfato está basado en el método de vanadomolibdato, donde el fosfato reacciona con amonio molibdato en presencia de amonio vanadato, para formar el complejo amarillo fosfo-vanadomolibdato. Para todos los análisis de los nutrientes, la intensidad del color es directamente proporcional a su concentración. El fotómetro YSI® está pre-programado con calibraciones para cada parámetro, permitiendo que el equipo seleccione la longitud de onda apropiada y que la respuesta del fotodiodo sea convertida en concentración.

Los análisis de la demanda biológica de oxígeno ( $DBO_5$ ) y de sólidos suspendidos totales (SST) fueron llevados a cabo semanalmente siguiendo el protocolo de APHA (2005). Las muestras de agua para  $DBO_5$  fueron tomadas de la superficie de cada estanque y transportadas al laboratorio para su análisis. Después de 5 días de incubación a 20 °C, se calculó la diferencia entre el valor inicial y final de oxígeno disuelto. Para la determinación

de los sólidos suspendidos totales (SST), se obtuvieron muestras de 50 mL y fueron filtradas utilizando filtros Whatman con diámetro de poro de 1.2  $\mu\text{m}$  a peso constante, para posteriormente ser secadas en un horno a 105 °C por 2 horas. Las muestras de agua para el análisis de sólidos sedimentables (SS) (1 L) fueron colocadas en conos Imhoff por un periodo de 45 minutos, y los resultados se expresaron en mL/L. La turbidez se midió en cm semanalmente utilizando un disco Secchi.

La concentración de clorofila- $\alpha$  (CLO-  $\alpha$ ) se analizó semanalmente, utilizando una sonda Hydrolab DS5X®. El sensor de la clorofila-  $\alpha$  es un fluorómetro, donde la muestra de agua es irradiada con luz azul (460 nm) y la clorofila absorbe la energía de la luz azul y fluoresce luz roja (620-715 nm). El sensor mide directamente la cantidad de luz roja emitida por la clorofila en la muestra de agua en concentraciones de  $\mu\text{g/L}$ . La concentración de bacterias heterótrofas y de *Vibrio* spp. fue determinado semanalmente siguiendo el protocolo de APHA (2005). Las muestras de agua se almacenaron en bolsas estériles de plástico y transportadas a 4 °C al laboratorio para su análisis. Posteriormente, se realizaron 4 diluciones consecutivas de cada muestra de 1:10 para inocular un volumen de 100  $\mu\text{L}$  en placas de Petri. El agar utilizado fue TCBS para el análisis de *Vibrio* spp. y 2216 para bacterias marinas heterótrofas. Las placas se incubaron por 48 horas a 35 °C. Finalmente, las colonias fueron contadas y los resultados fueron expresados en UFC/mL.

### **6.3.2 Parámetros zootécnicos**

Semanalmente se evaluó el crecimiento de los organismos, utilizando una balanza digital OHAUS® (precisión = 0.01 g) para medir el peso de 100 organismos por estanque. Al finalizar el ensayo de cultivo, se determinó el peso individual, la sobrevivencia y la biomasa de cosecha.

La sobrevivencia fue calculada al final del experimento con base en el peso promedio de los organismos, la biomasa final y la densidad inicial (120 PL/m<sup>2</sup>). El factor de conversión alimenticia (FCA) fue calculado en función de la cantidad de alimento suplementario utilizado y la biomasa obtenida.

### 6.3.3 Requerimiento eléctrico y de agua

El requerimiento eléctrico es la cantidad de energía eléctrica utilizada para producir un kilogramo de camarón (Boyd y Clay, 2002) y se calculó con la siguiente fórmula:

$$R_E = (E * t) / B \quad (1)$$

dónde:  $R_E$  es el requerimiento eléctrico (kW/kg),  $E$  es la energía eléctrica consumida (kW),  $t$  es el tiempo (horas de uso) y  $B$  es la biomasa total de camarón (kg).

Por otro lado, el requerimiento de agua es la cantidad de agua que se utiliza para producir un kilogramo de camarón y se calculó como:

$$R_A = V_I + (V_R * t) / B \quad (2)$$

dónde:  $R_A$  es el requerimiento de agua (m<sup>3</sup>/kg),  $V_I$  es el volumen inicial de agua en estanques (m<sup>3</sup>),  $V_R$  es el volumen de agua utilizada para reposición por día (m<sup>3</sup>),  $t$  es el tiempo (días) y  $B$  es la biomasa total de camarón (kg).

### 6.3.4 Modelo Bioeconómico

El modelo bioeconómico está integrado por tres sub-modelos: biológico, del factor de conversión alimenticia (FCA) y económico, y fue calibrado a partir de los resultados zootécnicos y de calidad de agua de los seis estanques experimentales registrados a lo largo de los dos ciclos de cultivo.

#### 6.3.4.1 Sub-modelo biológico

El submodelo biológico fue utilizado para predecir la cantidad de biomasa ( $b_t$ ) en función del tiempo, como el resultado del producto del peso individual promedio del camarón ( $w_t$ ) y el número de organismos sobrevivientes ( $n_t$ ):

$$b_t = w_t \cdot n_t \quad (3)$$

Se usó la ecuación desarrollada por Ruiz-Velazco *et al.* (2010) para predecir el crecimiento del camarón:

$$w_t = w_i + (w_f - w_i)[(1 - k') / (1 - k^h)]^3 + e \quad (4)$$

dónde:  $w_t$  es el peso promedio individual a  $t$  unidades de tiempo,  $w_i$  es el peso inicial,  $w_f$  es el peso final,  $k$  es el coeficiente de crecimiento,  $h$  es el número de unidades de tiempo hasta la cosecha y  $e$  es el error residual. La sobrevivencia fue calculada en función del tiempo, usando la ecuación exponencial:

$$n_t = n_0 e^{-z \cdot t} \quad (5)$$

dónde:  $n_t$  es el número de sobrevivientes,  $n_0$  es el número de organismos de la población inicial (siembra),  $t$  es el tiempo y  $z$  es la tasa de mortalidad, calculada de la siguiente manera:

$$z = -\text{Ln} (n_f / n_0) / t_f \quad (6)$$

dónde:  $n_f$  es el número de organismos al momento de la cosecha ( $t_f$ ). Se usaron procedimientos para regresión no lineal disponibles en Statistica 6.0 para ajustar la ecuación de crecimiento, estableciendo un nivel de significación de  $P < 0.05$ .

Se llevaron a cabo análisis para determinar correlaciones entre los parámetros del sub-modelo biológico y las variables de calidad de agua. En los casos en que se encontraron correlaciones significativas, se procedió a establecer relaciones funcionales entre los parámetros y variables mediante regresiones lineales simples o múltiples, dependiendo del número de variables correlacionadas. Para los análisis de regresión, se usaron las rutinas de Statistica 6.0, empleando los valores promedio de las variables de calidad de agua usadas. El nivel de significación se estableció en  $P < 0.05$ .

Siguiendo el método de “envoltura” descrito en Vose (2001), se incorporaron dos tipos de variabilidad estocástica en el sub-modelo biológico. Uno de ellos corresponde a la variabilidad estocástica asociada al error residual de la variable dependiente  $w_t$  en la ecuación 4, agregándole el error residual resultante del análisis de regresión que se empleó

para ajustar la ecuación a los datos de crecimiento. El otro tipo de variabilidad corresponde a la de los parámetros del sub-modelo biológico ( $w_f$ ,  $k$ ,  $z$ ) que resultaron relacionados significativamente entre sí o con variables de calidad del agua. En estos casos, el valor estocástico del parámetro ( $Q_s$ ) se calculó mediante ecuaciones lineales simples o múltiples, dependiendo de si el parámetro de producción está relacionado con uno o dos parámetros o variables de calidad de agua. Los valores estocásticos se calcularon de la siguiente manera:

$$Q_s = a + b \cdot q + e \quad (7)$$

$$Q_s = a + (b \cdot q) + (c \cdot q) + e \quad (8)$$

dónde:  $a$  y  $b$  son coeficientes de regresión,  $q$  es cualquier parámetro o variable de calidad de agua y  $e$  es el error residual correspondiente al análisis de regresión con el que se estima la variabilidad estocástica. En los casos donde no se encontró una correlación significativa, se ajustó una distribución de probabilidad empírica a los valores del parámetro.

#### 6.3.4.2 Sub-modelo del factor de conversión alimenticia (FCA)

El FCA para ambos ciclos de producción fue inferido en función del tiempo, combinando una ecuación lineal simple con una curva senoide:

$$FCA = A + (B \cdot t) + C * Sen(2 \cdot \pi \cdot t / L) + F + e \quad (9)$$

dónde:  $A$  y  $B$  son coeficientes de la ecuación lineal,  $C$ ,  $D$ ,  $L$  y  $F$  son parámetros de la curva senoide,  $t$  es el tiempo y  $e$  es el error residual resultante del análisis de regresión. Los elementos estocásticos en este sub-modelo fueron incorporados usando el método de “envoltura” descrito en la subsección 6.3.4.1.

#### 6.3.4.3 Sub-modelo económico

La utilidad ( $u_t$ ) y la relación beneficio-costos ( $b/c_t$ ) se usaron como indicadores del rendimiento económico y se calcularon en función del tiempo como:

$$u_t = i_t - c_t \quad (10)$$

$$b/c_t = i_t / c_t \quad (11)$$

dónde: el ingreso ( $i_t$ ) es el producto de la biomasa del camarón (del submodelo biológico) y el precio de venta del camarón ( $pv$ ) y  $c_t$  son los costos operativos considerados para el análisis:

$$c_t = c_{per} + c_{PL} + c_{fer} + c_{pe} + c_{ma} + c_c + c_{A_t} + c_{p_t} + c_{ra_t} + c_{e_t} \quad (12)$$

dónde: los costos son:  $c_{per}$ , personal (incluyendo costos administrativos);  $c_{PL}$ , postlarva;  $c_{fer}$ , fertilizante;  $c_{pe}$ , preparación del estanque;  $c_{ma}$ , mantenimiento;  $c_c$ , cosecha;  $c_{a_t}$ , alimento;  $c_{p_t}$ , probióticos;  $c_{ra_t}$ , reemplazo de agua y  $c_{e_t}$  energía eléctrica. Los valores unitarios de los costos de operación se enlistan en la tabla II. Los tiempos óptimos de cosecha correspondieron a aquéllos en que los indicadores económicos fueron máximos.

El camarón de cultivo en México generalmente se vende de acuerdo a un precio base, y el precio final de venta se calcula “añadiendo”, al precio base, el correspondiente peso promedio del camarón. Por ejemplo, si el precio base del kilogramo de camarón es \$50.00 y el peso promedio de los organismos es 13 g; entonces el precio de venta es de \$63.00.

Para incorporar elementos estocásticos a los precios de venta del camarón, se ajustó una distribución normal al precio promedio anual del camarón para el periodo 2012-2015, después que un análisis de regresión no mostrara incremento o decremento significativo ( $P > 0.05$ ) en la tendencia de los mismos. La variabilidad anual en los precios de venta se incorporó multiplicando los precios del camarón correspondientes a los meses de cada ciclo, por el coeficiente de variación (desviación estándar / promedio) de la distribución normal de los precios promedio anuales.

La variabilidad anual del precio de la postlarva ( $c_{PL}$ ), se estimó usando una regresión lineal para el ajuste a valores para los años 2006-2013, presentados por Estrada-Pérez (2016). La ecuación usada para la regresión es:

$$c_{PL} = a(t) + b + e \quad (13)$$

dónde:  $a$  y  $b$  son coeficientes de regresión,  $t$  es el tiempo en años y  $e$  es el error residual resultante del análisis de la regresión. La variabilidad anual de los precios fue incorporada usando el método “envoltura” descrito en la subsección 6.3.4.1.

**Tabla II.** Costos de operación unitarios en los ciclos primavera-verano y verano-otoño.

Costo Operativo	Valor (Pesos \$MX)
Alimento (\$/t) <sup>a</sup>	22246.5
Postlarva (\$/1000 PL) <sup>b</sup>	67.1
Personal (\$/estanque/día) <sup>c</sup>	20.7
Energía- aireación (\$/kW/h) <sup>d</sup>	0.6
Mantenimiento (\$/estanque) <sup>e</sup>	4831
Cosecha (\$/estanque) <sup>f</sup>	3116.7
Probióticos (\$/ 2 kg) <sup>g</sup>	1498.7
Fertilizante (\$/ 50 kg)	1030.0
Reemplazo de agua (\$/estanque/día) <sup>h</sup>	0.9
Preparación del estanque (\$/estanque) <sup>i</sup>	51.7

<sup>a</sup> Ziegler™ intensive-35 pellet v-pak (35% proteína cruda).

<sup>b</sup> Postlarva (PL14) de 0.04 g de peso proveniente del laboratorio Gran Mar Larvas.

<sup>c</sup> Incluye 0.2 trabajadores/estanque (1.60 \$/estanque/día), 0.005 gerente de producción/estanque (9.80 \$/estanque/día), 0.005 supervisor de campo/estanque (2.32 \$/estanque/día), 0.005 secretaria/estanque (1.60 \$/estanque/día), 0.005 contador/estanque (4.81 \$/estanque/día), servicios y material de oficina (0.53 \$/estanque/día).

<sup>d</sup> Costo asociado a la energía eléctrica utilizada para la aireación de los estanques (0.59 \$/kWh; SENER, 2017).

<sup>e</sup> Incluye limpieza y reparación de la membrana plástica (3600 \$/ciclo) y el mantenimiento de los aireadores (1230 \$/ciclo).

<sup>f</sup> Incluye 8 trabajadores por día/estanque (\$2670) y 100 kg de hielo/estanque para el manejo y preservación del producto (\$450).

<sup>g</sup> Probiótico Alibio 2135® y Alibio AC® (1kg cada uno).

<sup>h</sup> Costo asociado a la energía eléctrica utilizada por las bombas para mantener el nivel de agua en los estanques.

<sup>i</sup> Costo asociado a la energía eléctrica utilizada por las bombas para llenar los estanques a una profundidad de 1.35 m al inicio de cada ciclo.

## 6.4 Análisis estadísticos

La normalidad en los datos de crecimiento de los estanques para ambos ciclos se analizó con la prueba de Kolmogorov-Smirnov y se comparó con la prueba análisis de varianza de una vía. Se usaron métodos de regresión no-lineal para ajustar las ecuaciones 4, 9 y las ecuaciones 7, 8 y 13 fueron ajustadas con regresiones simples o múltiples. Para los análisis se utilizó Statistica 6.0 (Statsoft, Tulsa, OK, USA), estableciendo una significación de  $P < 0.05$ .

Se realizaron pruebas t-Student para comparar los valores de biomasa, peso individual promedio, sobrevivencia y de la utilidad, de ambos ciclos de producción. De la misma manera, se compararon los valores promedio diarios de temperatura (T), oxígeno disuelto (OD), pH y salinidad (S), y se analizaron los cambios en las desviaciones estándar

a través del coeficiente de variación ( $CV = \text{desviación estándar}/\text{media}$ ) de los distintos parámetros para ambos ciclos.

#### **6.4.1 Simulación Monte Carlo y análisis de sensibilidad.**

El modelo bioeconómico se programó en Excel 10.0 usando hojas de cálculo por separado para cada ciclo de cultivo. Se llevaron a cabo simulaciones Monte Carlo con @Risk 6.0 (Palisade, Ithaca, N.Y), a fin de generar variabilidad estocástica en los valores de la producción, de la utilidad y de la relación beneficio-costos utilizando las distribuciones de probabilidad previamente descritas para cada uno de los sub-modelos. Para efectos de la simulación y cuando fue procedente, se consideraron las correlaciones entre las estimaciones de los parámetros de las ecuaciones de los sub-modelos.

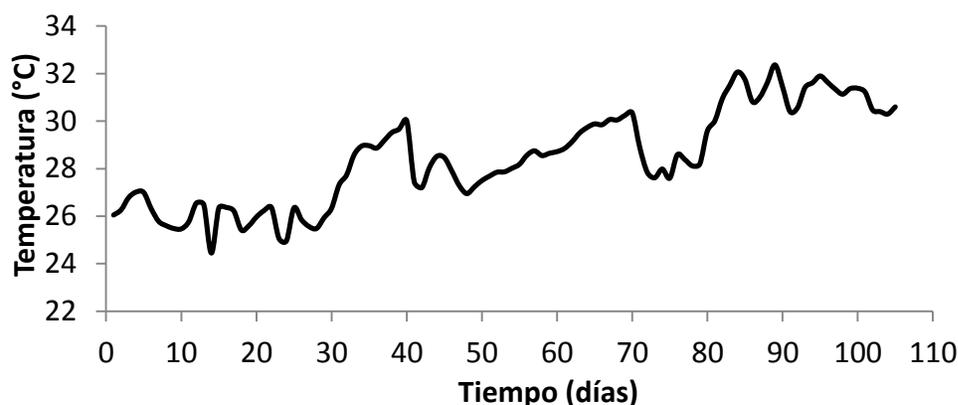
Para calcular el riesgo asociado al número total (6) de estanques correspondientes a cada ciclo de producción, en vez de a un solo estanque, se usaron las distribuciones teóricas disponibles en @RISK 5.5 que presentaron el mejor ajuste a las distribuciones de utilidades obtenidas para un estanque. Enseguida, para cada ciclo se utilizaron 6 réplicas de dichas distribuciones que presentaron el mejor ajuste, con el fin de tomar 6 muestras de lo que puede ocurrir, a nivel de un estanque, en la variabilidad de las utilidades. El proceso de muestreo se hizo repetidamente promediando, en cada ocasión y por separado para cada ciclo, los 6 valores de las muestras, generando así valores de lo que puede ocurrir en un estanque “promedio” para cada ciclo. El coeficiente de variación se usó como un índice de incertidumbre del desempeño económico (Ayyub, 2014).

Para analizar la sensibilidad de las utilidades a factores de riesgo, se utilizaron valores de los coeficientes de regresión múltiple los cuales relacionan las utilidades con los respectivos parámetros zootécnicos y económicos. De acuerdo con esto, un valor absoluto alto del coeficiente, indica un alto impacto (sensibilidad) de la variable o parámetro correspondiente en los ingresos netos. Para el análisis de sensibilidad se utilizaron los procedimientos disponibles en @Risk 6.0.

## 7. RESULTADOS

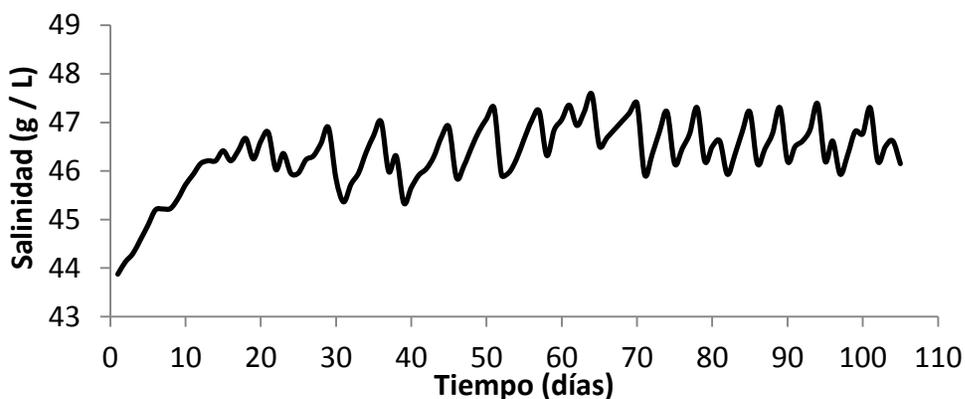
### 7.1 Parámetros de calidad de agua (ciclo primavera-verano)

La temperatura varió entre 24.5 y 32 °C (8 am), manteniendo un patrón ascendente durante los primeros 80 días del cultivo (primavera), para posteriormente mantenerse relativamente estable hasta finalizar el cultivo (Fig. 5). El coeficiente de variación promedio de la temperatura fue de 0.050 para los 105 días de cultivo.



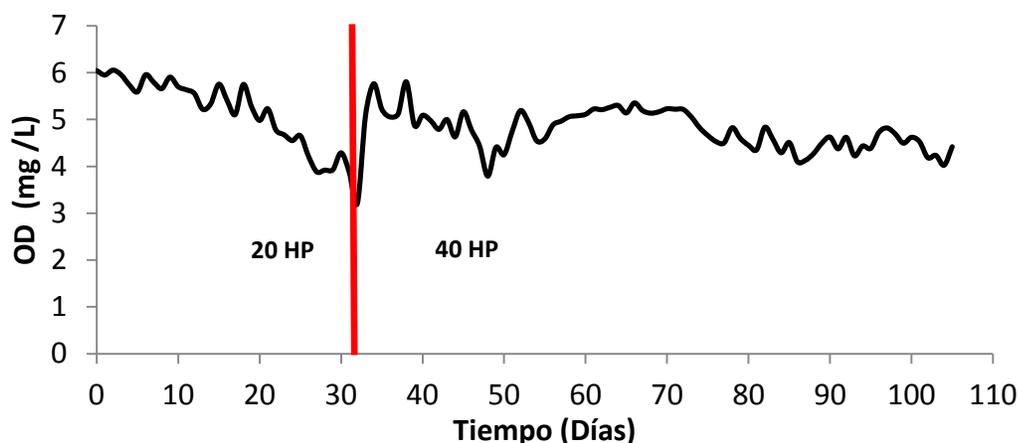
**Figura. 5.** Temperatura promedio en las unidades experimentales para el ciclo primavera-verano. n=6.

Durante los primeros 15 días de cultivo, no se realizó ninguna aportación de agua marina para recuperar el nivel en las unidades experimentales, y la salinidad aumentó de 44 a 47 g/L. Posteriormente, como consecuencia de las reposiciones semanales de 11%, la salinidad fue mantenida entre 45 y 47 g/L hasta finalizar el experimento (Fig. 6).



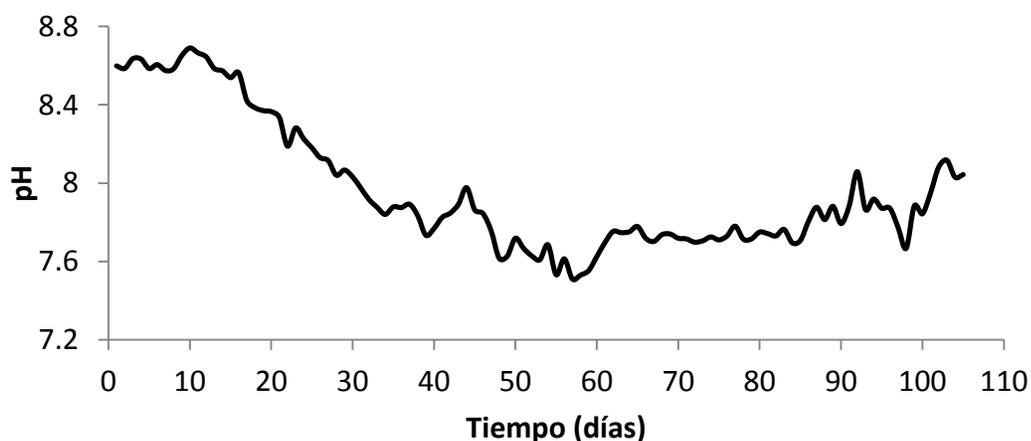
**Figura. 6** Salinidad promedio en las unidades experimentales para el ciclo primavera-verano. n=6.

El valor promedio de oxígeno disuelto en las unidades experimentales (8 am) varió entre 3.5 y 6 mg/L. El coeficiente de variación promedio de la concentración de oxígeno fue de 0.159 para los 105 días de cultivo. Durante los primeros 32 días, únicamente se utilizó el equivalente a 20 HP/ha de aireación, posteriormente se incrementó a 40 HP/ha (Fig. 7).



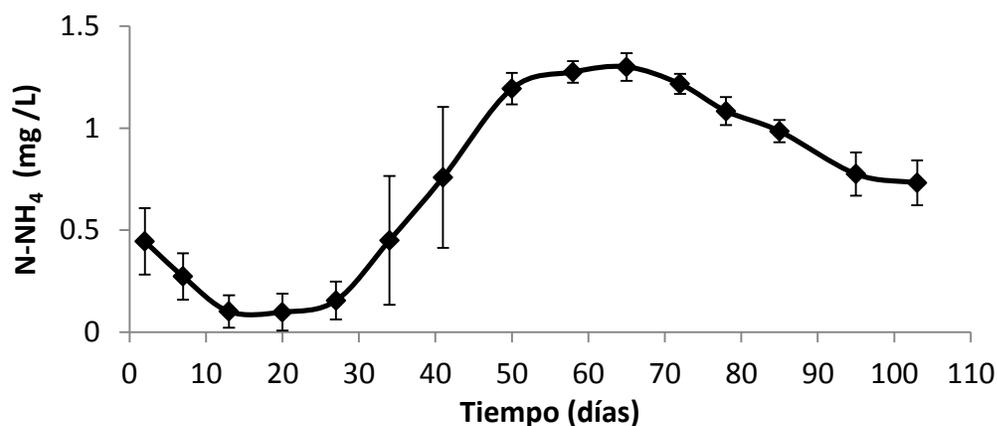
**Figura. 7** Concentración de oxígeno disuelto promedio en las unidades experimentales para el ciclo primavera-verano. n=6.

El valor promedio del pH (8 am) varió entre 7.5 y 8.7, sin embargo, a partir del día 30 la variación se redujo a 7.5 y 8 hasta finalizar el experimento (Fig. 8).

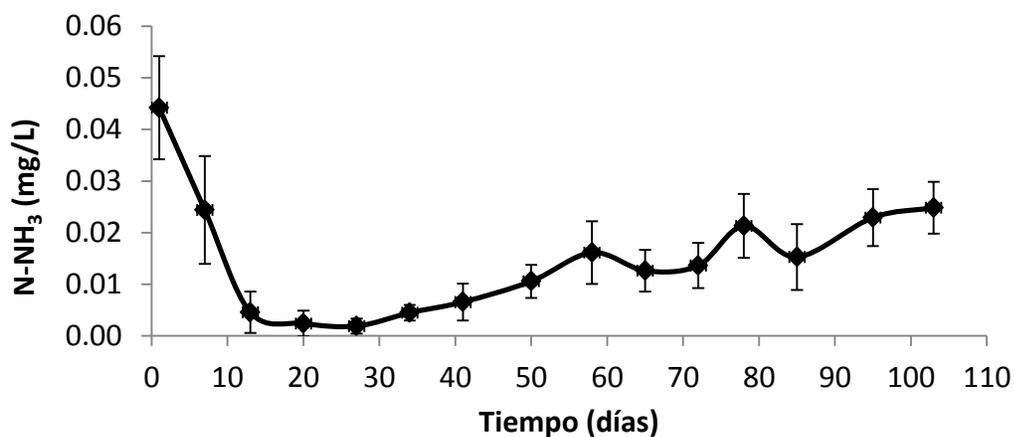


**Figura. 8** Valor promedio de pH en las unidades experimentales para el ciclo primavera-verano. n=6.

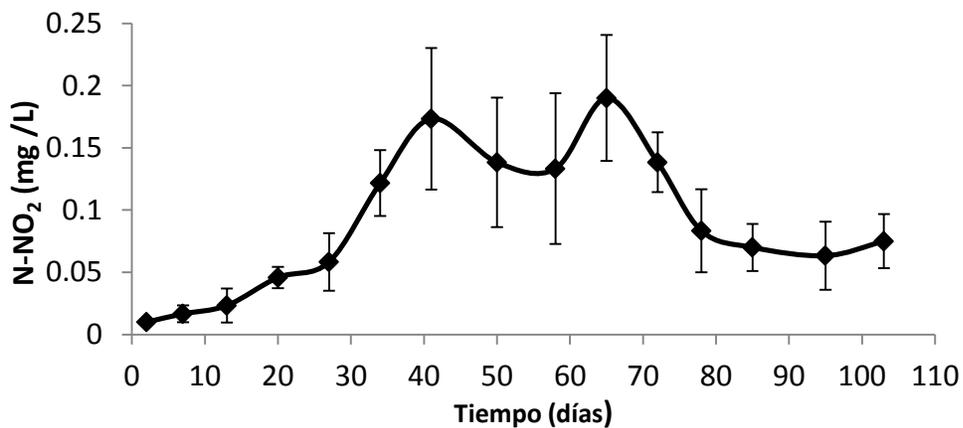
Las concentraciones promedio de amonio ( $\text{N-NH}_4$ ), amonio no ionizado ( $\text{N-NH}_3$ ), nitritos ( $\text{N-NO}_2$ ), nitratos ( $\text{N-NO}_3$ ), fosfato ( $\text{PO}_4$ ), silicato ( $\text{SiO}_2$ ), alcalinidad (ALC), demanda biológica de oxígeno ( $\text{DBO}_5$ ), sólidos sedimentables (SS), bacterias del género *Vibrio* y la turbidez (TUR) se muestran en las figuras 9 a la 19.



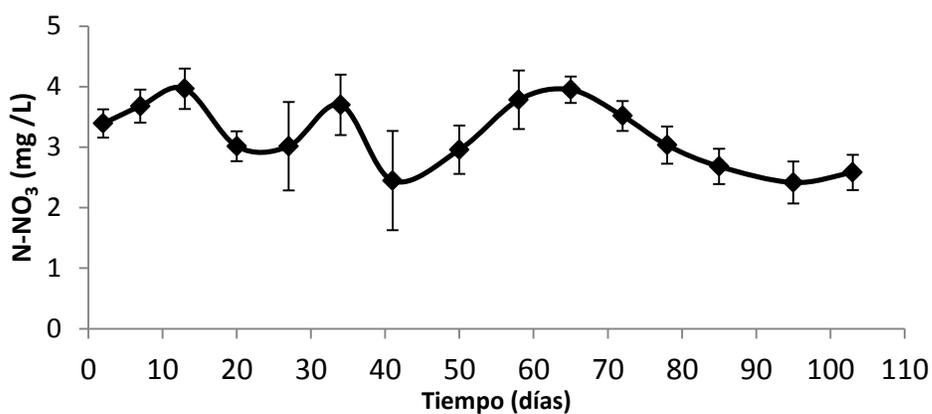
**Figura 9.** Concentración promedio de  $\text{N-NH}_4$  ( $\pm\text{DE}$ ) en las unidades experimentales para el ciclo primavera-verano.  $n=6$ .



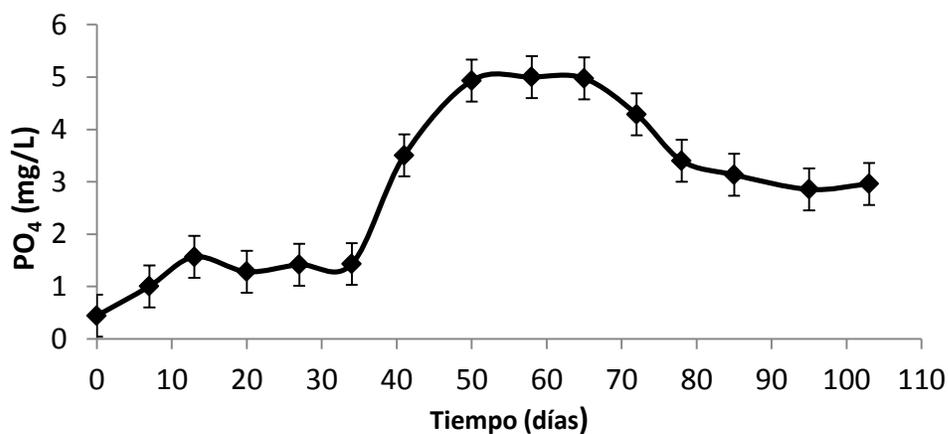
**Figura 10.** Concentración promedio de  $\text{N-NH}_3$  ( $\pm\text{DE}$ ) en las unidades experimentales para el ciclo primavera-verano.  $n=6$ .



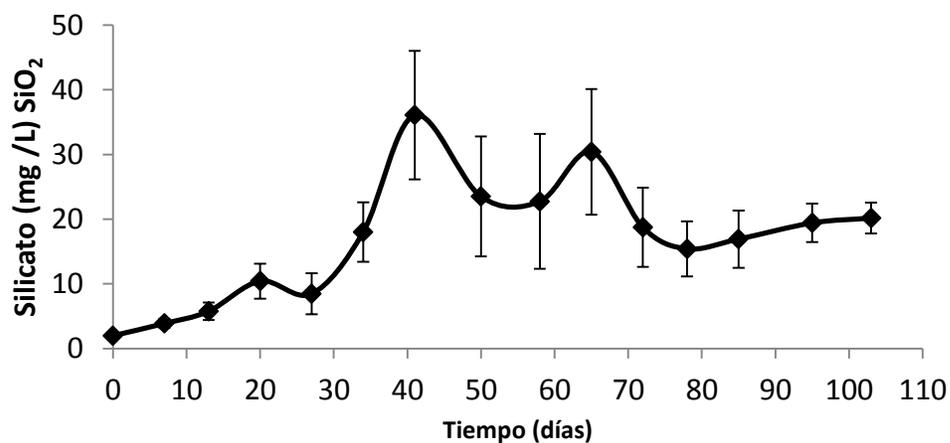
**Figura 11.** Concentración promedio de N-NO<sub>2</sub> ( $\pm$ DE) en las unidades experimentales para el ciclo primavera-verano. n=6.



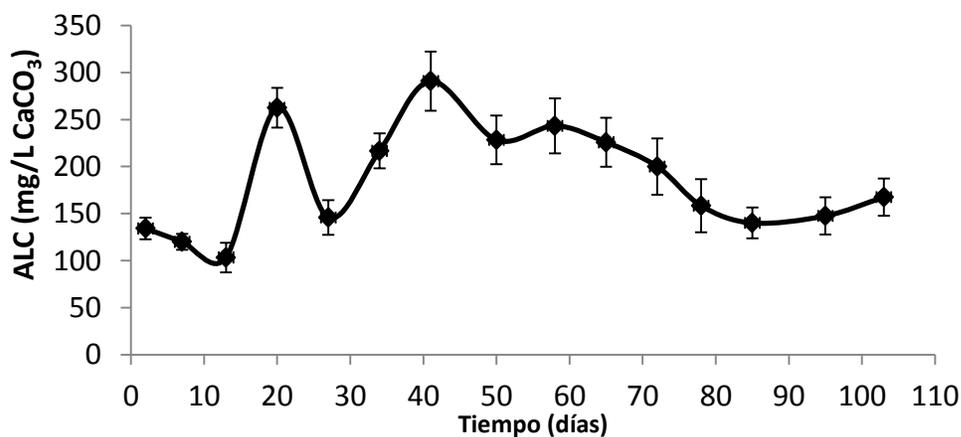
**Figura 12.** Concentración promedio de N-NO<sub>3</sub> ( $\pm$ DE) en las unidades experimentales para el ciclo primavera-verano. n=6.



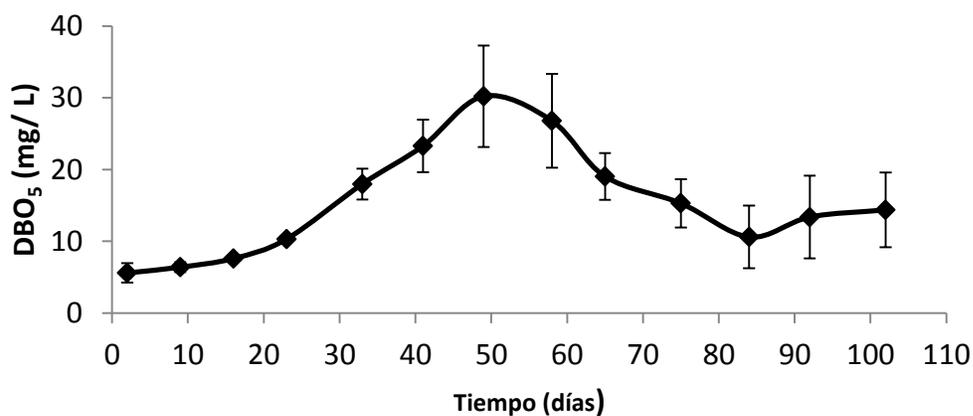
**Figura 13.** Concentración promedio de PO<sub>4</sub> ( $\pm$ DE) en las unidades experimentales para el ciclo primavera-verano. n=6.



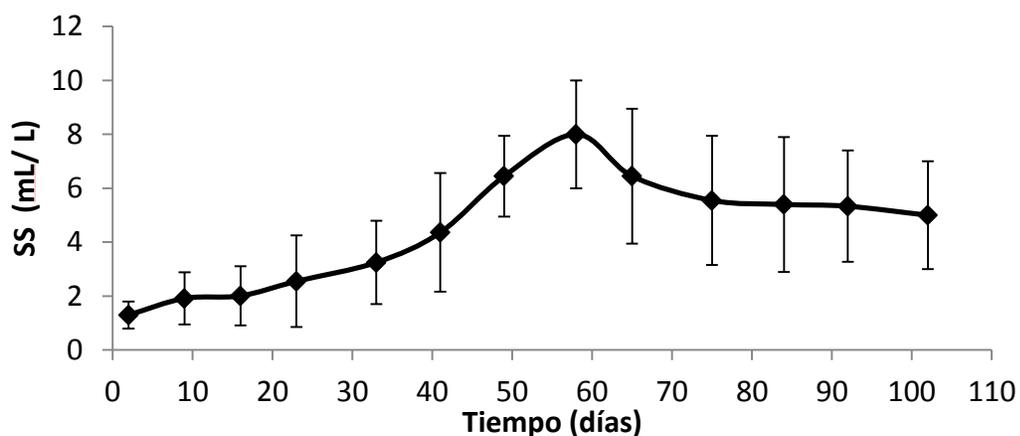
**Figura 14.** Concentración promedio de SiO<sub>2</sub> ( $\pm$ DE) en las unidades experimentales para el ciclo primavera-verano. n=6.



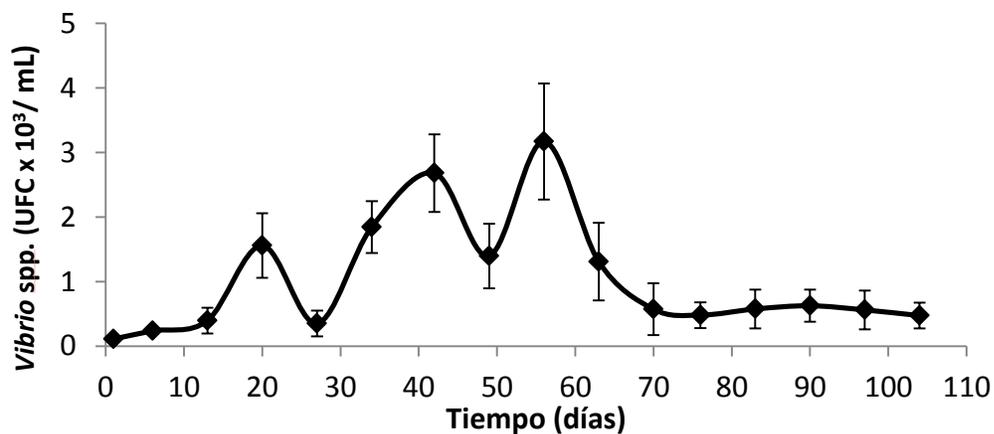
**Figura 15.** Concentración promedio de ALC ( $\pm$ DE) en las unidades experimentales para el ciclo primavera-verano. n=6.



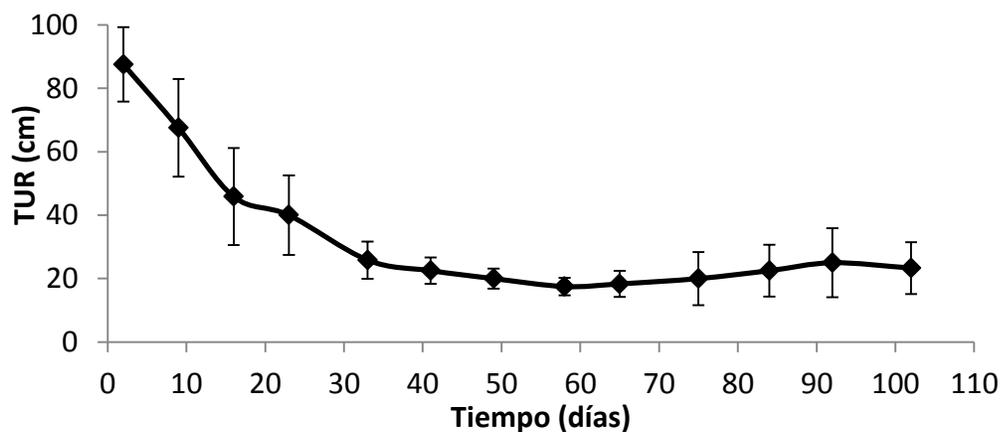
**Figura 16.** Concentración promedio de DBO<sub>5</sub> ( $\pm$ DE) en las unidades experimentales para el ciclo primavera-verano. n=6.



**Figura 17.** Concentración promedio de SS ( $\pm$ DE) en las unidades experimentales para el ciclo primavera-verano. n=6.

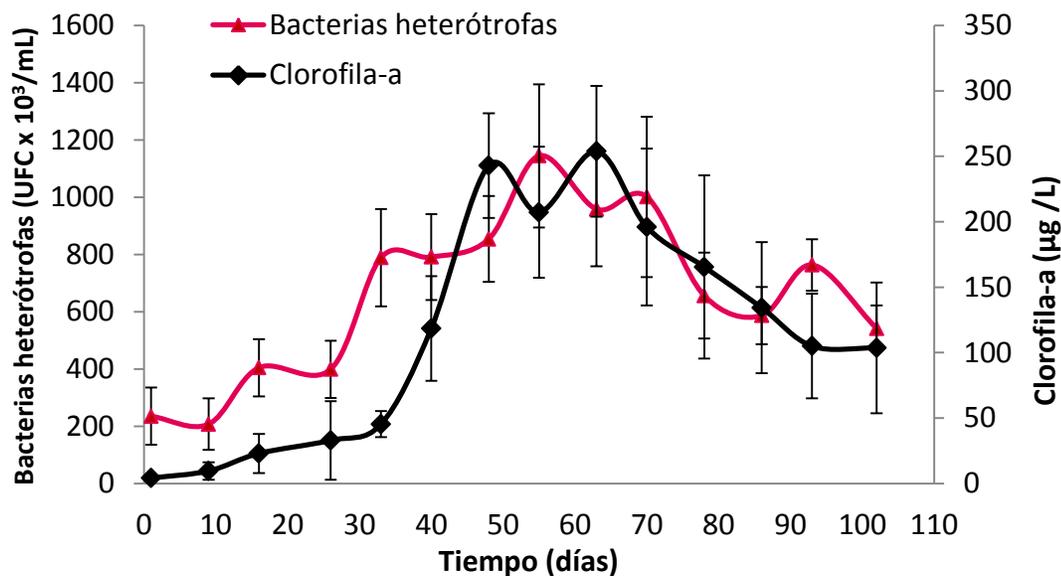


**Figura 18.** Concentración promedio de *Vibrio* spp. ( $\pm$ DE) en las unidades experimentales para el ciclo primavera-verano. n=6



**Figura 19.** Valor promedio de TUR ( $\pm$ DE) en las unidades experimentales para el ciclo primavera-verano.

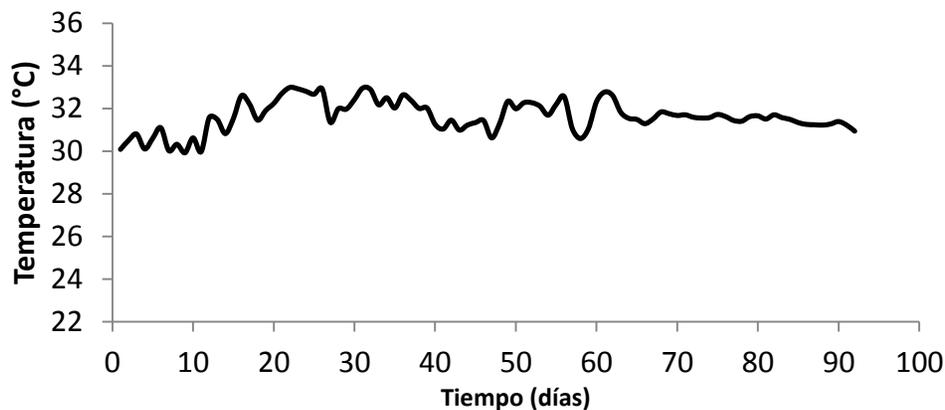
En la figura 20 se muestran las concentraciones promedio de clorofila- $\alpha$  y de bacterias heterótrofas marinas en las unidades experimentales para el ciclo primavera-verano.



**Figura 20.** Concentraciones promedio de clorofila-a ( $\pm$ DE) y bacterias heterótrofas ( $\pm$ DE) en las unidades experimentales para el ciclo primavera-verano.

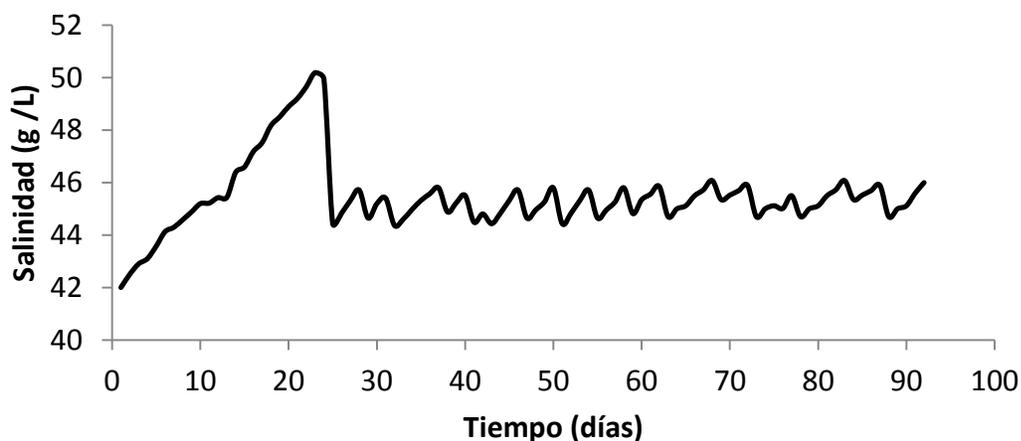
## 7.2 Parámetros de calidad de agua (ciclo verano-otoño)

La temperatura varió entre 30 y 34 °C (8 a.m.), sin tendencia a ascender o descender durante el experimento (Fig. 21). El coeficiente de variación promedio de la temperatura fue de 0.034 para los 92 días de cultivo.



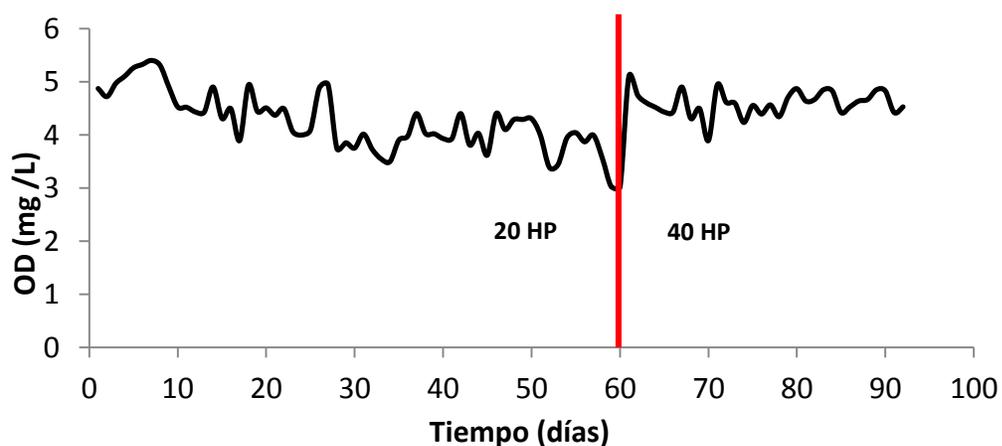
**Figura 21.** Temperatura promedio en las unidades experimentales para el ciclo verano-otoño.

Durante los primeros 23 días de cultivo, no se realizó aportación de agua marina para recuperar el nivel en las unidades experimentales, y la salinidad aumentó de 42 a 50 g/L. Posteriormente, debido a las reposiciones semanales de 8%, la salinidad se mantuvo entre 44 y 47 g/L hasta finalizar el experimento (Fig. 22).



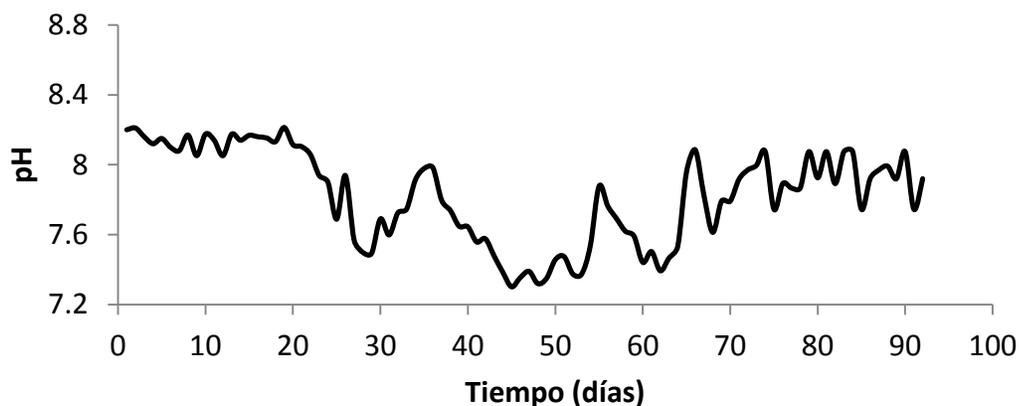
**Figura 22.** Salinidad promedio en las unidades experimentales para el ciclo verano-otoño.

El valor promedio de oxígeno disuelto en las unidades experimentales (8 a.m.) varió entre 3.2 y 5.7 mg/L. El coeficiente de variación promedio de la concentración de oxígeno fue de 0.122 para los 92 días de cultivo. Durante los primeros 60 días, únicamente se utilizó el equivalente a 20 HP/ha de aireación, posteriormente se incrementó a 40 HP/ha (Fig. 23).



**Figura 23.** Concentración de oxígeno disuelto promedio en las unidades experimentales para el ciclo verano-otoño.

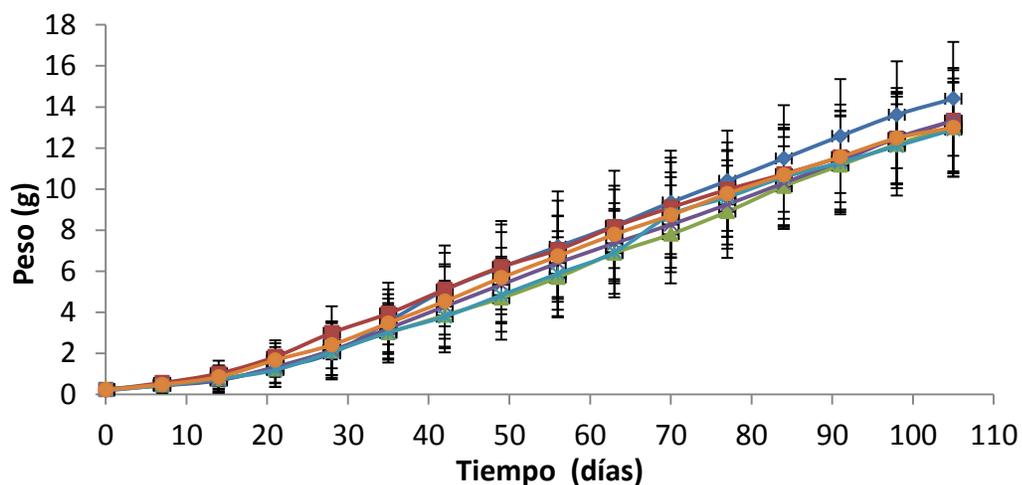
El valor promedio del pH (8 a.m.) de las unidades experimentales varió entre 7.3 y 8.2, sin embargo, a partir del día 30 el intervalo de variación se redujo a 7.5 y 8 hasta finalizar el experimento (Fig. 24).



**Figura 24.** Valor promedio de pH en las unidades experimentales para el ciclo verano-otoño.

### 7.2.1 Parámetros zootécnicos (ciclo primavera-verano)

En la figura 25 se presentan los incrementos de peso individual del camarón a través del tiempo para el ciclo primavera-verano en las 6 unidades experimentales.



**Figura 25.** Incremento en peso (g) en un cultivo intensivo para el ciclo primavera-verano en 105 días de cultivo.

En la tabla III se muestran los valores obtenidos de peso final, tasa de crecimiento (TC), factor de conversión alimenticia (FCA), sobrevivencia y biomasa por unidad de área de las unidades experimentales.

**Tabla III.** Valores promedio ( $\pm$ DE) de los parámetros zootécnicos para el ciclo primavera-verano.

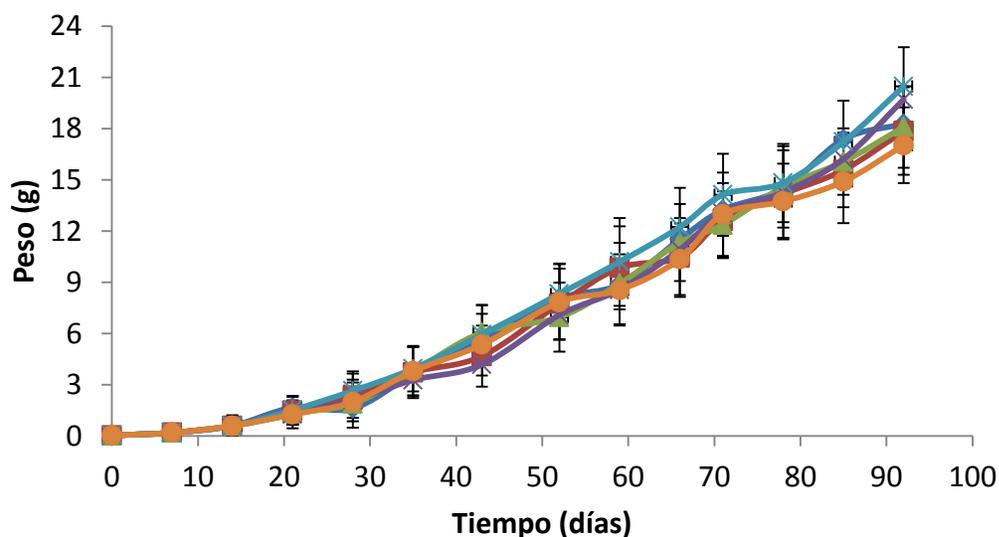
Unidad Experimental	Peso Final (g)	TC* (g/semana)	FCA**	Rendimiento (t/ha)	Sobrevivencia (%)
A1	14.4 $\pm$ 1.5	0.96	1.51	13.82	80
A2	13.0 $\pm$ 1.4	0.87	1.50	13.72	88
A3	12.9 $\pm$ 1.7	0.86	1.52	13.46	87
A4	13.3 $\pm$ 1.3	0.89	1.50	12.63	79
A5	13.0 $\pm$ 1.8	0.87	1.51	13.41	86
A6	13.3 $\pm$ 1.6	0.89	1.52	13.59	85
<b>Promedio</b>	<b>13.3</b>	<b>0.9</b>	<b>1.51</b>	<b>13.5</b>	<b>84.2</b>

\*Tasa de crecimiento

\*\*Factor de conversión alimenticia

## 7.2.2 Parámetros zootécnicos (ciclo verano-otoño)

En la figura 26 se presentan los incrementos de peso a través del tiempo para el ciclo verano-otoño de las 6 unidades experimentales.



**Figura 26.** Incremento en peso (g) en un cultivo intensivo para el ciclo verano-otoño en 92 días de cultivo.

En la tabla IV se muestran los valores obtenidos de peso final, tasa de crecimiento (TC), factor de conversión alimenticia (FCA), sobrevivencia y biomasa por unidad de área de las unidades experimentales.

**Tabla IV.** Valores promedio ( $\pm$ DE) de los parámetros zootécnicos para el ciclo verano-otoño.

Unidad Experimental	Peso Final (g)	TC* (g/semana)	FCA**	Rendimiento (t/ha)	Sobrevivencia (%)
A1	18.4 $\pm$ 2.2	1.40	1.51	17.66	80
A2	17.9 $\pm$ 2.1	1.36	1.50	17.39	81
A3	18.1 $\pm$ 2.6	1.37	1.52	17.81	82
A4	19.7 $\pm$ 2.7	1.50	1.53	18.91	80
A5	20.5 $\pm$ 2.5	1.56	1.54	19.68	80
A6	17.0 $\pm$ 2.8	1.30	1.52	16.93	83
<b>Promedio</b>	<b>18.6</b>	<b>1.42</b>	<b>1.52</b>	<b>18.1</b>	<b>81.2</b>

\*Tasa de crecimiento

\*\* Factor de conversión alimenticia

### 7.3.1 Requerimiento eléctrico y de agua (ciclo primavera-verano)

La cantidad de energía eléctrica (E) utilizada a lo largo del cultivo varió debido a que en los primeros 32 días del experimento, únicamente se utilizó el equivalente a 20 HP/ha, y posteriormente se incrementó a 40 HP/ha, hasta finalizar el ensayo. La cantidad de energía consumida fue:

$$E = 0.745 \text{ kW (20 HP) (24 horas) (32 días)} + 0.745 \text{ kW (40 HP) (24 horas) (73 días)}$$

$$E = 63653 \text{ kW}$$

Por lo que el requerimiento eléctrico ( $R_E$ ) resultante fue:

$$R_E = 63653 \text{ kW} / 13500 \text{ kg}$$

$$R_E = 4.71 \text{ kW} / \text{kg de camarón}$$

Por otro lado, el cálculo del requerimiento de agua ( $R_A$ ) resultante fue:

$$R_A = 13500 \text{ m}^3 + (216 \text{ m}^3 * 105 \text{ días}) / 13500 \text{ kg}$$

$$R_A = 2.68 \text{ m}^3 / \text{kg de camarón}$$

### 7.3.2 Requerimiento eléctrico y de agua (ciclo verano-otoño)

La cantidad de energía eléctrica (E) utilizada a lo largo del cultivo varió debido a que en los primeros 60 días del experimento, únicamente se utilizó el equivalente a 20 HP/ha, y posteriormente se incrementó a 40 HP/ha, hasta finalizar el ensayo. La cantidad de energía consumida fue:

$$E = 0.745 \text{ kW (20 HP) (24 horas) (60 días)} + 0.745 \text{ kW (40 HP) (24 horas) (32 días)}$$

$$E = 44342 \text{ kW}$$

Lo anterior dio como resultado un requerimiento eléctrico ( $R_E$ ) de:

$$R_E = 44342 \text{ kW} / 18100 \text{ kg}$$

$$R_E = 2.45 \text{ kW} / \text{kg de camarón}$$

El requerimiento de agua ( $R_A$ ) resultante fue:

$$R_A = 13500 \text{ m}^3 + (243 \text{ m}^3 * 92 \text{ días}) / 18100 \text{ kg}$$

$$R_A = 1.98 \text{ m}^3 / \text{kg de camarón}$$

## 7.4 Modelo bioeconómico (ciclo primavera-verano)

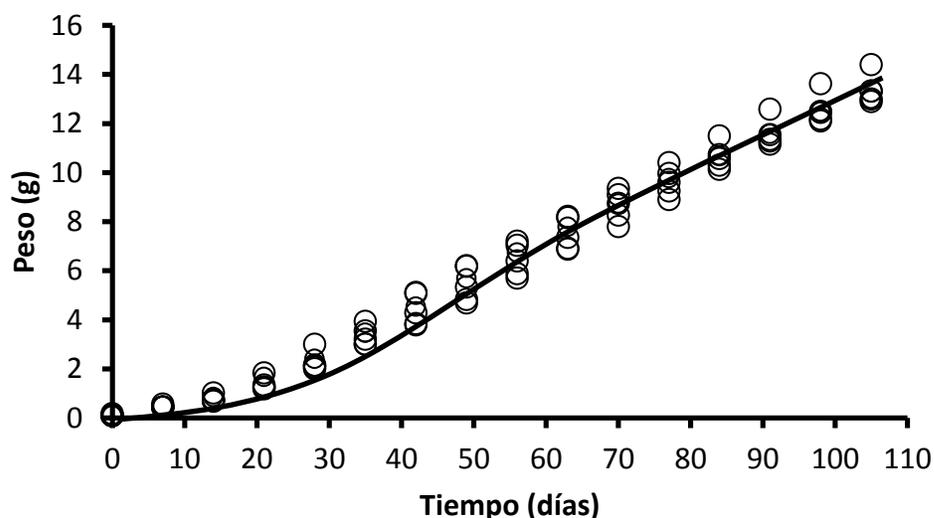
### 7.4.1 Submodelo biológico

La ecuación de crecimiento de Ruiz-Velazco *et al.* (2010) se ajustó adecuadamente a los datos de crecimiento y se obtuvieron resultados significativos en términos del análisis de varianza de la regresión (Fig. 27). Con 95 % de confianza, se estimó que el peso individual final ( $w_f$ ) debería estar entre 12.36 y 14.49 g, con un promedio de 13.10 g. Con el mismo porcentaje de confianza se estimó que la sobrevivencia debería estar entre 78.7 y 89.8%, promediando 84.2 %.

Los resultados mostraron que el coeficiente de crecimiento ( $k$ ) y la tasa de mortalidad ( $z$ ) están correlacionados inversamente con la temperatura del agua ( $r^2 = 0.93$ ) y el oxígeno disuelto ( $r^2 = 0.85$ ), respectivamente. Las relaciones establecidas entre ellos son:

$$k = 1.067 - 0.0031 (T)$$

$$z = 0.017 - 0.0030 (OD)$$

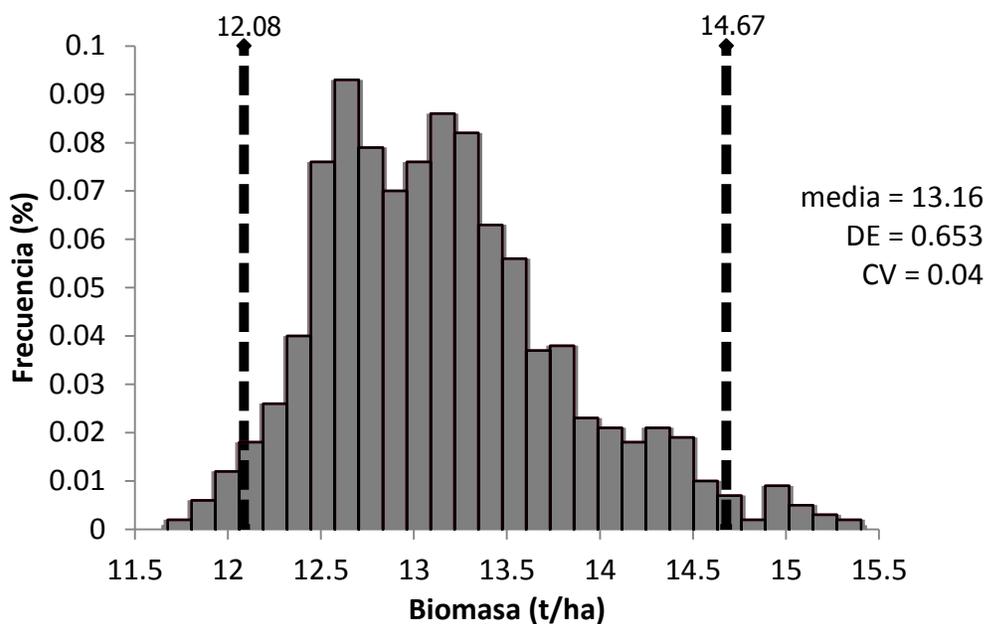


**Figura 27.** Ajuste de la ecuación de crecimiento a los valores de la base de datos en el ciclo primavera-verano.

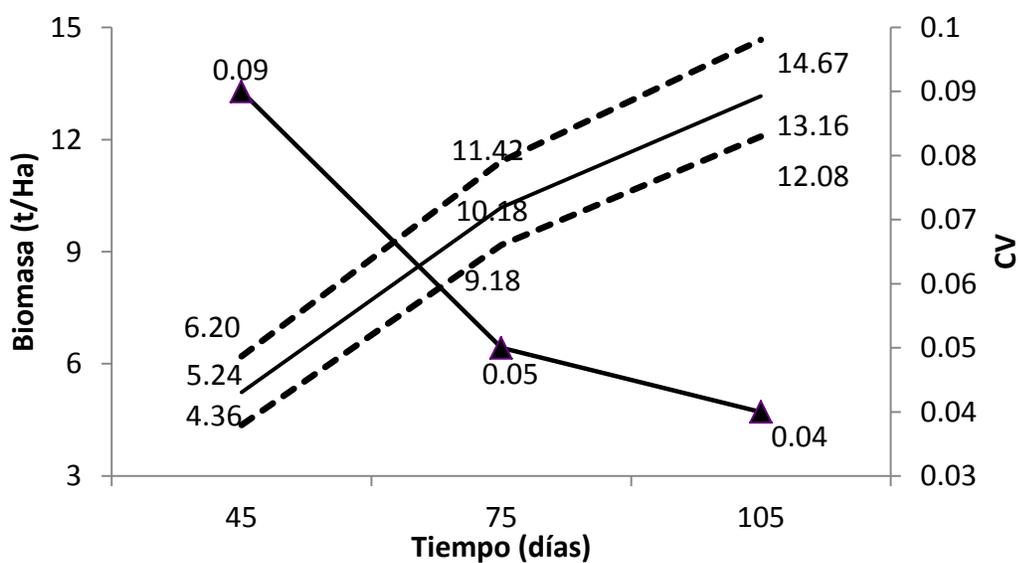
La distribución de probabilidades de rendimientos en biomasa después de 105 días de cultivo, se muestra en la figura 28. Con 95 % de confianza, se predice que el sistema de cultivo produce entre 12.08 – 14.67 t/ha (promedio = 13.16 t/ha). Los resultados del análisis del coeficiente de variación (CV) de la biomasa, mostraron que dicho coeficiente disminuyó con el paso del tiempo (Fig. 29).

Los resultados del análisis de sensibilidad para el cálculo de la biomasa a los 45, 75 y 105 días se muestran en la tabla V. La temperatura, el peso individual final y el oxígeno disuelto fueron los factores más importantes que influenciaron la variabilidad de la producción de camarón. El peso individual final tendió a ganar importancia con el paso del

tiempo, mientras que la tasa de mortalidad tuvo poca relevancia durante el periodo de cultivo.



**Figura 28.** Distribución de probabilidad de la biomasa en 105 días de cultivo para el ciclo primavera-verano. Las líneas interrumpidas indican un intervalo de 95 % de confianza.



**Figura 29.** Biomasa y su coeficiente de variación (CV, triángulos) calculadas para el ciclo primavera-verano. Las líneas interrumpidas indican intervalos de 95 % de confianza.

**Tabla V.** Análisis de sensibilidad de la biomasa después de 45, 75 y 105 días de cultivo para el ciclo primavera-verano. Los parámetros se presentan en orden descendente de acuerdo con el valor absoluto del coeficiente de regresión.

Tiempo (días)	Parámetro	Coeficiente de regresión
45	T	0.80
	$k$	-0.46
	$w_f$	0.38
	OD	0.13
	$z$	-0.08
75	$w_f$	0.65
	T	0.55
	OD	0.36
	$k$	-0.32
	$z$	-0.23
105	$w_f$	0.74
	OD	0.57
	$z$	-0.36

T, temperatura;  $k$ , coeficiente de crecimiento;  $w_f$ , peso final; OD, oxígeno disuelto;  $z$ , tasa de mortalidad.

#### 7.4.2 Sub-modelo del factor de conversión alimenticia (FCA)

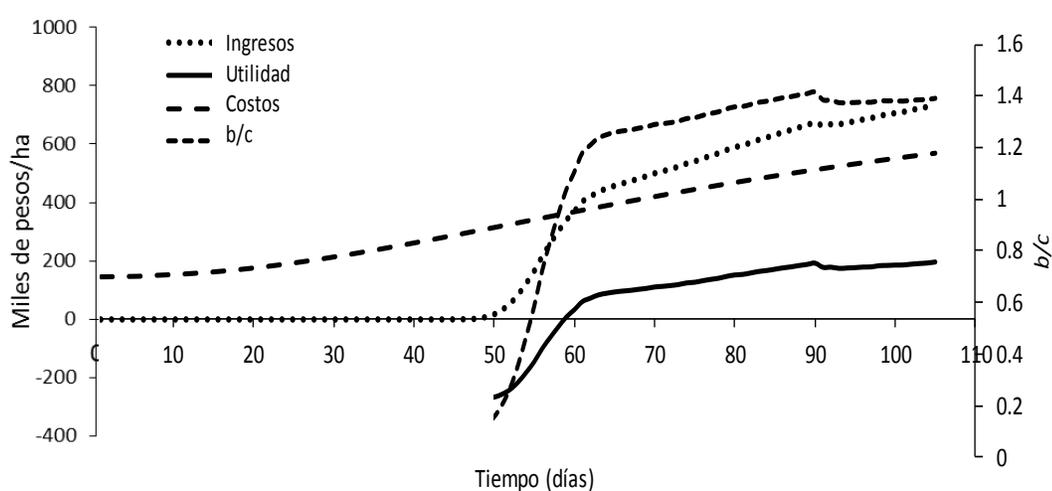
La ecuación resultante para el cálculo del factor de conversión alimenticia para el ciclo primavera-verano es:

$$FCA = 1.0727 + (0.0042 \cdot t) - 0.0076 \cdot \text{Sen}(2\pi t / 57.9964) + 1.8709$$

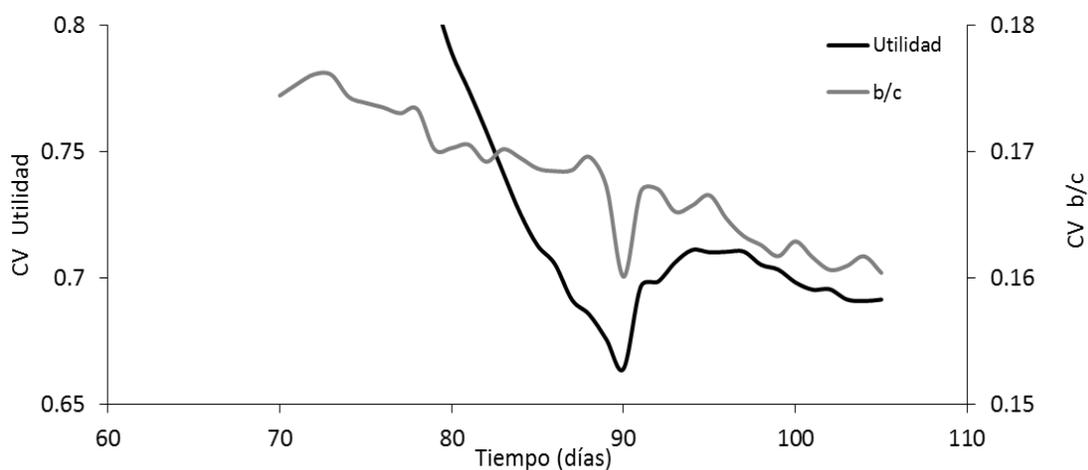
#### 7.4.3 Sub-modelo económico

Los valores de la utilidad, costos operativos totales, ingresos y relación beneficio-costos en función del tiempo de cultivo se presentan en la figura 30 para el ciclo primavera-verano. El ingreso se calculó por primera vez hasta el día 49 del cultivo, cuando el camarón adquirió talla comercial. Sin embargo, utilidades positivas se calcularon hasta el día 58, cuando el ingreso superó a los costos de producción. El tiempo óptimo de cosecha se registró a los 90 días, cuando la utilidad y la relación beneficio-costos fueron máximas. Los resultados del análisis del coeficiente de variación (CV) para la utilidad y la relación beneficio-costos, mostraron que, generalmente, el CV tendió a disminuir conforme avanzó el

tiempo (Fig. 31). Sin embargo, los valores mínimos del CV se registraron en el día 90, coincidiendo con el tiempo óptimo de cosecha. Las distribuciones de la utilidad neta y relación beneficio-costos después de 105 días de cultivo se muestran en las figuras 32 y 33, respectivamente. Con 95 % de confianza, se espera que el sistema obtenga una utilidad entre \$-32 000 y \$488 000 pesos/ha (promedio = \$222 300 pesos/ha) y una relación beneficio-costos entre 0.93 y 1.79 (promedio = 1.39). Se estima que para el ciclo de primavera-verano existe 6.2 % de probabilidad de obtener pérdidas.

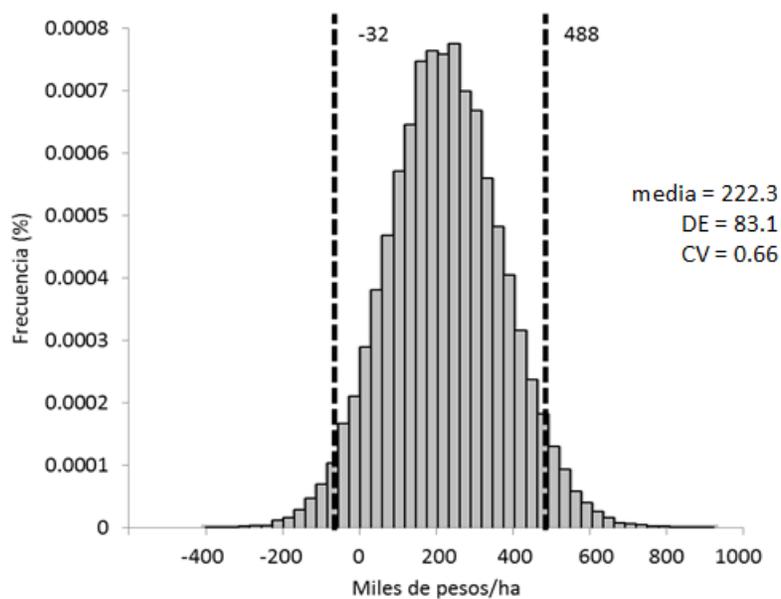


**Figura 30.** Ingresos, costos totales, utilidad y relación beneficio-costos durante el ciclo primavera-verano.

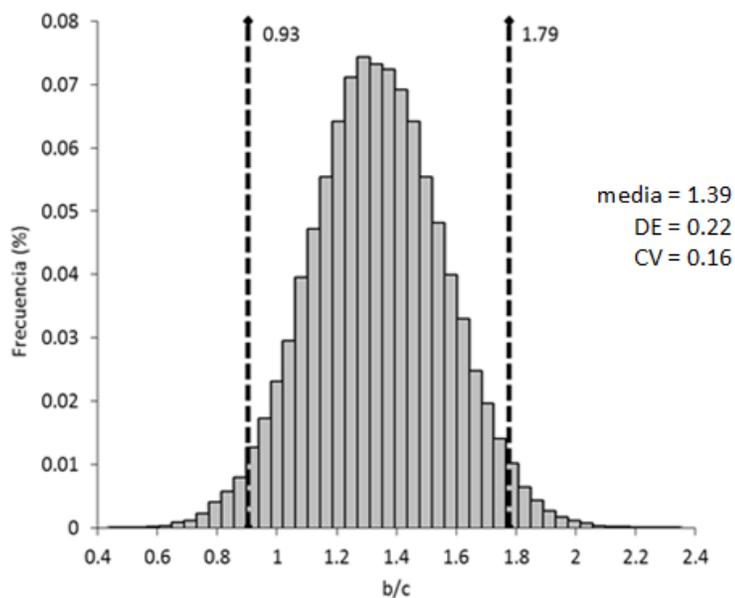


**Figura 31.** Valores del coeficiente de variación (CV) de la utilidad y de la relación beneficio-costos (b/c) durante el ciclo primavera-verano.

Los valores totales por hectárea de los costos operativos al tiempo de cosecha para el ciclo primavera-verano se enlistan en la tabla VI.



**Figura 32.** Distribución de probabilidad de la utilidad en el tiempo de cosecha para el ciclo primavera-verano. Las líneas interrumpidas indican un intervalo de 95 % de confianza.



**Figura 33.** Distribución de probabilidad de la relación beneficio-costos (b/c) al tiempo de cosecha para el ciclo primavera-verano. Las líneas interrumpidas indican un intervalo de 95 % de confianza.

**Tabla VI.** Costos operativos calculados con el modelo bioeconómico para el ciclo primavera-verano a la cosecha por hectárea.

Costo operativo	Pesos/ha	%
Alimento ( $cA_t$ )	440225.3	63.9
Postlarva ( $cPL$ )	80403.8	11.7
Personal ( $cper$ )	44264.8	6.4
Energía-aireación ( $ce_t$ )	38241.7	5.5
Mantenimiento ( $cma$ )	48310.0	7.0
Cosecha ( $cc$ )	31167.2	4.5
Probiótico ( $cp_t$ )	3813.4	0.6
Fertilizante ( $cfer$ )	1033.6	0.1
Reemplazo de agua ( $cra_t$ )	837.5	0.1
Preparación estanque ( $cpe$ )	516.8	0.1
TOTAL	688814.3	100

Los resultados del análisis de sensibilidad para el cálculo de la utilidad neta al tiempo de cosecha del ciclo primavera-verano se muestran en la tabla VII. Los factores que tienen mayor impacto en la utilidad son: los precios de venta del camarón de 13 y 12 g, seguido del peso final individual del camarón. El oxígeno y la temperatura tuvieron un impacto intermedio, mientras que la tasa de mortalidad tuvo un efecto bajo.

**Tabla VII.** Análisis de sensibilidad de la utilidad después de 105 días de cultivo para el ciclo primavera-verano. Los parámetros se presentan en orden descendente de acuerdo con el valor absoluto del coeficiente de regresión.

Parámetro	Coefficiente de regresión
$P$ 13g	0.47
$P$ 14 g	0.41
$w_f$	0.18
$P$ 12 g	0.09
$OD$	0.08
$T$	0.07
$cPL$	-0.05
$z$	-0.05
$k$	-0.04
$P$ 15g	0.02

$P$  11g, precio del camarón de 11g;  $P$  12 g, precio del camarón de 12g;  $w_f$ , peso final;  $P$  13g, precio del camarón de 13g;  $OD$ , oxígeno disuelto;  $T$ , temperatura;  $cPL$ , costo de la postlarva;  $z$ , tasa de mortalidad;  $k$ , tasa de crecimiento;  $P$  15g, precio del camarón de 15g.

## 7.5 Modelo Bioeconómico (ciclo verano-otoño)

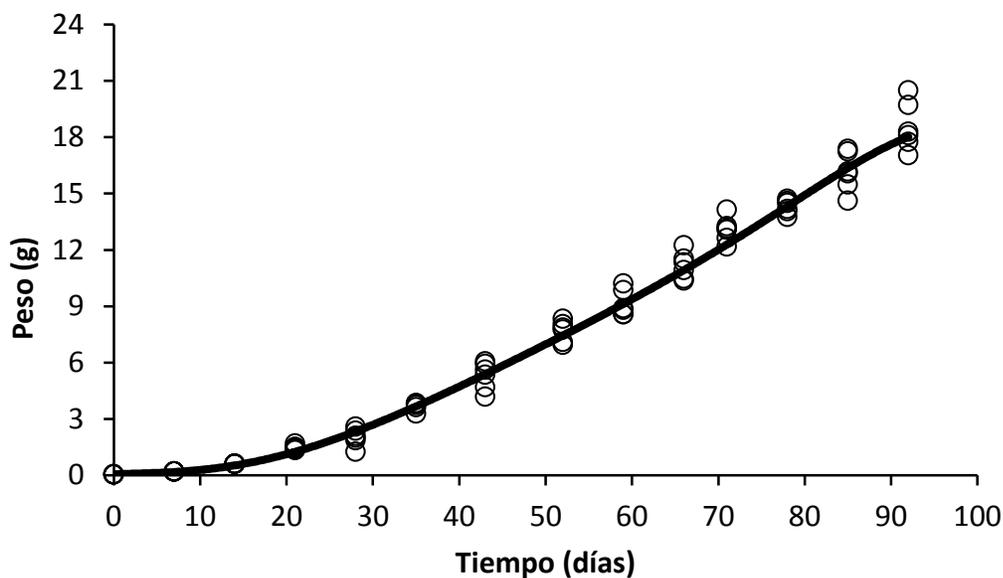
### 7.5.1 Submodelo biológico

La ecuación de crecimiento de Ruiz-Velazco *et al.* (2010) se ajustó adecuadamente a los datos de crecimiento y se obtuvieron resultados significativos en términos del análisis de varianza de la regresión (Fig. 34). Con 95 % de confianza, se estimó que el peso individual final ( $w_f$ ) debería estar entre 16.72 y 19.16 g, con un promedio de 18.14 g. Con el mismo porcentaje de confianza se estimó que la sobrevivencia debería estar entre 80.3 y 83.9%, promediando 81.4%.

Los resultados mostraron que el coeficiente de crecimiento ( $k$ ) está negativamente relacionado con la temperatura del agua ( $T$ ) ( $r^2 = 0.93$ ) y que el peso final ( $w_f$ ) está directamente relacionado con la concentración de oxígeno disuelto ( $OD$ ) ( $r^2= 0.92$ ) y con la tasa de mortalidad ( $z$ ) ( $r^2= 0.92$ ). Las relaciones establecidas entre ellos son:

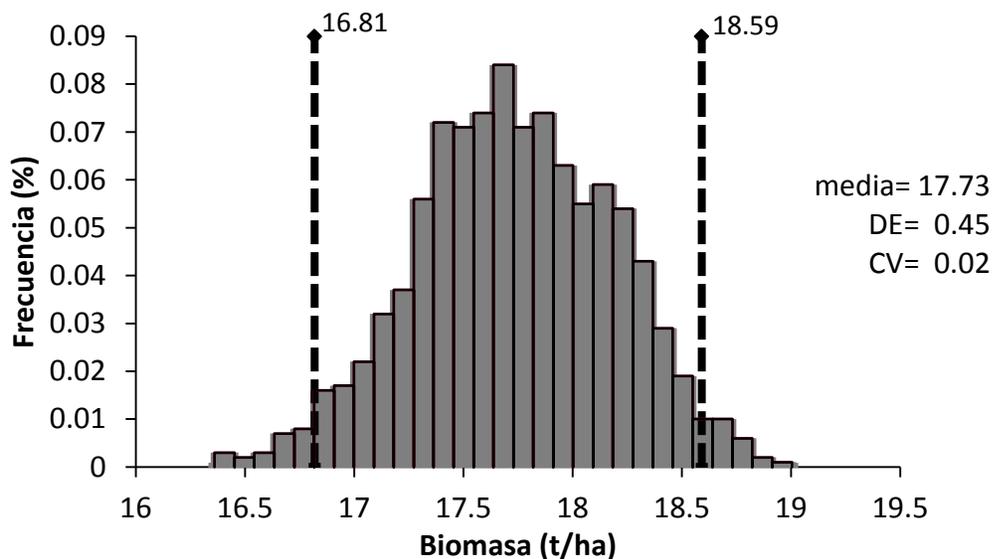
$$k = 1.3139 - 0.0105 (T)$$

$$w_f = 1.0891 + (3321.069 \cdot z) + (2.2626 \cdot DO)$$



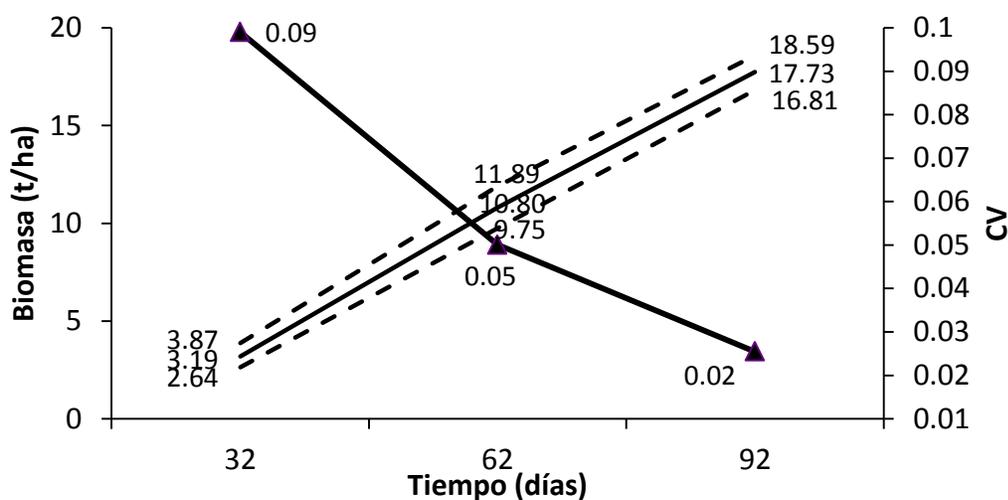
**Figura 34.** Ajuste de la ecuación de crecimiento a los valores de la base de datos en el ciclo verano-otoño.

La distribución de la biomasa después de 92 días de cultivo se presenta en la figura 35. Con un 95% de confianza, el sistema de cultivo foto-heterotrófico produce entre 16.81 – 18.59 t/ha (promedio = 17.73 t/ha).



**Figura 35.** Distribución de probabilidad de la biomasa después de 92 días en el ciclo verano-otoño. Las líneas interrumpidas indican un intervalo de 95 % de confianza

Los resultados del análisis del coeficiente de variación (CV) de la biomasa mostraron que disminuyó con el paso del tiempo (Fig. 36).



**Figura 36.** Biomasa y su coeficiente de variación (CV, triángulos) calculadas para el ciclo verano-otoño. Las líneas interrumpidas indican intervalos de 95 % de confianza.

Los resultados del análisis de sensibilidad para el cálculo de la biomasa a los 32, 62 y 92 días de cultivo se presentan en la tabla VIII.

**Tabla VIII.** Análisis de sensibilidad de la biomasa después de 32, 62 y 92 días de cultivo para el ciclo verano-otoño. Los parámetros se presentan en orden descendente de acuerdo con el valor absoluto del coeficiente de regresión.

Tiempo (días)	Parámetro	Coeficiente de regresión
32	$k$	-0.68
	T	0.67
	OD	0.20
	$w_f$	0.11
62	$k$	-0.59
	T	0.58
	OD	0.40
	$w_f$	0.22
92	OD	0.77
	$w_f$	0.42

T, temperatura;  $k$ , coeficiente de crecimiento;  $w_f$ , peso final; OD, oxígeno disuelto.

De acuerdo con el análisis, el coeficiente de crecimiento y la temperatura fueron los factores más importantes que influenciaron la variabilidad de la producción de camarón. La concentración de oxígeno disuelto y el peso individual final ganaron importancia al final del cultivo, mientras que la tasa de mortalidad tuvo nula relevancia durante el ciclo de producción.

### 7.5.2 Sub-modelo del factor de conversión alimenticia (FCA)

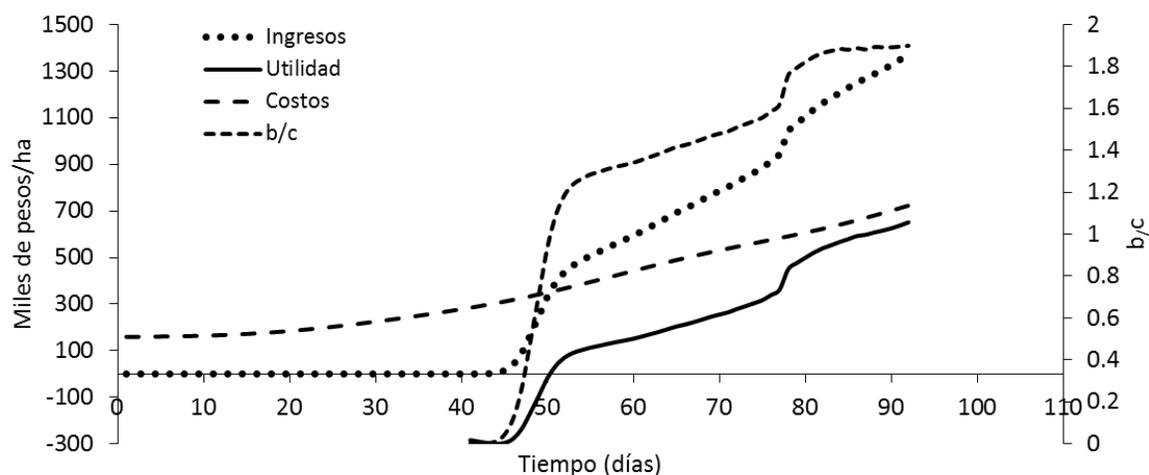
La ecuación resultante para el cálculo del factor de conversión alimenticia para el ciclo verano-otoño es:

$$FCA = 0.9209 + (0.0077 \cdot t) - 0.0413 \cdot \text{Sen}(2\pi t / 38.2618) + 6.9397$$

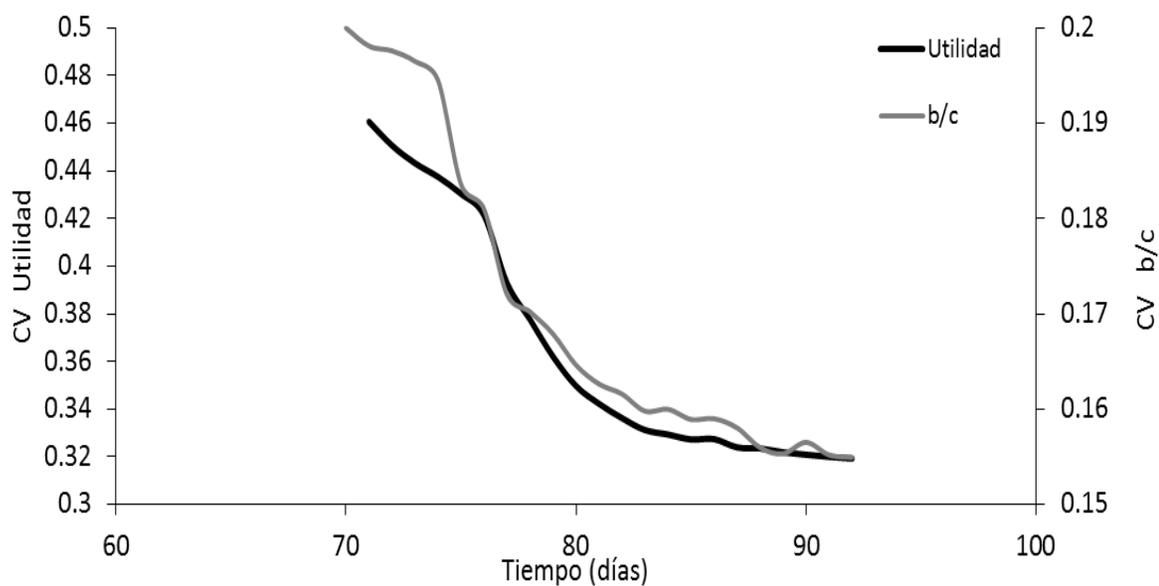
### 7.5.3 Sub-modelo económico

Los valores de la utilidad, costos totales, ingresos y relación beneficio-costos para el ciclo verano-otoño se presentan en la figura 37. El ingreso se calculó por primera vez hasta el día 45 del cultivo, cuando el camarón adquirió talla comercial. Sin embargo, utilidades positivas se calcularon hasta el día 50, cuando los ingresos superaron a los costos de producción. El tiempo óptimo de cosecha ocurrió al día 92 (final del ensayo), cuando se obtuvieron los valores máximos de utilidad y de la relación beneficio-costos. Los resultados del análisis del coeficiente de variación (CV) de ambos indicadores económicos mostraron que el CV tendió a disminuir conforme al transcurso del tiempo (Fig. 38), y que el valor mínimo se registró también al día 92.

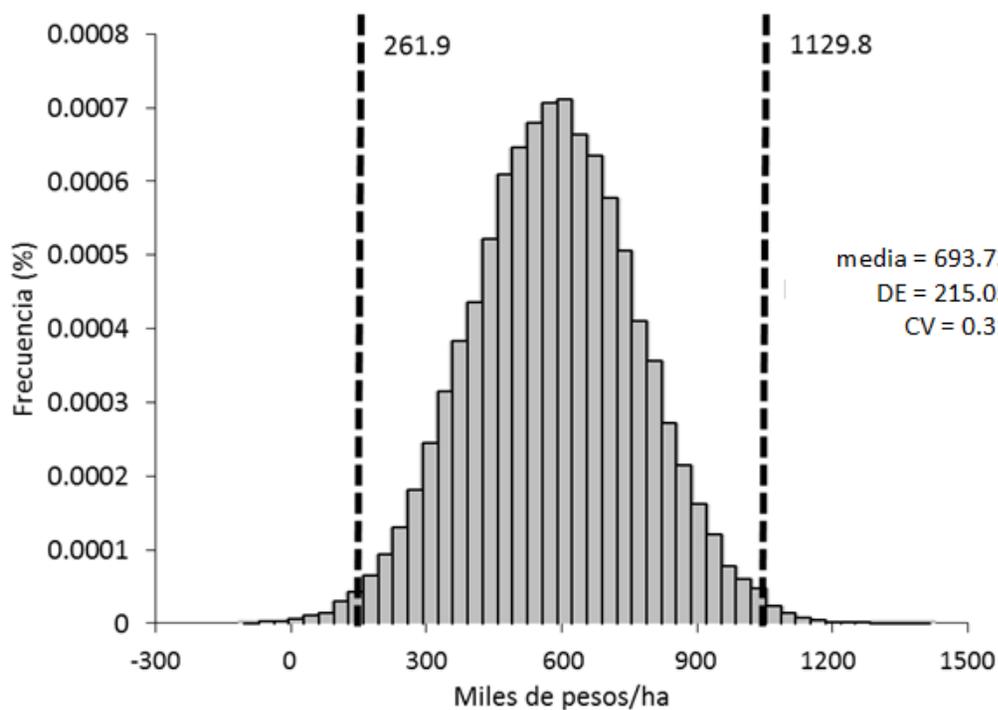
Las distribuciones de probabilidad de la utilidad y de la relación beneficio-costos al tiempo de cosecha se muestran en las figuras 39 y 40, respectivamente. Con 95 % de confianza, el sistema obtendrá una utilidad entre \$261 900 y \$1 129 800 pesos/ha (promedio = \$693 730 pesos/ha) y una relación beneficio-costos entre 1.35 y 2.53 (promedio = 1.93) en el ciclo verano-otoño.



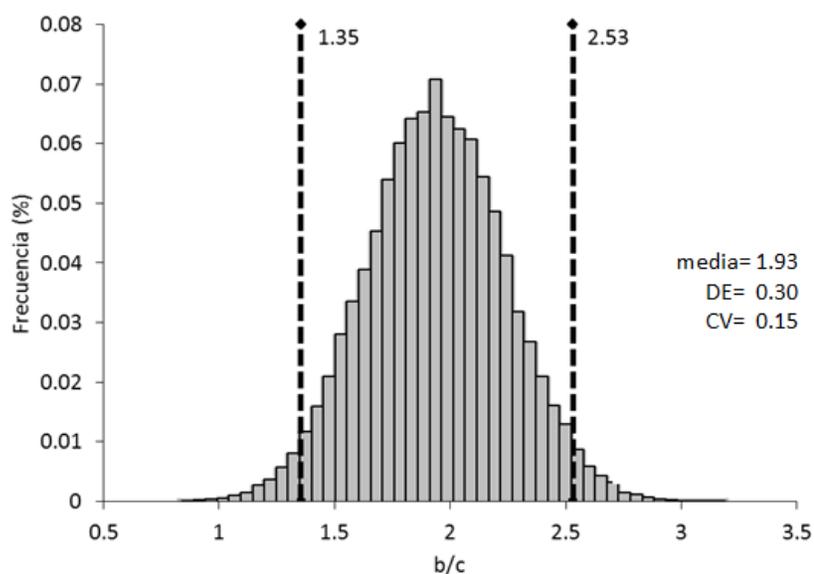
**Figuras 37.** Ingresos, costos totales, utilidad y relación beneficio-costos (b/c) durante el ciclo verano-otoño.



**Figura 38.** Valores del coeficiente de variación (CV) de la utilidad y de la relación beneficio-costos (b/c) durante el ciclo verano-otoño.



**Figura 39.** Distribución de probabilidad de la utilidad en el tiempo de cosecha para el ciclo de verano-otoño. Las líneas interrumpidas indican un intervalo de 95 % de confianza.



**Figura 40.** Distribución de la relación beneficio-costo (b/c) en el tiempo de cosecha para el ciclo de verano-otoño. Las líneas interrumpidas indican un intervalo de 95 % de confianza.

Los valores totales de los costos de operación al tiempo de cosecha para el ciclo de verano-otoño se enlistan en la tabla IX.

**Tabla IX.** Costos operativos calculados con el modelo bioeconómico para el ciclo de verano-otoño al tiempo de cosecha.

Costo operativo	Pesos/ha	%
Alimento ( $cA_t$ )	546592.8	70.3
Postlarva ( $cPL$ )	80403.8	10.3
Personal ( $cper$ )	38794.1	4.9
Energía- aireación ( $ce_t$ )	26623.0	3.4
Mantenimiento ( $cma$ )	48310.0	6.2
Cosecha ( $cc$ )	31167.2	4.0
Probiótico ( $cp_t$ )	3367.9	0.4
Fertilizante ( $cfer$ )	1033.6	0.1
Reemplazo de agua ( $cra_t$ )	730.6	0.1
Preparación estanque ( $cpe$ )	516.8	0.1
TOTAL	777540.0	100

Los resultados del análisis de sensibilidad de la utilidad al tiempo de cosecha para el ciclo de verano-otoño se muestran en la tabla X.

**Tabla X.** Análisis de sensibilidad de la utilidad después de 92 días de cultivo para el ciclo verano-otoño. Los parámetros se presentan en orden descendente de acuerdo con el valor absoluto del coeficiente de regresión.

Parámetro	Coeficiente de regresión
<i>P</i> 18g	0.46
<i>P</i> 19g	0.39
<i>P</i> 17 g	0.11
<i>OD</i>	0.10
<i>w<sub>f</sub></i>	0.05
<i>cPL</i>	-0.02
<i>P</i> 20g	0.02
<i>P</i> 16g	0.01

*P* 18g, precio del camarón de 18g; *P* 19g, precio del camarón de 19g; *P* 17g, precio del camarón de 17g; *OD*, oxígeno disuelto; *w<sub>f</sub>*, peso final; *cPL*, costo de la postlarva; *T*, temperatura; *P* 20g, precio del camarón de 20g; *P* 16g, precio del camarón de 16g.

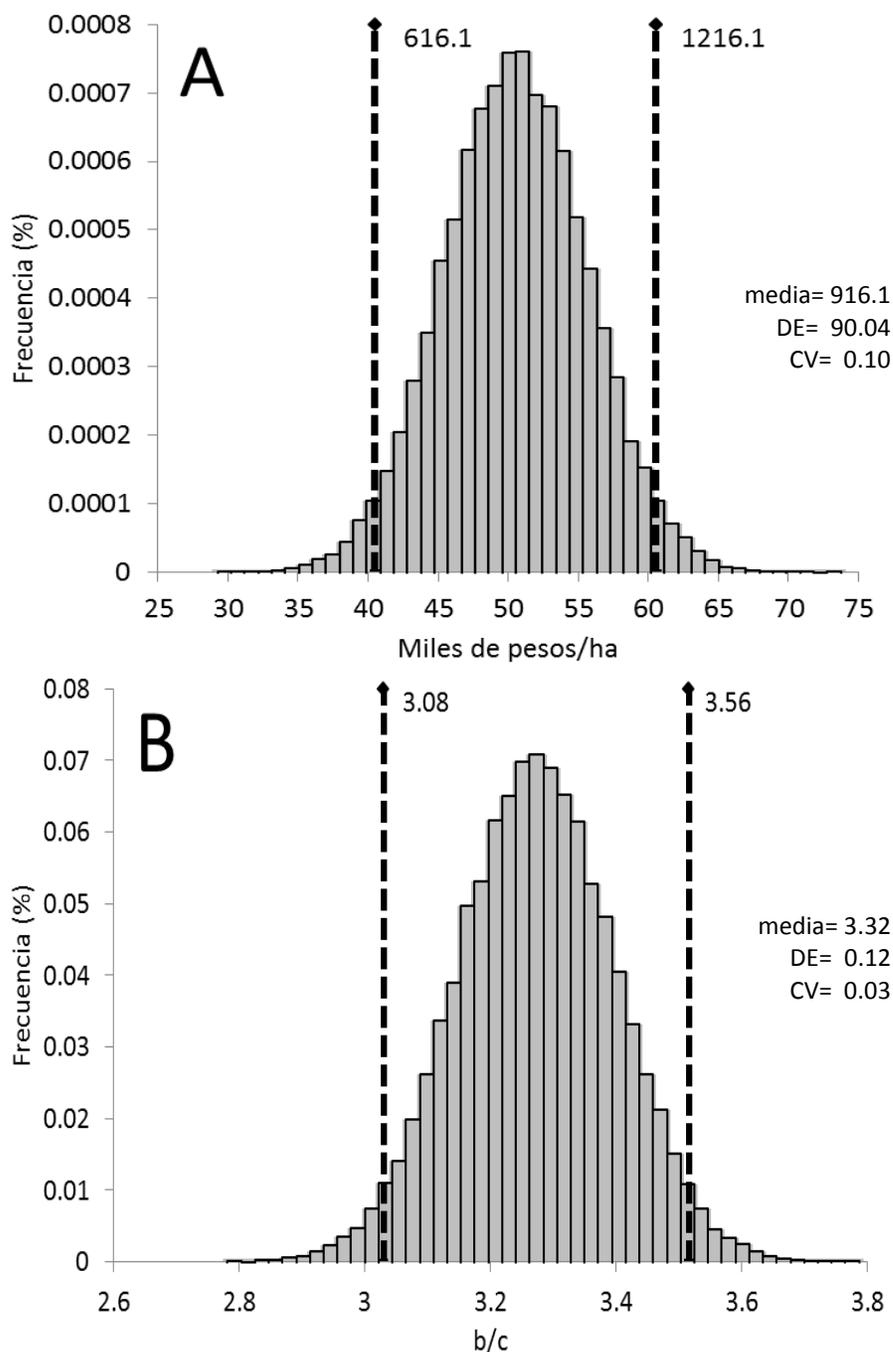
De acuerdo con el análisis, los precios del camarón para las tallas 17 a la 19 g fueron los factores que más influyeron en la variabilidad de las utilidades, mientras que los parámetros de producción y de calidad del agua y el costo de la postlarva tuvieron influencia media o nula.

## 7.6 Análisis económico de seis estanques y análisis anual de producción

Al incrementar a seis el número de estanques analizados, se encontró que el coeficiente de variación del promedio de la utilidad se redujo de 0.66 a 0.27 y de 0.31 a 0.11 para ambos ciclos de producción, respectivamente. Para una granja integrada por seis estanques, se tiene 95 % de confianza de que se generarán entre \$111 550 y \$334 300 pesos/ha (promedio = \$222 930 pesos/ha) para el ciclo de primavera-verano, y entre \$508 000 y \$814 000 pesos/ha (promedio = \$690 000 pesos/ha) para el ciclo verano-otoño.

Las distribuciones de probabilidad de la utilidad anual y la relación beneficio-costos anual (al sumar ambos ciclos) al tiempo de cosecha se presenta en la figura 41. Con un 95 % de confianza, el cultivo generará anualmente entre \$616 100 y \$1 216 100 pesos/ha

(promedio = \$916 100 pesos/ha), con una relación beneficio-costo entre 3.08 y 3.56 (promedio = 3.32).



**Figura 41.** Distribución de la utilidad anual (A) y relación beneficio-costo (b/c) anual (B) al tiempo de cosecha. Las líneas interrumpidas indican un intervalo de 95 % de confianza.

### 7.7 Comparación de calidad de agua, producción y utilidades entre los ciclos de producción.

La tabla XI muestra los resultados de las pruebas t-Student indicando diferencias significativas ( $P < 0.05$ ), en los parámetros de calidad de agua (temperatura, oxígeno disuelto, pH y salinidad), zootécnicos (biomasa, peso promedio y sobrevivencia) y de utilidad entre los dos ciclos de cultivo al tiempo de cosecha.

**Tabla XI.** Valores promedio ( $\pm$  error estándar) de los parámetros de calidad de agua, zootécnicos y económicos para los ciclos primavera-verano y verano-otoño.

Promedio $\pm$ Error Estándar	primavera-verano	verano-otoño
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	$28.41 \pm 0.19^{\text{a}}$	$31.62 \pm 0.10^{\text{b}}$
Oxígeno disuelto (mg/L)	$4.86 \pm 0.05^{\text{a}}$	$4.45 \pm 0.05^{\text{b}}$
pH	$7.96 \pm 0.03^{\text{a}}$	$7.82 \pm 0.02^{\text{b}}$
Salinidad (g/L)	$45.23 \pm 0.16^{\text{a}}$	$46.35 \pm 0.07^{\text{b}}$
Peso promedio (g)	$13.33 \pm 0.22^{\text{a}}$	$18.58 \pm 0.52^{\text{b}}$
Biomasa (t/ha)	$13.44 \pm 0.02^{\text{a}}$	$18.09 \pm 0.41^{\text{b}}$
Sobrevivencia (%)	$84.26 \pm 0.48^{\text{a}}$	$81.21 \pm 0.53^{\text{b}}$
Utilidad (\$/ha)	$222\ 310 \pm 8\ 120^{\text{a}}$	$693\ 730 \pm 21\ 500^{\text{b}}$

Valores promedio con diferente letra son estadísticamente diferentes ( $P < 0.05$ ).

La temperatura promedio para el ciclo primavera-verano fue  $3.2\ ^{\circ}\text{C}$  menor que para el ciclo verano-otoño, mientras que los valores de la concentración de oxígeno disuelto, pH y salinidad, fueron superiores a los registrados en el ciclo verano-otoño. Los valores del peso promedio individual y biomasa, así como el de utilidad fueron superiores para el ciclo de verano-otoño, mientras que la sobrevivencia fue mejor en el ciclo de primavera-verano.

## 8. DISCUSIÓN

### 8.1 Parámetros de calidad de agua

La temperatura es un parámetro que afecta directamente el metabolismo y el crecimiento del camarón (Ponce-Palafox *et al.*, 1997). En la presente investigación, la temperatura promedio registrada a las 8 am para las unidades experimentales en el ciclo primavera-verano varió entre 24-32 °C, con la temperatura más baja escasamente por debajo del óptimo recomendado por Boyd (2001) (25-32°C) para el crecimiento del camarón blanco *L. vannamei*. Otras evaluaciones han reportado que las mejores tasas de crecimiento y sobrevivencias se obtienen a temperaturas entre 30 y 32°C (Ponce-Palafox *et al.*, 1997; Wyban *et al.*, 1995)

La baja concentración de oxígeno disuelto ha sido catalogada como la principal causa de estrés, bajo apetito, crecimiento lento, susceptibilidad a enfermedades y mortalidad en los cultivos acuícolas (Boyd y Hanson, 2010). Sonnenholzner (2014) reportó que para el cultivo de camarón, los niveles críticos de oxígeno disuelto se encuentran entre 1-3 mg/L. En los sistemas intensivos con nulo recambio de agua, la aireación mecánica es fundamental, tanto para la respiración de los organismos cultivados como para la oxidación, suspensión y circulación del agua (Boyd, 2001). Debido a la aireación, en este estudio los niveles de oxígeno se mantuvieron por arriba de dichos niveles críticos durante todo el ciclo de producción. No obstante, se observó una tendencia a la disminución de sus concentraciones conforme avanzó el cultivo. Dicha tendencia puede explicarse como una consecuencia del incremento en la biomasa del camarón y del consiguiente aumento en el consumo de oxígeno para la respiración, la oxidación de compuestos metabólicos por los flóculos (Egna y Boyd, 1997), y la disminución de la solubilidad del oxígeno a medida que la temperatura del agua fue en ascenso (Boyd, 2001).

La región donde se ubican los estanques usados para la presente evaluación, se caracteriza por elevadas temperaturas, clima seco, alta irradiación solar (791-799 cal/cm/día) (INIFAP, 2017) y alta evaporación durante la mayor parte del año. La tasa de evaporación promedio durante el ensayo fue de casi 1 cm por día, motivo por el cual la salinidad ascendió hasta 43-47 g/L. Se ha reportado que en condiciones de alta salinidad, el

camarón tiende a gastar más energía con la finalidad de mantener la osmolaridad en hemolinfa y el crecimiento puede verse comprometido (Bucke *et al.*, 2006; Díaz *et al.*, 2004; Villarreal y Rivera, 1993).

No obstante, Ayaz *et al.* (2015) reportaron muy buenas sobrevivencias (100-95%) y tasas de crecimiento específico (1.54-1.99) en sistemas con agua hipersalina (35-45 g/L) en un cultivo de 62 días con postlarvas de *L. vannamei*. Robertson *et al.* (1993) reportaron que, para juveniles de 5.3 g cultivados 42 días en un ambiente hipersalino de 46 g/L, se alcanzaron  $17.5 \pm 0.3$  g con una sobrevivencia del 87%. Bartlett *et al.* (1990) y Martínez-Córdova *et al.* (1997) concluyeron que el crecimiento no se redujo en un rango de salinidad de 30-45 g/L. Pérez-Velázquez *et al.* (2007) informaron sobre una sobrevivencia de 88 % en juveniles de *L. vannamei* mantenidos en un ambiente hipersalino de 50 g/L. Más aun, Sui *et al.* (2015) reportaron una mejor sobrevivencia (77%) a 60 g/L que a 30 g/L de salinidad (61%) en postlarvas de *L. vannamei*. Mientras el rango de temperatura sea óptimo, la tolerancia a la salinidad es amplia y es posible obtener buenas tasas de crecimiento entre 25-45 g/L (Ponce-Palafox *et al.*, 1997).

La capacidad de *L. vannamei* para regular cambios en la osmolaridad, dependiendo de las condiciones de cultivo, es significativa, como evidencian numerosos reportes que refieren tasas de crecimiento aceptables a diferentes salinidades y densidades de cultivo (Tabla XII). En comparación con lo referido por dichos autores, los resultados obtenidos para el ciclo primavera-verano en este estudio indican un desempeño productivo aceptable del camarón blanco en condiciones hipersalinas en el sistema de cultivo foto-heterotrófico, con mínima reposición de agua en zonas semiáridas.

El valor óptimo de pH para el cultivo de *L. vannamei* se encuentra entre 6 y 9 (Boyd, 2001). Los valores de pH registrados en el ensayo variaron entre 7.6 y 8.5, por lo que se puede considerar que no fue un factor de riesgo para los organismos. La estabilidad en el pH pudo deberse al efecto amortiguador de la alcalinidad. Boyd (2001) reporta que, en estanques con una elevada alcalinidad (como la reportada en este estudio, 100-300 mg/L CaCO<sub>3</sub>) generalmente se presentan variaciones de pH menos amplias, manteniendo

condiciones más estables y consistentes. Se ha demostrado que el camarón presenta un mejor crecimiento en alcalinidades superiores a 100 mg/L CaCO<sub>3</sub> (Boyd y Daniels, 1994) posiblemente debido a una mayor disponibilidad de carbonatos utilizados para la formación del exoesqueleto (Solano-Motoche, 2003). Además, la condición hipersalina, provoca la presencia de concentraciones de cationes divalentes en el agua (Ca y Mg principalmente), lo suficientemente altas para mantener elevados niveles de alcalinidad.

**Tabla XII.** Densidad (D), salinidad, peso inicial (P<sub>I</sub>), tasa de crecimiento (TC) y promedios ( $\pm$  DE) de sobrevivencia (S), peso final (P<sub>F</sub>) referidos por diversos estudios de cultivo de *L. vannamei*.

D (PL/m <sup>2</sup> )	Salinidad (g/L)	P <sub>I</sub> (g)	TC (g/semana)	S (%)	P <sub>F</sub> (g)	Referencia
30	46	5.3	2.03	87 $\pm$ 5	17.5 $\pm$ 0.9	Robertson <i>et al.</i> , 1993
14	35	1.6	1.86	77 $\pm$ 6	10.9 $\pm$ 0.3	Bray, <i>et al.</i> , 1997
	49		1.64	78 $\pm$ 4	9.8 $\pm$ 0.4	
20	43	0.01	1.05	55 $\pm$ 6	14.7 $\pm$ 0.8	Martínez-Cordova, <i>et al.</i> , 1997
15	35	0.001	1.06	87 $\pm$ 2	30.9 $\pm$ 2.0	Casillas-Hernández, <i>et al.</i> , 2007
56	35	0.36	0.66	88 $\pm$ 26	3.40 $\pm$ 0.3	Pérez-Velázquez <i>et al.</i> , 2007
	50		0.54	88 $\pm$ 30	2.84 $\pm$ 0.5	
95	35	0.03	0.12	100 $\pm$ 0	1.15 $\pm$ 0.0	Ayaz, <i>et al.</i> , 2015
	40	0.02	0.14	96 $\pm$ 1	1.29 $\pm$ 0.1	
	45	0.02	0.11	95 $\pm$ 2	1.01 $\pm$ 0.0	
	50	0.03	0.11	74 $\pm$ 8	0.98 $\pm$ 0.0	
150	30	0.09	0.38	61 $\pm$ 8	2.28	Sui <i>et al.</i> , 2015
	60		0.26	73 $\pm$ 2	1.56	
120	45	0.01	0.89	84 $\pm$ 1	13.3 $\pm$ 0.4	Presente estudio

Los valores máximos de amonio (1.3 mg/L) y nitritos (0.19 mg/L) registrados durante el ensayo, estuvieron por debajo de los límites máximos permisibles para el cultivo de *L. vannamei* (0.2-2 mg/L y <0.23 mg/L, respectivamente) (Boyd 2001, 2002). Se han reportado bajas concentraciones de amonio y nitrito en sistemas sin recambio de agua, como resultado de la remoción de estos compuestos por los flóculos microbianos (Burford *et al.*, 2004; Rajkumar *et al.*, 2015; Vinatea *et al.*, 2010; Wasielesky *et al.*, 2006). La

concentración de amonio no ionizado en este estudio varió entre 0.005 y 0.045 mg/L y estuvo muy por debajo del límite máximo reportado como crítico para la especie (0.1 mg/L) (Boyd, 2001). Boyd (1982) considera que el amonio no ionizado es dependiente del pH, incrementando su concentración a medida que el pH aumenta. La mayor concentración de amonio no ionizado ocurrió a principios del cultivo, probablemente provocado, tanto por la fertilización inicial (incluyendo fosfato mono-amónico y urea), como por el efecto del pH, ya que éste, fue más elevado al inicio del cultivo que en el resto del mismo.

La relativamente alta concentración de nitratos (2.5- 4 mg/L) comparada con los nitritos (0.01-0.19 mg/L) observada en este estudio, sugieren un proceso eficiente de nitrificación en el sistema de cultivo, debido a la adecuada oxigenación de la columna de agua (Avnimelech, 2012; Rajkumar *et al.*, 2015). En el sistema foto-heterotrófico, al evitar el uso de insumos que sirvan como fuente de carbono orgánico suplementario (melaza, por ejemplo), mejora el proceso de nitrificación (Zhu y Chen, 2001) y reduce costos operativos al evitar gastos asociados a la compra de dichos suplementos y posteriormente tener que ser removidos por equipo y/o infraestructura costosa.

Para el caso del fosfato, se observaron concentraciones superiores (0.45 – 5 mg/L) a lo referido por Milstein *et al.* (2005) para un sistema extensivo (0.13 mg/L), por Casillas-Hernández *et al.* (2007) para un sistema semi-intensivo (0.49 mg/L) y por Burford *et al.* (2003) para un sistema intensivo (0.57 mg/L). A pesar de que el fosfato no se ha asociado con problemas de toxicidad en camarones, es un nutriente limitante para la productividad del fitoplancton y puede llegar a ocasionar problemas de eutrofización en los estanques (Egna y Boyd, 1997). Una de las posibles causas de los altos niveles de fosfato, puede ser el hecho de que, en estanques tradicionales de tierra, el fósforo es capturado en gran medida por el sedimento mediante reacciones químicas, mientras que en estanques recubiertos con geo-membrana de polietileno, con un adecuado movimiento del agua provocado por la aireación mecánica, la materia orgánica se mantiene en suspensión (Boyd, 1998), provocando que el fósforo se mantenga en la columna de agua y no pueda ser capturado por el sedimento.

El valor de la DBO<sub>5</sub> se incrementó durante los primeros 50 días de cultivo, alcanzando 30 mg/L. Después de este periodo, la DBO<sub>5</sub> disminuyó como consecuencia del consumo del exceso de la materia orgánica, la cual es asimilada por el camarón (Huda *et al.*, 2013), provocando la reducción en la descarga de nutrientes hacia el medio ambiente circundante (McIntosh *et al.*, 2001). Se observó un patrón similar en los sólidos sedimentables, en donde la concentración máxima (8 mL/L) se alcanzó en el día 58, para posteriormente bajar a 5 mL/L hasta finalizar el ensayo. Lo anterior evidencia, que el sistema de aireación utilizado para el cultivo, fue suficiente para mantener en suspensión la materia orgánica, y de esta manera facilitó su aprovechamiento, tanto por la biomasa de camarón, como la biomasa microbiana en el sistema.

Al mantener salinidades superiores a 35 g/L se favorece el desarrollo de las microalgas pertenecientes al género *Nannochloropsis*, lo que aunado al movimiento del agua provocado por el sistema de aireación, limita el desarrollo de las cianobacterias y bacterias del género *Vibrio* (Cremen *et al.*, 2007). La concentración de clorofila-a (indicador de la concentración de microalgas) y la de bacterias heterótrofas en este estudio, mostraron una fuerte correlación entre sí (Fig. 20). Se ha reportado que las microalgas producen exudados orgánicos que las bacterias heterótrofas usan como sustrato (Ohara *et al.*, 1993), contribuyendo a la optimización del sistema productivo (Riquelme y Avendaño-Herrera, 2003). La concentración promedio de las bacterias heterótrofas en este ensayo fue de  $6.6 \pm 3.4 \times 10^5$  UFC/mL, la cual es dos órdenes de magnitud menor a  $4 \times 10^7$  UFC/mL reportados en un sistema de biofloc (Burford *et al.*, 2004), en donde se adicionó carbono orgánico para incrementar la relación C:N y de esa manera favorecer el desarrollo de bacterias heterótrofas (Avnimelech, 2007). En la presente investigación, al prescindir de fuentes de carbono externas al sistema, se limitó el desarrollo de *Vibrio* spp. a  $1.24 \pm 1.42 \times 10^3$  UFC/mL (Eiler *et al.*, 2007) a niveles por debajo a lo reportado en una granja intensiva en Brasil ( $2.20 \times 10^4$  UFC/mL), en un sistema tipo RAS (recirculación) (Paiva-Maia *et al.*, 2013) y muy por debajo a lo reportado como una concentración que puede causar vibriosis ( $10 \times 10^3$  UFC/mL) (Ching *et al.*, 2014).

Durante la evaluación de los cultivos, no se removieron sólidos de las unidades experimentales, aunque sí se descargaron aproximadamente 13,500 m<sup>3</sup>/ha/ciclo de agua residual. Dicho valor es considerablemente menor a 38,000 m<sup>3</sup>/ha/ciclo reportado por Thi *et al.* (2010) para una granja intensiva en Vietnam, y a 208,000 m<sup>3</sup>/ha/ciclo reportado por Casillas *et al.* (2007) para granjas de tipo semi-intensivo en el Noroeste de México. En este estudio, se obtuvo un promedio de 5.1 mL/L de sólidos sedimentables en las unidades experimentales, cuyo valor representa 69 m<sup>3</sup>/ha/ciclo de residuos sólidos para el sistema foto-heterotrófico en alta salinidad para un ciclo de primavera-verano.

Por lo que se refiere a los resultados obtenidos para el ciclo verano-otoño, la temperatura promedio registrada a las 8 am varió entre 30 y 34 °C, en promedio 3.2 °C más que en ciclo de primavera-verano (28.4 °C). Si bien las temperaturas fueron más elevadas, se mantuvieron dentro de un intervalo (4°C) más estrecho que en el ciclo de primavera-verano, en el que varió hasta 8°C. La mayor estabilidad de la temperatura en el ciclo de verano-otoño, favoreció por un lado, que los camarones crecieran más rápido (1.4 g/semana) y por otro lado, un mayor desarrollo de los flóculos microbianos (microalga-bacteria), y por ende, una mayor concentración de comunidades de zooplancton, ya que una temperatura cálida constante, beneficia su metabolismo y su desarrollo (Avnimelech, 2012; Martínez-Porchas *et al.*, 2013).

Aunado al efecto directo de la temperatura en el crecimiento del camarón, al haber una posible mayor disponibilidad de flóculos en la columna de agua, el camarón pudo consumirlos de manera más asequible y por lo tanto complementar su nutrición, lo que resultó en que su crecimiento fuera superior al que se obtuvo en el ciclo primavera-verano. Aunque la temperatura promedio máxima (34 °C) estuvo por encima del límite óptimo para la especie (32 °C) (Boyd, 2001), los camarones no evidenciaron problemas de estrés.

La concentración de oxígeno disuelto en el agua no fue afectada por el incremento en la temperatura y/o salinidad y se mantuvo dentro del rango óptimo para cultivo para la especie (Sonnenholzner, 2014) por lo que, al igual que en el ciclo primavera-verano, la estrategia de aireación fue adecuada para mantener niveles aceptables de oxígeno disuelto.

Por otro lado, al registrarse mayores temperaturas (30-34°C), se favoreció que se incrementara la tasa de evaporación en las unidades de cultivo, situación que provocó que la salinidad se incrementara hasta 50 g/L, para posteriormente reducirla con reposiciones semanales de 8 % y estabilizarla entre 44 y 47 g/L.

El valor del pH se mantuvo entre 8.2 y 7.3, dentro del rango óptimo para el cultivo (6-9) (Boyd, 2001). De igual manera que para el ciclo primavera-verano, el valor del pH mantuvo consistencia durante todo el cultivo, lo que refleja el control de los nutrientes en la columna de agua y la estabilidad general del sistema. En general, si se compara con lo referido por otros autores en la tabla XII, el desempeño productivo del camarón blanco en el sistema foto-heterotrófico en condiciones de verano-otoño, califica como uno de los mejores cuando se le cultiva en condiciones hiper-salinas.

Las comparaciones realizadas entre los ciclos de producción con las pruebas t-Student mostraron que, aun cuando se detectaron diferencias significativas en los parámetros de calidad del agua, las condiciones en ambos ciclos estuvieron dentro de lo recomendable para el cultivo de *L. vannamei*. Las mismas pruebas estadísticas mostraron que la producción de camarón fue superior en el ciclo de verano-otoño, muy probablemente a consecuencia de la poca variabilidad en la temperatura en dicho ciclo (CV = 0.034), en comparación con la registrada en el ciclo de primavera-verano (CV = 0.050). La variación de temperaturas entre estaciones del año es común en las zonas semi-desérticas (Crespi y Lovatelli, 2011). Numerosos estudios han reportado las ventajas de la temperatura elevada en el cultivo de camarón, incluyendo un efecto positivo en la tasa de crecimiento (Ponce-Palafox *et al.*, 1997). Temperaturas estables superiores a los 30 °C promueven el desarrollo de los flóculos microbianos y comunidades de zooplancton (Avnimelech, 2012; Martínez-Porchas *et al.*, 2013). Dicha condición, provoca que la cantidad de alimento disponible para el camarón se incremente y favorezca su desarrollo (Campaña-Torres *et al.*, 2009). La variación en la concentración de oxígeno disuelto se atribuyó a la variación en la productividad de las microalgas, la cual es afectada principalmente por la temperatura (Alonso-Rodríguez *et al.*, 2004). Para el ciclo de verano-otoño, temperaturas elevadas pero más estables, resultaron en una producción constante de microalgas y flóculos microbianos,

por lo que el coeficiente de variación del oxígeno disuelto fue inferior (0.122) al registrado en el ciclo primavera-verano (0.159), razón por la cual, el incremento en el caballaje para la aireación fue requerido hasta el día 60 del cultivo, cuando la concentración del oxígeno estuvo debajo de 4 mg/L. Con base en lo anterior, se puede afirmar que la hipótesis de este trabajo es correcta, en el sentido de que la calidad de agua en el ciclo primavera-verano es inferior que a la del ciclo de verano-otoño.

## 8.2 Parámetros zootécnicos

Los rendimientos promedio obtenidos en los ciclos primavera-verano y verano-otoño fueron de 13.5 y 18.1 t/ha respectivamente, superiores a las 11.2 t/ha reportadas para un sistema intensivo en Belice (Boyd y Clay, 2002) y, particularmente a lo reportado para los sistemas semi-intensivos de producción camaronícola, tanto nacional como mundial (0.9-3 t/ha) (Boyd y Clay, 2002; ISAPESCA, 2017; SAGARPA, 2009). Taw *et al.* (2016) reportó rendimientos similares (16-21 t/ha) en Arabia Saudita, en un sistema intensivo hiper-salino (42-49.5 g/L) a cielo abierto. Sin embargo, utilizaron un recambio de agua semanal de entre 20-60% después de 60 días para mantener la salinidad en los estanques de cultivo.

La talla del camarón reportada como comercial varía entre 10 - 20 g y está regida principalmente por la demanda del producto (McIntosh *et al.*, 2001). En nuestras evaluaciones, los camarones alcanzaron tallas medias de 13.4 g y 18.6 g en 15 y 13 semanas de cultivo para los ciclos primavera-verano y verano-otoño, respectivamente, con tasas de crecimiento de 0.9 y 1.4 g/semana, comparables con la referida por Samocha (2007), quien considera 1.2 g/semana como tasa de crecimiento óptima los cultivos semi-intensivos de camarón blanco, a densidades de cultivo bajas, altos recambios de agua y generalmente con salinidades inferiores a las mantenidas en este estudio.

Venero *et al.* (2009) indican que, para cultivos intensivos de camarón, valores del FCA entre 1.2 y 2.5, se consideran exitosos. Por otro lado, en condiciones de hipersalinidad, el gasto de energía para el metabolismo rutinario del camarón se incrementa (Villarreal *et al.*, 2003). Tomando en cuenta lo anterior, puede afirmarse que, los valores de FCA obtenidos en el presente estudio (1.51 y 1.52 para los ciclos primavera-verano y

verano-otoño, respectivamente) fueron aceptables, y para lo que, muy posiblemente, la contribución del biofloc en la alimentación del camarón fue significativa (Avnimelech, 2012; Chamberlain *et al.*, 2001; Tacon, 2000). El sistema foto-heterotrófico es una innovadora tecnología que ayuda a reducir el FCA y las descargas ricas en nutrientes que pueden impactar el medio ambiente (Villarreal, 2005).

Es importante resaltar que, en Baja California Sur, la elevada radiación solar provoca que en sistemas a cielo abierto, se promueva el desarrollo fototrófico (microalgas). Sin embargo, la tecnología foto-heterotrófica no requiere la adición de carbono orgánico suplementario (melaza, por ejemplo), que se ha reportado como indispensable para mantener el desarrollo de las bacterias heterótrofas (Avnimelech 2012; Valenzuela-Jiménez y Durruti-Lagunes, 2013).

La reposición de agua que se pierde por evaporación (sin recambio) y la constante aireación mecánica usada en el sistema foto-heterotrófico, promueve el desarrollo de comunidades microbianas (Ray *et al.*, 2011), que contribuyen a degradar materia orgánica y otros residuales (Kumaraguro *et al.*, 2009). El consumo de la materia orgánica por parte de la comunidad microbiana y su eventual consumo por parte de la biomasa de camarón, provoca como resultado un sistema eficiente de auto-limpieza, que limita la descarga de residuos al medio ambiente (Moreno-Figueroa *et al.*, 2017). Las sobrevivencias registradas para los ciclos primavera-verano y verano-otoño fueron de 84% y 81% respectivamente, siendo ligeramente superiores al valor máximo de sobrevivencia histórico reportado para granjas de tipo semi-intensivo en el noroeste del país (80%) (SAGARPA, 2009).

### **8.3 Requerimientos de agua y electricidad**

Los requerimientos de agua y de electricidad para producir un kilogramo de camarón son buenos indicadores de la eficiencia del sistema de cultivo (Boyd y Clay, 2002). Casillas *et al.* (2007) reportaron que se ocupan 71.5 m<sup>3</sup> de agua para producir 1 kg de camarón en un ciclo de 203 días, utilizando una densidad de 15 PL/m<sup>2</sup> en un sistema semi-intensivo en Sonora, México. Así mismo, Boyd y Clay (2002) reportaron que en un sistema intensivo en

Belice, únicamente requirieron  $1 \text{ m}^3$  de agua para producir un kilogramo de camarón, en un ciclo de 139 días y utilizando una densidad de  $120 \text{ PL/m}^2$ . Para el presente trabajo, se utilizaron 2.7 (ciclo primavera-verano) y  $2.0 \text{ m}^3$  (ciclo verano-otoño) de agua por kilogramo de camarón producido, requerimientos inferiores a los referidos para otros sistemas de cultivo.

Por otro lado, Boyd y Clay (2002) reportaron un requerimiento eléctrico de 4.5 kW para producir 1 kg de camarón cuando la salinidad es de 29 g/L, requerimiento similar al del presente estudio para el ciclo de primavera-verano (4.7 kW/Kg de camarón), aunque con salinidades y temperaturas superiores. Más aun, durante el ciclo verano-otoño, se logró reducir el requerimiento eléctrico a 2.5 kW/Kg, como resultado del ahorro de energía eléctrica para el funcionamiento de los aireadores, ya que únicamente se utilizó el equivalente a 20 HP/ha durante los primeros 60 días del cultivo, manteniendo una capacidad de carga de aproximadamente 10.3 t/ha. En general, un uso eficiente de la energía eléctrica en un cultivo como el que aquí se investigó, implica el uso de aproximadamente 20 HP de aireación por cada 10 t de biomasa de camarón.

Una de las ventajas de cultivar camarones en ambientes de alta salinidad, es la obtención de organismos con mayor pigmentación y mejor sabor (Bao *et al.*, 2012), posiblemente a consecuencia de una mayor concentración de cenizas, humedad y proteína en el músculo (Sui *et al.*, 2015). Aunado al sabor, la condición de hipersalinidad, provoca que los organismos cultivados sean menos susceptibles a enfermedades, debido a que el camarón incrementa la actividad catalasa (CAT), super óxido-dismutasa (SOD), fenoloxidasa y la producción de hemocitos totales como respuesta a la producción de radicales libres (Wang y Chen, 2005; Sui *et al.*, 2015).

#### **8.4 Modelo Bioeconómico**

En el presente estudio, el modelo biológico predijo satisfactoriamente la dinámica de la producción de *L. vannamei*, como consecuencia del ajuste adecuado de las ecuaciones de crecimiento y sobrevivencia, así como de los modelos estadísticos resultantes del análisis

de regresión para ambos ciclos de producción. De acuerdo al modelo, la biomasa final promedio para el ciclo primavera-verano es de 13.16 t/ha y de 17.73 t/ha para el ciclo verano-otoño, valores que se aproximan a las 13.44 y 18.1 t/ha registradas en la base de datos para ambos ciclos, respectivamente.

Las relaciones entre los parámetros del modelo de producción y la calidad de agua fueron consistentes con lo reportado por otros autores (Bett y Vinatea, 2009; Boyd y Gautier, 2000; Ponce-Palafox *et al.*, 1997; Zhang *et al.*, 2006) en lo relativo a la influencia que tiene la temperatura y el oxígeno disuelto en el crecimiento y sobrevivencia del camarón. Para ambos ciclos de producción, se encontró que el coeficiente de crecimiento ( $k$ ) estuvo inversamente relacionado con la temperatura del agua. En la ecuación de crecimiento propuesto por Ruiz-Velazco *et al.* (2010), valores bajos de  $k$  indican un rápido crecimiento en la primera etapa de cultivo y los resultados indican una influencia positiva de las temperaturas altas en las primeras etapas de desarrollo del camarón. Sin embargo, como lo indica el análisis de sensibilidad, con el paso del tiempo, esta influencia positiva de la temperatura tendió a disminuir y la relevancia de la variabilidad de la ganancia en peso y la concentración de oxígeno disuelto se incrementaron.

En el ciclo primavera-verano se encontró que la tasa de mortalidad está relacionada inversamente con la concentración del oxígeno disuelto, indicando un efecto negativo de las bajas concentraciones del mismo en la sobrevivencia del camarón, coincidiendo con lo referido por Allan y Maguire (1991), Jiang *et al.* (2005) y Hu *et al.* (2008). En el ciclo verano-otoño, el peso final del camarón ( $w_f$ ) estuvo positivamente relacionado con la tasa de mortandad ( $z$ ) y la concentración de oxígeno disuelto ( $OD$ ). Una mayor tasa de mortandad significó una menor concentración de organismos, lo que facilitó un mayor crecimiento individual de los sobrevivientes, al haber mayor disponibilidad de espacio y recursos (Arnold *et al.*, 2006; Williams *et al.*, 1996). Por otra parte, la influencia positiva del oxígeno disuelto sobre el desempeño productivo general del camarón, se encuentra ampliamente documentado en la literatura.

El análisis de sensibilidad también indicó que, al término de ambos ciclos, la variación en la biomasa estuvo principalmente influenciada por el peso individual final ( $w_f$ ) y por las diferencias en sobrevivencia resultantes de la influencia del oxígeno disuelto sobre la tasa de mortalidad ( $z$ ).

Los resultados de los modelos estocásticos, mostraron que, con el paso del tiempo, el coeficiente de variación disminuyó en ambos ciclos de producción, indicando que hay menor incertidumbre al predecir los valores de la biomasa hacia el final de los mismos. El análisis de sensibilidad indicó que la tasa de mortalidad ( $z$ ) tuvo poca o nula influencia en la producción de camarón, como consecuencia de la alta estabilidad de las sobrevivencias observadas entre los estanques para ambos ciclos.

Por otro lado, el análisis bioeconómico y la prueba t-Student mostraron que, la hipótesis establecida para esta investigación, es correcta, en tanto que se encontró que la utilidad en el ciclo de verano-otoño es significativamente mayor que la de primavera-verano. Los principales factores que intervinieron en esta diferencia fueron la tasa de crecimiento del camarón en dicho ciclo (1.4 vs 0.9 g/semana), y precios de venta más altos al tiempo de cosecha en Noviembre, comparados con los respectivos en agosto.

Los costos de operación fueron similares en ambos ciclos de producción, excepto por el costo del alimento, el cual fue superior en el ciclo verano-otoño, debido a que se obtuvo una producción superior en biomasa (18.1 t/ha) en comparación con el ciclo primavera-verano (13.5 t/ha), por lo que fue necesaria la compra de mayor cantidad de alimento suplementario.

Las granjas semi-intensivas en México, generan utilidades entre \$13 000 y \$45 000 pesos/ha/ciclo (FIRA, 2007; SAGARPA, 2009; ISAPESCA, 2017), mientras que para esta investigación, se estimó que la utilidad promedio fue de \$222 300/ha para el ciclo primavera-verano y \$693 730/ha para el ciclo verano-otoño. A pesar de los beneficios en bioseguridad y en la reducción de requerimientos de área productiva, son necesarias futuras

investigaciones para demostrar completamente la factibilidad del sistema, tomando en cuenta, costos de inversión e impuestos, entre otras variables.

La simulación Monte Carlo utilizada para el análisis de la variabilidad, del rendimiento económico promedio de seis estanques, en vez de la de uno solo, permitió estimar una reducción significativa en la incertidumbre de obtener los resultados esperados, ya que el coeficiente de variación de la utilidad disminuyó 40.9 y 35.5% para el ciclo primavera-verano y ciclo verano-otoño, respectivamente, y la probabilidad de obtener pérdidas en el ciclo primavera-verano disminuyó de 6.2 a 3.3%.

La razón por la que la incertidumbre es menor para seis estanques que para uno consiste en que, si por cuestiones aleatorias se obtienen resultados pobres en algunos de los estanques, ello puede compensarse con buenos resultados que, también por azar, son posibles de obtener en otros estanques, lo que produce que, en promedio, se reduzca la incertidumbre cuando se le compara con el comportamiento aleatorio de un solo estanque. De acuerdo con el límite central de la estadística, es esperable que la varianza de la media disminuya conforme se incrementa el tamaño de la muestra (en este caso el número de estanques) (Vose, 2001).

El análisis de sensibilidad mostró que el precio del camarón fue el factor más importante en la variabilidad de la utilidad neta para ambos ciclos. En estudios anteriores, se indicó que el precio del camarón es un factor muy importante en la determinación del rendimiento económico en granjas semi-intensivas e intensivas (Hernández-Llamas *et al.* 2013; Hernández-Llamas y Magallón-Barajas, 1991; Hernández-Llamas y Zaráin-Herzberg, 2011). El rendimiento económico en el cultivo de camarón está altamente influenciado por la gran variabilidad de los precios de venta a lo largo del año (Estrada-Pérez *et al.* 2015).

En el presente estudio, el valor más alto de utilidad para el ciclo primavera-verano se obtuvo en el día 90, cuando el camarón tenía un peso promedio de 11 g, y el precio base (\$53/kg) fue superior al precio base del camarón de 12 y 13 g (\$50/kg). Si se hubiera

cosechado en el día 90 (tiempo óptimo de cosecha), se habría obtenido una utilidad promedio de \$228,810/ha, 2.6% más que lo obtenido el día de la cosecha (día 105). En contraste, la mejor estrategia para el ciclo verano-otoño fue cosechar hasta el final del cultivo (día 92). El precio base del camarón es principalmente determinado por comerciantes que acaparan la mayor parte de la producción y la mejor estrategia para la cosecha, posiblemente deberá cambiar año con año, dependiendo de cambios en los precios determinados por la demanda de tallas específicas del camarón, y la aparición de brotes de enfermedades, entre otros factores. La relevancia del precio del camarón para diseñar programas y/o protocolos de cultivo, hace imperativo el seguimiento y registros semanales en los precios del camarón, en vez de los actuales que se realizan mensual o trimestralmente.

Se ha reportado que los rendimientos económicos se encuentran altamente influenciados con el peso final del camarón (Hernández-Llamas *et al.* 2004; Hernández-Llamas y Magallón-Barajas 1991; éste estudio). Ello es atribuible al efecto de amplificación que tiene, sobre los ingresos, la relación creciente entre el peso del camarón y el precio de venta (Hernández-Llamas y Magallón-Barajas 1991). En este estudio, la variabilidad estocástica del precio de venta del camarón fue más importante que la variabilidad en el costo del alimento, coincidiendo a lo reportado por Hatch *et al.* (1987), Hernández-Llamas *et al.* (2004), Sánchez-Zazueta y Martínez-Cordero (2009), y Hernández-Lamas *et al.* (2013).

El modelo bioeconómico resultó una herramienta efectiva para analizar el rendimiento económico, factores de incertidumbre y tiempo óptimo de cosecha en los sistemas de cultivo de camarón. Los valores de las utilidades indican la conveniencia de continuar las investigaciones a fin de mejorar la tecnología del cultivo y poder ser considerada como alternativa en la producción de camarón en regiones áridas y semi-áridas.

## 9. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos con el presente estudio permiten concluir, por una parte, que el objetivo general de caracterizar y analizar el cultivo intensivo foto-heterotrófico del camarón blanco *Litopenaeus vannamei* con reposición mínima de agua en alta salinidad se alcanzó en forma satisfactoria; y por otra, que la hipótesis de investigación planteada es correcta, en tanto que las mejores condiciones de cultivo prevalecientes en el ciclo verano-otoño se tradujeron en mejor calidad de agua, producción y desempeño económico, cuando se le comparan con las condiciones del ciclo primavera-verano.

Asimismo, puede afirmarse que los objetivos particulares se cubrieron adecuadamente, considerando que, para ambos ciclos de producción:

- 1.- Se hizo una caracterización y comparación de la calidad del agua.
- 2.- Mediante un análisis estocástico, se evaluó y comparó el desempeño zootécnico del camarón.
- 3.- Mediante el análisis bioeconómico, se calcularon y compararon las utilidades, la relación beneficio-costos y los tiempos óptimos de cosecha.

El modelado bioeconómico resultó una herramienta útil para la cuantificación de parámetros biológicos, técnicos y económicos, a fin de evaluar el desempeño de un sistema acuícola e identificar acciones futuras para su mejora.

El cultivo intensivo foto-heterotrófico en alta salinidad es una innovadora tecnología que permite obtener elevados rendimientos de producción (13-18 t/ha) de camarón de manera biosegura. Los resultados económicos que arrojó el presente estudio indican un alto potencial de aplicación de la tecnología e indican la conveniencia de continuar la investigación sobre la misma para su escalamiento.

## 11. LITERATURA CITADA

Adams, C. M., W. L. Griffin, P. Nichols, R. W. Bricks. 1980. Application of a bioeconomic-engineering model for shrimp mariculture systems. *Southern J. Agricult. Econ.* 12:135-141.

Alonso-Rodríguez, R., F. Páez-Osuna, I. Gárate-Lizárraga. 2004. El fitoplancton en la camaronicultura y larvicultura: Importancia de un buen manejo. Comité de Sanidad Acuícola de Sinaloa (CESASIN). Editorial Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. Primera edición. México, D.F. 147p.

Allan, G. L., G. B. Maguire. 1991. Lethal levels of low dissolved oxygen and effects of short-term oxygen stress on subsequent growth of juvenile *Penaeus monodon*. *Aquaculture.* 94:27-37.

Allen, P. G., L. W. Botsford, A. M. Schuur, W. E. Johnston. 1984. *Bioeconomics of Aquaculture*. Editorial Elsevier. First edition Amsterdam, Netherlands. 351p.

APHA (American Public Health Association), American Water Works Association, Water Pollution Control Association. 2005. *Standard methods for the Examination of Water and Wastewater*, Editorial American Public Association. 21<sup>st</sup> Edition. Washington, D.C. USA. 367p.

Araneda, M. E. 2010. Análisis de la producción intensiva del camarón blanco *Litopenaeus vannamei* en agua dulce: un enfoque bioeconómico. Tesis (Doctorado en Ciencias). Mérida, Yucatán, México. Universidad Marista. 170 p.

Arnold, S. J., M. J. Sellars, P. J. Crocos, G. J. Coman. 2006. Intensive production of juvenile tiger shrimp *Penaeus monodon*: An evaluation of stocking density and artificial substrates. *Aquaculture.* 261:890-896.

Arredondo-Figueroa, J. L. 2002. El cultivo de camarón en México, actualidades y perspectivas. *ContactoS.* 43:41-54.

Avnimelech, Y. 1999. Carbon/nitrogen ratio as a control element in aquaculture systems. *Aquaculture.* 176:227-235.

Avnimelech, Y. 2006. Bio-filters: the need for a new comprehensive approach. *Aquac. Eng.* 34:172-178.

Avnimelech, Y. 2007. Feeding with microbial flocs by tilapia in minimal discharge bio-flocs technology ponds. *Aquaculture.* 264:140-147.

Avnimelech, Y. 2012. *Biofloc technology- A practical book*. Editorial The World Aquaculture Society. Second edition. Baton Rouge, Louisiana, United States. 272p.

- Ayaz, M., K. Sumara, K. H. Vadher, A. H. Ishakani. 2015. Effect of higher salinities on growth and survival of pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931). *J. Appl. & Nat. Sci.* 7:885-888.
- Ayyub, B. M. 2014. Risk Analysis in Engineering and Economics. Editorial CRC Press. Second Edition. Boca Raton, Florida. 640p.
- Balcázar, J. L. 2002. Uso de probióticos en acuicultura: Aspectos generales CIVIA 2002, 877-881.
- Bartlett, P., P. Bonilla, L. Quiros, M. Takano. 1990. Effects of high salinity on the survival and growth of juvenile *L. vannamei*, *P. stylirostris*, and *P. monodon*. In: Abstracts, World Aquaculture, 90: 121 /CP6. National Research Council, Ottawa, Ontario, Canada.
- Bao, H. Y., P. Shao, Q. Zhang, B. Z. Liu, S. X. Cao, G. G. Tang. 2012. Ecological shrimp farming in salt ponds in northern China. *Hebei fisheries.* 225:13-15.
- Barraza-Guardado, R. H., L. R. Martínez-Córdova, L. F. Enríquez-Ocaña, M. Martínez-Porchas, A. Miranda-Baeza, M. A. Porchas-Cornejo. 2014. Efecto de efluentes de granjas camaronícolas sobre parámetros de la calidad de agua y del sedimento frente a la costa de Sonora, México. *Cienc. Mar.* 40:221-235.
- Bett, C., L. Vinatea. 2009. Combined effect of weight, temperature and salinity on shrimp *Litopenaeus vannamei* oxygen consumption rate. *Braz. J. Oceanogr.* 57:305-314.
- Bray, W. A., A. L. Lawrence, J. R. Leung-Trujillo. 1994. The effect of salinity on growth and survival of *Litopenaeus vannamei*, with observations on the interaction of IHHN virus and salinity. *Aquaculture.* 122:133-146.
- Bosma, R. H., M. C. Verdegem. 2011. Sustainable aquaculture in ponds: Principles, practices and limits. *Livest. Sci.* 139:58-68.
- Bowen, B., R. McIntosh. 2006. Meet the flockers. *Shrimp news international.* October 1, 2006. Disponible en: [www.shrimpnews.com/FreeReportsFolder/.../MeetFlockers.html](http://www.shrimpnews.com/FreeReportsFolder/.../MeetFlockers.html) Accesado: 25 de agosto del 2017.
- Boyd, C. E. 1982. Water quality management for pond fish culture. Editorial Elsevier Science Pub Co. First edition. Amsterdam, Netherlands. 318p.
- Boyd, C. E. 1998. Pond water aeration systems. *Aquacult. Eng.* 18:9-40.
- Boyd, C. E. 1999. Codes of practice for responsible shrimp farming. Editorial Global Aquaculture Alliance. First edition. St. Louis, Missouri, USA. 42p.

- Boyd, C. E. 2001. Consideraciones sobre la calidad del agua y del suelo en cultivos de camarón. En: Haws, M. C., C. E. Boyd. (eds.). Métodos para mejorar la camaronicultura en Centroamérica. Editorial-Imprenta UCA. Primera edición. Managua, Nicaragua. pp 24-25.
- Boyd, C. E. 2002. Estándares de la calidad de agua: amoniaco de nitrógeno total. Boletín NICOTIVA. 7:1-5.
- Boyd, C. E. 2003. Bottom soil and water quality management in shrimp ponds. J. Appl. Aquaculture. 13:11-33.
- Boyd, C. E., J. W. Clay. 2002. Evaluation of Belize Aquaculture, Ltd: A Superintensive Shrimp Aquaculture System. Report prepared under the World Bank, NACA, WWF and FAO Consortium Program on Shrimp Farming and the Environment. Editorial the Consortium. First edition. Washington D. C., USA. 17p.
- Boyd, C. E., H.V. Daniels. 1994. Liming and fertilization of brackishwater shrimp ponds. J. Appl. Aquaculture. 2:221-234.
- Boyd, C. E., D. Gautier. 2000. Effluent composition and water quality standards. GAA. 3:61-66.
- Boyd, C. E., T. Hanson. 2010. Dissolved-oxygen concentrations in pond aquaculture. GAA. 1:40-41.
- Browdy, L. C., A. D. Stokes, J. Leffler, W. Wasilesky, B. McAbee, H. Atwood. 2006. Intensification of shrimp production technical strategies and financial feasibility. Seminario Internacional de Acuicultura. 6-8 de Abril. San José, Costa Rica.
- Brown, R. M., J. K. Jeffrey, G. A. Dunstan. 1997. Nutritional properties of microalgae for mariculture. Aquaculture. 151:315-331.
- Buckle, L. F., B. Barón, M. Hernández. 2006. Osmoregulatory capacity of the shrimp *Litopenaeus vannamei* at different temperatures and salinities, and optimal culture environment. Rev. Biol. Trop. 54:45-53.
- Burford, A. M., P. T. Thompson, R. H. McIntosh, R.H. Bauman, D. C. Pearson. 2003. Nutrient and microbial dynamics in high intensity, zero-exchange shrimp ponds in Belize. Aquaculture. 219:393-411.
- Burford, A. M., P. T. Thompson, R. H. McIntosh, R.H. Bauman, D. C. Pearson. 2004. The contribution of flocculated material to shrimp (*Litopenaeus vannamei*) nutrition in a high-intensity, zero-exchange system. Aquaculture. 232:525-537.

- Burgens, J., K. Burnett, L. Burnett. 2004. Disease resistance of Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*, following the dietary administration of a yeast culture food supplement. *Aquaculture*. 231:1-8.
- Cacho, O. J. 1997. Systems modeling and bioeconomics modeling in aquaculture. *Aquacul. Econ. Management*. 1:45-64.
- Campaña-Torres A, L. R. Martínez-Córdova, H. Villarreal-Colmenares, J. Hernández-López, J. M. Ezquerro-Brauer, E. Cortés-Jacinto. 2009. Efecto de la adición del rotífero *Brachionus rotundiformis* (Tschugunoff, 1921) sobre la calidad del agua y la producción, en cultivos super-intensivos de camarón blanco del Pacífico *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931). *Rev. Biol. Mar. Oceanogr.* 44:335-342.
- Casillas-Hernández, R., H. Nolasco-Soria, T. García-Galano, O. Carrillo-Farnes, F. Páez-Osuna. 2007. Water quality, chemical fluxes and production in semi-intensive Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) culture ponds utilizing two different feeding strategies. *Aquacult. Eng.* 36:105-114.
- Chamberlain, G. 2001. Cultivo sostenible de camarón: mitos y realidades. En: SHRIMP 2001 Conference. Chennai, India. pp 150-158.
- Chamberlain, G., Y. Avnimelech, R. P. McIntosh, R. H. Bauman, D. C. Pearson. 2001. Advantages of aerated microbial reuse systems with balanced C/N. II. Composition and nutritional value of organic detritus. *GAA*. 4:22-24.
- Ching, C. A., V. J. Portal, A. Salinas. 2014. Control of *Vibrio* spp. bacteria in marine shrimp larvae using low-salinity water. *GAA*. 6: 26-27.
- Crespi V, A. Lovatelli. 2011. Aquaculture in desert and arid lands: development constraints and opportunities. In *Global desert aquaculture at a glance*. FAO Technical Workshop. 6–9 July 2010, Hermosillo, Mexico. pp. 25–37.
- Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca (CONAPESCA). 2008. Programa Rector Nacional de Pesca y Acuicultura Sustentables. Secretaría de Agricultura Ganadería Pesca y Alimentación (SAGARPA); Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR). México, 2008. Disponible en: [http://www.conapesca.gob.mx/wb/cona/version\\_extendida](http://www.conapesca.gob.mx/wb/cona/version_extendida). Accesado: 15 de enero del 2017.
- Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca (CONAPESCA). 2011. Anuario Estadístico de Acuicultura y Pesca 2011. Editorial Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca. Primera edición. Mazatlán, México. 305p.
- Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca (CONAPESCA). 2014. Tablas de producción pesquera y acuícola. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación

(SAGARPA), Gobierno Federal, México 2014. Disponible en: <https://www.gob.mx/conapesca/documentos/anuario-estadistico-de-acuacultura-y-pesca>.  
Accesado: 15 de enero del 2017.

Crab, R., Y. Avnimelech, T. Defoirdt, P. Bossier, W. Verstraete. 2007. Nitrogen removal techniques in aquaculture for a sustainable production. *Aquaculture*. 270:1-14.

Crab, R., T. Defoirdt, P. Bossier, W. Verstraete. 2012. Biofloc technology in aquaculture: beneficial effects and future challenges. *Aquaculture*. 356-357:351-356.

Crab, R., A. Lambert, T. Defoirdt, P. Bossier, W. Verstraete. 2010. The application of bioflocs technology to protect brine shrimp (*Artemia franciscana*) from pathogenic *Vibrio harveyi*. *J. App. Micro*. 109:1643-1649.

Cremen, M. C. M., M. R. Martínez-Goss, V. L. J. Corre, R. V. Avanza. 2007. Phytoplankton bloom in commercial shrimp pond using green-water technology. *J. Appl. Phycol*. 19:615-624.

Díaz, F., A. D. Re, E. Sierra, E. Díaz-Iglesias. 2004. Effects of temperature and salinity fluctuation on the oxygen consumption, ammonium excretion and osmoregulation of the blue shrimp *Litopenaeus stylirostris* (Stimpson). *J. Shell. Res*. 3:903-910.

Ebeling, J. M., M. B. Timmons, J. J. Bisogni. 2006. Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, autotrophic, and heterotrophic removal of ammonia-nitrogen in aquaculture systems. *Aquaculture*. 257:346-358.

Egna, H.S., C. E. Boyd. 1997. Dynamics of pond aquaculture. Editorial CRS Press. First edition. Boca Raton, Florida. 472p.

Eiler, A., C. González-Rey, S. Allen, S. Bertilsson. 2007. Growth response of *Vibrio cholerae* and other *Vibrio* spp. to cyanobacterial dissolved organic matter and temperature in brackish water. *FEMS*. 60:411-418.

Emerenciano, M., G. Gaxiola, G. Cuzon. 2013. Biofloc Technology (BFT): A review for aquaculture application and animal food industry. *INTECH*. 12:301–327.

Esparza- Leal, H. M. 2010. Región epidémica, régimen de infección y evaluación de la vía acuática como mecanismo de dispersión del virus del síndrome de la mancha blanca (WSSV) en granjas camaronícolas del noroeste de México. Tesis (Doctorado en Ciencias). Sonora, México. Instituto Tecnológico de Sonora. 123 p.

Estrada-Pérez, M. 2016. Modelo bioeconómico de la producción semi-intensiva de camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*). Tesis (Doctorado en Ciencias). Xalisco, Nayarit. Universidad Autónoma de Nayarit. 75 p.

Estrada-Pérez, A., J. M. J. Ruiz-Velazco, A. Hernández-Llamas, I. Zavala-Leal, L. Martínez-Cárdenas. 2015. Deterministic and stochastic models for analysis of partial harvesting strategies and improvement of intensive commercial production of white leg shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Aquacult. Eng.* 70:56–62.

Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA). 2007. Cultivo de camarón blanco, análisis de rentabilidad 2006, proyección de costos de cultivo 2007, cuota de avío. Disponible en: [http://www.fira.gob.mx/Nd/CAMARON\\_ACUACULTURA\\_Sinaloa-Rentabilidad\\_2006\\_Costos\\_2007.pdf](http://www.fira.gob.mx/Nd/CAMARON_ACUACULTURA_Sinaloa-Rentabilidad_2006_Costos_2007.pdf). Accesado: 26 de junio del 2017.

Frías-Espericueta, M. G., F. Páez-Osuna. 2001. Toxicidad de los compuestos del nitrógeno en camarones. In: Páez-Osuna, F. (ed.). *Camaronicultura y medio ambiente*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología y El Colegio de Sinaloa, México, D.F. pp. 224-242.

Global Aquaculture Alliance. 2016. World production of shrimp capture fisheries and aquaculture. Guanzhou, China. Disponible en: <https://www.aquaculturealliance.org/advocate/topic/guangzhou/>. Accesado: 19 de agosto del 2017.

Gutiérrez, C.G. 2000. Efecto del recambio de agua y aireación en el crecimiento y la producción de camarón blanco *Litopenaeus vannamei* y su evaluación económica en estanques rústicos. Tesis (maestría en Ciencias). Manzanillo, Colima. Universidad de Colima. 95 p.

Griffin, W.L., J. S. Hanson, R. W. Brick, M. A. Johns. 1981. Bioeconomic modeling with stochastic elements in shrimp culture. *J. World Mar. Soc.* 12:94-103.

Gyalog, G., L. Varadi, D. Gal. 2011. Is intensification a viable way for pond culture in Central and Eastern Europe?. *ACCL BIOFLUX*, 4: 584-589.

Hari, B., B. M. Kurup, J. T. Varghese, J. W. Schrama, M. C. J. Verdegem. 2004. Effects of carbohydrate addition on production in extensive shrimp culture systems. *Aquaculture* 241:179–194.

Hatch, U., S. Sindelar, D. Rouse, H. Pérez. 1987. Demonstrating the use of risk programming for aquacultural farm management: The case of Penaeid shrimp in Panama. *J. World Aquacult. Soc.* 18:260–269.

Hernández-Llamas, A., A. González-Becerril, S. Hernández-Vázquez, S. Escutia-Zúñiga. 2004. Bioeconomic analysis of intensive production of the blue shrimp *Litopenaeus stylirostris*. *Aquacult. Res.* 35: 103-111.

- Hernández-Llamas, A., F. J. Magallón-Barajas. 1991. Análisis bioeconómico del cultivo del camarón azul (*Penaeus stylirostris*) con fertilizantes orgánicos y alimentación balanceada. Invest. Mar. CICIMAR. 6:267-281.
- Hernández-Llamas, A., J. M. J. Ruiz-Velazco, V. M. Gómez-Muñoz. 2013. Economic risk associated with white spot disease and stochastic variability in economic, zootechnical and water quality parameters for intensive production of *Litopenaeus vannamei*. REV. AQUACULT. 5:121-131.
- Hernández-Llamas, A., M. Zaráin-Herzberg. 2011. Bioeconomic modeling and risk analysis of raising shrimp *Litopenaeus vannamei* in floating cages in northwestern Mexico: assessment of hurricane hazard, stochastic variability of shrimp and feed prices, and zootechnical parameters. Aquaculture. 314:261–268.
- Hewitt, C.L., M. L. Campbell. 2007. Mechanisms for the prevention of marine bioinvasions for better biosecurity. Mar. Pollut. Bull. 55:395-401.
- Hochman, E., P. S. Leung, L. W. Rowland, J. A. Wyban. 1990. Optimal scheduling in shrimp mariculture: A stochastic growing inventory problem. Amer. J. Agricult. Econ. 72:382-393.
- Hu, F., P. Luqing, J. Futao. 2008. Effects of hypoxia on dopamine concentration and the immune response of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). J. Ocean Univ. China. 8:77-82.
- Huda, A.S., J. Ispinanto, F. Bahri, O. Decamp. 2013. Successful production in semi-biofloc in Indonesia. Aq. As. Pac. 2:8-12.
- Huys, L., P. Dhert, R. Robles, F. Ollevier, P. Sorgeloos, J. Swings. 2001. Search for beneficial bacterial strains for turbot (*Scophthalmus maximus* L.) larviculture. Aquaculture; 193:25–37.
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). 2016. Sistema de consulta, zonificación agroecológica del municipio de La Paz, B.C.S. Disponible en: [http://cesvbcs.gob.mx/DR\\_LA\\_PAZ/ZA-CA-Radiacion%20Solar.html](http://cesvbcs.gob.mx/DR_LA_PAZ/ZA-CA-Radiacion%20Solar.html). Accesado: 10 de septiembre del 2016.
- Irianto, A., B. Austin. 2002. Probiotics in aquaculture. J. Fish. Dis. 25:633-642.
- Instituto Sinaloense de Acuicultura y Pesca (ISAPESCA) .2017. Rendimiento productivo y económico en granjas semi-intensivas de camarón blanco en el estado de Sinaloa. Boletín informativo 5:1-5.
- Jiang, L., L. Pan, F. Bo. 2005. Effect of dissolved oxygen on immune parameters of the white shrimp *Litopenaeus vannamei*. Fish Shellfish Immunol. 18:185-188.

Karp, L., A. Sadeh, W. L. Griffin. 1986. Cycles in agricultural production: The case of aquaculture. *Amer. J. Agricult. Econ.* 68:553-561.

Keys, S.J., P. J. Crocos, O. J. Cacho. 2004. Commercial grow-out performance and cost-benefit analysis for farm production of the brown tiger shrimp *Penaeus esculentus*. *Aquacult. Econ. Manage.* 8:295-308.

Krummenauer, D. 2011. Superintensive culture of white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, in a biofloc technology system in southern Brazil at different stocking densities. *J. of the Wor. Aqua. Soc.* 5:726-733.

Kumar, A., S. Moulick, B. Mal. 2010. Performance evaluation of propeller-aspirator-pump aerator. *Aquacult. Eng.* 42:70-74.

Kumaraguru-Vasagam, K.P., A. V. Suresh, G. W. Chamberlain. 2009. Growth performance of blue shrimp, *Litopenaeus stylirostris* in self-cleaning microcosm tanks. *Aquaculture.* 290:236-242.

Leaño, E. M., C.V. Mohan. 2012. Early Mortality Syndrome (EMS)/ Acute Hepatopancreatic Necrosis Syndrome (AHPNS): An emerging threat in the Asian shrimp industry. Disease advisory. NACA, Bangkok, Thailand. Disponible en: [www.cfsph.iastate.edu/Factsheets/es/acute-hepatopancreatic-necrosis-disease-es.pdf](http://www.cfsph.iastate.edu/Factsheets/es/acute-hepatopancreatic-necrosis-disease-es.pdf).  
Accesado: 15 de febrero del 2017.

Magallón-Barajas, F. J., H. Villarreal-Colmenares., F. Arcos-Ortega., S. Avilés- Quevedo., R. Civera-Cerecedo., P. Cruz-Hernández., A. González-Becerril., V. Gracia-López., A. Hernández-Llamas., J. Hernández-López., A. M. Ibarra-Humphries., C. Lechuga-Deveze., J. M. Mazón-Suáztegui., A. F. Muhlia-Melo., J. Naranjo-Páramo., R. Pérez-Enríquez., G. Porchas-Cornejo, Portillo-Clark, y J. C. Pérez-Urbiola. 2007. Orientaciones estratégicas para el desarrollo sustentable de la acuicultura en México. Publicaciones especiales del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C. Cámara de Diputados. LX Legislatura. 256 p.

Makridis, P., A. Jon Fjellheim., J. Skjermo., O. Vadstein. 2000. Colonization of the gut in first feeding turbot by bacterial strains added to the water or bioencapsulation in rotifers. *Aquac. Int.* 8:267-280.

Martínez-Córdova, L.R., M. Martínez-Porchas, E. Cortés-Jacinto. 2015. Alimentos y estrategias de alimentación para una acuicultura sustentable. Editorial AGT Editor. Primera Edición. México, D.F. 163 p.

Martínez-Córdova, L.R., H. Villarreal-Colmenares, M. A. Porchas-Cornejo, J. Naranjo-Páramo, A. Aragón-Noriega. 1997. Effect of aeration rate on growth, survival and yield of white shrimp *Penaeus vannamei* in low water exchange ponds. *Aquacult. Eng.* 16:85-90.

Martínez, J.A., J. C. Seijo. 2001. Economics of risk and uncertainty of alternative water exchange and aeration rates in semi-intensive shrimp culture systems. *Aquacult. Econ. Manage.* 5:129-146.

Martínez-Porchas, M., L. R. Martínez-Córdova, M. A. Martínez-Cornejo. 2013. El zooplancton en sistemas acuícolas: importancia, manejo y evaluación. In: Martínez-Córdova., Martínez-Porchas (eds.), *Alimento natural en acuicultura*. Editorial AGT editor. Primera edición. México, D.F. pp 89-112.

McIntosh, D. 2001. Changing paradigms in shrimp farming: V. Establishment of heterotrophic bacterial communities. *GAA* 4:53-58.

McIntosh, D., K. Fitzsimmons. 2003. Characterization of effluent from an inland, low-salinity shrimp farm: What contribution could this water make if used for irrigation. *Aquacult. Eng.* 27: 147-156.

McIntosh, D., T. M. Samocha, E. R. Jones, A. L. Lawrence, S. Horowitz, A. Horowitz. 2001. Effects of two commercially available low-protein diets (21% and 31%) on water and sediment quality, and on the production of *Litopenaeus vannamei* in an outdoor tank system with limited water discharge. *Aquacult. Eng.* 25:69-82.

Milstein, A., M. S. Islam, M. A. Wahab, A. H. M. Kamal, S. Dewan. 2005. Characterization of water quality in shrimp ponds of different sizes and with different management regimes using multivariate statistical analysis. *Aquac. Int.* 13:501-518.

Monroy-Dosta, M.C., R. Lara-Andrade, J. Castro-Mejía, G. Castro-Mejía, M. G. Coelho-Emerenciano. 2013. Composición y abundancia de comunidades microbianas asociadas al biofloc en un cultivo de tilapia. *Rev Biol Mar Oceanogr.* 3:511-520.

Moreno-Figueroa, L.D., J. Naranjo-Páramo, A. Hernández-Llamas, M. Vargas-Mendieta, J. A. Hernández-Gurrola, H. Villarreal-Colmenares. 2017. Performance of a photo-heterotrophic, hypersaline system for intensive cultivation of white leg shrimp (*Litopenaeus vannamei*) with minimal water replacement in lined ponds using a stochastic approach. *Aquac Res.* 1–11. <https://doi.org/10.1111/are.13432>.

Moriarty, D.J.W. 1999. Disease Control in Shrimp Aquaculture with Probiotic Bacteria. *Microbial Interaction in Aquaculture.* 8:117-125.

Navarro, R., V. Morales, R. Tello, J. Cuellar, L. Montoya. 2013. Manual regional de procedimientos de emergencia para síndrome de mortalidad temprana (EMS/ AHPNS). Organismo internacional regional de sanidad agropecuaria. Disponible en: [https://www.oirsa.org/contenido/documentos/AHPND/MANUAL%20DE%20PROCEDIMIENTOS%20AHPND%20ACTUALIZADO%20031016.docx.\[5\].pdf](https://www.oirsa.org/contenido/documentos/AHPND/MANUAL%20DE%20PROCEDIMIENTOS%20AHPND%20ACTUALIZADO%20031016.docx.[5].pdf) Accesado: 20 de agosto del 2017.

- Newman, S. 2000. Prevención de enfermedades del camarón de cultivo. *Panorama Acuícola*. 5:22-23.
- Robertson, L., A. L. Lawrence, F. Castille. 1993. Interaction of salinity and feed protein level on growth of *Penaeus vannamei*. *J. Appl. Aquaculture*. 2:43-54.
- Ohara, S., K. I. Fukam, Y. Ishida, Y. 1993. Algal effects on the bacterial assemblage in Lake Biwa. *Jap. J. Limnol.* 54:261-268.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2011. Programa de información de especies acuáticas. *Penaeus vannamei* (Boone, 1931). Departamento de Pesca y Acuicultura.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2016. The state of world fisheries and aquaculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Fisheries and Aquaculture Department. Italy, Rome, 2012. Disponible en: [www.fao.org/3/a-i2727e.pdf](http://www.fao.org/3/a-i2727e.pdf). Accesado: 20 de mayo del 2017.
- Otoshi, C.A., S.M. Arce, M. M. Shaun. 2003. Growth and reproductive performance of broodstock shrimp reared in a biosecure recirculating aquaculture system versus a flow-through pond. *Aquacult Eng.* 29:93-107.
- Paiva-Maia, E., G Alves-Modesto, L. Octavio-Brito, A. Olivera, T. C. Vascolcelos-Gesteira. 2013. Effect of a commercial probiotic on bacterial and phytoplankton concentration in intensive shrimp farming (*Litopenaeus vannamei*) recirculation systems. *Lat. Am. J. Aquat. Res.* 41:126-137.
- Pardy, R., W.L. Griffin, M. A, Johns, A. L. Lawrence. 1983. A preliminary economic analysis of stocking strategies for penaeid shrimp culture. *J. World Mar. Soc.* 14:49-63.
- Pérez-Rostro, C. I., J. A. Pérez-Fuentes, M. P. Hernández-Vergara. 2014. Biofloc, a Technical Alternative for Culturing Malaysian Prawn *Macrobrachium rosenbergii*. In: Hernández-Vergara, M. P., C. I. Pérez-Rostro (eds.). *Sustainable Aquaculture Techniques*. Editorial InTech. First edition. Boca del Río, México. pp 274.
- Pérez-Velázquez, M., M. L. González-Félix, F. Jaimes-Bustamante, L. R. Martínez-Córdova, D. A. Trujillo-Villalba. 2007. Investigation of the effects of salinity and dietary protein level on growth and survival of pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*. *J. Wor. Aqu. Soc.* 38:475-485.
- Pomeroy, R., B. Bravo-Ureta, D. Solís, R. J. Johnston. 2008. Bioeconomic modelling and salmon aquaculture: an overview of the literature. *Int. J. Environment and Pollution.* 33:485-500.

- Piedrahita, R. H. 2003. Reducing the potencial environmental impact of tank aquaculture effluents through intensification and recirculation. *Aquaculture*. 226:35-44.
- Ponce-Palafox, J.; C. A. Martinez- Palacios, L. Ross. 1997. The effects of salinity and temperatura on te growht and survival rates of juvenile white shrimp *Penaeus vannamei*, Boone, 1931. *Aquaculture*. 157:107-115.
- Rajkumar, M., P. Kumar-Pandey, R. Aravind, A. Venilla, V. Bharti, C. Sekharan. 2015. Effect of different biofloc system on water quality, biofloc composition and growth performance in *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931). *Aquac. Res.* 47:3432–3444.
- Ray, A. J., K. S. Dillon, J. M. Lotz. 2011. Water quality dynamics and shrimp (*Litopenaeus vannamei*) production in intensive, mesohaline culture systems with two levels of biofloc management. *Aquac. Eng.* 45:127-136.
- Riquelme, C. E., R. E. Avendaño-Herrera. 2003. Interacción bacteria-microalga en el ambiente marino y uso potencial en acuicultura. *Rev. Chil. Hist. Nat.* 76:725-736.
- Rodríguez-Méndez, N., S. Gaitán, N. Chaparro. 2006. Evaluación del crecimiento de juveniles del Bagre *Ariopsis bonillai* utilizando alimento con probióticos en condiciones de laboratorio. *Revista Aquatic.* 24:3-12.
- Rosas, C., A. Sánchez, E. Díaz-Iglesias, R. Brito, E. Martínez, L. A. Soto. 1997. Critical dissolved oxygen level to *Penaeus setiferus* and *Penaeus schmitti* poslarvae (PL 10-18) exposed to salinity changes. *Aquaculture*. 152:259-272.
- Rosenberry, B. 2006. Meet the flockers. *Shrimp news international*. October 1, 2006. Disponible en: [www.shrimpnews.com/FreeReportsFolder/.../MeetFlockers.html](http://www.shrimpnews.com/FreeReportsFolder/.../MeetFlockers.html). Accesado: 15 de febrero del 2017.
- Ruiz-Velazco, J. M. Modelo bioeconómico para el análisis de riesgo del cultivo intensivo de camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*). Tesis (Doctorado en Ciencias). La Paz, B.C.S., México. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. México. 128 p.
- Ruiz-Velazco, J. M., A. Hernández-Llamas, V. M. Gomez-Muñoz, F. J. Magallón. 2010. Dynamics of intensive production of shrimp *Litopenaeus vannamei* affected by white spot disease. *Aquaculture*. 300:113-119.
- Sadeh, A., C. R. Pardy, W. Griffin, A. L. Lawrence. 1986. Uncertainty consideration resulting from temperature variation on growth of *Penaeus stylirostris* in ponds. *Texas J. Sci.* 38:159-172.
- Sánchez-Zazueta, E., F. J. Martínez-Cordero. 2009. Economic risk assessment of a semi-intensive shrimp farm in Sinaloa, Mexico. *Aquacult. Econ. Manage.* 13:312-327.

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación (SAGARPA). 2009. Estudio de la Infraestructura Logística para la Exportación del camarón blanco a algunas ciudades de Estados Unidos y Canadá. Disponible en:

[http://www.sagarpa.gob.mx/agronegocios/Documents/Estudios\\_promercado/CAMARONI\\_CULTORES.pdf](http://www.sagarpa.gob.mx/agronegocios/Documents/Estudios_promercado/CAMARONI_CULTORES.pdf) Accesado: 15 de octubre del 2017.

Seijo, J. C. 1995. Contribución al Análisis Bioeconómico de las pesquerías peruanas FAO. Documento de Campo. pp 1-15

Seijo, J. C. 2004. Risk of exceeding bioeconomic limit reference points in shrimp aquaculture systems. *Aquacult. Econ. Manage.* 8:201-212.

Samocha, T. M., A. L. Lawrence. 1992. Shrimp nursery systems and management. In: *Proceeding of the Special Session on Shrimp Farming*. World Aquaculture Society, Baton Rouge, L.A. USA. pp 87-105.

Samocha, T. M., S. Patnaik, M. Speed, A. M. Ali, J. M. Burger, R. V. Almeida, Z. Ayub, M. Harisanto, A. Horowitz, D. L. Brock. 2007. Use of molasses as carbon source in limited discharge nursery and grow-out systems for *Litopenaeus vannamei*. *Aquac. Eng.* 36:184–191.

Sandifer, P. A., J. S. Hopkins. 1994. Progress toward development of an environmental-friendly, pond-based, intensive shrimp mariculture system. In: *Book of abstracts, World Aquaculture Society (January 14-18, 1994)*. New Orleans, Louisiana, USA. pp 172-179.

Schrader, K. K., B. W. Green, P.W. Perschbacher. 2011. Development of phytoplankton communities and common off-flavors in a biofloc technology system used for the culture of channel catfish (*Ictalurus punctatus*). *Aquac. Eng.* 45:118-126.

Schuur, A. M. 2003. Evaluation of biosecurity applications for intensive shrimp farming. *Aquac. Eng.* 28:3-20.

Shishehchian, F. 2012. Mixotrophic method of aquaculture. US 14/408,552. Patent WO2013191642A1. 18 jun 2012. Appl. 22 Oct 2015.

Solano-Motoche, G. W. 2003. Efecto del hidróxido de calcio sobre la calidad del agua y la producción de estanques de cultivo de *Litopenaeus vannamei* en aguas salobres. Tesis (Maestría en Ciencias). Guayaquil, Ecuador. Facultad de ingeniería marítima y ciencias del mar. 124 p.

Sonnenholzner, S. 2014. Oxígeno disuelto y su importancia en acuicultura: sistemas de aireación para mejorar la productividad de los sistemas acuícolas. IV Congreso Internacional de Acuicultura-ESPE 2014, Quito, Ecuador.

- Sui, L., G. Ma, Y. Deng. 2015. Effect of dietary protein level and salinity on growth, survival, enzymatic activities and amino-acid composition of the white shrimp *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931) juveniles. *Crustaceana* 88:82-95.
- Tacon, A. G. J. 2000. Shrimp feeds and feeding regime in zero exchange outdoor tanks. *GAA*. 3:15-16.
- Taw, N., R. Palasseri, Z. A. Alrahmah, P. Sampath. 2016. Shrimp biofloc production trials in Saudi Arabia. *Global Aquaculture Alliance-Online magazine*. Disponible: <https://www.aquaculturealliance.org/advocate/shrimp-biofloc-production-trials-in-saudi-arabia/>. Accesado: 16 de septiembre del 2017.
- Thi, A. P., C. Kroeze, S. R. Bush, A. P. J. Mol. 2010. Water pollution by intensive brackish shrimp farming in south-east Vietnam: Causes and options for control. *Agric. Water Manage.* 97:872-882.
- Tian, X., P. S. Leung, D. J. Lee. 2000. Size economies and optimal scheduling in shrimp production: results from a computer simulation model. *Aquac. Eng.* 22:289-307.
- Tidwell, J. H. 2012. *Aquaculture Production Systems*. World Aquaculture Society. Editorial Wiley-Blackwell. First Edition. Oxford, U.K. 421p.
- Torres-Beristain, B. 2005. Organic matter decomposition in simulated aquaculture ponds. Tesis (Doctorado en Ciencias). Wageningen, The Netherlands. Universidad de Wageningen. 137 p.
- Treece, G. D. 2001. Fertilización. En: Haws, M., C. E. Boyd (eds.). *Métodos para mejorar la camaronicultura en Centroamérica*. Editorial UCA. Primera edición. Managua, Nicaragua. pp 93-106.
- Tseng, D. Y., P. L. Ho, S. Y. Huang, S.C. Cheng, Y. L. Shiu, C. S. Chiu, C. H. Liu. 2009. Enhancement of immunity and disease resistance in the white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, by the probiotic, *Bacillus subtilis* E20. *Fish Shell- fish Immunol.* 26:339-344.
- Tucker, C., J. Hargreaves. 2004. *Biology and culture of channel catfish*. *Developments in Aquaculture and Fisheries Science*. Elsevier publication.
- Venero, J. A., B. McAbee, A. Lawson, B. L. Lewis, A. D. Stokes, J. W. Leffler, C. L. Browdy. 2009. Greenhouse-enclosed superintensive shrimp production: alternative to traditional ponds in USA. *GAA*. 12: 61-64.
- Verschuere, L., G. Rombault, P. Sorgeloos. W. Verstraete. 2000. Probiotic bacteria as biological control agents in aquaculture. *Mol. Micr. Biol. Rev.* 64:651-671.

- Villamil-Diaz, L., M. A. Martínez-Silva. 2009. Probióticos como herramienta biotecnológica en el cultivo de camarón: reseña. *Biol. Invest. Mar. Cost.* 38:165-187.
- Villarreal, H. 2005. Tendencias en la producción comercial de crustáceos en sistemas con recambio de agua limitado. En: Curso de buenas prácticas de manejo y alimentación en acuicultura. CYTED. Managua Nicaragua.
- Villarreal, H., A. Hernandez-Llamas, R. Hewitt. 2003. Effect of salinity on growth, survival and oxygen consumption of juvenile brown shrimp, *Farfantepenaeus californiensis* (Holmes). *Aquac. Res.* 34:187–193.
- Villarreal, H., J. Naranjo, B. Camacho, L. Mercier. 2012. Advances in the intensive culture of white shrimp *Litopenaeus vannamei* in Baja California Sur, Mexico. In: Book of abstracts, Aquaculture America 2012. Las Vegas, Estados Unidos de América..
- Villarreal, H., J. Naranjo, W. Quadros, J. A. Hernández, L. D. Moreno, M. Vargas. 2016. Characterization of a low water exchange system for intensive shrimp production in a subtropical environment. In: Book of abstracts, World Aquaculture Society. Las Vegas Nevada, USA.
- Villarreal, H., J. A. Rivera. 1993. Effect of temperature and salinity on the oxygen consumption of laboratory produced *Penaeus californiensis* postlarvae. *Comp. Biochem. Physiol. A-Mol. Integr. Physiol.* 106:103-107.
- Vinatea, L., J. W. Carvalho. 2007. Influence of water salinity on the SOTR of paddlewheel and propeller-aspirator-pump aerators, its relation to the number of aerators per hectare and electricity costs. *Aquac. Eng.* 37:73-78.
- Vinatea, L., A. O. Galvez, C. L. Browdy, A. Stokes, J. Venero, J. Haveman, B. L. Lewis, A. Lawson, A. Shuler, J. W. Leffler. 2010. Photosynthesis, water respiration and growth performance of *Litopenaeus vannamei* in a super-intensive raceway culture with zero water exchange: Interaction of water quality variables. *Aquac. Eng.* 42:17-24.
- Vose, D. 2001. Risk Analysis. A Quantitative Guide. Editorial John Wiley and Sons. Second Edition. Chichester, UK.
- Wang, L. U., J. C. Chen. 2005. The immune response of white shrimp *Litopenaeus vannamei* and its susceptibility to *Vibrio alginolyticus* at different salinity levels. *Fish Shellfish Immunol.* 18:269-278.
- Wasielisky, W., H. Atwood, A. Stokes, C. Browdy. 2006. Effect of natural production in a zero exchange suspended microbial floc based super-intensive culture system for a white shrimp *L. vannamei*. *Aquaculture.* 258:396-403.

Wyban, J., W. A. Walsh, D. M. Godin. 1995. Temperature effects on growth, feeding rate and feed conversion of the pacific white shrimp (*Penaeus vannamei*). *Aquaculture*. 138:267–279.

Williams, A. S., D. A. Davis, C. R. Arnold. 1996. Density-dependent growth and survival of *Penaeus setiferus* and *Penaeus vannamei* in a semi-closed recirculating system. *J. Wor. Aq. Soc.* 1:107-112.

Yao, S., Z. Shufang, C. Jufa, S. Yunli. 2001. Supplement and consumption of dissolved oxygen and their seasonal variations in shrimp pond. *Marine Science Bulletin*. 2:89-96.

Zhang, P., X. Zhang, J. Li, G. Huang. 2006. The effects of body weight, temperature, salinity, pH, light intensity and feeding condition on lethal DO levels of white leg shrimp, *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931). *Aquaculture*. 256:579-587.

Zhu, S., S. Chen. 2001. Effects of organic carbon on nitrification rate in fixed film biofilters. *Aquac. Eng.* 25:1-11.