



CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS
DEL NOROESTE, S.C.

Programa de Estudios de Posgrado

EFFECTO DE LA AIREACIÓN EN EL CULTIVO HÍPER-INTENSIVO
FOTO-HETEROTRÓFICO DEL CAMARÓN BLANCO *Litopenaeus*
vannamei (Boone, 1931) EN UN SISTEMA SIN RECAMBIO DE
AGUA.

TESIS

Que para obtener el grado de

Maestra en Ciencias

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

P r e s e n t a

Alejandra Victoria Villarreal García

La Paz, Baja California Sur, septiembre de 2022.

ACTA DE LIBERACIÓN DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B. C. S., siendo las 10:00 horas del día 18 del Mes de Agosto del 2022, 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:

"EFECTO DE LA AIREACIÓN EN EL CULTIVO HÍPER-INTENSIVO FOTO-HETEROTRÓFICO DEL CAMARÓN BLANCO *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931) EN UN SISTEMA SIN RECAMBIO DE AGUA."

Presentada por la alumna:

Alejandra Victoria Villarreal García

Aspirante al Grado de MAESTRO 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. Felipe de Jesús Ascencio Valle
Director de Tesis



Dr. José Naranjo Páramo
Co-Tutor de Tesis



Dr. Clive M. Jones
Co-Tutor de Tesis

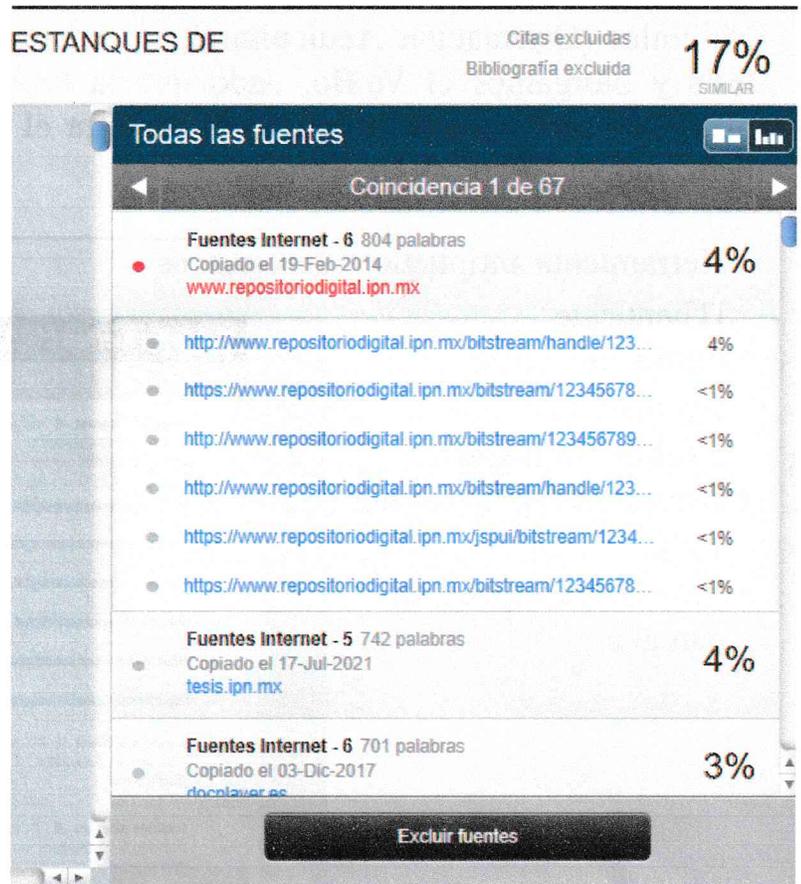


Dra. Gracia Alicia Gómez Anduro,
Directora de Estudios de Posgrado y
Formación de Recursos Humanos.

La Paz, Baja California Sur, a 22 de Agosto de 2022.

Los miembros del comité de tesis del (la) estudiante ALEJANDRA VICTORIA VILLARREAL GARCÍA del Programa de Maestría en Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales (Orientación Acuicultura), revisamos el contenido de la tesis y otorgamos el Vo.Bo. dado que la tesis no representa un plagio de otro documento como lo muestra el reporte de similitud realizado:

- Herramienta antiplagio:
iThenticate
- Filtros utilizados:
Excluir citas
Excluir bibliografía.
- Porcentajes de similitud:
17%
Se muestra captura de pantalla



Firmas del comité



Dr. Felipe de Jesús Ascencio Valle



Dr. José Naranjo Páramo



Dr. Clive Jones

Conformación de Comités

Comité Tutorial

Dr. Felipe de Jesús Ascencio Valle
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.
Director de Tesis

Dr. José Naranjo Páramo
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.
Co-Tutor de Tesis

Dr. Clive M. Jones
James Cook University, Australia
Co-Tutor de Tesis

Comité Revisor de Tesis

Dr. Felipe de Jesús Ascencio Valle
Dr. José Naranjo Páramo
Dr. Clive M. Jones

Jurado de Examen

Dr. Felipe de Jesús Ascencio Valle
Dr. José Naranjo Páramo
Dr. Clive M. Jones

Suplente

Dr. Ángel Isidro Campa Córdova

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 la mezcla entre organismos heterotróficos, quimio-tróficos 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. La aireación es fundamental para estabilizar el sistema y lograr que el recambio de agua sea mínimo, optimizando el cultivo. Sin embargo, el costo relacionado con este concepto puede ser significativo. El objetivo de la presente investigación fue caracterizar el impacto de diferentes sistemas de aireación en la producción del cultivo intensivo foto-heterotrófico, establecer el efecto de la reducción en el tiempo de aireación en la respuesta productiva, y caracterizar el impacto en las respuestas fisiológica. Se presenta también, un análisis preliminar de la respuesta a nivel del genoma del organismo. Se llevó a cabo un ciclo de producción durante la primavera-verano para generar información relativa al impacto de los sistemas continuos de aireación en la calidad de agua, sobrevivencia, factor de conversión alimenticia y biomasa. Un segundo ciclo de producción permitió establecer el efecto de la reducción en el nivel de aireación de 24 a 12 horas por día. La hipótesis nula estableció que no existe una modificación en la respuesta productiva del organismo relacionada con el tipo de equipos utilizados o el tiempo para realizar el proceso de aireación, y que esta reducción no afecta la respuesta fisiológica del organismo. En la primera evaluación se obtuvieron rendimientos promedio de 17.1, 16.9 y 16.6 t/ha para estanques de cultivo replicados con dos aspiradores, dos aireadores de paleta o un aspirador y un aireador de paleta de 2 hp, respectivamente. La sobrevivencia no fue significativamente diferente entre los sistemas y promedió 84.97% después de 105 días de cultivo. El costo de producción por hectárea equivale a \$776,336 y los ingresos por venta fueron de \$1'435,678, por lo que la utilidad neta fue de \$659,342. La segunda evaluación permitió establecer que una reducción del tiempo de aireación a 12 hrs/día resulta en una incapacidad de los organismos para alcanzar tasas máximas de crecimiento. Los resultados mostraron que con 24 horas de aireación por día se alcanzaron tallas promedio de 15.4 ± 0.21 g, con una biomasa de $18,851 \pm 325$ kg/ha, mientras que el promedio fue de 10.84 ± 0.07 g (biomasa = $13,179 \pm 390$ kg/ha) cuando el tiempo de aireación fue de 12 hrs/día. No hubo diferencias significativas en sobrevivencia (promedio de 81.3%). El consumo de oxígeno (0.3875 mgO₂/g/hr) y el punto crítico (1.3 mg O/l) fueron significativamente más altos con aireación reducida, lo que indica un mayor consumo de energía para el metabolismo rutinario y una menor tolerancia a condiciones adversas de cultivo cuando se reduce la aireación. El análisis preliminar de la expresión génica en un microarreglo heterólogo mostró que los organismos cultivados con aireación restringida evidencian una afectación de la capacidad de producir eficientemente ATP, asociado a procesos de fosforilación oxidativa, que interviene en 90% del uso de energía celular. Esto se refleja en una pérdida en la capacidad de crecimiento. Por otro lado, la sobre-expresión de genes indicativos de actividad de serina, la cual se relaciona con la activación de la cascada fenoloxidasas, se asocia a la pérdida de la capacidad de respuesta inmune del organismo en condiciones de estrés. Estudios posteriores deberán confirmar su correlación con el efecto de las condiciones de cultivo en el camarón. Se concluye que el cultivo intensivo 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 energía por bombeo de agua, manteniendo condiciones estables de cultivo y minimizando la posible entrada de patógenos al sistema.

Palabras clave: Tiempo de aireación, cultivo foto-heterotrófico, camarón *Litopennaeus vannamei*, respuesta fisiológica

ORCID: 0000-0002-9749-7425

Vo.Bo.



Dr. Felipe de Jesús Ascencio Valle
Director de Tesis

Summary

The drop in shrimp production in Mexico has been associated mainly to diseases, outdated infrastructure and the use of obsolete technologies. To counter this, bio secure and economically efficient systems are needed. The photoheterotrophic culture is a hybrid system that mixes heterotrophic, chemotrophic and autotrophic microorganisms when a balance is struck in the ecosystem between nutrients, available dissolved oxygen and a capacity for particle transportation, through aeration. Aeration is fundamental to stabilize the system, minimize water exchange so that culture is optimized. However, the cost for its use can be significant. The object of the present research was to characterize the impact of different aeration equipment for the intensive photoheterotrophic production of shrimp, establish the effect of a reduction in aeration time and characterize the impact on the physiological response of the organism. A preliminary analysis of the genome response is also presented. A spring-summer culture cycle was conducted to generate information on the continuous use of different aeration equipment on water quality, survival, food conversion ratio and yield. A second production cycle tested the reduction of aeration from 24 to 12 hours per day. The null hypothesis established that there would be no differences in production from different aeration equipment use or from a reduction in aeration time, and that this reduction would not impact the physiological response. Average yields of 17.1, 16.9 and 16.6 t/ha were obtained during the first evaluation for replicate ponds with, respectively, two 2 hp aspirators, two paddlewheels, and one each, an aspirator and a paddlewheel. Survival was not significantly different among treatments averaging 84.97% after 105 days of culture. Production costs per hectare was \$776,336 pesos and gross income \$1'435,678, giving a net income of \$659,342. The second evaluation established that reducing aeration to 12 h/day would not allow the shrimp to maximize growth. The 24 h/day aeration treatment resulted in a final weight of 15.4 ± 0.21 g, and a biomass of $18,851 \pm 325$ kg/ha, while the averages were 10.84 ± 0.07 g and $13,179 \pm 390$ kg/ha when aeration was 12 h/day. There were no statistical differences in survival (av. 81.3%). The oxygen consumption (0.3875 mgO₂/g/h) and critical point of oxygen saturation (1.3 mg O /l) were higher on shrimp with restricted aeration, indicating more energy expenditure for routine metabolism and a reduced capacity to withstand adverse culture conditions. A preliminary analysis of genic expression showed that, on a heterologous micro array, organisms with restricted aeration evidenced an affectation on the capacity to produce ATP, associated to oxidative phosphorylation that intervenes on 90% of cellular energy use. This would be shown as a loss in growth capacity. On the other hand, the over-expression of genes indicative of serine activity, which is related to the activation of the phenoloxidase cascade, is associated with the loss of the body's immune response capacity under stress conditions. Future studies are needed to confirm these findings and the potential correlation with culture conditions. It is concluded that the intensive photoheterotrophic culture is a good alternative for the shrimp industry, as it allows for high yields to be obtained in limited space, reduce the costs for feeding an energy for water pumping, maintaining stable culture conditions and minimizing potential pathogen entries to the system.

Keywords: Aeration time, photo-heterotrophic culture, shrimp *Litopennaeus vannamei*, physiological response

ORCID: 0000-0002-9749-7425

Vo.Bo.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Felipe de Jesús Ascencio Valle". The signature is fluid and cursive, with a long horizontal stroke at the end.

Dr. Felipe de Jesús Ascencio Valle
Director de Tesis

Dedicatoria

A mi Mamá...

A mi Papá.....

A mi Hermana....

Agradecimientos

Al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR) y en especial a la Dirección de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos por las facilidades otorgadas durante mis estudios de Maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada (CVU: 1011940).

Al Dr. Felipe de Jesús Ascencio Valle por su guía y paciencia durante mi Posgrado en condiciones difíciles.

A los Dres. José Naranjo Páramo y Clive M. Jones por aceptar ser mis Co-Tutores y ofrecer diferentes puntos de vista, consejos y sugerencias para mejorar mi trabajo. Al Dr. José Luis Juárez por su apoyo en la parte inicial de mi Maestría.

Al Dr. Humberto Villarreal por su apoyo durante la ejecución del trabajo de campo y por facilitar la información asociada a los proyectos FINNOVA No. 192666 y el Proyecto de recursos propios con la empresa Aeration Industries International, los cuales financiaron el desarrollo de la presente investigación.

Al Sr. Marcos Kroupa y a Aeration Industries International por su apoyo durante la realización de la fase experimental.

Al personal de Biohelis-CIBNOR y especialmente a la Ing. Mayra Vargas Mendieta, M.C. José Andrés Hernández Gurrola, Dr. Luis Daniel Moreno, Biol. Jesús Antonio Aguilar Villavicencio, Tec. Víctor Polo.

Contenido	
Resumen	i
Summary	iii
Dedicatoria	v
Agradecimientos	vi
Contenido	vii
Lista de figuras	ix
Lista de tablas	xi
Abreviaturas	xii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	5
2.1 Biología y producción del camarón blanco <i>Litopenaeus vannamei</i>	5
2.2 Uso de recambio de agua y aireación en la acuicultura.....	7
2.2.2 Aireación.....	8
2.3 Sistemas de producción de camarón	8
2.3.1 Sistema Fototrófico	9
2.3.2 Sistema Heterotrófico	10
2.3.3 Sistema Foto-heterotrófico	11
2.4 Metabolismo rutinario y punto crítico	13
2.5 Expresión génica asociada a la respuesta fisiológica	15
3. JUSTIFICACIÓN	17
4. HIPÓTESIS	18
5. OBJETIVOS	19
5.1 Objetivo general	19
5.2 Objetivos particulares	19
6. MATERIAL Y MÉTODOS	21
6.1 Preparación de unidades experimentales.....	21
6.2 Organismos experimentales.....	22
6.3 Evaluaciones experimentales	23
6.3.1 Evaluación de diferentes sistemas de aireación	23
6.3.2 Evaluación del tiempo de aireación.	26
6.3.3 Evaluación de tasa metabólica estándar y punto crítico de conformación respiratoria	28
6.3.4 Extracción de RNA	29
6.4 Análisis estadísticos	31
7. RESULTADOS	32
7.1 Evaluación de diferentes sistemas de aireación	32
7.1.1 Parámetros de calidad de agua	32
7.1.2 Respuesta de variables productivas	37
7.1.3 Uso de energía eléctrica.....	39
7.1.4 Requerimiento de agua	40
7.1.5 Velocidad de corriente	40
7.1.6 Análisis de costos, ingresos y utilidad neta	42
7.1.6.1 Costos de producción	42
7.1.6.2 Ingresos y utilidad neta	43
7.2 Evaluación de tiempos de aireación.....	44
7.2.1 Parámetros de calidad de agua	44
7.2.2 Respuesta de variables productivas	45
7.2.3 Costos, ingresos y utilidad neta.....	47

7.3 Tasa metabólica estándar (TME) y punto crítico (PC)	48
7.4 Expresión génica	49
8. DISCUSIÓN	56
8.1 Evaluación de diferentes sistemas de aireación	56
8.1.1 Parámetros de calidad de agua	56
8.1.2 Respuesta de variables productivas	58
8.1.3 Uso de energía eléctrica	59
8.1.4 Requerimiento de agua	59
8.1.5 Velocidad de corriente	59
8.1.6 Análisis de costos, ingresos y utilidad neta	60
8.2 Evaluación de diferentes tiempos de aireación	61
8.2.1 Parámetros de calidad de agua	61
8.2.2 Respuesta de variables productivas	62
8.3 Tasa metabólica estándar (TME) y punto crítico (PC)	63
8.4 Expresión génica	64
9. CONCLUSIONES	66
10. LITERATURA CITADA	67
11. ANEXOS	82

Lista de figuras

Figura 1. Producción mundial de camarón por Acuicultura. Tomado de National Fisheries Institute (2020).....	1
Figura 2. Principales retos de la producción mundial de camarón. Tomado de Global Aquaculture Alliance (2018).....	2
Figura 3. Ciclo de vida natural del camarón blanco, <i>L. vannamei</i> (Fuente: FAO, 2011).	5
Figura 4. Esquema de un sistema Foto-Heterotrófico (Tomado de Moreno-Figueroa (2017).	12
Figura 5. Variación de la temperatura, (A) a las 8 am y (B) a las 6 pm, en estanques de cultivo intensivo de camarón blanco con diferentes equipos de aireación de 2 HP: Aspirador (A1, A2), Paletas (P1, P2) y Combinación aspirador-paletas (C1, C2). La línea roja y el número, representan el momento en que el nivel de aireación se incrementó de 20 hp/ha a 40 hp/ha.	34
Figura 6. Variación de la concentración de oxígeno disuelto (A) a las 8 am y (B) a las 6 pm, en estanques de cultivo intensivo de camarón blanco con diferentes equipos de aireación de 2 HP: Aspirador (A1, A2), Paletas (P1, P2) y Combinación aspirador-paletas (C1, C2). La línea roja y el número representan el momento en que el nivel de aireación se incrementó de 20 hp/ha a 40 hp/ha.	35
Figura 7. Incremento en peso de <i>Litopenaeus vannamei</i> a través del tiempo durante la engorda con diferentes equipos de aireación de 2 HP: Aspirador (A), paletas (P) y combinación aspirador-paletas (C).....	38
Figura 8. Velocidad de corriente generada por aireadores de aspiración y de paleta en los días 5 y 100 de cultivo intensivo de camarón blanco <i>L. vanammei</i>	41
Figura 9. Estanques vacíos de 1,000 m ² en BioHelis al final de la evaluación con diferentes equipos de aireación de 2 HP.....	42
Figura 10. Condición de desgaste de (A) aireador de paleta y (B) aspirador al final de la evaluación de cultivo intensivo de camarón blanco.....	44
Figura 11. Incremento en peso a través del tiempo de <i>L. vannamei</i> en cultivo intensivo sin recambio de agua y con diferentes niveles de aireación.....	46
Figura 12. Consumo de oxígeno del camarón blanco <i>Litopenaeus vannamei</i> , después de 80 días de cultivo con 2 esquemas diferentes de aireación suplementaria.	49
Figura 13. Punto crítico de conformación metabólica del camarón blanco <i>Litopenaeus vannamei</i> , después de 80 días de cultivo intensivo con 2 esquemas diferentes de aireación suplementaria.	49
Figura 14. Distribución de transcritos sobre-expresados y suprimidos utilizando la base de datos DAVID, para procesos moleculares y biológicos, componentes celulares y rutas metabólicas de camarón blanco <i>Litopenaeus vannamei</i> sometido a cultivo intensivo por 105 días.....	50
Figura 15. Genes suprimidos para: Procesos biológicos en camarón blanco. <i>L. vanammei</i> , cultivado de manera intensiva por 105 días.	51
Figura 16. Genes suprimidos para: Componentes celulares en camarón blanco. <i>L. vanammei</i> , cultivado de manera intensiva por 105 días.	52
Figura 17. Genes suprimidos para: Funciones metabólicas en camarón blanco. <i>L. vanammei</i> , cultivado de manera intensiva por 105 días.	53
Figura 18. Genes sobre-expresados para: Procesos biológicos en camarón blanco. <i>L. vanammei</i> , cultivado de manera intensiva por 105 días.	54

Figura 19. Genes sobre-expresados para: Componentes celulares en camarón blanco. <i>L. vanammei</i> , cultivado de manera intensiva por 105 días.	55
Figura 20. Genes sobre-expresados para: Funciones metabólicas en camarón blanco. <i>L. vanammei</i> , cultivado de manera intensiva por 105 días.	55

Lista de tablas

Tabla 1. Ración alimentaria con base en el peso húmedo del camarón (Tomado de Zeigler Bros.Co. https://issuu.com/zeiglerbrosfeed/docs/shrimp_catalog).	24
Tabla 2. Costos de operación para producción de camarón en Baja California Sur (Tomado de Moreno-Figueroa, 2017).	27
Tabla 3. Parámetros fisicoquímicos de calidad del agua, durante la engorda intensiva de <i>Litopenaeus vannamei</i> utilizando sistemas de aireación diferentes. Promedio \pm desviación estándar*.....	33
Tabla 4. Promedio (\pm desviación estándar) de los parámetros de producción de <i>Litopenaeus vannamei</i> cultivado con diferentes equipos de aireación de 2 HP, después de 105 días de engorda.	38
Tabla 5. Valores de amperaje y voltaje registrados durante la engorda de <i>Litopenaeus vannamei</i> para diferentes sistemas de aireación de 2 HP: aireador tipo aspirador (A1, A2), aireador de paletas (P1, P2) y combinación aspirador-paletas (C1, C2).	39
Tabla 6. Rendimiento promedio y requerimiento de KWhr por kilogramo de camarón producido, para estanques con diferentes equipos de aireación de 2 HP.....	40
Tabla 7. Costos fijos y variables en estanques de engorda intensiva de camarón con (A) 2 aspiradores de 2 HP c/u, (P), 2 paletas de 2 HP c/u y (C) combinación de un aspirador de 2 HP y una paleta de 2 HP por estanque.....	43
Tabla 8. Rendimiento, peso final, precio de venta, costo de operación, ingresos por venta, utilidad neta y beneficio/costo en estanque de engorda de camarón con diferentes equipos de aireación de 2 HP.....	44
Tabla 9. Valores promedio (\pm desviación estándar) de los parámetros fisicoquímicos de calidad del agua, durante la engorda (105 días) de <i>Litopenaeus vannamei</i> con diferentes tiempos de aireación.....	45
Tabla 10. Promedio (\pm desviación estándar) de peso inicial y final, sobrevivencia, factor de conversión alimenticia (FCA), tasa de crecimiento absoluta (TCA) y biomasa del camarón <i>Litopenaeus vannamei</i> en cultivo intensivo durante 105 días con dos niveles de aireación, en estanques experimentales de 1.000 m ² revestidos de membrana de HDPE.	47
Tabla 11. Rendimiento, peso final, precio de venta, costo de operación, ingresos por venta y utilidad neta en estanque de engorda de camarón con diferentes tiempos de aireación.	47

Abreviaturas

$\mu\text{g/ml}$ = Microgramo por mililitro

μl = Micro litro

μm = Micrómetro

CaCO_3 = Carbonato de calcio

cm = Centímetro

CO_2 = Dióxido de carbono

DBO_5 = Demanda bioquímica de oxígeno (5 días)

DL_{50} = Dosis letal 50

FAO = Food and Agriculture Organization

FCA = Factor de conversión alimenticia

g = Gramo

h = hora

ha = Hectárea

HDPE = Polietileno de alta densidad

HP = Caballo de fuerza

Ind = Individuo

kg = Kilogramo

kWh = Kilowatt por hora

L = Litro

m = metro

m^2 = Metro cuadrado

mm = milímetro

mg/l = Miligramo por litro

ml/l = Mililitro por litro

ml = mililitro

N = Nitrógeno

NAT = Nitrógeno amoniacal total

NH_3 = Amoniac (amonio no-ionizado)

NH_4 = Amonio

NO_2 = Nitrito

NO_3 = Nitrato

nm = Nanómetro

O_2 = Oxígeno atmosférico

OD = Oxígeno disuelto

P = Fósforo

PC = Proteína cruda

ppt = Partes por mil

PO_4 = Fosfato

PL = Postlarva

SiO_2 = Óxido de silicio

SS = Sólidos sedimentables

SST = Sólidos suspendidos totales

UFC = Unidades formadoras de colonia

1. INTRODUCCIÓN

La producción acuícola creció a un ritmo anual de 6.2% (Martínez-Córdova *et al.*, 2015) de 1970 a 2008. En los últimos 10 años, su contribución pasó de 34.6 a 59.9 millones de toneladas, lo cual representó un incremento del 42.3%. Actualmente se producen 82,1 millones de toneladas, que representan el 46 % de pescados y mariscos (FAO, 2020). La camaronicultura, en particular, genera anualmente alrededor de 4 millones de toneladas (Figura 1) representando el producto acuícola-pesquero más importante, desde el punto de vista económico (GOAL, 2013; FAO 2020).

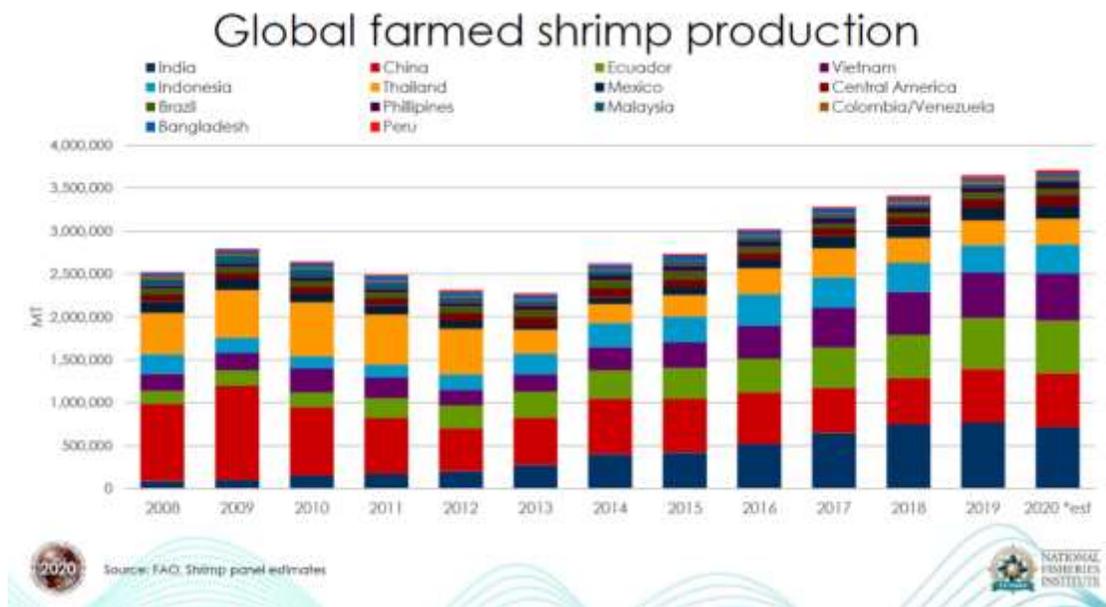


Figura. 1 Producción mundial de camarón por Acuicultura. Tomado de National Fisheries Institute (2020).

El camarón blanco *L. vannamei* es la especie preferida para el consumo en los Estados Unidos, el mayor mercado de camarón del mundo. Existe también una fuerte demanda de esta especie en los mercados de Europa, China, Taiwán y Tailandia (Briggs *et al.*, 2005). Por lo que la producción de este crustáceo ha venido adquiriendo cada vez mayor relevancia en los países que se encuentran en las zonas tropicales y subtropicales del mundo.

La camaronicultura genera empleos, divisas y da ganancias económicas para las empresas del sector. Sin embargo, enfrenta una problemática relevante, donde las enfermedades, la caída de

precios, el aumento en el costo de producción y la falta de líneas genéticas adecuadas (Figura 2) se unen a los problemas de falta de sustentabilidad relacionados con el impacto ambiental que causan los efluentes de las granjas sobre los ecosistemas receptores de las descargas y la dependencia en la harina de pescado, para la fabricación de alimentos balanceados (Martínez-Córdova *et al.*, 2015).

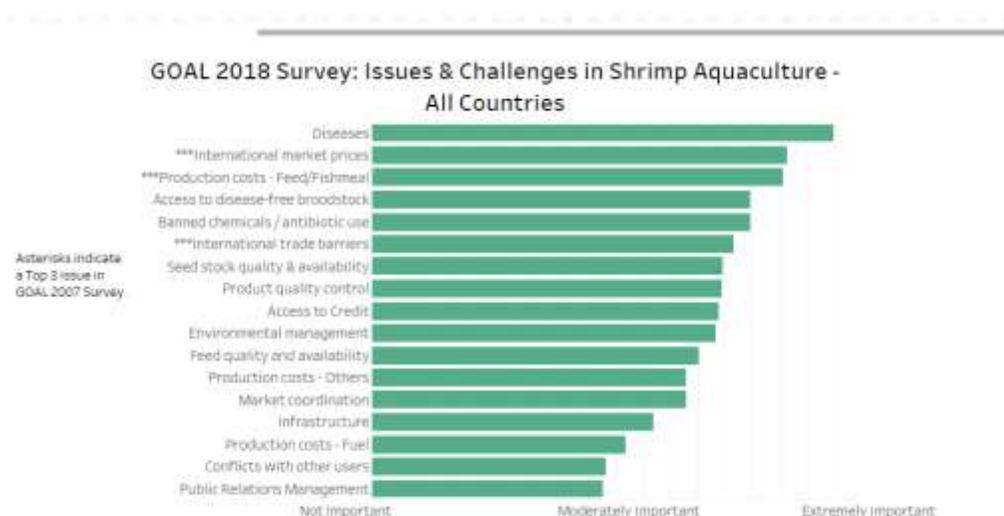


Figura 2. Principales retos de la producción mundial de camarón. Tomado de Global Aquaculture Alliance (2018).

El 95% de las granjas en México utilizan grandes volúmenes de agua, los cuales retornan a los cuerpos de agua costeros con una carga orgánica mayor al 200% (Anaya, 2012), provocando eutrofización, alteración de flora y fauna bentónicas y el florecimiento de organismos nocivos a la salud de los organismos en la zona (Martínez-Córdova, 1998). Para enfrentar dichos retos, se busca intensificar la producción con mínimo recambio de agua, 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 (Tacon *et al.*, 2002; Villarreal *et al.*, 2012).

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). Durante el día, el fitoplancton produce oxígeno y absorbe directamente algunos productos metabólicos producidos en el estanque, como amoníaco y bióxido de carbono, afectando negativamente la salud de los organismos (Yao *et al.*, 2001). Esta función es relevante en la regulación de parámetros de calidad de agua (Alonso-Rodríguez *et al.*, 2004). Wasielesky *et al.* (2006) mencionan que los sistemas de cultivo basados en la productividad primaria (fitoplancton) alcanzan producciones de 500 kg/ha.

Bowen y McIntosh (2006) indican que el desarrollo de sistemas a base de bacterias heterotróficas, que dominan la comunidad microbiana del medio acuático, asimila de 10 a 100 veces más residuos nitrogenados, cuando se compara con sistemas basados en productividad primaria (microalgas). Estos residuos, llamados “biofloc”, generan residuos con proteína de alta digestibilidad que aprovechan los organismos cultivados. En estanques a cielo abierto las bacterias interactúan con productividad primaria, lo que da origen a los llamados sistemas híbridos o “foto-heterotróficos” (Moreno-Figueroa, 2017). Villarreal *et al.* (2012) establecen que es esencial lograr un manejo optimizado de estos sistemas, incluyendo el alimento que se suministra en función a la biomasa de camarón y la cantidad de movimiento mediante el uso de sistemas de aireación, que transporta partículas en suspensión y proporciona oxígeno suplementario. Los microorganismos utilizados como base para la producción deben mostrar inocuidad, poseer rápida colonización en el huésped y tener un efecto antagónico en el desarrollo de bacterias potencialmente patógenas (p.e. *Vibrio* spp.), por lo que generalmente se prefieren organismos locales de la zona donde se realiza el cultivo del camarón (Rodríguez-Méndez *et al.*, 2006). Estos microorganismos son capaces de reducir la concentración de metabolitos tóxicos (como los productos nitrogenados) en la columna de agua o constituirse como una barrera biológica que evita la colonización del tracto digestivo del camarón para promover un crecimiento adecuado (Huys *et al.*, 2001; Torres-Beristain, 2005).

La aireación tiene un papel fundamental en el cultivo de camarón ya que permite difundir el oxígeno del ambiente para mantener el nivel de oxígeno disuelto en el agua, movilizar los nutrientes en la columna de agua mejorando el desarrollo del fitoplancton y la descomposición de materia orgánica (Hernández-Gurrola, 2016). La aireación es fundamental cuando la carga

orgánica del alimento ocasiona que este pase de ser autotrófica a heterotrófica, ya que los estanques heterótrofos tienen una producción negativa de oxígeno debido al exceso de consumo de éste (Tacon *et al.*, 2002; Villarreal *et al.*, 2012). Consecuentemente, la aireación se utiliza para corregir la pérdida de oxígeno y estabilizar el nivel diurno de oxígeno. Mohanty (2001) ha indicado que los estanques semi-intensivos pueden ser aireados durante la noche, pero que la aireación durante el día no es necesaria. Sin embargo, Sanares *et al.* (1986) mencionan que la aireación diurna puede ser negativa pero que, en estanques que reciben una cantidad significativa de alimento, pueden requerir aireación continua para mezclar el agua y evitar condiciones anaeróbicas en el fondo. Esto quiere decir que la aireación se incrementa de 12 horas por la noche a 24 horas al día, conforme el cultivo avanza. Sin embargo, la aireación puede no resultar en un incremento sustancial de producción haciendo la producción poco viable (Naranjo-Páramo, 2009).

2. ANTECEDENTES

2.1 Biología y producción del camarón blanco *Litopenaeus vannamei*

El camarón blanco, *L. vannamei*, es nativo de la costa oriental del Océano Pacífico, y se encuentra desde Sonora, México, hasta Tumbes en Perú, en aguas marinas tropicales y subtropicales (FAO, 2011). Son organismos altamente adaptables, lo que los hace deseables para la acuicultura, ya que los adultos se reproducen en mar abierto, donde 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. La postlarva migra a la costa y la etapa juvenil y pre-adulta se desarrolla en esteros, lagunas y manglares (Figura 3).

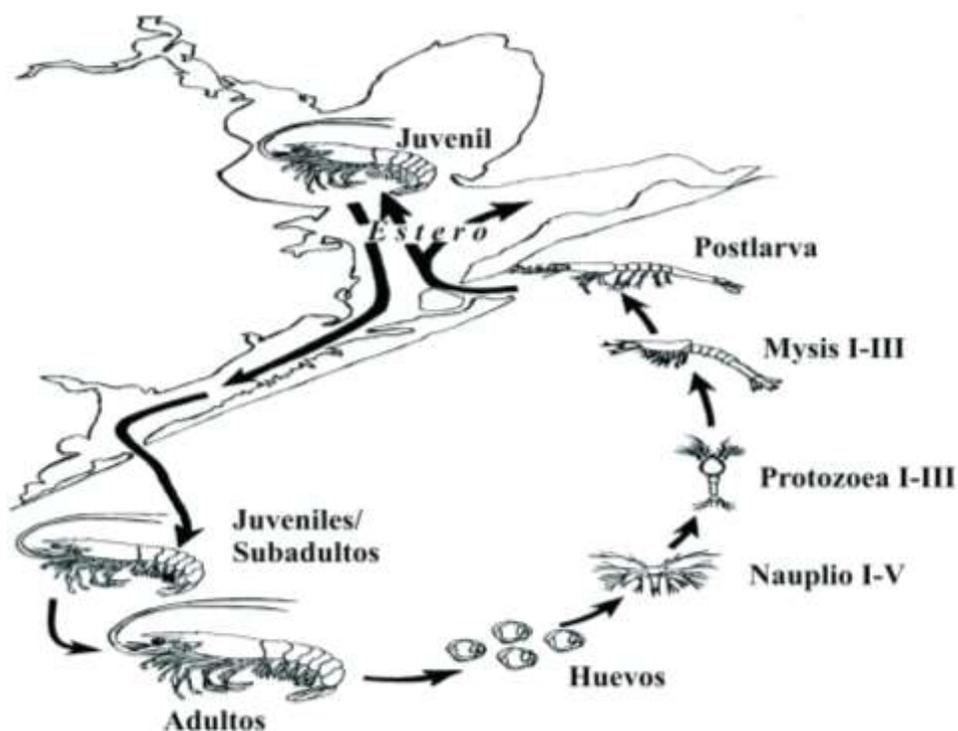


Figura 3. Ciclo de vida natural del camarón blanco, *L. vannamei* (Fuente: FAO, 2011).

La producción comercial de camarón ha sido exitosa a nivel mundial, ya que cuenta con desarrollos tecnológicos efectivos para su crianza en sistemas controlados. Recientemente se ha evidenciado que tolera densidades altas con altas sobrevivencias al final del cultivo (Arredondo-Figueroa, 2002). Sin embargo, la presencia de enfermedades, en Asia y América Latina, y los

problemas de calidad del agua, han causado pérdidas económicas significativas (FAO, 2011). En México, la producción principal por cultivo se da en el Noroeste de México, donde las granjas llevan a cabo uno o dos ciclos de producción semi-intensiva, dependiendo de la presencia de enfermedades, demanda y precio de venta (ISAPESCA, 2017). México ocupó el séptimo lugar a nivel mundial en el cultivo de camarón en 2010, aportando 115,000 t de las 3'778,000 t de la producción mundial. Sin embargo, en 2013, la industria sufrió un colapso significativo, originado por enfermedades relevantes como mancha blanca y mortalidad temprana (Leaño y Mohan, 2012; Peña-Navarro *et al.*, 2013) por lo que la producción anual disminuyó a 50,000 toneladas (CONAPESCA, 2011; Villarreal *et al.* 2019).

La mortalidad temprana es causada por una cepa patógena de *Vibrio parahaemolyticus*, que se introduce por vía oral por los detritos que se encuentran en la columna de agua y el fondo del estanque, produciendo toxinas que afectan la función del hepatopáncreas (Peña-Navarro *et al.*, 2013). A fin de poder prevenir estos problemas sanitarios es fundamental el manejo eficiente de la microbiota en el sistema de cultivo, generando una cadena trófica bien estructurada entre los nutrientes y el conjunto bacteria-microalga (Moriarty *et al.*, 2000). Avnimelech (1999) indicó que esto es posible si se emplea aireación y un balance adecuado de carbono/nitrógeno (C: N), manteniendo una proporción de 15-20:1, así como la adición de probióticos (Tseng *et al.*, 2009), que también propician el aumento de la actividad fagocítica inmuno dependiente.

Browdy *et al.* (2006) indicaron que aplicando este balance C: N se mejora la calidad de agua, así como la tasa de crecimiento del camarón. Para esto se requiere optimizar el suministro de alimento suplementario, reduciendo el nivel de proteína de la ración y maximizar el uso del valor proteico del detrito (Burford *et al.*, 2004). Esto limita la concentración de metabolitos tóxicos (Avnimelech, 2012) y reduce el costo de producción (Hari *et al.*, 2004; Villarreal *et al.*, 2012).

Por otro lado, una estrategia para mejorar las condiciones de bioseguridad de un cultivo se relaciona con limitar la interacción con el medio ambiente durante el suministro y la descarga de agua mediante el uso de aireación artificial y/o la disminución del recambio de agua. Vinatea

y Carvalho (2007) mencionan que la aireación se debe considerar esencial para cubrir los requerimientos fisiológicos del organismo de cultivo.

Por su lado, Sandifer y Hopkins (1996) establecen que con el uso de aireación se puede reducir el recambio de agua, mantener una concentración de oxígeno disuelto estable y los sólidos sedimentables en suspensión, mientras que McIntosh y Fitzsimmons (2003) y Samocha *et al.* (2007), entre otros, indican que reducir el recambio de agua limita el riesgo de infección y de eutrofización del agua. De ahí han surgido tecnologías basadas en la homogeneización de las condiciones en la columna de agua para estimular el crecimiento de bacterias heterótrofas que permitan incorporar a la cadena trófica la materia orgánica suspendida, una vez que esta ha sido parcialmente oxidada (Burford *et al.*, 2004).

2.2 Uso de recambio de agua y aireación en la acuicultura

2.2.1 Recambio de agua

El éxito en el cultivo de camarón 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 por eutrofización (Burford *et al.*, 2003). Además, en la región noroeste de México la reducción del recambio de agua es un reto ya que, debido a las altas tasas de evaporación, la salinidad del agua se incrementa (Martínez *et al.*, 1997), estresando al organismo (Villarreal *et al.*, 2003).

Por otro lado, los sistemas sin recambio de agua, intensivos y súper-intensivos, se han utilizado para disminuir la tasa de alimentación del camarón (Avnimelech, 2012), limitando las pérdidas de microalgas y nutrientes. Esto trae como beneficio la reducción en el impacto de los cuerpos de agua adyacentes (Boyd, 1999) y la reducción de costos de energía para bombeo.

2.2.2 Aireación

Como se menciona anteriormente, la aireación funciona como fuerza de circulación y mezcla del agua de un estanque, por un lado, y propicia el intercambio de gases con la columna de aire atmosférico, resultando en un incremento en la cantidad de oxígeno disuelto (Boyd, 1998). También se reducen la posibilidad de la presencia de zonas anóxicas y la estratificación de temperaturas. Los equipos más utilizados para airear estanques de cultivo de camarón son los aireadores de paleta y los aspiradores, que forman parte esencial del sistema intensivo de producción (Kumar et al., 2010).

2.3 Sistemas de producción de camarón

Los sistemas de cultivo se pueden clasificar en cuatro categorías de acuerdo a la densidad de siembra y las características asociadas a su manejo (Martínez-Palacios, 1992). (1) Los estanques extensivos utilizan grandes extensiones de tierra (hasta 100 hectáreas), hay poco control del sistema y la producción es entre 500 y 1,000 kg/ha. (2) Los estanques semi-intensivos de tierra son de tamaño moderado (1-20 ha), recambio de agua de 5-20%/día, densidad de siembra entre 5 y 25 individuos/m², aireación parcial, alimentación suplementaria y fertilización inicial. Se produce de 1 a 5 ton/ha/año. (3) En el cultivo intensivo se utilizan estanques pequeños (0.1-2 ha), de tierra o recubiertos con membrana plástica, con recambio de agua de 25-100%/día. La densidad de siembra es de 25 a 100 individuos/m² y se utiliza aireación particularmente durante la noche. Los rendimientos van de 5 a 15 ton/ha. (Tacon, 2002). (4) En un sistema hiperintensivo, se requiere un control total del proceso de producción en estanque de pequeño tamaño donde se elimina el recambio de agua, la aireación debe alcanzar niveles de 4-6 mg/l de oxígeno disuelto y la densidad de siembra es de más de 120 organismos/m², con rendimientos cercanos a 20 ton/ha/ciclo (Villarreal et al., 2019). Experimentalmente en un sistema intensivo de tipo heterotrófico (biofloc), se pueden producir hasta 100 ton/ha de camarón (Tidwell, 2012).

Aunque la producción actual de camarón es cercana a las 140,000 toneladas por año (CONAPESCA, 2020), el Plan Rector Nacional de Pesca y Acuicultura (CONAPESCA, 2008)

estableció una meta de 300,000 toneladas, únicamente para cubrir la demanda nacional que se tendrá para el año 2030. Si se busca incrementar la producción y la rentabilidad (Piedrahita, 2003; Bosma y Verdegem, 2011; Gyalog *et al.*, 2011), México debe seguir la tendencia mundial de la industria hacia la intensificación y la hiper intensificación. Existen diferentes sistemas hiper intensivos que deben ser evaluados y las estrategias necesarias para su manejo (Moreno-Figueroa, 2017):

2.3.1 Sistema Fototrófico

Villarreal *et al.* (2012) indican que el sistema fototrófico se basa en la productividad autótrofa generada por microalgas, por lo que requiere de fertilización, ya sea orgánica o inorgánica, para incrementar los niveles de nitrógeno y fósforo. Estos sistemas requieren estanques a cielo abierto (expuestos al sol) de tierra o recubiertos con membrana plástica entre 0.5 y 1 ha de superficie (Villarreal, 2005). De día la fotosíntesis genera oxígeno. Por la noche, es común que disminuya la concentración de oxígeno disuelto, pudiendo afectar a los organismos cultivados, incluso causando la muerte (Avnimelech, 2012).

Por otro lado, Ebeling *et al.* (2006) mencionan que el nivel de amonio está asociado a la concentración de microalgas, ya que son éstas las encargadas de su asimilación y remoción.

Nutricionalmente, las microalgas proporcionan diversos compuestos. Brown (1997) estableció que las microalgas pueden aportar 20% de lípidos, 25% de carbohidratos y hasta 50% de proteínas. Algunas etapas larvales de los crustáceos pueden nutrirse completamente de microalgas, pero también alimentan al zooplancton que forma parte de la cadena trófica en sistemas de cultivo (Alonso-Rodríguez *et al.*, 2004) que es más relevante al aumentar la intensificación.

En el sistema intensivo fototrófico la densidad de siembra varía entre 30-100 organismos/m², con una producción entre 5 y 10 t/ha por ciclo. Debido a la acumulación de metabolitos tóxicos, así como para evitar problemas de anoxia, utilizan un recambio de agua de 15-30%/día y aireación mecánica (Villarreal *et al.*, 2012).

2.3.2 Sistema Heterotrófico

Se desarrollan principalmente en invernaderos a fin de controlar la temperatura, incrementar la bioseguridad y generar floculaciones (“bioflocs”) de materia orgánica, microalgas, protozoarios y bacterias, lo que permite una intensificación de la producción y reducción de los problemas relacionados con la sanidad (Avnimelech, 2012). El consumo del biofloc reduce el factor de conversión alimenticia aparente, y contribuye al incremento de la tasa de crecimiento del camarón (Burford *et al.*, 2004). Las comunidades de microorganismos son eficientes en la remoción del nitrógeno amoniacal (Schraeder *et al.*, 2011), utilizando compuestos lixiviados de heces y alimento no consumido, para transformarlo en proteína, que es aprovechada por el organismo en cultivo (Emerenciano *et al.*, 2013). Esto permite reducir, e incluso eliminar, el recambio de agua, por un lado, y reducir la demanda de alimento suplementario, ya que la biomasa del flóculo se convierte en la principal fuente de proteína asimilable (31-43%), de carbohidratos (14-31%) y de lípidos totales (0.1-10%) (Burford *et al.*, 2004; Avnimelech, 2006; Crab *et al.*, 2010; Krummenauer, 2011).

El sistema heterotrófico de camarón requiere condiciones de calidad de agua constantes, con temperatura alrededor de 30°C, altos niveles de oxigenación (6 mg/l) y movimiento de agua mediante aireación constante. El biofloc cuenta con una estructura poco densa, que permite el paso de agua y nutrientes a través de su masa. El movimiento de agua generado por la aireación lo mantiene en la columna de agua y retrasa su sedimentación al fondo del estanque, (Avnimelech, 2012).

El nitrógeno amoniacal y otros compuestos como el nitrito (NO_2^-), provenientes del catabolismo de proteínas y la descomposición de materia orgánica, son generalmente abundantes, propician el desarrollo de microalgas y, en niveles altos, resultan tóxicos para el camarón (Avnimelech, 1999; Frías-Espericueta y Páez-Osuna, 2001). Generalmente, las bacterias quimioautótrofas nitrificantes (*Nitrospira* sp., *Nitrobacter* sp.) son eficientes para desdoblar estos desechos, pero (Ebeling *et al.*, 2006) mencionan que tienen un tiempo de generación más lento, así como una susceptibilidad a los cambios en su ambiente. Por ello, con la adición de fuentes de carbohidratos (melaza, salvado de arroz o trigo) para ajustar la proporción C: N, cercana a 20:1,

se estimula principalmente el crecimiento bacteriano heterótrofo, como *Pseudomonas* sp. y *Bacillus* sp., en el estanque (Avnimelech, 2006; Crab *et al.*, 2010; Monroy-Dosta *et al.*, 2013). Éstas incorporan los compuestos nitrogenados a su biomasa como proteína (Hargreaves, 2013) y sirven como inmunoestimulantes debido a que poseen polisacáridos que actúan directamente en el sistema inmune de los organismos en cultivo (Crab *et al.*, 2010), por lo que son deseables en el sistema. Sin embargo, el biofloc genera lodos sedimentables, que deben ser removidos mecánicamente.

Según Wasielesky *et al.* (2006), líneas genéticas de calidad a una densidad de siembra de hasta 500 organismos/m², producen tasas de crecimiento de 1.5 g/semana, sobrevivencia de más de 70% y biomasas de 80 t/ha. en tanques heterotróficos en invernaderos.

2.3.3 Sistema Foto-heterotrófico

De acuerdo con Villarreal *et al.* (2012), el sistema foto-heterotrófico busca el desarrollo de organismos heterotróficos y autotróficos producto del balance en los nutrientes suministrados, la concentración de oxígeno disuelto y el transporte de partículas por uso de sistemas de aireación. Algunos autores (McIntosh, 2001; Shishehchian, 2012; Huda *et al.*, 2013) lo describen como un sistema híbrido también llamado “semi-biofloc”, “mixotrófico” o “biofloc-verde” (Figura 4).

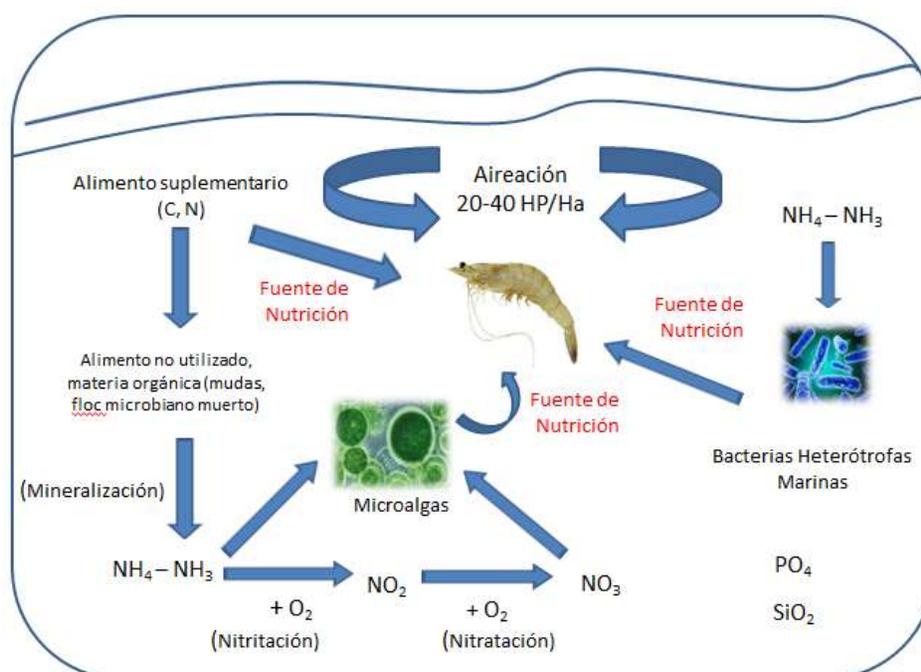


Figura 4. Esquema de un sistema Foto-Heterotrófico (Tomado de Moreno-Figueroa (2017)).

De manera similar al sistema heterótrofo, se genera un flóculo con algas verdes, bacterias, detritos, partículas orgánicas y protozoarios (Huda *et al.*, 2013). El agregado es utilizado como alimento de la especie cultivada, permite controlar la calidad del agua por lo que el recambio de agua es mínimo. Sin embargo, Moreno-Figueroa (2017) menciona que, contrario al sistema heterótrofo, en donde predominan bacterias, el balance entre los microorganismos autotróficos y heterotróficos es de 30-40% fitoplancton y 60-70% de bacterias, siempre y cuando la circulación del agua para evitar estratificación y el balance bacteria-microalga sean adecuados, con una saturación de 4 ppm de oxígeno disuelto como mínimo (Huda *et al.*, 2013). Esto es debido a que el sistema se desarrolla a cielo abierto y no en invernaderos. Pérez-Rostro *et al.* (2014) indican que el sistema híbrido microalga-bacteria es más eficiente en términos de biorremediación, ya que el aprovechamiento de metabolitos nitrogenados es hasta 100 veces más rápido con bacterias heterótrofas que con microalgas (Rosenberry, 2006), y la diversidad de alimento vivo disponible, permite reducir la cantidad de alimento suplementario necesaria para cubrir los requerimientos nutricionales.

Wasielesky *et al.* (2006) y Moreno-Figueroa *et al.* (2017) indican que el cultivo fotoheterotrófico produce en promedio 17 t/ha de camarón en 90 días de cultivo, con un FCA de 1.4 y un peso de 19 g por organismo.

2.4 Metabolismo rutinario y punto crítico

Generalmente se conoce que el manejo inadecuado durante el cultivo propicia el deterioro de los parámetros de calidad de agua afectando la producción comercial (Boyd y Tucker, 1998). El camarón blanco ha demostrado que es una especie robusta, lo que la hace deseable para el cultivo (Rosenberry, 2006; Villarreal *et al.*, 2012). Sin embargo, como cualquier especie acuícola, presenta requerimientos mínimos para su óptimo desarrollo (Villarreal, 2005). Para optimizar la respuesta del organismo y su producción se ha establecido que la concentración de oxígeno disuelto debe mantenerse por encima de 4 mg/L (Seidman y Lawrence, 1985; Ocampo *et al.*, 2000). Carreño-León *et al.* (2014) indicaron que cuando los niveles de saturación de oxígeno en el agua son bajos se presentan mecanismos de compensación a hipoxia: a) aumento de la concentración de hemocianina; b) aumento de la afinidad de la hemocianina por el oxígeno; y c) cambios en el metabolismo de la glucosa y el lactato (Astete-Espinoza *et al.*, 2010). Ulaje-Fernández (2015) mencionó que exposiciones agudas y crónicas a bajos niveles de oxígeno afectan la tasa de ingestión de alimento en el camarón peneido debido a la reducción de la demanda metabólica. Si el problema es recurrente, esto se verá reflejado en una caída en la tasa de crecimiento, como consecuencia de una afectación de la capacidad de asimilación de proteína y la consecuente baja en la conversión en biomasa. Por ello se considera que estimar tasa metabólica y nivel crítico de oxígeno de un organismo puede contribuir a establecer criterios para optimizar el rendimiento productivo en condiciones específicas de cultivo (Villarreal, 1989).

Se define como tasa metabólica basal aquella que considera funciones vitales como la respiración, circulación o tono muscular en condiciones de reposo durante el ayuno (Torres-Mendoza, 2007). Sin embargo, James (1989) indica que en animales poiquiloterms no es posible definir una tasa metabólica basal, porque la respuesta es termo-dependiente. McMahon (2001) indica que, en este caso, se puede determinar la tasa metabólica rutinaria, la cual se

mide a una temperatura biológicamente significativa como, por ejemplo, aquella que permite crecimiento óptimo durante el cultivo (Villarreal, 1989).

La tasa metabólica se estima por medio de calorimetría, en base a la energía metabólica liberada. En crustáceos se puede determinar por calorimetría indirecta a partir de la oxidación de los principales nutrientes (proteínas, carbohidratos, lípidos) y se refiere al consumo de oxígeno disuelto en función del tiempo, en organismos en ayuno. La medición puede variar en base al peso del organismo (Villarreal, 1989). Un animal que presente una tasa metabólica menor (i.e. un menor consumo de oxígeno), respecto a otro animal de la misma talla, será más eficiente metabólicamente y estará mejor preparado ante situaciones adversas de bajas de oxígeno en los estanques de cultivo (Torres-Mendoza, 2007).

La capacidad de adaptación del organismo de cultivo a variaciones en la concentración de oxígeno se puede definir estableciendo el intervalo de regulación y el punto donde inicia la conformación metabólica. Un animal que regula mantiene su respuesta fisiológica a pesar de las perturbaciones en el medio ambiente, mientras que un animal que conforma es aquel que cambia sus niveles internos en base a las variaciones del medio (McMahon, 2001). Villarreal (1989) estableció criterios donde se considera a un organismo como regulador de su tasa metabólica hasta cierto nivel de saturación de oxígeno en el agua. Una vez que se alcanza ese nivel de saturación de oxígeno, el organismo empieza a conformar su respuesta. Este nivel se considera como punto crítico donde inicia el nivel letal. Aquí, la energía por respiración es utilizada solo para las funciones metabólicas esenciales. Fisiológicamente, un organismo que presente un menor punto crítico de oxígeno estará mejor preparado frente a eventos de hipoxia en el estanque.

En el medio natural los organismos pueden aclimatarse en el tiempo si se presentan condiciones adversas en factores abióticos o bióticos, con respuestas fisiológicas, bioquímicas y de comportamiento, como estrategia de sobrevivencia (McMahon, 2001). Entre los más importantes factores se encuentran: temperatura, pH, salinidad, nutrientes o su carencia,

metabolitos, ciclo de muda, maduración sexual y competencia. En estanques de cultivo los cambios pueden ser más repentinos influenciando el estado fisiológico del animal.

La metodología utilizada para la determinación del metabolismo energético es por calorimetría indirecta, en la cual se asume que toda la energía se deriva del metabolismo oxidativo de carbohidratos, lípidos y proteínas (Gelineau et al., 1998). Por otro lado, Hopkins y Cech (1994) mencionan que evaluar el metabolismo respiratorio midiendo el consumo de oxígeno es factible ya que es un indicador sensible y no invasivo de la condición fisiológica, por medio del cual se puede cuantificar la cantidad de energía que está siendo utilizada por el organismo. Este valor permanece casi constante, independientemente de la oxidación de grasas, carbohidratos o proteínas (Schmidt-Nielsen, 1997), por lo que diferencias en los valores reflejan una condición fisiológica diferente. En estudios de especies cultivadas, se han utilizado la determinación de la tasa metabólica y del punto crítico de oxígeno para conocer la capacidad de adaptación del organismo a condiciones cambiantes y/o estresantes en el sistema. Varios autores (p. ej. Wickins, 1976; Paterson y Thorne, 1993; Rosas et al., 1995; Villarreal et al., 2003;) han reportado valores de tasa metabólica de 0.38 a 1.56 mg/O₂/h para diferentes crustáceos. Por otro lado, puntos críticos de 1.3 a 2.0 mgO₂/L han sido registrados (Seidman y Lawrence, 1985; Villarreal, 1989; Ocampo et al., 2001).

2.5 Expresión génica asociada a la respuesta fisiológica

Como se mencionó inicialmente, el camarón blanco es una especie altamente adaptable al cultivo. Esto quiere decir que cuentan y han desarrollado mecanismos de adaptación que permiten enfrentar los procesos de estrés a los que se enfrentan con mayor o menor éxito. La capacidad de respuesta fisiológica y metabólica del organismo permite adaptarse a variaciones en las condiciones del medio, como son temperatura, salinidad, pH y nivel de oxígeno disuelto en el agua. De manera similar se pueden adaptar al incremento en la densidad de cultivo y aprovechar eficientemente los nutrientes disponibles en el medio. Sin embargo, dicha adaptación representa una elección del uso de energía disponible al organismo. En otras palabras, a mayor requerimiento metabólico para cubrir funciones básicas del organismo, habrá menor disponibilidad para el crecimiento.

Ulaje-Fernández (2020) recientemente presentó una revisión de los genes relacionados con la expresión del camarón blanco a cambios en la temperatura y niveles de críticos de oxígeno (hipoxia), en donde la expresión génica a cambios de temperatura se relaciona con procesos de obtención de energía para el crecimiento y la reparación celular, mientras que las limitaciones de oxígeno generan una respuesta de la obtención y uso de energía asociada al estrés oxidativo, la síntesis de transportadores de oxígeno y glucosa (Jiang et al., 2009) y la síntesis de proteínas (Rathburn et al, 2013). Ulaje-Fernández (2015) utilizó un microarreglo heterólogo de *C. elegans* para demostrar una sobre expresión de genes asociados a constituyentes del ribosoma y el metabolismo de nucleótidos y ácidos grasos insaturados y la sub expresión del metabolismo de aminoácidos y la actividad oxido-reductasa que afecta la capacidad de utilización de oxígeno. Villarreal (1989), McMahon (2001) y Carreño-León (2013), entre otros, han indicado que en condiciones de hipoxia, los decápodos pueden cambiar de glucólisis aeróbica a anaeróbica, por lo que genes como el lactato deshidrogenasa (LDH), fructuosa 1,6-bifosfatasa (FBP), fosfofructoquinasa (PFK) y fosfenol piruvato carboxiquinasa (PEPCK) pueden utilizarse como indicadores en hemolinfa y hepatopáncreas, del uso de carbohidratos durante este cambio (Cota-Ruiz et al., 2015; Reyes-Ramos et al., 2018), mientras que la citrato cintasa (CS) y la succinato deshidrogenasa (SDHA) han sido planteadas como indicadores relevantes, reflejando la capacidad de generación de acetil-CoA durante los procesos de oxidación energética de ácidos grasos y carbohidratos (Pillet et al., 2016), la primera, y la formación de grupos *hemo*, la segunda (Tretter et al., 2016).

El presente trabajo pretende contribuir al conocimiento científico asociado con cambios en las variables de cultivo del camarón blanco *L. vannamei* y su impacto en los parámetros de producción y en la respuesta fisiológica del organismo, evidenciado a través de la tasa metabólica, el nivel de punto crítico y, de manera preliminar, su expresión en un microarreglo heterólogo. Para ello se evaluaron sistemas y tiempo de aireación en el cultivo, en sistemas fotoheterotróficos. Esto contribuirá a la implementación de tecnologías de cultivo bioseguras, ecológicamente amigables y económicamente atractivas para la industria camaronícola mundial.

3. JUSTIFICACIÓN

La implementación de nuevas tecnologías bioseguras y económicamente eficientes es necesaria como estrategia para contribuir a consolidar a la industria camaronícola. Estas dependen del manejo del sistema de cultivo, particularmente de las interacciones entre el camarón con fitoplancton, bacterias y demás microorganismos, que muestran una relación específica con la calidad de agua del estanque (Avnimelech, 2012). Como se mencionó en la introducción, el cultivo intensivo foto-heterotrófico busca optimizar estas relaciones a fin de producir biomásas más altas de camarón por hectárea.

Uno de los elementos más relevantes para alcanzar el balance productivo es el oxígeno disuelto, ya que éste es fundamental para que la flora y fauna planctónica puedan desarrollarse (Egna & Boyd, 1997). Por otro lado, la capacidad del organismo para aprovechar el oxígeno disuelto disponible puede utilizarse efectivamente como un indicador de su respuesta fisiológica (Villarreal, 1989), la cual es determinante para el éxito o fracaso del cultivo. Los sistemas de aireación se han utilizado como estrategia para el intercambio gaseoso en estanques, en donde se introduce oxígeno de la atmósfera y se elimina el exceso de dióxido de carbono (Boyd, 1998). Los aireadores también juegan un papel fundamental en la mezcla del agua en el ecosistema, lo que contribuye a la respiración de los microorganismos presentes en el estanque y la oxidación de los distintos compuestos orgánicos existentes (Boyd, 2001). Moreno- Figueroa et al. (2017) indicaron que, en sistemas sin recambio de agua, los aireadores promueven el desarrollo de flóculos bacterianos, los cuales permiten hacer más eficiente la degradación de materia orgánica, por un lado, y contribuir a la alimentación del organismo de cultivo, por el otro (Avnimelech, 2012).

El presente estudio genera conocimiento científico asociado al efecto que variaciones en la estrategia de uso de equipos de aireación tienen en la capacidad de carga del sistema de cultivo intensivo sin recambio de agua de camarón blanco *Litopenaeus vannamei* en la región desértica del noroeste de México, así como del impacto que esto genera en el organismo, contribuyendo al entendimiento de los mecanismos de respuesta metabólica y fisiológica. No existen antecedentes de estudios previos en este sentido.

4. HIPÓTESIS

El uso de equipos de aireación tiene un efecto en el resultado productivo en el estanque de cultivo foto-heterotrófico de camarón. Este efecto se da en términos de la capacidad de carga del sistema, evidenciado, por un lado, en la degradación de desperdicios que pueden ser aprovechados como nutrientes y que se refleja en los parámetros de calidad de agua y, por otro, en la biomasa de camarón que se genera. Entonces, en sistemas sin recambio de agua, la restricción en el tiempo de aireación tendrá un impacto en el aprovechamiento de nutrientes y la calidad de agua, resultando en un efecto diferenciado en términos de producción y de la respuesta fisiológica del organismo.

5. OBJETIVOS

5.1 Objetivo general

Caracterizar el efecto del uso de aireación suplementaria en el cultivo intensivo foto-heterotrófico del camarón blanco *Litopenaeus vannamei* en estanques sin recambio de agua.

5.2 Objetivos particulares

1.- Comparar el efecto del uso de diferentes equipos de aireación en el desempeño productivo (peso, tasa de crecimiento, factor de conversión aparente de alimento, sobrevivencia y biomasa) del camarón en un cultivo intensivo foto-heterotrófico sin recambio de agua.

2.- Caracterizar la calidad de agua (temperatura, oxígeno disuelto, pH, salinidad, residuos amoniacales), clorofila y microorganismos específicos (bacterias heterotróficas, *Lactobacillus spp.* y *Vibrio parahaemolyticus*), durante el cultivo intensivo foto-heterotrófico de camarón en estanques con diferentes equipos de aireación.

3.- Comparar el efecto del uso de diferentes tiempos de aireación (24/día y 12 h/día) en el desempeño productivo (peso, tasa de crecimiento, factor de conversión aparente de alimento, sobrevivencia y biomasa) del camarón en un cultivo intensivo foto-heterotrófico sin recambio de agua.

4.- Caracterizar la calidad de agua (temperatura, oxígeno disuelto, pH, salinidad, residuos amoniacales), clorofila y microorganismos específicos (bacterias heterotróficas, *Lactobacillus spp.* y *Vibrio parahaemolyticus*), durante el cultivo intensivo foto-heterotrófico de camarón en estanques con diferentes tiempos de aireación.

5.- Evaluar la respuesta fisiológica de organismos provenientes de estanques con diferente tiempo de aireación, mediante la determinación del consumo de oxígeno durante actividades relacionadas con el metabolismo rutinario, y la definición del punto crítico de conformación del consumo de oxígeno.

6.- Establecer si hay relaciones entre la respuesta fisiológica de organismos procedentes de estanques con diferentes tiempos de aireación y la expresión génica en un micro arreglo heterólogo.

6. MATERIAL Y MÉTODOS

6.1 Preparación de unidades experimentales

Las evaluaciones se llevaron a cabo en el sistema de estanques de cultivo del Parque de Innovación Tecnológica de CIBNOR, BioHelis®, en La Paz, Baja California Sur (24 ° 08'32 "N, 110 ° 18'39" W) durante los meses de abril a octubre. Los estanques de 50 X 20 m están recubiertos con geomembrana de polietileno de alta densidad (HDPE), tienen una superficie de 1,000 m² (0.1 ha) y 1.35 m de profundidad. Cada estanque cuenta con suministro y drenaje de agua independientes, mediante tubos y válvula de cierre rápido de PVC en 6 pulgadas para control de flujos. El drenaje central está ubicado en el extremo más profundo y al centro del estanque. El agua de mar proveniente de la Ensenada de La Paz se obtiene utilizando bombas centrífugas de 15 HP a través de tuberías de 6" desde una distancia de 600 metros y una profundidad de 6 m. El agua pasa por un sistema de "peines" de tuberías ranuradas de PVC, colocados dentro de una cama de grava de 5" para ser enviado a reservorios de 1,000 m² x 1.5 m de profundidad en donde se utiliza una malla de 300 mm para prevenir el acceso de depredadores y competidores. El agua de mar se bombea desde los reservorios pasando por un sistema de cuatro filtros de arena de 20 micras, hasta los estanques experimentales. Debido a que el agua de la ensenada tiene una salinidad promedio de 38 ppt y hay una tasa de evaporación promedio de 5-9 mm/día (Hernández-Gurrola, 2015), fue necesario adicionar 2% del volumen total de agua por semana, para mantener el nivel de operación de los estanques. Quince días antes de iniciar la evaluación experimental se distribuyeron 5 kg/ha/día de fertilizante NutriLake-P® (14,7% N; 6% P₂O₅; 3% SiO₂) diariamente, con la finalidad de promover el desarrollo de microalgas en los estanques experimentales.

Por otro lado, se aplicó una mezcla fermentada de probióticos. Se utilizaron dos productos: ALIBIO AC®, ALIBIO 2135®, que incluyen bacterias y levaduras (*Bacillus spp.*, *Lactobacillus spp.*, *Thiobacillus sp.*, *Nitrosomonas sp.*, *Nitrobacter sp.* y *Sacharomyces spp.*), con la intención de fomentar la generación de flóculos que contribuyan a la conversión de materia orgánica y fomenten la respuesta inmune del camarón.

Como fuente de nutrientes para estos microorganismos se incluyó una mezcla que incluye carbohidratos simples, aminoácidos solubles en agua, vitaminas y oligoelementos (marca ALIBIO BIONUTRE®). Durante los primeros siete días se inoculó la mezcla fermentada diariamente y, posteriormente, dos veces por semana. Siguiendo a Moreno-Figueroa (2017), se preparó el equivalente a 70 L/ha de fermento de la siguiente manera:

1. Se esterilizó agua marina (70 l) con cloro comercial (0.1 ml/L) por 24 h.
2. Se agregó tiosulfato de sodio (0.02 g/L) con aireación constante por 5 h, para eliminar remanentes de cloro.
3. Se añadieron los productos arriba mencionados a razón de: ALIBIO AC®, 100 g; ALIBIO 2135®, 100 g; ALIBIO BIONUTRE®, 50 g. Se mantuvo aireación constante por 24 h para fermentar, antes de su aplicación a cada estanque, a razón de 7 L del fermentado por estanque.

6.2 Organismos experimentales

Se adquirieron postlarvas (PL) de camarón blanco, *Litopenaeus vannamei*, certificadas libre de enfermedades específicas (WSSV, TSV, YHV, IMNV y NHP), de la empresa Larvas Gran Mar, S.A. Los organismos fueron aclimatados a la temperatura y la salinidad de los estanques por 1 hora antes de la siembra, la cual se realizó directamente del tanque de transporte a cada estanque experimental utilizando mangueras de 1.5". En cada evaluación se realizó una precría de 28 días, hasta alcanzar un peso promedio de 0.2 g. La alimentación durante esta fase consistió de un alimento comercial micro peletizado para precría, con 35% de proteína cruda y 8% de lípidos, marca Ziegler®, suministrado alrededor del estanque dos veces al día (8:00 am y 6:00 pm).

Los resultados presentados por Hernández-Gurrola (2015) y Moreno-Figueroa et al. (2017) mostraron que era factible incrementar la densidad de cultivo, por lo que se determinó una densidad inicial de siembra de 150 PL/m² para las evaluaciones de diferentes equipos de

aireación y de diferentes tiempos de aireación. La aireación suministrada fue constante (24 h/día) y equivalente a 20 HP/ha, con un aireador en cada estanque.

Una vez concluido el periodo de precría dio inicio la evaluación experimental de equipos y tiempos de aireación.

6.3 Evaluaciones experimentales

6.3.1 Evaluación de diferentes sistemas de aireación

Se utilizaron 6 estanques de 1,000 m² para evaluar 3 tratamientos por replicado:

1) Aireadores AIRE-O₂ (2 equipos de 2 hp/estanque)

2) Aireadores de Paletas (2 equipos de 2 hp/estanque)

3) Aireador AIRE- O₂ combinado con Aireador de Paleta (1 equipo de 2 hp de cada tipo por estanque).

Los estanques contaron con una capacidad de suministrar el equivalente a 20 o 40 HP/ha de aireación. Al inicio del cultivo la biomasa en el estanque es limitada por lo que sólo se utilizó un aireador por estanque. De acuerdo a lo planteado por Moreno- Figueroa et al. (2017), a partir del día 33 se encendieron los segundos aireadores en cada estanque, proporcionando el equivalente de 40 HP/ha de aireación.

El alimento utilizado tenía 35% de proteína cruda y fue suministrado 4 veces al día (8, 12, 16 y 20 horas). La cantidad de alimento se calculó de acuerdo a la tabla de alimentación del proveedor (Tabla 1) y se ajustó de acuerdo al crecimiento del camarón. Para ello, semanalmente se tomó una muestra aleatoria de 120 camarones por estanque, en tres diferentes puntos, con una atarraya de 5 mm de luz de malla. Se registró el peso del camarón individualmente en una

balanza analítica Scout Pro® con precisión de 0.01 g. La tasa inicial fue del 10% de la biomasa total y progresivamente fue descendiendo hasta el 2% hacia el final del cultivo.

Al final de la prueba, se determinó el peso final, la tasa de crecimiento (peso final – peso inicial / número de días), la supervivencia (número final de organismos / número inicial de organismos × 100), la biomasa (peso promedio final * número final de organismos) y el factor de conversión alimenticia (alimento suministrado / ganancia de biomasa).

Tabla 1. Ración alimentaria con base en el peso húmedo del camarón (Tomado de Zeigler Bros.Co. https://issuu.com/zeiglerbrosfeed/docs/shrimp_catalog).

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

Los parámetros de calidad de agua se establecieron de acuerdo a lo indicado por Villarreal et al., (2015). Brevemente, el oxígeno disuelto, pH, salinidad, temperatura se midieron tres veces al día (8:00 am, 12:00 pm y 6:00 pm) mediante una sonda multiparámetros YSI Professional Plus®. El amonio, nitritos, nitratos, fosfatos, alcalinidad y silicio se determinaron con un YSI 9500 direct-read photometer®. La clorofila-a se determinó por fluorescencia utilizando una Sonda Multiparamétrica Hydrolab DS5X®. Los sólidos suspendidos totales se estimaron gravimétricamente (APHA, AWWA & WEF, 2012); Para el análisis de sólidos sedimentables se utilizaron conos Imhoff siguiendo el procedimiento establecido en la Norma Mexicana NMX-AA-004-SCFI-2013. La turbidez se midió utilizando un disco Secchi. El DBO₅ se determinó mediante la cantidad de oxígeno molecular utilizado durante un periodo de incubación de 5 días para la degradación bioquímica de la materia orgánica y el oxígeno utilizado para oxidar los compuestos inorgánicos (APHA, AWWA & WEF, 2012). Para la evaluación de la comunidad fitoplanctónica se

utilizó un microscopio binocular Lieder® y una cámara de Neubauer de 0.1 mm. La comunidad bacteriana se determinó por el método de conteo de colonias inoculadas por dispersión en superficie, utilizando los siguientes medios: agar TCBS (Bacterias del género *Vibrio*), Agar 2216 (Bacterias heterótrofas marinas) y medio MRS (Bacterias del género *Lactobacillus*).

A fin de comparar eficiencias de cada tratamiento experimental se estableció la capacidad de movimiento de la masa de agua y los sólidos en el estanque, el consumo eléctrico y la eficiencia de uso de agua por kilo de producción de camarón. Para el movimiento de agua, se determinó la velocidad de la corriente de agua generada por los diferentes equipos de aireación. Esta se midió en 3 ocasiones utilizando un correntómetro (Villarreal et al, 2015) al inicio, a la mitad del cultivo y una semana antes de finalizar la evaluación. De manera similar se determinó con un miliamperímetro el consumo eléctrico de los equipos utilizados durante la prueba al inicio, a la mitad y al final de la evaluación experimental. De ahí se estableció el requerimiento eléctrico, que es la cantidad de energía eléctrica utilizada para producir un kilogramo de camarón (Boyd y Clay, 2002) y que se calculó con la siguiente fórmula:

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

Dónde RE 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).

De manera similar, se estableció el requerimiento de agua, como la cantidad de agua que se utiliza para producir un kilogramo de camarón. Esta se calculó de acuerdo a lo descrito por Moreno-Figueroa et al., (2017):

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

Dónde:

R_A es el requerimiento de agua (m^3/kg), V_i es el volumen inicial de agua en estanques (m^3), V_R es el volumen de agua utilizada para reposición por día (m^3), t es el tiempo (días) y B es la biomasa total de camarón (kg).

Para establecer posibles diferencias en la viabilidad económica del cultivo, se establecieron la utilidad (u_t) y el beneficio-costo (b_t/c_t) como parámetros de evaluación, de acuerdo a lo planteado por Moreno-Figueroa et al., (2017):

$$u_t = i_t - c_t \quad (3)$$

$$b_t/c_t = i_t / c_t \quad (4)$$

Dónde el ingreso (i_t) se define multiplicando la biomasa del camarón por el precio de venta (pv) en la fecha de cosecha y c_t representa el costo total de producción:

$$c_t = c_{per} + c_{PL} + c_{fer} + c_{pe} + c_{ma} + c_c + c_{A_t} + c_{p_t} + c_{ra_t} + c_{e_t} \quad (5)$$

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 (Tabla 2).

6.3.2 Evaluación del tiempo de aireación.

Para la segunda evaluación experimental se utilizaron 4 estanques de $1,000 m^2$ para evaluar 2 tratamientos por replicado:

- 1) Aireación constante por 24 horas/día con equipos AIRE-O₂ (2 equipos de 2 hp/estanque)
- 2) Aireación parcial por 12 horas/día con equipos AIRE-O₂ (2 equipos de 2 hp/estanque)

Los estanques contaron con una capacidad de suministrar el equivalente a 40 HP/ha de aireación. Mientras que la aireación del tratamiento de 24 horas/día fue constante, el suministro de aireación complementaria para el tratamiento de 12 horas/día fue predominantemente nocturno, ya que se realizó de 6 pm a 6 am. Las condiciones de

preparación de estanques, fertilización, inoculación de probióticos y alimentación, como el registro de parámetros de calidad de agua y las biometrías (incremento de peso) fueron iguales a las de la primera evaluación.

De manera similar se establecieron requerimientos de energía y agua, así como los indicadores de utilidad y beneficio/costo. Debido a una falla del equipo, no fue posible establecer la velocidad de corriente en las unidades experimentales.

Tabla 2. Costos de operación para producción de camarón en Baja California Sur (Tomado de Moreno-Figueroa, 2017).

Costo Operativo	Valor (\$)
Alimento (\$/t) ^a	22,246.5
Postlarva (\$/1000 PL) ^b	67.1
Personal (\$/estanque/día) ^c	20.66
Energía- aireación (\$/kW/h) ^d	0.59
Mantenimiento (\$/estanque) ^e	4831
Cosecha (\$/estanque) ^f	3,116.7
Probióticos (\$/ 2 kg) ^g	1,498.7
Fertilizante (\$/ 50 kg)	1,030.0
Reemplazo de agua (\$/estanque/día) ^h	0.9
Preparación del estanque (\$/estanque) ⁱ	51.7

^a Ziegler™ intensive-35 pellet v-pak (35% proteína cruda).

^b Postlarva (PL14) de 0.04 g de peso proveniente del laboratorio Gran Mar Larvas.

^c 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).

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

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

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

^g Probiótico Alibio 2135[®] y Alibio AC[®] (1kg cada uno).

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

ⁱ 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.

6.3.3 Evaluación de tasa metabólica estándar y punto crítico de conformación respiratoria

La determinación de la tasa metabólica estándar y el punto crítico de oxígeno se realizó de acuerdo a lo planteado por Villarreal (1989), Carreño-León et al. (2014) y Hernández-Gurrola (2021). Durante la cosecha de los estanques de la segunda evaluación experimental, se seleccionaron aleatoriamente 150 organismos de cada estanque, se colocaron en unidades experimentales de plástico de 1,500 L y fueron mantenidos con aireación constante, alimentados a saciedad una vez al día. La temperatura del agua se mantuvo en $28 \pm 1^\circ\text{C}$ con la ayuda de un sistema de control de temperatura, SITMA. Veinticuatro horas antes de la evaluación de consumo de oxígeno, se transfirió una muestra aleatoria de cada tanque de mantenimiento, y se colocaron en unidades de 60 l con agua a $28 \pm 1^\circ\text{C}$ y aireación constante. Estos tanques no fueron alimentados a fin de que los camarones pudieran vaciar el tracto digestivo. Esto contribuye a disminuir las variaciones en la lectura de consumo de oxígeno en el respirómetro por efecto de los procesos digestivos (Carreño-León *et al.*, 2014). La evaluación se llevó a cabo en 10 respirómetros y 2 blancos herméticos de 1 L, con agua desinfectada a $28 \pm 1^\circ\text{C}$ y saturada con oxígeno. Se colocó un organismo en cada respirómetro y blanco, manteniéndolos con aireación continua por 2 horas a fin de que los organismos se aclimataran a las condiciones de la unidad experimental. Después de 2 horas, los organismos en los blancos fueron retirados. Esto permitió la transferencia de microorganismos asociados al camarón, al agua del respirómetro (Villarreal, 1989). Se utilizó un equipo PreSens Precision con sensor de oxígeno de fibra óptica de 505 nm, Needle-Type housing (NTH-L10-TS-NS40/0.4) para la medición del cambio en el oxígeno disuelto, como referencia de la tasa metabólica. La concentración de oxígeno disuelto (OD) se midió al inicio del experimento para cada respirómetro y cada 15 minutos por espacio de una hora, a fin de obtener una curva de consumo de oxígeno de cinco puntos. Los organismos experimentales se pesaron al finalizar la medición con una balanza digital Ohaus (0.001 g). El consumo registrado en los blancos se

promedia y se le resta al consumo de cada respirómetro para definir el consumo neto de oxígeno de cada organismo. La tasa metabólica estándar se establece en base al peso del organismo experimental utilizando la ecuación:

$$TME = ([ODf] - [ODi] / P) \quad (6)$$

Dónde:

TME= Tasa metabólica estándar.

[ODf]= Concentración neta de oxígeno disuelto final (mg/l).

[ODi]= Concentración de oxígeno disuelto inicial (mg/l).

P= Peso del organismo (g).

El punto crítico de saturación de oxígeno disuelto se estableció de manera similar a lo descrito arriba. En este caso, se determinó la concentración inicial de oxígeno disuelto (OD) para cada respirómetro y blancos y se registró la concentración cada 15 minutos hasta que las lecturas reflejaron una variación mínima en por lo menos tres registros consecutivos. Siguiendo lo propuesto por Hernández-Gurrola (2021), se calculó el punto crítico de oxígeno utilizando el software SegReg (www.waterlog.info/segreg.htm), que ajusta matemáticamente líneas de regresión a los datos, lo que permite calcular dos segmentos con un punto de inflexión cuando el coeficiente de determinación (R²) se maximiza a una significancia de 95% (Sokal y Rohlf, 1995).

6.3.4 Extracción de RNA

Una vez definidos los parámetros de respuesta fisiológica del organismo, se determinó la respuesta en expresión génica de los organismos sometidos a cultivo de 24 horas/día y 12 horas/día de aireación. Para ello, se tomaron muestras aleatorias de los organismos experimentales procedentes de cada unidad experimental durante la cosecha. Se colectaron 50 organismos de cada estanque y se realizó la extracción de RNA a partir de 100 mg de tejido del

hepatopáncreas, el cual se colocó en 1 ml de TriPure ISolation Reagent para su homogenización. Se realizó la extracción de RNA utilizando la técnica de extracción con tiocianato-fenol-cloroformo de guanidinio ácido descrita por Chomczynski y Sacchi (1987) con mínimas modificaciones. La resuspensión del ARN fue en 40 uL de agua desionizada DEPC a 60 °C. Se cuantificó la concentración obtenida en cada extracción utilizando un espectrofotómetro NanoDrop (Thermo Scientific). La calidad del ARN se evaluó en electroforesis en gel de agarosa al 1% bajo condiciones desnaturalizantes (75-80 volts; 90 A; 30-45 min) (Ulaje-Fernandez, 2015).

Las muestras se mandaron a la unidad de microarreglos de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) para realizar el análisis posterior preliminar por parte del personal técnico. Brevemente, se realiza una selección de genes a partir del análisis de datos obtenidos en el microarreglo heterólogo de *Drosophila melanogaster*, de los programas Blast2GO y DAVID.

Los genes seleccionados se ingresaron en el programa en línea KEGG Mapper, que mostró un mapa de genes sobreexpresados y subexpresados para cada tratamiento, y se compararon con las bases de datos disponibles en UniProt y NCBI para confirmar estas características. (Ulaje-Fernández, 2020).

Los genes seleccionados son evaluados utilizando qRT-PCR con el kit GoScript Reverse Transcription System (Promega), de acuerdo a lo recomendado por el fabricante. La amplificación se realizó en un termociclador de tiempo real StepOne System.

El microarreglo fue analizado mediante el programa GenArise desarrollado en la Unidad de Computación del Instituto de Fisiología Celular de la UNAM, realizando transformación de genes, corrección de ruido de fondo, normalización, filtrado de intensidad, análisis de réplicas y expresión diferencial. El programa calcula la desviación estándar de la media de cada punto para definir el Z-score:

$$Z_i = (R_i - \text{media}(R)) / Sd(R) \quad (7)$$

Dónde:

Z_i: Z-score para cada punto. R_i: Log-radio de cada punto.

Sd (R): desviación estándar del Log-radio.

Bajo este criterio, tanto los genes sobre-expresados como los reprimidos con Zscore>1.5 fueron considerados como genes expresados diferencialmente. Una vez obtenidos los genes con valores de Z-score mayor a 1.5, se obtuvieron los números de identificación de cada uno de ellos y se realizó la anotación ontológica de cada gen utilizando el programa en línea DAVID (<http://david.niaid.nih.gov>) para obtener los diferentes procesos biológicos en los que están involucrados y las rutas metabólicas modificadas para cada uno de los tratamientos. (Ulaje-Fernandez, 2020).

6.4 Análisis estadísticos

Los análisis estadísticos se llevaron a cabo utilizando el programa STATISTICA® Versión 10, StatSoft, Inc. Los datos fueron sometidos a las pruebas de normalidad de Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk's W; y al análisis de homogeneidad de varianzas de Levene. Cuando los datos no cumplieron las condiciones de normalidad, estos fueron transformados utilizando Log10. Cuando la transformación no fue suficiente para establecer una distribución normal, se utilizó el análisis no-paramétrico de Kruskal-Wallis.

Se realizaron pruebas t-Student para la comprobación de los valores de biomasa, sobrevivencia, peso individual promedio, 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 utilizando el coeficiente de variación ($CV = \text{desviación estándar}/\text{media}$) de los distintos parámetros para los dos ciclos.

Los parámetros del desempeño productivo, así como los valores de tasa metabólica y punto crítico de oxígeno fueron comparados utilizando el análisis de varianza de una vía (ANOVA) con una significancia de $P < 0.05$. (Sokal y Rohlf, 1995). Los datos de supervivencia fueron transformados a arco seno para comparar porcentajes.

Se realizó un ANOVA para evaluar diferencias en expresión génica entre los tratamientos.

7. RESULTADOS

7.1 Evaluación de diferentes sistemas de aireación

7.1.1 Parámetros de calidad de agua

Los parámetros de calidad de agua registrados durante la evaluación, se mantuvieron dentro de los intervalos óptimos reportados para la especie en cultivo intensivo (Boyd y Clay, 2002). La Tabla 3 muestra los valores promedio de los parámetros fisicoquímicos de calidad del agua registrados, durante la engorda de *Litopenaeus vannamei* con diferentes sistemas de aireación de 2 HP. No hubo diferencias significativas ($p>0.05$) entre los tratamientos evaluados.

Como se evidencia en la Tabla 3, los tratamientos con aireadores de paletas mostraron temperaturas más bajas con respecto a los otros tratamientos, ya que las temperaturas promedio fueron de 26.20°C para los estanques aireados con paletas, la combinación de paletas y aspirador alcanzaron un promedio de 27.35°C y las paletas de 28.95°C, respectivamente.

La Figura 5 muestra las temperaturas registradas diariamente en los estanques, a las 8 am y 6 pm. No se establecieron diferencias en crecimiento asociadas a variaciones en la temperatura en los estanques. La Figura 6 presenta los niveles de oxígeno disuelto en los estanques de cultivo intensivo de camarón. De acuerdo a Moreno-Figueroa et al. (2017), se utilizaron 20 HP/Ha de aireación hasta que el nivel registrado alcanzara niveles cercanos a 3 mg/l, ya que estos valores son apropiados para el cultivo de la especie (Villarreal et al., 2015). No hubo diferencias significativas entre los estanques experimentales y, a partir del día 30, se utilizaron 40 HP/Ha.

El valor promedio de pH se encontró en el intervalo de 7.4 a 8.3, con los valores más bajos registrados en el tratamiento con aspiradores. No hubo diferencias significativas entre tratamientos. Para este tipo de sistemas de cultivo, valores de pH de 7 a 7.5 son deseables (Boyd y Clay, 2002) y son característicos de sistemas foto-heterotróficos estables, que maximizan el rendimiento.

Tabla 3. Parámetros fisicoquímicos de calidad del agua, durante la engorda intensiva de *Litopenaeus vannamei* utilizando sistemas de aireación diferentes. Promedio \pm desviación estándar*.

Parámetro		Tratamiento		
		Aireador tipo Aspirador (A)	Aireador de Paleta (P)	Combinación Aspirador-Paleta (C)
Temperatura (°C)	08:00 am	28.95 \pm 1.4 ^c	26.20 \pm 1.5 ^a	27.35 \pm 1.7 ^{bc}
	06:00 pm	31.75 \pm 1.3 ^c	29.50 \pm 1.7 ^a	30.10 \pm 1.8 ^b
Oxígeno disuelto (mg/l)	08:00 am	4.5 \pm 0.6 ^a	5.3 \pm 0.5 ^b	4.8 \pm 0.5 ^{ab}
	06:00 pm	6.0 \pm 0.7 ^a	6.1 \pm 0.7 ^a	6.0 \pm 0.5 ^a
pH	08:00 am	7.4 \pm 0.2 ^a	7.5 \pm 0.3 ^a	7.6 \pm 0.5 ^a
	06:00 pm	7.7 \pm 0.6 ^a	8.3 \pm 0.3 ^a	8.0 \pm 0.4 ^a
Salinidad (ppm)		46.55 \pm 0.5 ^a	47.10 \pm 0.6 ^a	46.62 \pm 0.6 ^a
Amonio (mg/l)		0.83 \pm 0.3 ^a	0.80 \pm 0.4 ^a	0.80 \pm 0.5 ^a
Amonio no-ionizado (mg/l)		0.01 \pm 0.02 ^a	0.01 \pm 0.01 ^a	0.01 \pm 0.02 ^a
Nitritos (mg/l)		0.11 \pm 0.08 ^a	0.13 \pm 0.06 ^a	0.12 \pm 0.09 ^a
Nitratos (mg/l)		3.7 \pm 0.6 ^a	3.8 \pm 0.7 ^a	4.1 \pm 0.5 ^a
Fosfatos (mg/l)		3.5 \pm 1.8 ^a	3.6 \pm 1.7 ^a	3.3 \pm 1.3 ^a
Alcalinidad (mg/l)		189 \pm 47 ^a	187 \pm 66 ^a	187 \pm 55 ^a
Sílice (mg/l)		25.9 \pm 6.8 ^a	26.0 \pm 8.7 ^a	26.2 \pm 9.0 ^a
Turbidez (cm)		26 \pm 09 ^a	28 \pm 15 ^a	30 \pm 17 ^a
Sólidos suspendidos totales (mg/l)		189 \pm 38 ^b	117 \pm 48 ^a	120 \pm 45 ^a
Sólidos sedimentables (mg/l)		6.5 \pm 4.7 ^a	5.8 \pm 3.5 ^a	6.4 \pm 21 ^a
DBO ₅ (mg/l)		18.3 \pm 8.5 ^a	20.7 \pm 7.6 ^a	20.3 \pm 9.2 ^a
Clorofila-a (mg/l)		62.0 \pm 35.1 ^a	173.2 \pm 122.0 ^b	147.8 \pm 113.8 ^{ab}
Heterótrofas marinas (10 ⁵ ufc/ml)		9.2 \pm 4.3 ^a	4.77 \pm 2.7 ^a	7.1 \pm 3.5 ^a
<i>Lactobacillus</i> spp. (ufc/ml)		55.3 \pm 30.8 ^a	43.3 \pm 37.1 ^a	42.0 \pm 43.3 ^a
<i>Vibrio</i> spp. (10 ³ ufc/ml)		1.55 \pm 1.71 ^a	1.99 \pm 1.37 ^a	1.87 \pm 1.35 ^a

*Valores promedio con la misma letra para cada línea no son significativamente diferentes (P > 0.05).

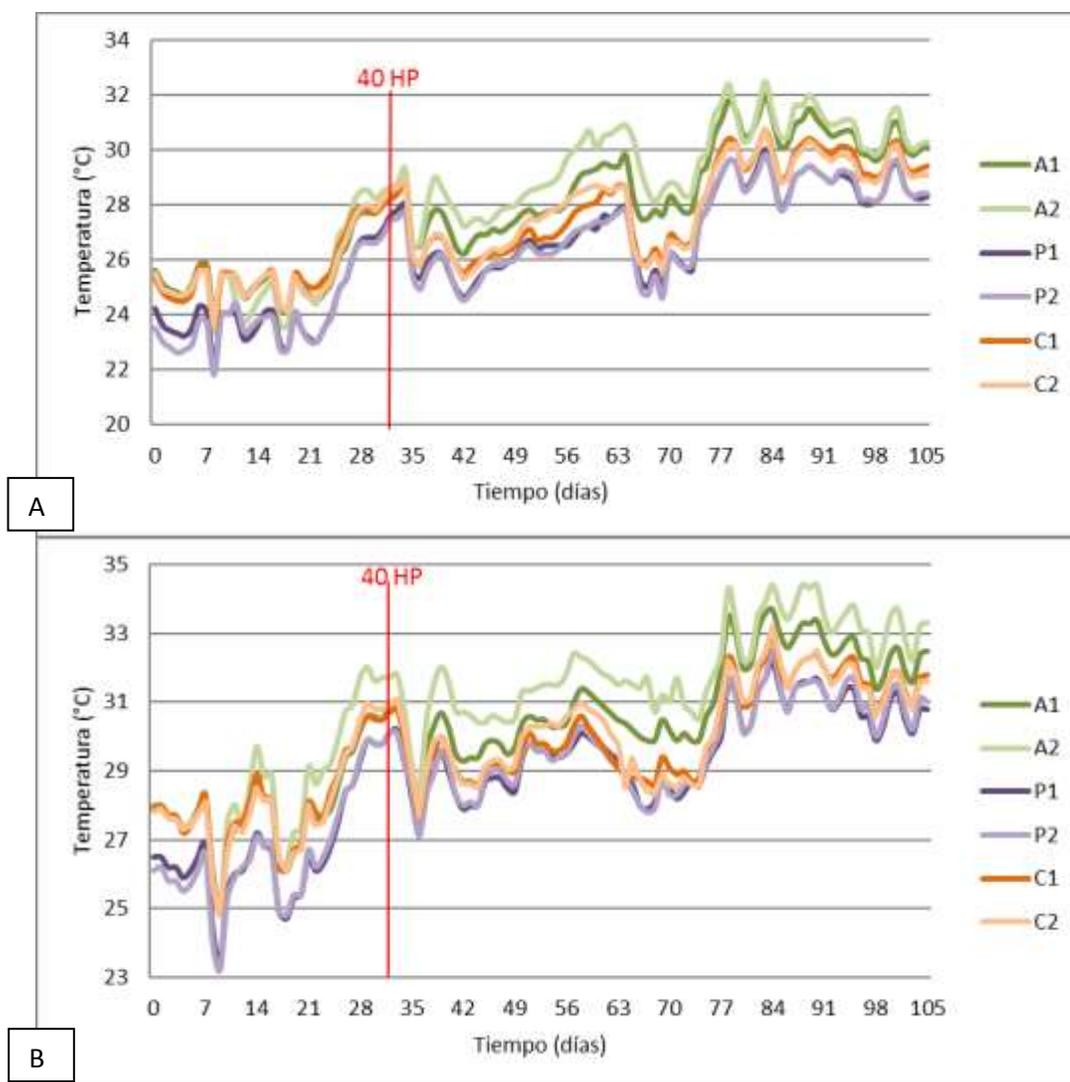


Figura 5. Variación de la temperatura, (A) a las 8 am y (B) a las 6 pm, en estanques de cultivo intensivo de camarón blanco con diferentes equipos de aireación de 2 HP: Aspirador (A1, A2), Paletas (P1, P2) y Combinación aspirador-paletas (C1, C2). La línea roja y el número, representan el momento en que el nivel de aireación se incrementó de 20 hp/ha a 40 hp/ha.

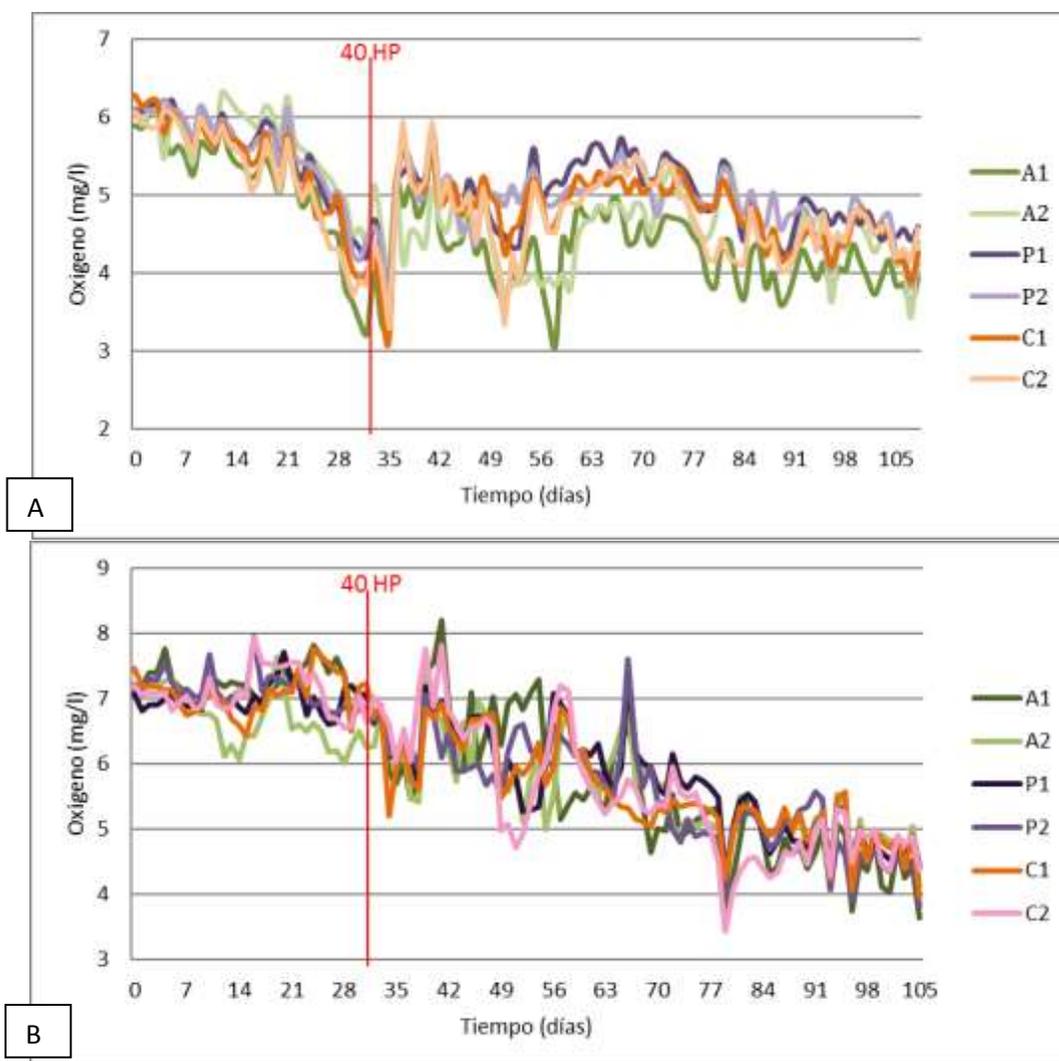


Figura 6. Variación de la concentración de oxígeno disuelto (A) a las 8 am y (B) a las 6 pm, en estanques de cultivo intensivo de camarón blanco con diferentes equipos de aireación de 2 HP: Aspirador (A1, A2), Paletas (P1, P2) y Combinación aspirador-paletas (C1, C2). La línea roja y el número representan el momento en que el nivel de aireación se incrementó de 20 hp/ha a 40 hp/ha.

La engorda se realizó con una salinidad promedio entre 46 y 47 ppt. Como estrategia de cultivo para mantener la salinidad estabilizada y no afectar el crecimiento del camarón, se realizaron ajustes semanales del nivel de agua, a partir del día 15. Al finalizar la evaluación, el recambio fue equivalente a 1.6% de recambio de agua/día.

Este valor es significativamente más bajo que otros valores reportados para sistemas intensivos y con bajo recambio de agua (p. ej. Boyd y Clay, 2002). Los niveles de amonio, amonia, nitritos y nitratos se mantuvieron por debajo de los niveles considerados tóxicos para el camarón, y significativamente más abajo de los reportado para sistemas intensivos con bajo recambio de agua (Boyd y Clay, 2002). Para la producción intensiva de camarón se recomienda mantener niveles por encima de 80 mg/l y debajo de 300 mg/l de alcalinidad. En la presente evaluación, la estrategia de recambio de agua en pulsos permitió que no hubiera diferencias significativas entre los tratamientos, con la alcalinidad promedio cercana a 190 mg/l. Los niveles de sílice alcanzaron un pico de 52 mg/l después del día 40 de cultivo, que, asociado a niveles bajos de nitrato y altos de clorofila, probablemente representa el punto de cambio de ciclo de micro algas a bacterias en el sistema foto heterotrófico. Por su parte, los niveles de fosfato muestran un punto de inflexión al incrementar su concentración de manera gradual hasta alcanzar niveles de fosfato alrededor de 6 mg/l hacia el día 70 de cultivo, probablemente como consecuencia de la cantidad de alimento utilizada de acuerdo a la talla del camarón y un proceso en el que el biofloc no se ha consolidado (Avnimelech, 2012).

No hubo diferencias significativas entre los tratamientos, en términos de turbidez, encontrándose dentro de los valores recomendados para la especie. La cantidad de sólidos suspendidos y sedimentables se incrementa a medida que el cultivo avanza hasta el día 70, estabilizándose hasta el final del cultivo. Esto es esperado, en función al incremento de la biomasa de camarón y la cantidad de alimento suplementario utilizado, por un lado, y la capacidad de aireación empleada. La demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) mostró valores promedio cercanos a 20 mg/l, incrementándose hacia la mitad del cultivo, cuando la capacidad de aireación mantiene los niveles por debajo de los valores máximos recomendados para el cultivo intensivo de la especie (Boyd y Clay, 2002). El valor promedio más alto de Clorofila-a se registró en el tratamiento con aireadores de paleta y el más bajo en el tratamiento con aspiradores.

El total de bacterias heterótropas mostró variaciones durante la engorda en forma cíclica. Esto se relaciona con la proporción de carbono-nitrógeno (C:N) disponible en el sistema. Los valores

están dentro de lo recomendado para el cultivo intensivo de la especie (Avnimelech, 2012). Para el caso de lactobacilos, los valores promedio no fueron diferentes entre los tratamientos, registrando los valores más altos al momento de encender el segundo aireador en los estanques de cultivo. Esto se relaciona con la re suspensión de materia orgánica, mayor movimiento de agua y valores más altos de oxígeno. Por otro lado, *Vibrio spp.* registró incrementos a partir de ese día, con un comportamiento cíclico. Los valores se mantuvieron por debajo de los niveles críticos para sistemas intensivos en todos los casos (Moreno- Figueroa et al. 2017).

7.1.2 Respuesta de variables productivas.

La Figura 7 muestra el incremento en peso del camarón en el tiempo para cada tratamiento. Los pesos promedio al final del cultivo para los tratamientos no fueron significativamente diferentes entre sí ($P>0.05$).

La Tabla 4 presenta los resultados de variables productivas de *Litopenaeus vannamei* cultivados con diferentes equipos de aireación de 2 HP. La sobrevivencia mostró diferencias significativas, siendo estadísticamente más baja para el aspirador (A). Por otro lado, la biomasa, factor de conversión alimenticia (FCA) y tasa de crecimiento absoluta (TCA) para los diferentes tratamientos evaluados no mostraron diferencias significativas.

Los resultados muestran que, para las condiciones de manejo, el tiempo de cultivo y el peso cosechado, se alcanzó la máxima capacidad de carga de los estanques en todos los tratamientos evaluados, con valores alrededor de 17 ton/ha, independientemente del tipo de aireador utilizado.

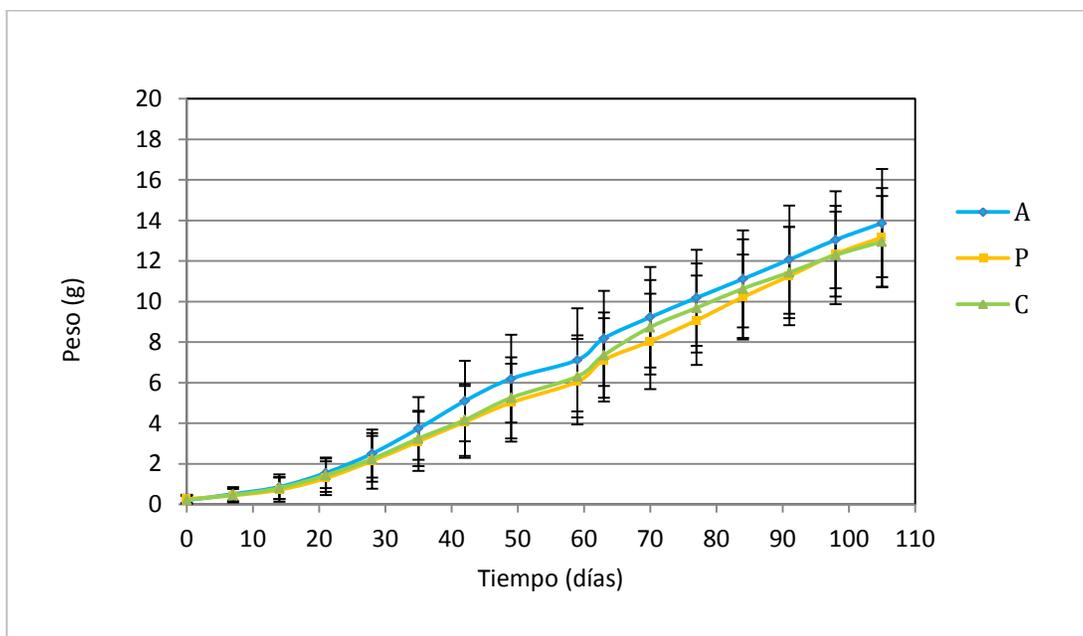


Figura 7. Incremento en peso de *Litopenaeus vannamei* a través del tiempo durante la engorda con diferentes equipos de aireación de 2 HP: Aspirador (A), paletas (P) y combinación aspirador-paletas (C).

Tabla 4. Promedio (\pm desviación estándar) de los parámetros de producción de *Litopenaeus vannamei* cultivado con diferentes equipos de aireación de 2 HP, después de 105 días de engorda.

Variable	Tratamiento		
	(A)	(P)	(C)
Peso final (g)	13.93 \pm 0.65 ^a	13.05 \pm 0.34 ^a	12.96 \pm 0.17 ^a
TCA (g/día)	0.1403 \pm 0.01 ^a	0.1333 \pm 0.002 ^a	0.1317 \pm 0.0002 ^a
Sobrevivencia (%)	82 \pm 0.7 ^a	86.42 \pm 2.12 ^b	86.5 \pm 0.7 ^b
Biomasa (ton/Ha)	17.133 \pm 0.07 ^a	16.917 \pm 0.09 ^a	16.621 \pm 0.06 ^a
FCA	1.47 \pm 0.09 ^a	1.52 \pm 0.06 ^a	1.55 \pm 0.07 ^a

* Valores promedio en cada renglón con la misma letra no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

7.1.3 Uso de energía eléctrica

A fin de considerar variaciones en el consumo de energía en los equipos de aireación se registró el voltaje y amperaje de cada equipo al inicio, al día 50 y al final de la engorda de camarón. La Tabla 5 muestra los valores de amperaje y voltaje registrados durante la engorda de *Litopenaeus vannamei*. No hubo diferencias significativas entre los tratamientos y los valores se encontraron dentro de los intervalos esperados para el motor que utilizan. De manera similar no se identificó una tendencia al cambio de los valores en el tiempo, indicando que el incremento de biomasa y en la cantidad de alimento suministrado no resultó en modificaciones al consumo eléctrico.

Tabla 5. Valores de amperaje y voltaje registrados durante la engorda de *Litopenaeus vannamei* para diferentes sistemas de aireación de 2 HP: aireador tipo aspirador (A1, A2), aireador de paletas (P1, P2) y combinación aspirador-paletas (C1, C2).

Tratamiento	Día 1		Día 50		Día 100	
	Amperaje	Voltaje	Amperaje	Voltaje	Amperaje	Voltaje
A	5.13	221	4.67	223	4.80	225
P	5.07	221	5.03	225	5.30	228
C (A)	5.03	221	4.97	226	4.93	225
(P)	5.08	221	4.81	227	4.88	226

El cálculo de kilowatts (KW) consumidos durante la evaluación experimental se realizó con base a lo descrito por Boyd y Clay (2002), para lo cual se asume una eficiencia del 90% de los motores. Se operó con 1 aireador de 2 hp los primeros 32 días, lo que equivale a 20 hp/ha de aireación, y los 73 días restantes con 2 aireadores, lo que equivale a 40 hp/ha. El uso de KW se calculó de la siguiente manera:

$$(X \text{ hp}/0,90) \times 0.745 \text{ KW}/\text{hp} \times 24 \text{ horas}/\text{día.} \quad (8)$$

Entonces:

$$(20 \text{ hp}/0.90) \times 0.745 \text{ KW/hp} \times 24 \text{ hr} \times 32 \text{ días} = 12,714.6 \text{ KWhr}$$

$$(40 \text{ hp}/0.90) \times 0.745 \text{ KW/hp} \times 24 \text{ hr} \times 73 \text{ días} = 58,010.6 \text{ KWhr.}$$

Lo que resulta en un total de 70,725.2 KWhr/ha, en 105 días de engorda.

La Tabla 6 muestra los rendimientos y el requerimiento de KWhr por kilogramo de camarón producido, en estanques con equipos de aireación de 2 hp. Boyd y Clay (2002), reportan un requerimiento promedio de 4.35 KWhr/kg de camarón para un rendimiento de 13,600 kg/ha.

Tabla 6. Rendimiento promedio y requerimiento de KWhr por kilogramo de camarón producido, para estanques con diferentes equipos de aireación de 2 HP.

Tratamiento	Biomasa (kg/ha)	KWhr/kg de camarón
Aspirador	17,130	4.13
Paleta	16,920	4.18
Combinación	16,620	4.26
Promedio	16,890	4.27

7.1.4 Requerimiento de agua

El uso de agua durante la evaluación fue muy eficiente, dado que no se utilizó recambio de agua. Se realizó una adición de agua en pulsos cada 5-7 días a partir del día 10 de cultivo, con la finalidad de mantener la salinidad en 46-47 ppt y recuperar las pérdidas de agua por evaporación. El nivel de operación promedio en los estanques fue de 1.25 m. La adición de agua en pulsos representó llenar 2.6 veces el estanque (3,350 m³). El promedio de rendimiento en los estanques fue de 1,689 kg, por lo que el requerimiento de agua por kilogramo de camarón producido es de 1.98 m³.

7.1.5 Velocidad de corriente

La Figura 8 muestra respuestas de la corriente generada por aireadores de aspiración y de paleta al inicio y al final de la evaluación. No hubo diferencias significativas en la velocidad de corriente de agua generada en los estanques con diferentes sistemas de aireación. El Anexo

presenta las figuras de medición de corriente por tipo de aireador para los tres tiempos de medición.

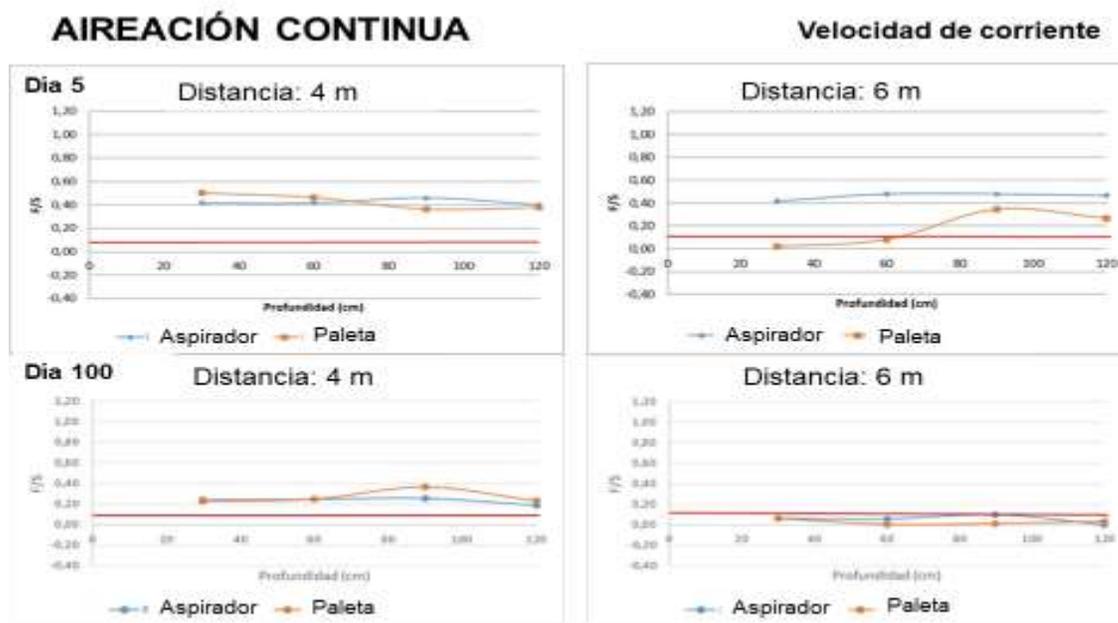


Figura 8. Velocidad de corriente generada por aireadores de aspiración y de paleta en los días 5 y 100 de cultivo intensivo de camarón blanco *L. vanammei*.

La Figura 9 muestra los estanques después de la cosecha al final de la evaluación con diferentes equipos de aireación. La velocidad generada y el buen manejo del alimento no permitieron la acumulación significativa de sedimento en el fondo de los estanques en ninguno de los tratamientos.

7.1.6 Análisis de costos, ingresos y utilidad neta

7.1.6.1 Costos de producción

Se calculó el costo de producción por hectárea considerando personal y postlarvas como costos fijos, y alimento, electricidad y amortización, como costos variables (Tabla 7). El costo del alimento se calculó en función del FCA y se utilizó una amortización de 6 años para el valor del aspirador y de 3 años para el aireador de paleta. Esto basado en el desgaste evidenciado en cada tipo de equipo (ver Figura 10) y la experiencia previa de operación (Dr. José Naranjo, com pers., 2021).



Figura 9. Estanques vacíos de 1,000 m² en BioHelis al final de la evaluación con diferentes equipos de aireación de 2 HP.

7.1.6.2 Ingresos y utilidad neta

Por otro lado, se estableció el ingreso por venta para cada tratamiento, con base al rendimiento y el valor comercial del camarón de acuerdo al peso promedio final obtenido. La utilidad se obtuvo de la diferencia del ingreso por venta y el costo de operación (Tabla 8). El promedio de la utilidad neta más alto se presentó para los aspiradores (\$692,971/ha), seguido de estanques con paletas (\$653,222/ha) y estanques con combinación de aireadores (\$631,833/ha). Las diferencias encontradas, se relacionan a la estimación de un costo más alto por amortización de los equipos de paletas, que han mostrado una menor duración operativa. Sin embargo, no hay diferencias significativas entre los tratamientos.

Tabla 7. Costos fijos y variables en estanques de engorda intensiva de camarón con (A) 2 aspiradores de 2 HP c/u, (P), 2 paletas de 2 HP c/u y (C) combinación de un aspirador de 2 HP y una paleta de 2 HP por estanque.

Costos de operación	A	P	C
Costos fijos			
Personal	28,000	28,000	28,000
Postlarva	100,500	100,500	100,500
Subtotal	128,500	128,500	128,500
Costos variables			
Alimento	560,290	572,043	573,092
Electricidad	56,580	56,580	56,580
Amortización de equipo de aireación	17,964	27,600	22,780
Subtotal	634,834	656,223	652,452
TOTAL	763,334	784,723	780,952

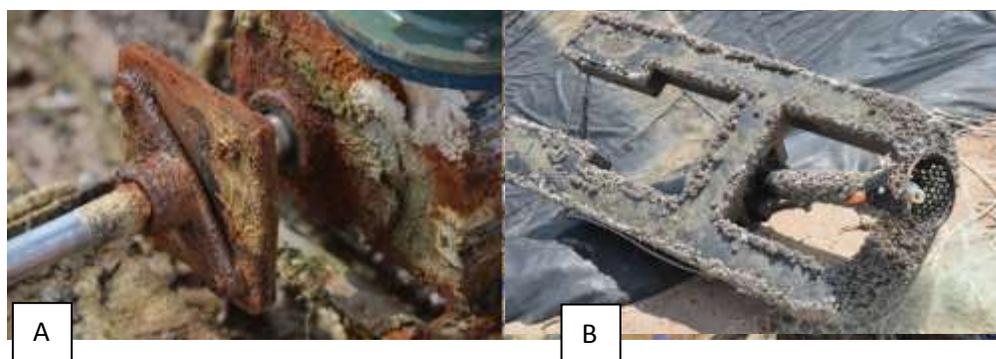


Figura 10. Condición de desgaste de (A) aireador de paleta y (B) aspirador al final de la evaluación de cultivo intensivo de camarón blanco.

Tabla 8. Rendimiento, peso final, precio de venta, costo de operación, ingresos por venta, utilidad neta y beneficio/costo en estanque de engorda de camarón con diferentes equipos de aireación de 2 HP.

Variable	A	P	C
Rendimiento (kg/Ha)	17,133	16,917	16,621
Peso final (g)	13.93	13.05	12.96
Precio de venta (\$/kg)	85	85	85
Costo de operación (\$/Ha)	763,334	784,723	780,952
Ingresos por venta (\$/Ha)	1'456,305	1'437,945	1'412,785
Utilidad (\$)	692,971	653,222	631,833
Beneficio/Costo	1.91	1.83	1.81

7.2 Evaluación de tiempos de aireación

7.2.1 Parámetros de calidad de agua

Los parámetros de calidad de agua registrados durante la evaluación se mantuvieron dentro de los intervalos óptimos reportados para la especie (Boyd y Clay, 2002) en cultivo intensivo. La Tabla 9 muestra los valores promedio de los parámetros fisicoquímicos de calidad del agua registrados, durante la engorda de *Litopenaeus vannamei* con 2 tiempos diferentes de aireación. Los parámetros de calidad del agua no mostraron diferencias significativas ($p > 0.05$) entre los tratamientos evaluados.

7.2.2 Respuesta de variables productivas

El peso promedio final del camarón *L. vannamei*, fue significativamente diferente ($P < 0.05$) entre los tratamientos. La Figura 11 muestra el incremento en peso de los organismos experimentales en un período de 105 días de cultivo para dos estrategias de aireación diferentes. Aunque a los 28 días el peso promedio en el tratamiento con 12 horas de aireación/día fue más bajo, no hubo diferencias significativas entre los tratamientos. Esta se presenta por primera vez a los 77 días de cultivo.

Tabla 9. Valores promedio (\pm desviación estándar) de los parámetros fisicoquímicos de calidad del agua, durante la engorda (105 días) de *Litopenaeus vannamei* con diferentes tiempos de aireación.

Parámetro		Tiempo de aireación/día	
		24 hr	12 hr
Temperatura (°C)	08:00 a. m.	27.90 \pm 2.50	27.74 \pm 3.10
	06:00 p. m.	29.60 \pm 2.20	30.12 \pm 3.20
Oxígeno disuelto (mg/l)	08:00 a. m.	3.21 \pm 0.83	3.15 \pm 0.53
	06:00 p. m.	6.44 \pm 0.92	6.25 \pm 2.03
pH	08:00 a. m.	8.58 \pm 0.41	8.62 \pm 0.29
	06:00 p. m.	8.91 \pm 1.32	8.93 \pm 0.93
Salinidad (ups)	08:00 a. m.	47.22 \pm 3.88	47.33 \pm 3.51
	06:00 p. m.	46.82 \pm 4.09	47.13 \pm 3.23
Nitritos (mg/l)	Fondo	0.03 \pm 0.02	0.08 \pm 0.19
	Superficie	0.065 \pm 0.16	0.15 \pm 0.20
Nitratos (mg/l)	Fondo	0.025 \pm 0.10	0.05 \pm 0.06
	Superficie	0.020 \pm 0.05	0.05 \pm 0.09
Amonio (mg/l)	Fondo	2.24 \pm 2.19	6.12 \pm 4.88
	Superficie	2.49 \pm 2.51	6.17 \pm 4.59
Bacterias Heterótrofas (ufc/ml)	Fondo	2,332,734 \pm 1,310,000	1,080,055 \pm 1,300,000
	Superficie	1,475,328 \pm 525,000	1,125,382 \pm 452,000
Bacterias <i>Vibrio</i> (ufc/ml)	Fondo	1,778 \pm 325	1,879 \pm 625
	Superficie	2,015 \pm 400	1,223 \pm 615

El peso promedio final más alto (15.4 g) se obtuvo en el tratamiento con 24 horas de aireación/día, con una tasa de crecimiento absoluta (TCA) de 0.96 g/semana, siendo significativamente diferente ($P < 0.05$) del peso obtenido con 12 horas de aireación/día (10.85 g), lo que representa una TCA de 0.65 g/semana (Tabla 10). La sobrevivencia final no fue significativamente diferente con un promedio de 80.8%, mientras que la biomasa final fue significativamente diferente ($P < 0.05$) entre los tratamientos, obteniéndose el valor más alto (18.8 t/ha) con 24 horas de aireación por día.

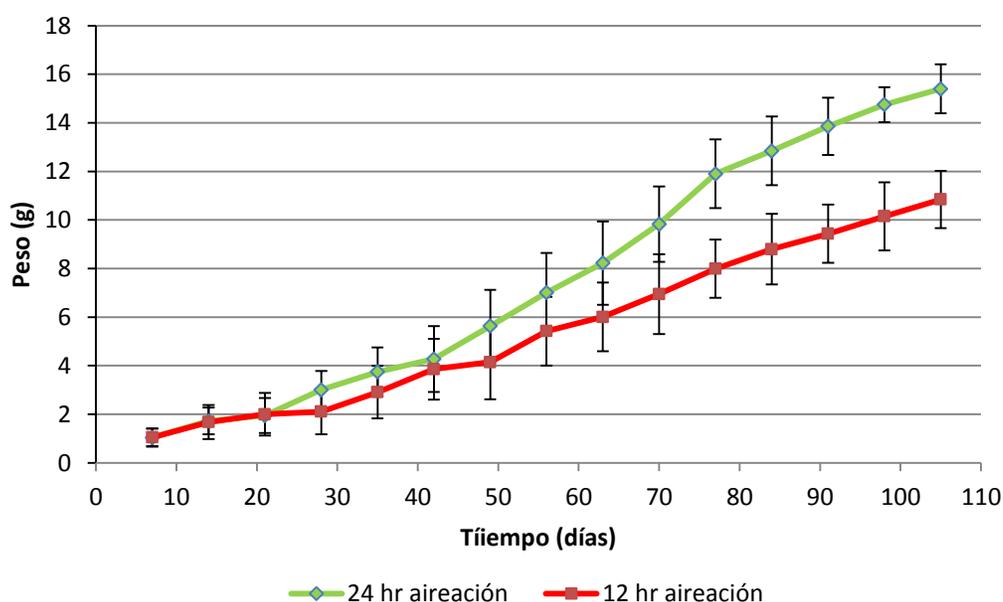


Figura 11. Incremento en peso a través del tiempo de *L. vannamei* en cultivo intensivo sin recambio de agua y con diferentes niveles de aireación.

Tabla 10. Promedio (\pm desviación estándar) de peso inicial y final, sobrevivencia, factor de conversión alimenticia (FCA), tasa de crecimiento absoluta (TCA) y biomasa del camarón *Litopenaeus vannamei* en cultivo intensivo durante 105 días con dos niveles de aireación, en estanques experimentales de 1.000 m² revestidos de membrana de HDPE.

Parámetro	24 hr Aireación	12 hr Aireación
Peso Inicial (g)	1.04 \pm 0.07 a	1.05 \pm 0.08 a
Peso final (g)	15.40 \pm 0.21 a	10.84 \pm 0.07 b
Sobrevivencia (%)	81.60 \pm 0.56 a	81.00 \pm 0.70 a
FCA	1.35 \pm 0.07 a	1.45 \pm 0.07 a
TCA (g/semana)	0.96 \pm 0.018 a	0.63 \pm 0.001 b
Biomasa (Kg/Ha)	18,851 \pm 3250 a	13,179 \pm 390 b

* Valores promedio en cada renglón con la misma letra no son significativamente diferentes ($P > 0.05$).

7.2.3 Costos, ingresos y utilidad neta

La Tabla 11 presenta los resultados del cálculo de costo de producción en función a los datos presentados en la sección anterior, los ingresos y la utilidad neta de los tratamientos que recibieron aireación de 24 y 12 horas/día, respectivamente. El costo está afectado diferencialmente por el alimento utilizado y el gasto de energía para aireación, mientras que el ingreso por venta está influenciado por el precio para la talla promedio final obtenida. Se obtuvo una utilidad neta 40.23% superior en el tratamiento con aireación de 24 horas/día.

Tabla 11. Rendimiento, peso final, precio de venta, costo de operación, ingresos por venta y utilidad neta en estanque de engorda de camarón con diferentes tiempos de aireación.

Variable	24 hrs	12 hrs
Rendimiento (kg/Ha)	18,851	13,179
Peso final (g)	15.40	10.84
Precio de venta (\$/kg)	80	70
Costo de operación (\$/Ha)	827,469	640,696
Ingresos por venta (\$/Ha)	1,508,080	922,530
Utilidad (\$)	700,611	281,834

7.3 Tasa metabólica estándar (TME) y punto crítico (PC).

Como estrategia para evidenciar el impacto en el organismo de la diferencia en tiempo de aireación en el estanque de cultivo, se utilizó la evaluación de la tasa metabólica estándar (TME). TME evalúa el gasto energético del organismo durante la actividad motora rutinaria.

La Figura 12 muestra el consumo de oxígeno del camarón blanco en el día 80 de cultivo, con 2 esquemas diferentes de aireación suplementaria. El gasto energético para poder cumplir las funciones fisiológicas rutinarias fue 47.62% mayor en el tratamiento con 12 hr de aireación (0.3875 mgO₂/g/hr), comparado con la tasa en camarones procedentes de estanques con 24 horas de aireación/día (0.2625 mgO₂/g/hr). Cuando esto sucede hay menos energía disponible para el crecimiento (Villarreal, 1989).

Por otro lado, se determinó el punto crítico de conformación metabólica, que se presenta cuando el organismo deja de regular su consumo de oxígeno y empieza a conformar su actividad metabólica para sobrevivir. La Figura 13 muestra el punto crítico del camarón blanco después de 80 días de cultivo, para 24 horas de aireación por día (0.75 mg O₂/l) y para estanques con 12 horas/día de aireación (1.30 mg O₂/l). Un valor más bajo representa una mejor capacidad de tolerancia de condiciones de estrés (Villarreal, 1989).

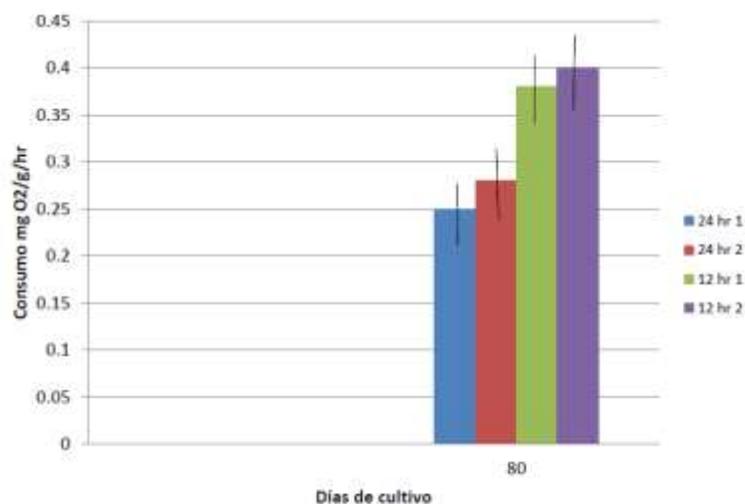


Figura 12. Consumo de oxígeno del camarón blanco *Litopenaeus vannamei*, después de 80 días de cultivo con 2 esquemas diferentes de aireación suplementaria.

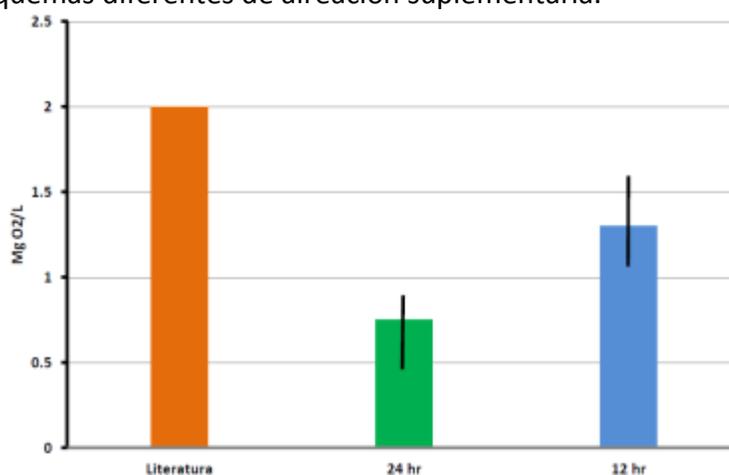


Figura 13. Punto crítico de conformación metabólica del camarón blanco *Litopenaeus vannamei*, después de 80 días de cultivo intensivo con 2 esquemas diferentes de aireación suplementaria.

7.4 Expresión génica.

Una vez establecido que la respuesta fisiológica del camarón cultivado con 12 horas de aireación mostraba una menor capacidad que aquellos producidos con 24 horas/día, se decidió explorar si algunos mecanismos de expresión a nivel del genoma pudieran establecer líneas generales de respuesta del organismo. El microarreglo es una herramienta que puede ser aplicada en estudios diferenciales de expresión de genes, por lo que se utilizó un microarreglo heterólogo de *D. melanogaster* para evaluar la expresión de extracciones de hepatopáncreas del camarón para los dos sistemas de aireación. Se sobre expresaron 323 genes, de los cuales se identificaron

153 para *D. melanogaster*. De los 300 genes suprimidos se identificaron 160 para *D. melanogaster*. La Figura 14 muestra la distribución en los transcritos sobre-expresados y suprimidos en hepatopáncreas del camarón en cultivo intensivo con 12 horas de aireación por día, utilizando la base de datos DAVID.

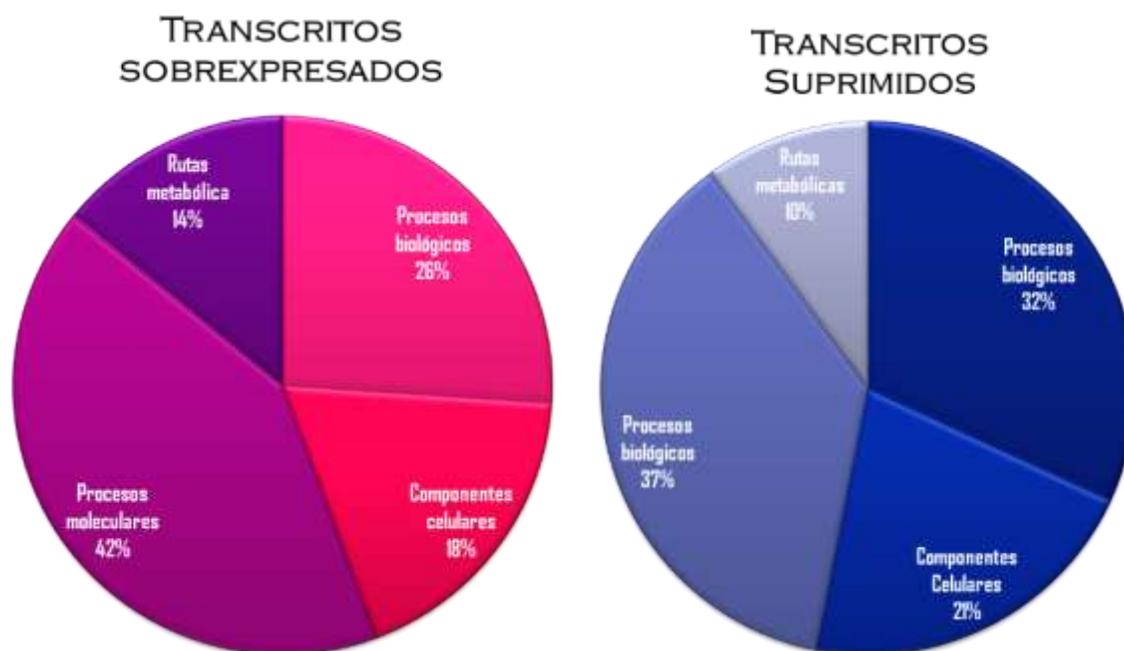


Figura 14. Distribución de transcritos sobre-expresados y suprimidos utilizando la base de datos DAVID, para procesos moleculares y biológicos, componentes celulares y rutas metabólicas de camarón blanco *Litopenaeus vannamei* sometido a cultivo intensivo por 105 días.

Las Figuras 15, 16 y 17 presentan un análisis parcial de los genes suprimidos mientras que las figuras 18, 19 y 20 presentan los genes sobre-expresados, respectivamente, para procesos biológicos, componentes celulares y funciones metabólicas en camarón blanco cultivado de manera intensiva.

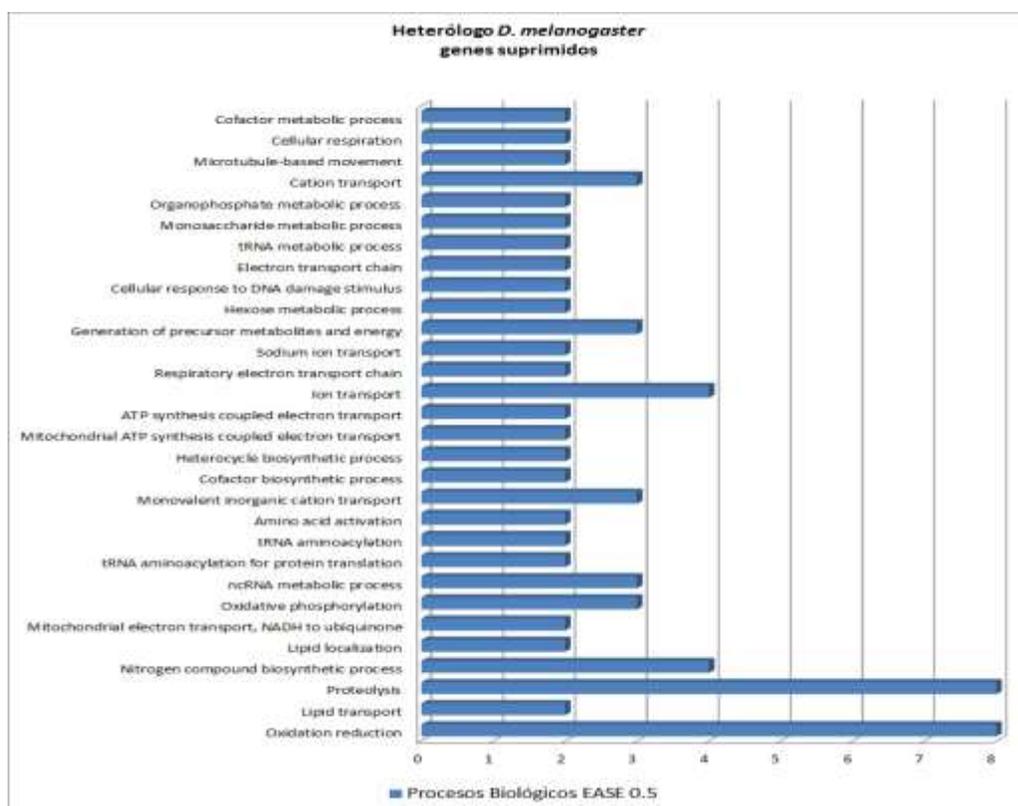


Figura 15. Genes suprimidos para: Procesos biológicos en camarón blanco. *L. vanammei*, cultivado de manera intensiva por 105 días.

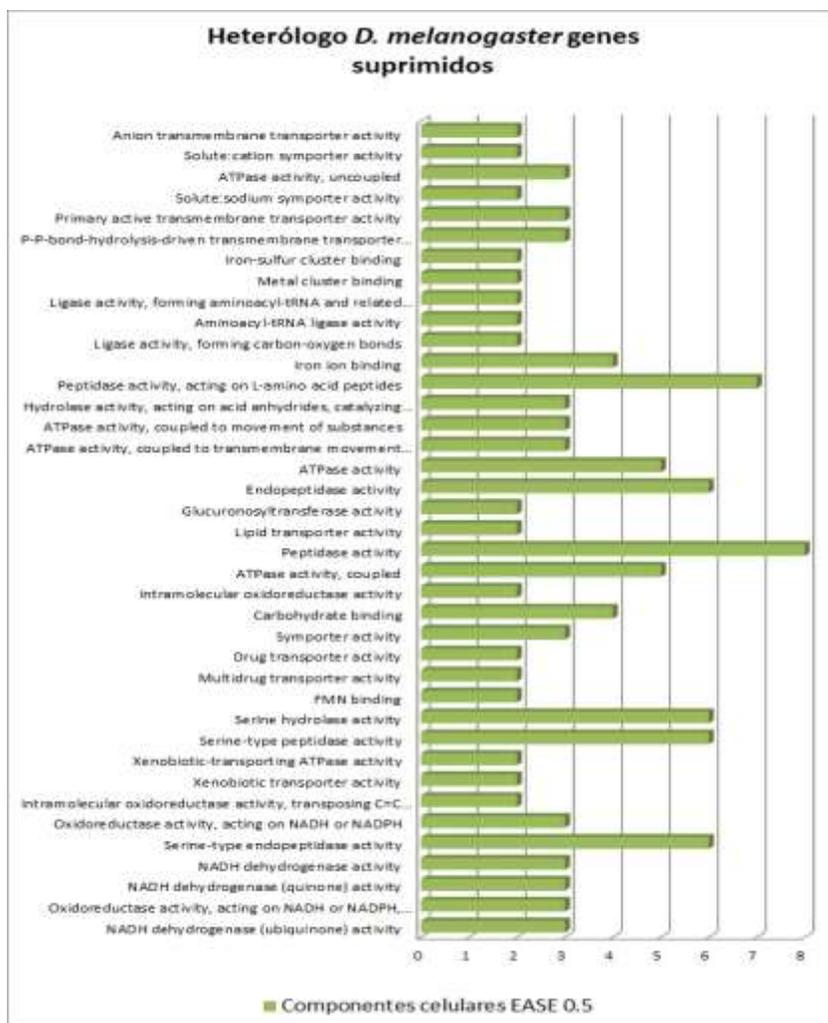


Figura 16. Genes suprimidos para: Componentes celulares en camarón blanco. *L. vanammei*, cultivado de manera intensiva por 105 días.

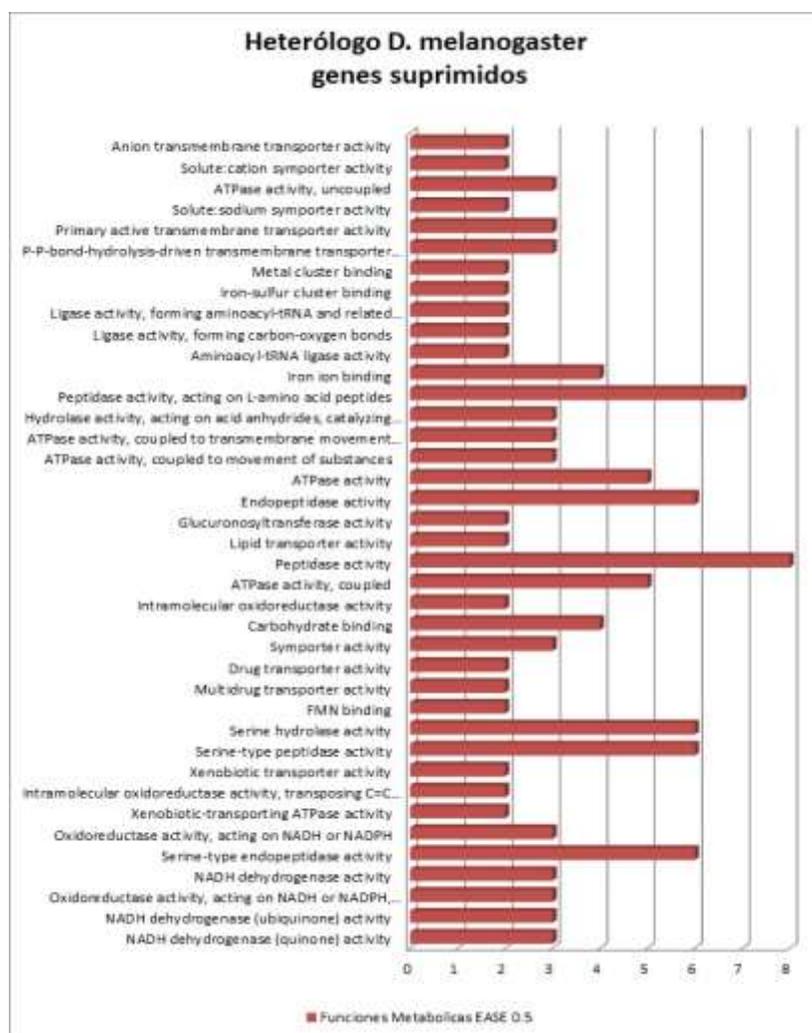


Figura 17. Genes suprimidos para: Funciones metabólicas en camarón blanco. *L. vanammei*, cultivado de manera intensiva por 105 días.

El análisis con el microarreglo de *D. melanogaster* evidenció una afectación de la capacidad de producir eficientemente ATP, asociado a procesos de fosforilación oxidativa, que interviene en la ruta por la que se produce el 90% de energía celular y que, probablemente, está asociado a las enzimas involucradas en la catálisis en la reacción de formación de ATP, así como una reducción en la eficiencia del transporte y almacenamiento de lípidos. Esto se refleja en una pérdida en la capacidad de crecimiento.

En ese sentido, los genes de actividad ATP, actividad endopeptidasas y actividad peptidasa parecen ser buenos indicadores de respuesta. Por otro lado, la sobre expresión de los genes de

ligadura de ATP y ligadura de nucleótidos pueden ser buenos indicadores. Se evidencia la actividad del amino-ácido serina, que se relaciona con la activación de la cascada fenoloxidas, la cual se asocia a la disminución en la capacidad de respuesta inmune del organismo en condiciones de estrés. Su sobre-expresión se refleja también como una disminución en la capacidad de crecimiento en los organismos en el cultivo sub-óptimo.

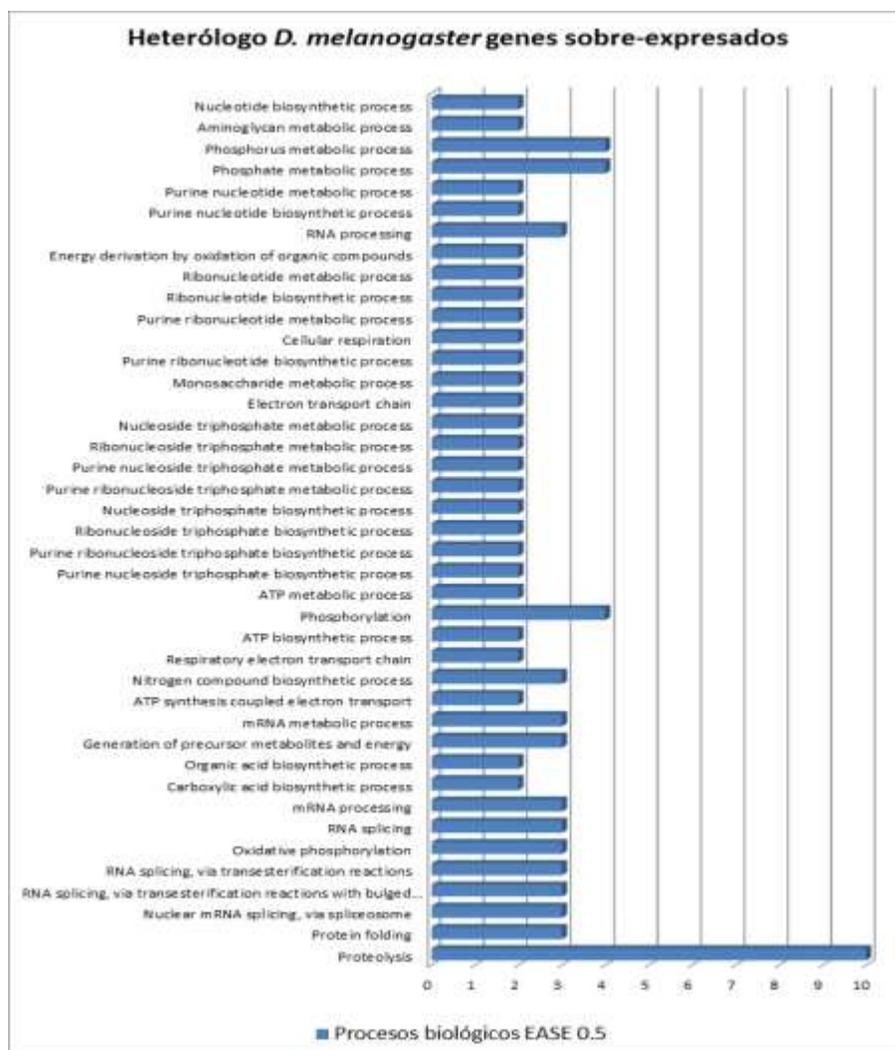


Figura 18. Genes sobre-expresados para: Procesos biológicos en camarón blanco. *L. vanammei*, cultivado de manera intensiva por 105 días.

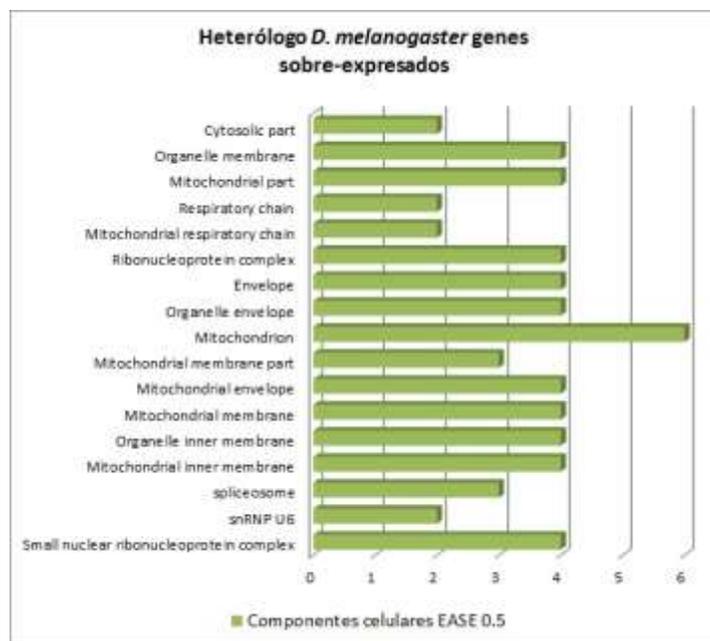


Figura 19. Genes sobre-expresados para: Componentes celulares en camarón blanco. *L. vanammei*, cultivado de manera intensiva por 105 días.

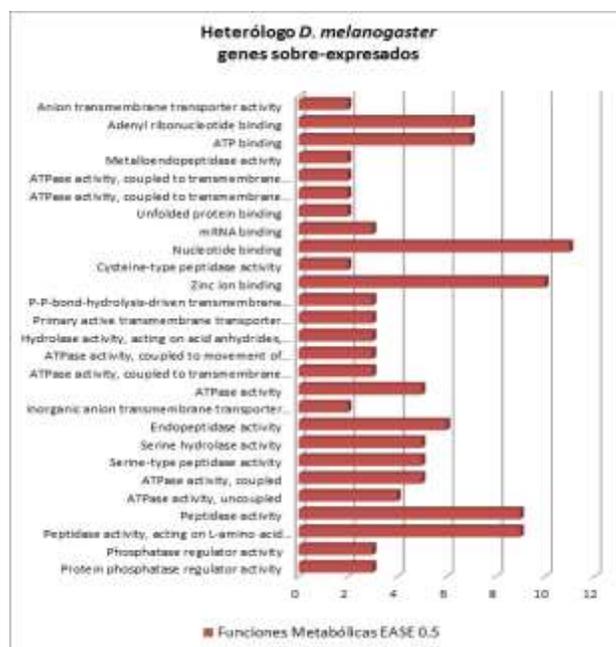


Figura 20. Genes sobre-expresados para: Funciones metabólicas en camarón blanco. *L. vanammei*, cultivado de manera intensiva por 105 días.

8. DISCUSIÓN

8.1 Evaluación de diferentes sistemas de aireación

8.1.1 Parámetros de calidad de agua

Los estanques con paletas de 2 HP registraron una salinidad más alta que los estanques con aspiradores. Abdelrahman & Boyd (2015) y Moreno-Figueroa et al. (2017) mostraron que la tasa de evaporación cuando se utilizan paletas es más alta (2 mm/día), que cuando se utilizan aspiradores (<0.9 mm/día), lo que se puede relacionar con la acción mecánica de la paleta, la cual lanza gotas de agua al aire como estrategia para realizar el intercambio de gases. En condiciones desérticas esto es relevante ya que se fomenta la evaporación. Moreno-Figueroa et al. (2017) reportaron una evaporación superior a 9.4 mm por día. Por otro lado, si el cultivo se realiza en zonas de condición hipersalina, como la Ensenada de La Paz (Espinoza, 1978), esto puede afectar la viabilidad de cultivo comercial si no se realiza una adición o recambio de agua, afectando los niveles de otros parámetros de calidad de agua. La Tabla 3 muestra que esto no fue el caso en el presente estudio, debido al manejo utilizado, manteniéndose dentro de lo recomendado por Boyd (2001) para *L. vannamei*. La especie es halotolerante (Pante 1990), viviendo en salinidades de 0 a 50 ppt, con un óptimo alrededor de 20 ppt, sin afectar su sobrevivencia significativamente (Decamp et al., 2003). La sobrevivencia en este estudio fue alta (> 80%) lo cual se considera apropiado para el cultivo.

La diferencia en la temperatura promedio de las paletas con el tratamiento mixto de aireación o los aspiradores se debe a que el movimiento de las paletas provoca que el agua tenga mayor contacto con el aire. En zonas desérticas o semidesérticas, como La Paz, la temperatura del aire puede cambiar significativamente al enfriarse la tierra durante la noche, generando vientos con dirección tierra-mar. Por otro lado, durante el día, la temperatura del suelo tiende a elevarse significativamente, por encima de la que mantiene el mar, provocando vientos en sentido contrario (Espinoza, 1978). Wyban et al. (1995) y Boyd (2001) encontraron que existen diferencias en crecimiento de *L. vannamei* entre 27 y 30°C.

En este estudio, la tasa de crecimiento del camarón fue ligeramente mayor en los estanques que mantuvieron temperaturas más altas, aunque la diferencia no fue significativa. Reportes sobre la respuesta metabólica de la especie (Villarreal et al, 1994, 2003) indican que valores entre 26 y 30°C no producen diferencias significativas en el metabolismo rutinario de la especie, por lo que no se esperaba que el diferencial de temperatura registrado necesariamente afectara las tasas de crecimiento en los estanques.

Por otro lado, la temperatura aumentó conforme avanzó el cultivo, afectando la solubilidad del oxígeno disuelto (Boyd, 2001). A esto es necesario agregar las demandas para la respiración del oxígeno conforme aumenta su biomasa, del consumo de oxígeno del alimento no consumido y compuestos metabólicos, y de los organismos que conforman la productividad natural en el estanque (Egna & Boyd, 1997). Por ello fue necesario incrementar el volumen de aireación, de 20 a 40 hp/día, a fin de mantener niveles por encima de la concentración de oxígeno disuelto letal en camarones que se reporta entre 1 y 2 mg/l (Boyd, 2001), y de condiciones que propicien el lento crecimiento (1-3 mg/l, Sonnenholzner, 2014), garantizando niveles superiores a 4 mg/l que propician un crecimiento óptimo en aguas cálidas (Boyd, 2001). En el presente estudio, los niveles de saturación de oxígeno disuelto promedio se encontraron por encima de 4 mg/l en todos los tratamientos. Es importante mencionar que los estanques con aspiradores mostraron menores concentraciones de OD, comparados con estanques aireados con paletas. Esta se relaciona con la capacidad de los primeros de mezclar mejor la columna de agua, manteniendo en suspensión un mayor porcentaje de la materia orgánica, lo que se tradujo en una demanda superior de oxígeno. La Tabla 3 confirma esto en función a los niveles de sólidos suspendidos en los estanques, en donde los estanques con combinación de aireadores se encuentran en niveles intermedios de temperatura, oxígeno y sólidos suspendidos. Además de la temperatura, la transferencia de gases aire-agua, la respiración animal, de materia orgánica y del sedimento, otro factor que impacta el nivel de oxígeno disuelto es la fotosíntesis. Los niveles de clorofila que se muestran en la Tabla 3 fueron significativamente más altos en estanques con paletas, que en estanques con aspiradores. Esto se relaciona con el movimiento mecánico de cada uno, en donde la paleta expone más eficientemente al sol y al intercambio de gases las capas superiores del agua del estanque, propiciando una mayor producción de microalgas.

Es relevante mencionar que, durante la noche, las microalgas no producen oxígeno, sino que lo consumen, lo que afecta los niveles de saturación en el agua.

8.1.2 Respuesta de variables productivas.

Cuando la temperatura se encuentra dentro del intervalo óptimo para el cultivo de la especie, otros factores que pueden afectar el desarrollo del organismo incluyen pH, amonio y salinidad. En el presente estudio, los datos de pH y amonio se encontraron dentro de los niveles adecuados para el camarón blanco. En cuanto a la salinidad, Le *et al.* (2009) indicaron que cuando el estrés osmótico es menor, las demandas metabólicas disminuyen, liberando energía para el crecimiento y mejorando la eficiencia de conversión de alimento. Gong *et al.* (2004) indican que para *L. vannamei* el punto isosmótico es 25-26 ppt. No todas las regiones donde se cultiva la especie permiten mantener la salinidad ideal para el cultivo. Burford *et al.* (2003) mostraron que es factible producir tallas de 13 g y 11 toneladas/ha en Belice a bajas salinidades con temperaturas alrededor de 26-28°C cuando se siembran 120 postlarvas/m², mientras que Moreno-Figueroa *et al.* (2017) alcanzaron 13 ton/ha en las mismas condiciones de cultivo, pero con una salinidad de 45 ppt. Utilizando el mismo sistema de producción en nuestro estudio, se demostró que se puede alcanzar tallas similares pero una biomasa significativamente mayor (16.6-17.1 ton/ha), cuando se incrementa la densidad de siembra a 150 PL/m², ya que no hubo un efecto negativo en la sobrevivencia o el factor de conversión del alimento. McIntosh (2000) ha indicado que el diseño y el manejo de los estanques de cultivo son fundamentales para obtener producciones significativas en sistemas intensivos con recambio de agua limitado. El sistema fotoheterotrófico (Villarreal *et al.*, 2019) utilizado resulta en un ecosistema homogéneo de producción, que suspende los residuos de materia orgánica con aireadores a fin de optimizar las condiciones de calidad de agua por la presencia de bacterias quimiotróficas (*Nitrosomonas*, spp., *Nitrobacter* spp.), y aprovechar las bacterias y levaduras heterótrofas para convertir la materia orgánica en una fuente significativa de alimento para el camarón (Amnivelech, 2012).

8.1.3 Uso de energía eléctrica

No hubo diferencias significativas de amperaje y voltaje entre los tratamientos durante la engorda de *Litopenaeus vannamei* y no se identificó una tendencia al cambio de los valores en el tiempo, indicando que el incremento de biomasa y en la cantidad de alimento suministrado no resultó en modificaciones al consumo eléctrico. No existen muchos reportes de consumo eléctrico para cultivos intensivos de camarón. Boyd y Clay (2002), reportaron un requerimiento de 4.35 KWhr/kg de camarón para un rendimiento de 13.6 ton/Ha, mientras que Moreno-Figueroa et al., (2017) reportaron producción de 13.4 ton/ha para un costo de 4.71 KWhr/kg. La Tabla 6 muestra que, en el presente estudio, el rendimiento promedio fue de 16.89 ton/ha de camarón. Con ello, la eficiencia energética por kilo de camarón fue de 4.27 KWhr/kg, que es similar a la reportada por Boyd y Clay (2002) y significativamente menor a lo reportado por Moreno-Figueroa (2017).

8.1.4 Requerimiento de agua

Durante el cultivo no se utilizó recambio de agua, pero se agregó una cantidad semanalmente, de acuerdo a la evaporación, para mantener el nivel de operación del estanque y limitar el incremento de salinidad. Se agregaron 3,350 m³ por estanque. El promedio de rendimiento en los estanques fue de 1,689 kg, por lo que el requerimiento de agua por kilogramo de camarón producido es de 1.98 m³. Boyd y Clay (2002) reportaron un requerimiento promedio de 2.3 m³/kg de camarón cosechado, mientras que Moreno-Figueroa (2017) reportan un consumo de 2.68 m³/kg de camarón; ambos valores significativamente más altos.

8.1.5 Velocidad de corriente

Existen diversos trabajos que determinan la velocidad mínima necesaria para poder suspender la mayor cantidad de partículas de materia orgánica en estanques acuícolas, dependiendo del tamaño de partícula sedimentable a considerar (Villarreal et al., 2018). En la presente evaluación, se estableció un valor mínimo de velocidad de agua de 0.1 pie/segundo (McIntosh, 2000; Boyd y Clay, 2002), por debajo del cual se presentan niveles significativos de

sedimentación de materia orgánica en los estanques. Los resultados muestran que, a 4 y 6 m de distancia del aireador, no hubo diferencias marcadas en la velocidad de corriente de agua generada en los estanques con diferentes sistemas de aireación en la fase inicial del cultivo. Como es de esperarse, sistemas de superficie (paletas) muestran una tendencia a generar mayor velocidad en la parte superior. La caída en la velocidad de corriente con la profundidad es clara para estos equipos.

Por otro lado, los aireadores de aspiración están diseñados para un movimiento central de agua. Esto se refleja como velocidades más consistentes en el estanque. En ambos casos se mantuvo una mezcla adecuada en la columna de agua, que propició una calidad de agua homogénea, comparado con sistemas en los que no se propicia el movimiento de agua por medio de aireadores. En algunos casos, los datos de velocidad muestran variaciones e inconsistencias atribuibles a la implementación del proceso de medición (colocar a una persona sosteniendo el correntómetro en el agua a la distancia deseada). No hubo una tendencia clara que reflejara la disminución de la velocidad de la corriente de agua generada por los aireadores cuando se comparan las velocidades al día 50. Sin embargo, después de 100 días de cultivo la capacidad de los aireadores para mantener la velocidad de corriente por encima de la velocidad mínima deseada (0.1 pies/segundo, 0.031 m/s) fue afectada por la biomasa del camarón, la cantidad de alimento suplementario distribuido, y el peso de la materia orgánica sedimentada y en suspensión. Boyd y Clay (2002) han indicado que la función de los equipos de aireación es transferir oxígeno a la columna de agua. Avnimelech (2012), por su parte, menciona que el papel de los aireadores es fundamental para lograr una mezcla homogénea de la columna de agua. En el presente estudio, ambas funciones se lograron de manera satisfactoria.

8.1.6 Análisis de costos, ingresos y utilidad neta

Los costos de producción fueron muy consistentes para todos los tratamientos. Las diferencias se establecieron en función a la cantidad de alimento suplementario suministrado, que está asociado al factor de conversión de alimento, y a las diferencias en la amortización del tipo de equipo de aireación, en donde el tiempo de operación viable es menor para un aireador de

paletas que para un aspirador. A pesar de ello, las diferencias en la utilidad neta (Tabla 9) son limitadas, indicando que la producción de camarón fue exitosa, independientemente del tipo de aireador utilizado. Se obtuvo un costo y una utilidad promedios por hectárea de \$776,336 y \$659,342, respectivamente, que compara favorablemente con otros estudios. Por ejemplo, Moreno-Figueroa (2017) presentó costos de producción de \$777,540/ha y una utilidad promedio de \$222,930/ha en condiciones similares de cultivo. El beneficio-costo reportado por este autor fue de 1.39, mientras en el presente estudio fue de 1.85, lo cual está relacionado principalmente al precio de venta y a la mayor biomasa obtenida. Si se realiza un ajuste para utilizar los precios de venta estimados por Moreno-Figueroa (2017), de \$67/kg, la utilidad neta sería de \$355,316, que es 59% más alta que la reportada por este autor.

Por otro lado, en el caso de cultivo en granjas semi-intensivas en México, FIRA (2007), SAGARPA (2009) e ISAPESCA (2017) reportaron que las utilidades se encuentran entre \$13,000 y \$45,000/ha. Estas son altamente influenciadas por el peso del camarón (Hernández-Llamas y Magallón-Barajas 1991; Hernández-Llamas *et al.* 2004), y el costo del alimento (Hatch *et al.*, 1987; Hernández-Llamas *et al.*, 2004; Sánchez-Zazueta y Martínez-Cordero, 2009 y Hernández-Llamas *et al.*, 2013).

8.2 Evaluación de diferentes tiempos de aireación

8.2.1 Parámetros de calidad de agua

Los parámetros de calidad de agua registrados durante la evaluación se mantuvieron dentro de los intervalos óptimos reportados para la especie (Boyd y Clay, 2002) en cultivo intensivo. Los valores promedio de amonio fueron más altos para el tratamiento de 12 horas de aireación y los niveles de bacterias heterotróficas fueron más bajos, aunque no hubo diferencias estadísticas. Estos cambios pueden estar asociados a la falta de movimiento de agua durante el día, que permite sedimentación de materia orgánica, por lo que la cantidad de bacterias nitrificantes y heterótrofas disminuye (Avnimelech, 2012). Naranjo *et al.* (2022) han mostrado que cuando la aireación se limita, la velocidad de crecimiento disminuye en la langosta de agua dulce, *Cherax quadricarinatus*. Esto puede estar asociado con un tiempo de degradación más largo para

metabolitos, como el amonio que, aunque se encuentre en niveles no letales para la especie, puede afectarlas a nivel crónico. Colt y Tchobanoglous (1976), Armstrong et al. (1978), Wasielesky et al. (2006) y Sampaio et al. (2002) han mostrado que los niveles subcríticos de amonio tienen un efecto en el crecimiento de especies como *Macrobrachium rosenbergii*, *Ictalurus punctatus*, *Mugil platanus* y *Litopenaeus paulensis*.

8.2.2 Respuesta de variables productivas

Normalmente, el recambio de agua se utiliza para prevenir la acumulación de metabolitos en estanques (Chamberlain, 1988; Hopkins et al. 1993). La aireación se utiliza como estrategia para mejorar la calidad de agua, mejorar la producción y reducir la cantidad de recambio de agua (Sandifer et al. 1988; Martínez-Córdova et al. 1995, 1997, 1998). Por otro lado, existen reportes de limitación del recambio de agua y aireación sin efectos negativos en el cultivo semi-intensivo e intensivo de camarón (Martínez- Córdova et al. 1995, 1997, 1998; Moreno-Figueroa et al. 2017). Esto es importante, ya que una reducción en los costos de energía por concepto de recambio de agua o uso de aireadores mejora la rentabilidad del cultivo.

Varios reportes muestran que el uso de aireación como estrategia para reducir el recambio de agua en cultivo de *Litopenaeus vannamei* da buenos resultados (Hopkins, et al., 1993; Martínez et al. 1997; Hopkins et al., 1996; Fast y Menasveta, 2000; Boyd y Clay, 2002). En ese sentido, el uso de membranas de recubrimiento en los estanques puede ayudar a reducir la fricción del agua en movimiento, en comparación con estanques de arcilla, permitiendo alcanzar una velocidad de agua cerca de 6 pies/min (0.031 m/seg) (Browdy et al., 2001; McIntosh, 2000), lo que contribuye a mantener materia orgánica y sólidos en suspensión. Esto es crítico en sistemas intensificados. Cuando se limita el movimiento de agua como, por ejemplo, en estanques sin aireación, ocurre una acumulación de sedimentos orgánicos e inorgánicos en el fondo del estanque que pueden afectar la alimentación y el consumo de oxígeno por los organismos (Boyd y Clay, 2002). Para especies de fondo, como *Machrobrachium spp.*, *Cherax, spp.* y *Penaeus spp.*, estas *micro* condiciones en la capa adyacente al fondo pueden afectar al organismo. Este problema se ha reportado en *Litopenaeus vannamei* (Ritvo et al., 2000; Yusoff et al., 2003;

Abraham, 2004). En el presente estudio, el peso promedio final del camarón fue significativamente menor en el tratamiento de 12 horas de aireación a partir del día 77 de cultivo. Al final del cultivo el promedio del FCA fue ligeramente inferior para el tratamiento de 24 horas de aireación y no hubo diferencias en sobrevivencia entre los tratamientos. Naranjo et al., (2022) indicaron que esto ocurre cuando se limita la disponibilidad de oxígeno, lo que provoca una menor eficiencia de oxidación de compuestos nutricios del alimento, destinando la energía para funciones prioritarias, como la respiración y la sobrevivencia, y limitando la energía disponible para el crecimiento.

8.3 Tasa metabólica estándar (TME) y punto crítico (PC).

La tasa metabólica estándar (TME) evalúa el gasto energético del organismo durante la actividad motora rutinaria, siendo mayor en el tratamiento con 12 hr de aireación. Cuando esto sucede, hay menos energía disponible para el crecimiento para poder cumplir las funciones fisiológicas rutinarias (Villarreal, 1989). Por otro lado, el punto crítico de conformación metabólica, cuando el organismo deja de regular su consumo de oxígeno y empieza a conformar su actividad metabólica para sobrevivir, mostró una mayor resiliencia cuando los camarones son cultivados con aireación continua. Carreño et al. (2014) y Villarreal (1988), entre otros, han indicado que la disponibilidad de nutrientes o de oxígeno disuelto, no son suficientes para maximizar la producción cuando el organismo pasa de ser regulador metabólico a conformador. En otras palabras, los organismos en cultivo en estanques con 12 horas de aireación sufrieron mayor cantidad de estrés crítico, que redujo su capacidad para maximizar el crecimiento. Esto se evidenció en TME más elevadas y un PC más alto. Esto se explica al entender que la demanda de oxígeno es más alta en el fondo que en la columna de agua, ya que la concentración de materia orgánica, nutrientes y microorganismos es más alta, además de la biomasa de camarón. Si el fondo del estanque no se maneja de manera adecuada al permitir que haya sedimentación cíclica (cada 12 horas), la degradación de materia orgánica va a exceder la capacidad de renovación de oxígeno, posiblemente generando zonas anóxicas, con compuestos potencialmente tóxicos para el organismo, como los sulfuros (Teichert-Coddington et al. 1994), que reducen la tasa de alimentación, reducen el crecimiento, pueden incrementar la mortalidad

y la susceptibilidad a enfermedades (Hopkins et al., 1991; Sandifer et al., 1993; Ritvo et al., 2000; Avnimelech and Gad, 2003; Yusoff et al. 2003).

8.4 Expresión génica.

Los camarones cultivados en estanques con 12 horas de aireación resultaron en un peso promedio final menor y una menor biomasa final. Al realizar la evaluación del estado fisiológico de los organismos se encontró que estos camarones mostraban una tasa metabólica estándar más alta y un punto crítico de conformación más alto, en comparación con organismos procedentes del cultivo con 24 horas de aireación. La explicación productiva y fisiológica se presentó en las secciones anteriores. Sin embargo, los resultados ofrecían una oportunidad para evaluar la respuesta en términos de expresión génica, para lo que se utilizó un microarreglo heterólogo. Los resultados mostraron una sobreexpresión de 323 genes, de los cuales se identificaron 153 para *D. melanogaster*. De los 300 genes suprimidos se identificaron 160 para *D. melanogaster*.

Se evidenció una afectación de la capacidad de producir eficientemente ATP, asociado a procesos de fosforilación oxidativa, que interviene en la ruta por la que se produce el 90% de energía celular y que, probablemente, está asociado a las enzimas involucradas en la catálisis en la reacción de formación de ATP, así como una reducción en la eficiencia del transporte y almacenamiento de lípidos. Esto se refleja en una pérdida en la capacidad de crecimiento. (Wu, 2002).

Por otro lado, Ulaje-Fernandez (2015) demostró que la exposición crónica a hipoxia en *L. vannamei* tiene un efecto en la reducción en el uso de energía, así como en la síntesis de proteína, lo que contribuye a explicar la diferencia en peso entre el tratamiento de 24 horas y el de 12 horas de aireación. La investigación futura deberá evaluar si se presenta un aumento en la expresión de genes con actividad en rutas de obtención de energía por oxidación de compuestos orgánicos de manera similar a lo reportado por Storey (2000).

En el caso del camarón chino (*Fenneropenaeus chinensis*), la principal respuesta a la hipoxia es la activación de genes involucrados en las rutas de glucólisis y gluconeogénesis (Jiang, et al., 2009). En un estudio realizado en el langostino de río oriental (*Macrobrachium nipponense*), por Sun et al. (2015) mostraron la asociación de expresión de genes en hepatopáncreas, tejido muscular y branquial en condiciones de hipoxia con actividad de la transferasa y oxidorreductasa, y la señalización de vías de fosforilación oxidativa, glucólisis/gluconeogénesis y ciclo TCA. Esto es similar a los resultados del presente estudio.

Por otro lado, la evidencia de sobre-expresión de la actividad del amino-ácido serina, que se relaciona con la activación de la cascada fenoloxidasas (PO) puede asociarse a la caída de la capacidad de respuesta inmune del organismo en condiciones de estrés. (Huang et al, 2010). Este proceso generaría una demanda adicional de energía que puede relegarse en una disminución en la tasa de crecimiento.

Como se menciona arriba, estos resultados son preliminares por lo que la investigación futura deberá estudiar la expresión de genes que puedan asociarse a una disminución en la capacidad de crecimiento en los organismos en condiciones sub-óptimas de cultivo.

9. CONCLUSIONES

Se ha demostrado que la mezcla adecuada de agua crea un ambiente más estable en el estanque de cultivo, lo que se refleja en el bienestar, sobrevivencia y crecimiento del organismo. La corriente de agua generada por los aireadores propicia la suspensión de materia orgánica y el desarrollo de flóculos bacterianos, facilitando la descomposición aeróbica de la materia orgánica. (Avnimelech, 2007, 2012; Boyd y Clay, 2002; Moreno et al. 2017; Sandifer y Hopkins, 1996). Estos sistemas se han llamado biofloc, mixotróficos o fotoheterotróficos (Avnimelech, 2012; Shishehchian, 2012; Moreno-Figueroa et al. 2017; Núñez-Amao et al., 2019), que buscan reducir el recambio de agua y la descarga de materia orgánica, ofreciendo un cultivo más sustentable y rentable (Torrans, 2012; Boyd and Clay, 2002; Timmons et al., 2002; Gelfand et al., 2003; Browdy and Moss, 2005). Los rendimientos alcanzados en la evaluación con equipos de aireación de 2 HP, tipo aspirador o paletas, no mostraron diferencias significativas en términos de variables productivas, incluyendo peso final, sobrevivencia, TCA, biomasa y FCA, confirmando que el sistema fotoheterotrófico utilizado fue eficiente para alcanzar más de 18 ton/ha por ciclo de producción. Por otro lado, la limitación de aireación propició un cambio significativo en la respuesta fisiológica que se traduce en una pérdida de capacidad para acumular tejido, resultando en un peso final menor. Las implicaciones económicas de esto son significativas, por lo que la identificación de criterios, como es el caso de la expresión génica, que permitan establecer cambios en la respuesta del organismo, es deseable.

10. LITERATURA CITADA

- Abdelrahman, H.A. & Boyd, C.E. 2015. Effects of paddlewheel and diffused-air aerators on water temperature and pond evaporation. FENACAM & LACQUA'15. Fortaleza, Brasil.
- Abraham, T.J. 2004. Antibacterial marine bacterium deter luminous vibriosis in shrimp larvae. NAGA. World. Fish Cent.Q. 27(3-4): 28-31
- Adams, C.M., Griffin, W.L., Nichols, P., Bricks, R.W. 1980. Application of a bioeconomic-engineering model for shrimp mariculture systems. Southern J. Agricult. Econ. 12: 135-141.
- Allan, G.L., Maguire, G.B. 1991. Lethal levels of low dissolved oxygen and effects of short-term oxygen stress on subsequent growth of juvenile *Penaeus monodon*. Aquaculture. 94(1): 27-37.
- Alonso-Rodríguez, R., Páez-Osuna, F., Gárate-Lizárraga, I. 2004. El fitoplancton en la camaronicultura y larvicultura, Importancia de un buen manejo. Comité de Sanidad Acuícola de Sinaloa (CESASIN), Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). México.
- Armstrong D.A., Chippendale D., Knight A. W. and Colt J. E., 1978, Interaction of ionized and un-ionized ammonia on short-term survival and growth of prawn larvae, *Macrobrachium rosenbergii*. Biol. Bull., 154(1): 15-31.
- Anaya-Rosas, R.E., L.F: Buckle-Ramirez, 2012, Cultivo de *Litopenaus vannamei* (BOONE,1931) en un sistema con agua de mar recirculada, como alternativa a los cultivos semi-intensivos tradicionales. Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud. 14(3): 16-24.
- APHA (American Public Health Association), American Water Works Association, Water Pollution Control Association. 2012. Standard methods for the Examination of Water and Wastewater, 22 ed. Rice, E.W., Baird, A.B., Eaton, A. D & Clesceri, L. S. (eds.). American Public Health Association, Washington, DC. USA. 874 PP. ISBN: 9780875530130.
- Arnold, S.J., Sellars, M.J., Crocos, P.J., Coman, G.J. 2006. Intensive production of juvenile tiger shrimp *Penaeus monodon*: An evaluation of stocking density and artificial substrates. Aquaculture, 261(3): 890-896.
- Arredondo-Figueroa, J.L. 2002. El cultivo de camarón en México, actualidades y perspectivas. ContactoS. 43(): 41-54.
- Astete-Espinoza, L. P., Garrido, C. F., Cáceres, C. W., 2010. Respuestas fisiológicas de *Neotrypaea uncinata* (Decapoda: Thalassinidea) a la hipoxia y al parasitismo por *Ionella agassizi* (Isopoda: Epicaridea). Revista de Biología Marina y Oceanografía 45(3): 423-431.
- Avnimelech, Y. 1999. Carbon/nitrogen ratio as a control element in aquaculture systems. Aquaculture. 176(3-4): 227-235.
- Avnimelech, Y. 2006. Bio-filters: the need for a new comprehensive approach. Aquacultural engineering. 34(3): 172-178.
- Avnimelech, Y. 2007. Feeding with microbial flocs by tilapia in minimal discharge bio-flocs technology ponds. Aquaculture. 264(1-4): 140-147.
- Avnimelech, Y. 2012. Biofloc technology- A practical book, Second Edition. The World Aquaculture Society, Baton Rouge, Louisiana, United States.
- Avnimelech, Y. & Gad, R., 2003. Shrimp and fish pond soils: processes and management. Aquaculture. 220(1-4): 549-567

- Ayaz, M., Sumara, K., Vadher, K.H., Ishakani, A.H. 2015. Effect of higher salinities on growth and survival of pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931). Journal of Applied and Natural Science. 7(2): 885-888.
- Balcázar, J.L. 2002. Uso de probióticos en acuicultura: Aspectos generales CIVA 2002: 877-881.
- Bartlett, P., Bonilla, P., Quiros, L., Takano, M. 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., Shao, P., Zhang, Q., Liu, B.Z., Cao, S. X., Tang, G.G. 2012. Ecological shrimp farming in salt ponds in northern China. Heibei fisheries. 225(9): 13-15.
- Barraza-Guardado, R.H., Martínez-Córdova, L.R., Enríquez-Ocaña, L.F., Martínez-Porchas, M., Miranda-Baeza, A., Porchas-Cornejo, M.A. 2014. Efecto de efluentes de granjas camaronícolas sobre parámetros de la calidad de agua y del sedimento frente a la costa de Sonora, México. Ciencias Marinas. 40(4): 221-235.
- Bett, C., Vinatea, L. 2009. Combined effect of weight, temperature and salinity on shrimp *Litopenaeus vannamei* oxygen consumption rate. Brazilian Journal of Oceanography. 57 (4): 305-314.
- Boyd, C., and J. Clay. 2002. Evaluation of Belize Aquaculture, Ltd. super intensive shrimp aquaculture system. FAO. Roma.
- Bray, W.A., Lawrence, A.L., Leung-Trujillo, J.R. 1994. The effect of salinity on growth and survival of *Litopenaeus vannamei*, with observations on the interaction of IHNV virus and salinity. Aquaculture 122(2-3): 133-146.
- Briggs, M., Funge-Smith, R.P. & Philips, M. 2005. Introducciones y movimiento de dos especies de camarones peneidos en Asia y el Pacifico. FAO Documento Técnico de Pesca. No. 476. Roma, FAO.
- Browdy, C.L. and Moss, S.M., 2005. Shrimp culture in urban, superintensive closed systems. In: Costa-Pierce, B.A. (Ed.), Urban Aquaculture. Blackwell Science, Oxford.
- Bosma, R.H., Verdegem, M.C. 2011. Sustainable aquaculture in ponds: Principles, practices and limits. Livestock Science. 139(1-2): 58-68.
- Bowen, B., McIntosh, R. 2006. Meet the flockers. Shrimp news international. October 1, 2006. Disponible en: <http://www.shrimpnews.com/FreeReportsFolder/.../MeetFlockers.html>. (Consultado el 23 de Noviembre de 2021).
- Boyd, C.E. 1982. Water quality management for pond fish culture. Elsevier Science Pub Co. First edition. Amsterdam.
- Boyd, C.E. 1998. Pond water aeration systems. Aquacultural Engineering. 18(1): 9-40.
- Boyd, C.E. 1999. Codes of practice for responsible shrimp farming. Global Aquaculture Alliance. First edition. St. Louis, Missouri.
- Boyd, C.E. 2001. Consideraciones sobre la calidad del agua y del suelo en cultivos de camarón. En: Haws, M.C., Boyd, C.E. (eds.). Métodos para mejorar la camaronicultura en Centroamérica. Editorial-Imprenta UCA, Managua, Nicaragua.
- Boyd, C.E. 2002. Estándares de la calidad de agua: amoniaco de nitrógeno total. Boletín NICOTIVA. 7(1): 1-5.
- Boyd, C.E. 2003. Bottom soil and water quality management in shrimp ponds. Journal of Applied Aquaculture. 13(1-2): 11-33.
- Boyd, C.E. and Clay, J.W. 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. Work in Progress for Public Discussion. Published by the Consortium.
- Boyd, C.E. and Daniels, H.V. 1994. Liming and fertilization of brackishwater shrimp ponds. *Journal of Applied Aquaculture*. 2(3-4): 221-234.
- Boyd, C. E. and Gautier, D. 2000. Effluent composition and water quality standards. *Global Aquaculture Advocate*. 3(5): 61-66.
- Boyd, C.E. and Hanson, T. 2010. Dissolved-oxygen concentrations in pond aquaculture. *Global Aquaculture Advocate*. 1: 40-41.
- Briggs, M.; Funge-Smith, S.; Subasinghe, R.P.; Phillips, M, 2005, Introductions and movement of two penaeid shrimp species in Asia and the Pacific.; FAO, Rome (Italy). Fishery Resources Div.
- Browdy, C.L., Bratford, D., Stokes, A.D. & McIntosh, R.P. 2001. Perspectives on the application of closed shrimp culture systems. In: C.L. Browdy & D.E. Jory (ed.). *The new wave. Proceedings of the Special Session on sustainable shrimp farming*, The World Aquaculture Society, Baton Rouge.
- Browdy, L.C., Stokes, A.D., Leffler J., Wasilesky, W., McAbee, B. & Atwood, H. 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., Jeffrey, J.K. and Dunstan, G.A. 1997. Nutritional properties of microalgae for mariculture. *Aquaculture*. 151(1-4): 315-331.
- Brugere, C. and Ridler, N. 2005. *Perspectivas de la acuicultura para los próximos decenios: Análisis para los pronósticos 2030 de la producción acuícola de los principales países*. FAO. Roma.
- Buckle, L.F., Barón, B. and Hernández, M. 2006. Osmoregulatory capacity of the shrimp *Litopenaeus vannamei* at different temperatures and salinities, and optimal culture environment. *Rev.Biol. Trop*. 54(3): 45-53.
- Burford, A.M., Thompson, P.T., McIntosh, R.H., Bauman, R.H. and Pearson, D.C. 2003. Nutrient and microbial dynamics in high intensity, zero-exchange shrimp ponds in Belize. *Aquaculture*. 219(1-4): 393-411.
- Burford, A.M., Thompson, P.T., McIntosh, R.H., Bauman, R.H. and Pearson, D.C. 2004. The contribution of flocculated material to shrimp (*Litopenaeus vannamei*) nutrition in a high-intensity, zero-exchange system. *Aquaculture*. 232(1-4): 525-537.
- Burgens, J., Burnett, K. and Burnett, L. 2004. Disease resistance of Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*, following the dietary administration of a yeast culture food supplement. *Aquaculture*. 231(1-4): 1-8.
- Campaña-Torres A, Martínez-Córdova LR, Villarreal-Colmenares H, Hernández-López J, Ezquerra-Brauer JM, Cortés-Jacinto E. 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). *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 44(2): 335-342.
- Carreño-León D, Racotta-Dimitrov I, Casillas-Hernández R, Monge-Quevedo A, Ocampo-Victoria L, Naranjo-Paramo, J. & Villarreal, H. Growth, Metabolic and Physiological Response of Juvenile *Cherax quadricarinatus* Fed Different Available Nutritional Substrates. *J Aquac Res Development* 2014. 5 (2): 220-227.
- Chamberlain, G., 1988. Rethinking shrimp ponds management. *Coastal Aquaculture* 5(2): 1-19.

- Chamberlain, G. 2001. Conferencia: Cultivo sostenible de camarón: mitos y realidades. SHRIMP 2001. Chennai, India.
- Chamberlain, G., Avnimelech, Y., McIntosh, R.P., Bauman, R.H. y Pearson, D.C. 2001. Advantages of aerated microbial reuse systems with balanced C/N. II. Composition and nutritional value of organic detritus. *Global Aquaculture Advocate* 4(4): 22-24.
- Ching, C.A., Portal, V.J., Salinas, A. 2014. Control of *Vibrio* spp. bacteria in marine shrimp larvae using low-salinity water. *Global Aquaculture Advocate*. 6 (17): 26-27.
- Chomczynski, P., & Sacchi, N. (1987). Single-step method of RNA isolation by acid guanidinium thiocyanate-phenol-chloroform extraction. *Analytical biochemistry*, 162(1), 156-159.
- Crespi V y Lovatelli A. 2011. Global desert aquaculture at a glance. En: V. Crespi & A. Lovatelli, (Eds.) *Aquaculture in desert and arid lands: development constraints and opportunities*. FAO Technical Workshop. 6–9 July 2010, Hermosillo, Mexico. FAO Fisheries and Aquaculture Proceedings No. 20. Rome, FAO.
- Colt J., Tchobanoglous G., 1976. Evaluation of the short-term toxicity of nitrogenous compounds to channel catfish, *Ictalurus punctatus*. 8(3): 209–224.
- 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.
- CONAPESCA. 2011. Anuario Estadístico de Acuicultura y Pesca 2011. Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca. Secretaría de Agricultura Ganadería Pesca y Alimentación. México.
- CONAPESCA. 2014. Tablas de producción pesquera y acuícola. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación (SAGARPA), Gobierno Federal, México.
- CONAPESCA. 2020. Producción de camarón crece para alimentar a México. *Revista Divulgación acuícola*. 15 de diciembre de 2020. <http://divulgacionacuicola.com.mx/blog/2020/12/15/produccion-de-camaron-crece-para-alimentar-a-mexico>. (Consultado el 10 de octubre de 2021).
- Cota-Ruíz, K., Peregrino-Uriarte, A.B., Félix-Portillo, M., Martínez- Quintana, J.A. & Yépiz-Plazencia, G. 2015. Expression of fructose 1,6-biphosphatase and phosphofructokinases is induced in hepatopáncreas of the White shrimp *Litopenaesus vannamei* by hypoxia. *Marine Environmental research*.106(1): 1-9.
- Crab, R., Avnimelech, Y., Defoirdt, T., Bossier, P. & Verstraete, W. 2007. Nitrogen removal techniques in aquaculture for a sustainable production. *Aquaculture*. 270(1-7): 1-14.
- Crab, R., Defoirdt, T., Bossier, P. & Verstraete, W. 2012. Biofloc technology in aquaculture: beneficial effects and future challenges. *Aquaculture* 356-357: 351-357.
- Crab, R., Lambert, A., Defoirdt, T., Bossier, P. & Verstraete, W. 2010. The application of bioflocs technology to protect brine shrimp (*Artemia franciscana*) from pathogenic *Vibrio harveyi*. *J. App. Micro*. 109(5): 1643-1649.
- Cremen, M.C.M., Martínez-Goss, M.R., Corre, V.L.J. & Avanza, R.V. 2007. Phytoplankton bloom in comercial shrimp pond using green-water technology. *J.Appl. Phycol*. 19(6): 615-624.
- Decamp O., Cody J., Conquest L., Delanoy G.; Tacon A.G.T., 2003. Effect of salinity on natural community and production of *Litopenaesus vannamei* (Boone), within experimental zero-water exchange culture systems. 34(4): 345–355.
- Díaz, F., Re, A.D., Sierra, E. & Díaz-Iglesias, E. 2004. Effects of temperature and salinity fluctuation on the oxygen consumption, ammonium excretion and osmoregulation of the blue shrimp *Litopenaesus styllirostris* (Stimpson). *J.Shell. Res*. 3(23): 903-910.

- Ebeling, J.M., Timmons, M.B. & Bisogni, J.J. 2006. Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, autotrophic, and heterotrophic removal of ammonia-nitrogen in aquaculture systems. *Aquaculture*. 257(1-4): 346-358.
- Egna, H.S. and Boyd, C.E. 1997. Dynamics of pond aquaculture. CRS Press. First edition. Boca Raton, Florida.
- Eiler, A., González-Rey, C., Allen, S. & Bertilsson, S. 2007. Growth response of *Vibrio cholerae* and other *Vibrio* spp. to cyanobacterial dissolved organic matter and temperature in brackish water. *Federation of European Microbiological Societies* 60(3): 411-418.
- Emerenciano, M., Gaxiola, G. & Cuzon, G. 2013. Biomass Now- Cultivation and Utilization; Biofloc Technology: A Review for Aquaculture Application and Animal Food Industry. ISBN: 978-953-51-1106-1, InTech, DOI: 10.5772/53902.
- 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 de Doctorado, Instituto Tecnológico de Sonora, Sonora, México.
- Espinoza, A.J. 1978. Variación estacional de parámetros físico-químicos en la ensenada de La Paz, B.C.S. VI Cong. Nal. Oceanog.
- Estrada-Pérez, M. 2016. Modelo bioeconómico de la producción semi-intensiva de camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*). Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Nayarit. Xalisco, Nayarit.
- Estrada-Pérez, A., Ruiz-Velazco, J.M.J., Hernández-Llamas, A., Zavala-Leal I. & Martínez-Cárdenas, L. 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.
- FAO. 2011. Programa de información de especies acuáticas. *Penaeus vannamei* (Boone, 1931). Departamento de Pesca y Acuicultura. Recuperado de: https://www.fao.org/fishery/docs/DOCUMENT/aquaculture/CulturedSpecies/file/es/es_whitelegshrimp.htm el 20 de Septiembre 2021.
- FAO. 2012. The state of world fisheries and aquaculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Fisheries and Aquaculture Department. Italy, Rome.
- FAO, 2020. Estado Mundial de la Pesca y la Acuicultura 2020. Departamento de Pesca y Acuicultura de la FAO. Organización de las Naciones Unidas Para la Alimentación y la Agricultura. Roma.
- Fast, A.W. & Menasveta, P. 2000. Some recent issues and innovations in marine shrimp Pond culture. *Reviews in Fisheries Science* 8(3):151-233.
- 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 (Consultada el 28 de octubre de 2021).
- 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.

- Gelfand, I., Barak, Y., Even-Chen, Z., Cytryn, E., Rijn, V.J., Krom, M.D., Neori, A., 2003. A novel zero discharge intensive seawater recirculating system for the culture of marine fish. *J. World Aquac. Soc.* 34(3): 344–358.
- Gelineau A., Medale F., Boujard T. (1998). Effect of feeding time on postprandial nitrogen excretion and energy expenditure in rainbow trout. *J. Fish Biol.*, 52(4): 655–664.
- Global Aquaculture Alliance. 2013. Aquaculture global perspective. Paris, France. 2013.
- Global Aquaculture Alliance. 2016. World production of shrimp- capture fisheries and aquaculture. Guanzhou, China.
- Global Aquaculture Alliance. 2018. Revisión y pronóstico de la producción mundial de camarón: crecimiento constante por delante. Guayaquil, Ecuador, 25-27 de septiembre de 2018. <https://www.globalseafood.org/advocate/revision-y-pronostico-de-la-produccion-mundial-de-camaron-crecimiento-constante-por-delante>. (Consultada el 28 de octubre de 2021).
- Gong H., Jiang D.-H., Lightner D.V., Collins C., Brock D. 2004. A dietary modification approach to improve the osmoregulatory capacity of *Litopenaeus vannamei* cultured in the Arizona desert. *Aquaculture Nutrition*. 10(4): 227–236.
- 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 de maestría. Facultad de ciencias marinas, Universidad de Colima. Manzanillo, Colima.
- Gyalog, G., Varadi, L., Gal, D. 2011. Is intensification a viable way for pond culture in Central and Eastern Europe? *ACCL BIOFLUX*. 4(5): 584-589.
- Hari, B., Kurup, B.M., Varghese, J.T., Schrama, J.W. & Verdegem, M.C.J. 2004. Effects of carbohydrate addition on production in extensive shrimp culture systems. *Aquaculture* 241(1-4): 179–194.
- Hatch, U., Sindelar, S., Rouse, D. & Pérez, H. 1987. Demonstrating the use of risk programming for aquacultural farm management: The case of Penaeid shrimp in Panama. *J. World Aquacult. Soc.*, 18(4): 260–269.
- Hargreaves, J. A. (2013). Biofloc production systems for aquaculture (Vol. 4503, pp. 1-11). Stoneville, MS: Southern Regional Aquaculture Center.
- Hernández-Gurrola, J. A. 2016. Caracterización de la calidad de agua en un sistema intensivo de cultivo de camarón blanco *Litopenaeus vannamei*, en condiciones de alta salinidad con recambio de agua limitado. Tesis de Maestría en Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales (Orientación Acuicultura). CIBNOR.
- Hernández-Gurrola, J. A. 2021. Caracterización de la respuesta fisiológica, inmunológica, de crecimiento y supervivencia, de juveniles y adultos de *Cherax quadricarinatus* provenientes de tres líneas genéticas divergentes en México y sus cruces. Tesis de Doctorado en Ciencias en el Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales (Orientación Acuicultura) CIBNOR.
- Hernández-Llamas, A., González-Becerril, A., Hernández-Vázquez, S. Escutia-Zúñiga, S. 2004. Bioeconomic analysis of intensive production of the blue shrimp *Litopenaeus stylirostris*. *Aquacult. Res.* 35(2): 103-111.
- Hernández-Llamas, A. y Magallón-Barajas, F.J. 1991. Análisis bioeconómico del cultivo del camarón azul (*Penaeus stylirostris*) con fertilizantes orgánicos y alimentación balanceada. *Investigaciones Marinas CICIMAR* 6(2): 267-281.

- Hernández-Llamas, A., Ruiz-Velazco, J.M.J. & Gómez-Muñoz, V.M. 2013. Economic risk associated with white spot disease and stochastic variability in economic, zootechnical and water quality parameters for intensive production of *Litopenaeus vannamei*. *Reviews in Aquaculture*. 5(): 121-131.
- Hernández-Llamas, A. and Zaráin-Herzberg, M. 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(1-4): 261–268.
- Hewitt, C.L. and Campbell, M.L. 2007. Mechanisms for the prevention of marine bio invasions for better biosecurity. *Marine Pollution Bulletin*. 55(7-9): 395-401.
- Hochman, E., Leung, P.S., Rowland, L.W. & Wyban, J.A. 1990. Optimal scheduling in shrimp mariculture: A stochastic growing inventory problem. *Amer. J. Agricult. Econ.* 72(2): 382-393.
- Hopkins, T.E. and Cech, J.J. Jr. 1994. Effect of temperature on oxygen consumption of the bat ray, *Myliobatis californica* (Chondrichthyes, Myliobatidae). *Copeia* 1994(2): 529–532.
- Hopkins, J.S., Sandifer, P.A., Stokes, A.D. & Browdy, C.L., 1991. The effect of minimal water exchange on the water quality and production of intensive marine shrimp ponds. *Book of Abstracts. Aquaculture '91*. World Aquaculture Society, Baton Rouge, L.A. USA.
- Hopkins, J.S. Hamilton II, R.D., Sandfier, P.A., Browdy, C.L. & Stokes, D. 1993. Effect of Water Exchange Rate on Production, Water Quality, Effluent Characteristics and Nitrogen Budgets of Intensive Shrimp Ponds. *Journal of the World Aquaculture Society*, 24 (3): 304-320.
- Hopkins, J.S., Sandifer, P., Browdy, C. L. & Holloway J.D. 1996. Comparison of exchange and no-exchange water management for intensive culture of marine shrimp. *Journal of Shellfish Research* 15(2): 441-445.
- Hu, F., Luqing, P. & Futao, J. 2008. Effects of hypoxia on dopamine concentration and the immune response of withe shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *J. Ocean Univ. China*. 8(1): 77-82.
- Huang J., Yang Y., Wang A., 2010. Reconsideration of phenoloxidase activity determination in white shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Fish & Shellfish Immunology*. 28(1): 0–244.
- Huda, A.S., Ispinanto, J., Bahri, F. & Decamp, O. 2013. Succesful production in semi-biofloc in Indonesia. *Aq. As. Pac.* 9(2): 8-12.
- Huys, L., Dhert, P., Robles, R., Ollevier, F., Sorgeloos, P. & Swings, J. 2001. Search for beneficial bacterial strains for turbot (*Scophthalmus maximus* L.) larviculture. *Aquaculture*. 193(1-2): 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. http://cesvbcs.gob.mx/DR_LA_PAZ/ZA-CA-Radiacion%20Solar.html (Consultada el 28 de octubre de 2021).
- 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.
- Irianto, A. and Austin, B. 2002. Probiotics in aquaculture. *Journal of Fish Diseases*, 25(11): 633-642.
- James, D. G. 1989. Population biology of *Biprorulus bibax* Breddin (Hemiptera: Pentatomidae) in a southern New South Wales citrus orchard. *J. Aust. ent. SOC.* 28(4): 279-286

- Jiang, L., Pan, L. & Bo, F. 2005. Effect of dissolved oxygen on immune parameters of the white shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Fish and shellfish immunology*. 18(2): 185-188.
- Jiang H., Li F., Xie Y., Huang B., Zhang J., Zhang J., Zhang C., Li S., Xiang J., 2009. Comparative proteomic profiles of the hepatopancreas in *Fenneropenaeus chinensis* response to hypoxic stress. *Proteomics*. 9(12): 3353–3367.
- Karp, L., Sadeh, A. & Griffin, W.L. 1986. Cycles in agricultural production: The case of aquaculture. *Amer. J. Agricult. Econ.* 68(3): 553-561.
- Keys, S.J., Crocos, P.J. & Cacho, O.J. 2004. Commercial grow-out performance and cost-benefit analysis for farm production of the brown tiger shrimp *Penaeus esculentus*. *Aquacult. Econ. Manage.* 8 (5-6): 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.* 42(5): 726-733.
- Kumar, A., Moulick, S. & Mal, B. 2010. Performance evaluation of propeller-aspirator-pump aerator. *Aquacultural Engineering*. 42(2): 70-74.
- Kumaraguru-Vasagam, K.P., Suresh, A.V. & Chamberlain, G.W. 2009. Growth performance of blue shrimp, *Litopenaeus stylirostris* in self-cleaning microcosm tanks. *Aquaculture*. 290(3): 236-242.
- Le, Y., Shigui, J., Xiaoming, Z., Qibing, Y., Weigeng, W. & Kaichang, W. 2009. Effects of salinity on growth and energy budget of juvenile *Penaeus monodon*. *Aquaculture* 290(1-2): 140-144.
- Leaño, E. M. and Mohan, C.V. 2012. Early Mortality Syndrome (EMS)/ Acute Hepatopancreatic Necrosis Syndrome (AHPNS): An emerging threat in the Asian shrimp industry. *Disease advisory*. NACA, Bangkok, Thailand.
- 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.*
- Martínez-Cordero, F.J., Leung, P.S. 2004. Sustainable aquaculture and producer performance: measurement of environmentally adjusted productivity and efficiency of a sample of shrimp farms in Mexico. *Aquaculture*. 241(1-4): 249-268.
- Martínez-Córdova, L.R. 1998. *Ecología de los sistemas acuícolas*. México. A.G.T. Editor S.A. Cap. 7. *Acuicultura e impacto ambiental*.
- Martínez-Córdova, L.R., Villarreal-Colmenares, H. & Porchas-Cornejo, M. 1995. Culture of white shrimp *Penaeus vannamei* in low water exchange ponds in Sonora. México. *World Aquaculture* 26(4): 47-48.
- Martínez-Córdova, L.R., Villarreal-Colmenares, H., Porchas-Cornejo, M.A., Naranjo-Paramo, J. & Aragón-Noriega, A. 1997. Effect of aeration rate on growth, survival and yield of white shrimp *Penaeus vannamei* in low water exchange ponds. *Aquaculture Engineering* 16(1-2): 85-90.
- Martínez-Córdova, L.R., Porchas-Cornejo, M.A., Villarreal-Colmenares, H. 1998. Effect of three different feeding strategies on phytoplankton, zooplankton and benthos in Pacific brown

- shrimp *Penaeus californiensis* (Holmes 1900) farming ponds. *Ciencias Marinas* 24(3): 267-281.
- Martínez-Córdova, L.R., Martínez-Porchas, M., Cortés-Jacinto, E. 2015. Alimentos y estrategias de alimentación para una acuicultura sustentable. Primera Edición, AGT Editor, México, D.F.
- Martínez, J.A., Seijo, J.C. 2001. Economics of risk and uncertainty of alternative water exchange and aeration rates in semi-intensive shrimp culture systems. *Aquacult. Econ. Manage.* 5 (3-4): 129-146.
- Martínez-Palacios, C.A. 1992. Segundo informe sobre nutrición y alimentación de camarones. FAO. Primera Edición. Mozambique.
- Martínez-Porchas, M., Martínez-Córdova, L.R., Martínez-Cornejo, M.A (2013) El zooplancton en sistemas acuícolas: importancia, manejo y evaluación. In: Martínez-Córdova., Martínez-Porchas (Eds.), *Alimento natural en acuicultura* (89-112 pp). Ciudad de México, AGT editor.
- McIntosh, R.P. 2000. Diseño de estanques y consideraciones de operación. *Boletín Nicovita Camarón de Mar*, 5.:1-5.
- McIntosh, D. 2001. Changing paradigms in shrimp farming: V. Establishment of heterotrophic bacterial communities. *Global Aquaculture Advocate* 4(1): 53-58.
- McIntosh, D. and Fitzsimmons, K. 2003. Characterization of effluent from an inland, low-salinity shrimp farm: What contribution could this water make if used for irrigation? *Aquacultural Engineering*. 27(2): 147-156.
- McIntosh, D., Samocha, T.M., Jones, E.R., Lawrence, A.L., Horowitz, S. & Horowitz, A. 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(2): 69-82.
- McMahon BR (2001). Respiratory and circulatory compensation to hypoxia in crustaceans. *Respiration Physiology* 128(3): 349-364.
- Milstein, A., Islam, M.S., Wahab, M.A., Kamal, A.H.M. & Dewan, S. 2005. Characterization of water quality in shrimp ponds of different sizes and with different management regimes using multivariate statistical analysis. *Aquaculture International*. 13(6): 501-518.
- Mohanty, R.K. 2001. Effect of pond aeration on growth and survival of *Penaeus monodon* (Fab.) Bangladesh. *Fish. Res.* 5(1): 59-65.
- Monroy-Dosta, M.C., Lara-Andrade, R., Castro-Mejía, J., Castro-Mejía, G., Coelho-Emerenciano, M.G. 2013. Composición y abundancia de comunidades microbianas asociadas al biofloc en un cultivo de tilapia. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*. 48(3): 511-520.
- Moreno-Figueroa, L.D 2017. Cultivo intensivo fotoheterotrófico del camarón blanco *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931) en alta salinidad con reposición mínima de agua. Tesis de Doctor en Ciencias en Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales (Orientación Acuicultura). CIBNOR.
- Moreno-Figueroa, L.D., Naranjo-Páramo, J., Hernández-Llamas, A., Vargas-Mendieta, M., Hernández-Gurrola, J.A., Villarreal-Colmenares, H. 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 Research* 49(2):1-11.

- Moriarty, D.J.W. 2000. Disease Control in Shrimp Aquaculture with Probiotic Bacteria. Microbial Interactions in Aquaculture. Microbial Biosystems: New Frontiers. Proceedings of the 8th International Symposium on Microbial Ecology.
- Naranjo-Páramo, J. 2009. Optimización del cultivo de langosta de Agua Dulce *Cherax quadricarinatus*, mediante el ajuste de los niveles de recambio de agua, aeración y alimentación. Tesis de doctorado. CICIMAR.
- Naranjo-Páramo, J., Martínez-Córdova, L. R., Vargas-Mendieta, M. and Villarreal, H. 2022. Aeration level in HDPE-lined nursery ponds that optimizes yield and production cost of preadult redclaw crayfish, *Cherax quadricarinatus*. Aquaculture engineering 96,[102221] <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2021.102221>.
- National Fisheries Institute 2020. Global Seafood Market Conference 2020. JW Marriott Grande Lakes in Orlando, FL. January 21-23. <https://aboutseafood.com/2020-global-seafood-market-conference>. (Consultada 11 de noviembre de 2021.)
- Newman, S. 2000. Prevención de enfermedades del camarón de cultivo. Panorama Acuícola. 5(4): 22-23.
- Núñez-Amao, L., Naranjo-Paramo, J., Hernández-Llamas, A., Vargas-Mendieta, M. & Villarreal, H., 2019. Estimating production costs of preadult redclaw crayfish, *Cherax quadricarinatus*, reared in a commercial nursery system: a stochastic bioeconomic approach, J. World Aquac. Soc. 50(1):172–185.
- Ocampo, L., Villarreal, H., Vargas, M., Portillo, G., Magallón, F. 2000. Effect of dissolved oxygen and temperature on growth, survival and body composition of juvenile *Farfantepenaeus californiensis* (Holmes). Aquaculture Research. 31(2): 167-171.
- Ohara, S., Fukam, K.I., Ishida, Y. 1993. Algal effects on the bacterial assemblage in Lake Biwa. Japanese Journal of Limnology. 54(4): 261-268.
- Otoshi, C.A., Arce, S.M., Shaun, M.M. 2003. Growth and reproductive performance of broodstock shrimp reared in a biosecure recirculating aquaculture system versus a flow-through pond. Aquaculture Engineering. 29(3): 93-107.
- Paiva-Maia, E., Alves-Modesto, G., Octavio-Brito, L., Olivera, A., Vascolcelos-Gesteira, T.C. 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(1): 126-137.
- Pante, M.J.R., 1990. Influence of environmental stress on the heritability of molting frequency and growth rate of the penaeid shrimp, *Penaeus vannamei*. University of Houston-Clear lake, Houston, TX, USA, M.Sc. Thesis.
- Pardy, R., Griffin, W.L., Johns, M.A. & Lawrence, A.L. 1983. A preliminary economic analysis of stocking strategies for penaeid shrimp culture. J. World Mar. Soc. 14(1-4): 49-63.
- Paterson, B. D. and Thorne, M. J. (1995). Measurements of oxygen uptake, heart and gill bailer rates of the callinassid burrowing shrimp *Trypaea australiensis* Dana and its responses to low oxygen tensions. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 194(1): 39-52.
- Peña-Navarro, Nelson, Vargas-Cordero, Ruth, & Varela-Mejías, Alexander. (2013). Productos naturales como estimuladores del sistema inmunológico de *Litopenaeus vannamei*, infectado con *Vibrio parahaemolyticus*. Agronomía Mesoamericana. 24(1): 133-147.
- Pérez-Rostro, C. I., Pérez-Fuentes, J. A., Hernández-Vergara, M. P. 2014. Biofloc, a Technical Alternative for Culturing Malaysian Prawn *Macrobrachium rosenbergii*. Chapter 3 in: Sustainable Aquaculture Techniques. INTECH. ISBN: 978-953-51-1224-2.

- Pérez-Velázquez, M., González-Félix, M.L., Jaimes-Bustamante, F., Martínez-Córdova, L.R. & Trujillo-Villalba, D.A. 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(4): 475-485.
- Pillet, M., Dupont-Prinet, A., Chabot, D., Tremblay, R. & Audet, C., 2016. Effects of exposure to hypoxia on metabolic pathways in Northern shrimp (*Pandalus borealis*) and Greenland halibut (*Reinhardtius hippoglossides*). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 483: 88-96.
- Ponce-Palafox, J; Martinez- Palacios, C.A. & Ross, L. 1997. The effects of salinity and temperature on the growth and survival rates of juvenile white shrimp *Penaeus vannamei*, Boone, 1931. *Aquaculture*. 157(1-2): 107-115.
- Rathburn, C. K.; Sharp, N. J.; Ryan, J. C.; Neely, M. G.; Cook, M.; Chapman, R. W.; Burnett, L. E.; Burnett, K. G. (2013). Transcriptomic responses of juvenile Pacific whiteleg shrimp, *Litopenaeus vannamei*, to hypoxia and hypercapnic hypoxia. *Physiological Genomics*. 45(17): 794–807.
- Rajkumar, M., Kumar-Pandey, P., Aravind, R., Venilla, A., Bharti, V., Sekharan, C. 2015. Effect of different biofloc system on water quality, biofloc composition and growth performance in *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931). *Aquaculture Research*. 47(11): 3432–3444.
- Ray, A.J., Dillon, K.S., Lotz, J.M. 2011. Water quality dynamics and shrimp (*Litopenaeus vannamei*) production in intensive, mesohaline culture systems with two levels of biofloc management. *Aquacult. Eng.* 45(3): 127-136.
- Reyes-Ramos, C. A., Peregrino-Uriarte, A.B., Cota-Ruiz, K., Valenzuela-Soto, E.M., Leyva-Carrillo, L. & Yepis-Plascencia, G. 2018. Phosphoenolpyruvate carboxylase cytosolic and mitochondrial isoforms are expressed and active during hypoxia in the white shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*. 226(): 1-9.
- Riquelme, C.E., Avendaño-Herrera, R.E. 2003. Interacción bacteria-microalga en el ambiente marino y uso potencial en acuicultura. *Revista Chilena de Historia Natural* 76(4): 725-736.
- Ritvo, G., Dixon, J.B., Neill, W.H., Samocha, T.M., Lawrence, A.L., 2000. The Effect of Controlled Soil Sulfur Concentration on Growth and Survival of *Litopenaeus vannamei*. *J. World Aquacult. Soc.* 31(3): 381-389.
- Robertson, L., Lawrence, A.L., Castille, F. 1993. Interaction of salinity and feed protein level on growth of *Penaeus vannamei*. *Journal of Applied Aquaculture*. 2(1): 43-54.
- Rodríguez-Méndez, N., Gaitán, S., Chaparro, N. 2006. Evaluación del crecimiento de juveniles del Bagre *Ariopsis bonillai* utilizando alimento con probióticos en condiciones de laboratorio. *Revista Aquatic*. 24(1): 3-12.
- Rosas, C., Sánchez, A., Díaz-Iglesias, E., Brito, R., Martínez, E., Soto, L.A. 1997. Critical dissolved oxygen level to *Penaeus setiferus* and *Penaeus schmitti* postlarvae (PL 10-18) exposed to salinity changes. *Aquaculture*. 152(1-4): 259-272.
- Rosas, C., Sanchez, A., Gaxiola, G., Brito, R., Baes, M., Pedroza, R. (1995). Oxygen consumption and ammonia excretion of *Penaeus setiferus*, *P. schmitti*, *P. duorarum* and *P. notialis* postlarvae fed purified test diets: effect of protein level on substrate metabolism. *Aquat. Living Resour.*, 8(2) :161-169.
- Rosenberry, B. 2007. Shrimp News International. Consultado en <http://www.shrimpnews.com> el 13 de Diciembre 2021

- Sadeh, A., Pardy, C.R., Griffin, W. & Lawrence, A.L. 1986. Uncertainty consideration resulting from temperature variation on growth of *Penaeus stylirostris* in ponds. *Texas J. Sci.* 38 (2): 159-172.
- Samocha, T.M., Lawrence, A. L. 1992. Shrimp nursery systems and management. In: Proceeding of the Special Session on Shrimp Farming. World Aquaculture Society, Baton Rouge, L.A. USA.
- Samocha, T.M., Patnaik, S., Speed, M., Ali, A.M., Burger, J.M., Almeida, R.V., Ayub, Z., Harisanto, M., Horowitz, A., Brock, D.L. 2007. Use of molasses as carbon source in limited discharge nursery and grow-out systems for *Litopenaeus vannamei*. *Aquacultural Engineering.* 36(2): 184–191.
- Sampaio L.A., Wasielesky W., Campos Miranda-Filho K. 2002. Effect of Salinity on Acute Toxicity of Ammonia and Nitrite to Juvenile *Mugil platanus*. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 68(5): 668–674.
- Sanares, R.C., Katase, S.A., Fast, A.W. & Carpenter, K.E. 1986. Water quality dynamics in brackishwater shrimp ponds with artificial aeration and circulation. In: J.L. M aclean, L.B. Dizcm and L.V. Hosillos (Editors). *Proceedings of the First Asian Fisheries Forum. The Philippines.*
- Sandifer, P.A., Hopkins, J.S., Stokes, A.D., Browdy, C.L., 1993. Development of intensive pond culture of marine shrimp in South Carolina: from research to commercial reality. *From Discovery to Commercialization.* Carrillo, M., Dahle, L., Morales, J., Sorgeloos, P., Svennevig, N., Wyban, J. (Eds.), Oostende Belgium European Aquaculture Society 19.
- Sánchez-Zazueta, E. and Martínez-Cordero, F.J. 2009. Economic risk assessment of a semi-intensive shrimp farm in Sinaloa, Mexico. *Aquacult. Econ. Manage.* 13(4): 312-327.
- Sandifer, P.A. and Hopkins, J.S. 1994. Progress toward development of an environmental-friendly, pond-based, intensive shrimp mariculture system. In: *Book of abstracts, World Aquaculture Society, New Orleans, Louisiana, USA.*
- Sandifer, P. A., J. S. Hopkins & A. D. Stokes. 1988. Intensification of shrimp culture in earth ponds in South Carolina: progress and prospect. *Journal of World Aquaculture Society* 19(4): 218-226.
- Schmidt-Nielsen Knut. (1997). *Animal physiology: adaptation and environment.* Cambridge University Press.
- Schrader, K.K., Green, B.W. & Perschbacher, P.W. 2011. Development of phytoplankton communities and common off-flavors in a biofloc technology system used for the culture of channel catfish (*Ictalurus punctatus*). *Aquacultural Engineering.* 45(3): 118-126.
- Schuur, A.M. 2003. Evaluation of biosecurity applications for intensive shrimp farming. *Aquacultural Engineering.* 28(1-2): 3-20.
- 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. http://www.sagarpa.gob.mx/agronegocios/Documents/Estudios_promercado/CAMARONICULTORES.pdf (Consultado el 10 de octubre de 2021).
- Seidman, E. R. and A. L. Lawrence. 1985. Growth, feed digestibility and proximate body composition of juvenile *Penaeus vannamei* and *Penaeus monodon* grown at different dissolved oxygen levels. *Journal of the World Mariculture Society.* 16(1-4): 333-346.

- Shishehchian, F. 2012. Patent WO2013191642A1; Mixotrophic method for aquaculture. Blue Aqua International Pte Ltd.
- Sokal, R.R. and Rohlf, F.J. 1995. Biometry: The Principles and Practice of Statistics in Biological Research. 3rd Edition, W.H. Freeman and Co., New York.
- 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 de maestría. Facultad de ingeniería marítima y ciencias del mar. Guayaquil, Ecuador.
- 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.
- Storey, K. B. y Storey, J.M. 2000 Cell and Molecular Responses to Stress. Volume 1: Environmental Stressors and Gene Responses. Elsevier Science, Amsterdam.
- Sui, L., Ma, G. & Deng, Y. 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(1): 82-95.
- Sun, S., Xuan, F., Fu, H., Zhu, J., Ge, X., Gu, Z. 2015 Transcriptomic and histological analysis of hepatopancreas, muscle and gill tissues of oriental river prawn (*Macrobrachium nipponense*) in response to chronic hypoxia. *BMC Genomics*. 16(1): 491-504
- Tacon, A.G.J. 2000. Shrimp feeds and feeding regime in zero exchange outdoor tanks. *Global Aquaculture Advocate*. 3(2): 15-16.
- Tacon, A.G.J., Cody, J.J., Conquest, L.D., Divakaran, S., Forster, I.P. & Decamp, O.E. 2002. Effect of culture system on the nutrition and growth performance of Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* (Boone) fed different diets. *Aquaculture Nutrition*. 8(2): 121-137.
- Taw, N., Palasserri, R., Alrahmah, Z.A., Sampath, P. 2016. Shrimp biofloc production trials in Saudi Arabia. *Global Aquaculture Alliance-Online magazine*. Disponible de URL: <https://www.aquaculturealliance.org/advocate/shrimp-biofloc-production-trials-in-saudi-arabia/> (Consultado el 10 de octubre de 2021).
- Teichert-Codington, D., 1994. La calidad del agua y su manejo en estanques de camarón. In: *Proceedings International Seminar on Shrimp Mariculture*. Mazatlán, México.
- Thi, A. P., Kroeze, C., Bush, S.R., Mol, A.P.J. 2010. Water pollution by intensive brackish shrimp farming in south-east Vietnam: Causes and options for control. *Agricultural Water Management*. 97(6): 872-882.
- Tidwell, J.H. 2012. *Aquaculture Production Systems*. World Aquaculture Society, Ed. Wiley-Blackwell, First Edition, Oxford, U.K.
- Timmons, M.B., Ebeling, J.M., Wheaton, F.W., Summerfelt, S.T. & Vinci, B.J., 2002. *Recirculating Aquaculture System*, Second ed. Cayuga Aqua Ventures Llc.
- Torrans, L., Ott, B., Bosworth, B., 2012. Impact of minimum dissolved oxygen concentration on grow-out performance of blue catfish with comparison to channel catfish. *N. Am. J. Aquac.* 74(2): 273-282.
- Torres-Beristain, B. 2005. Organic matter decomposition in simulated aquaculture ponds. Tesis de Doctorado. Universidad de Wageningen. Wageningen, The Netherlands.
- Torres-Mendoza, E. 2007. Tasa metabólica estándar y punto crítico de oxígeno de la langosta de agua dulce, *Cherax quadricarinatus*. Tesis Profesional. Instituto Tecnológico Superior. Cd. Constitución, B.C.S.

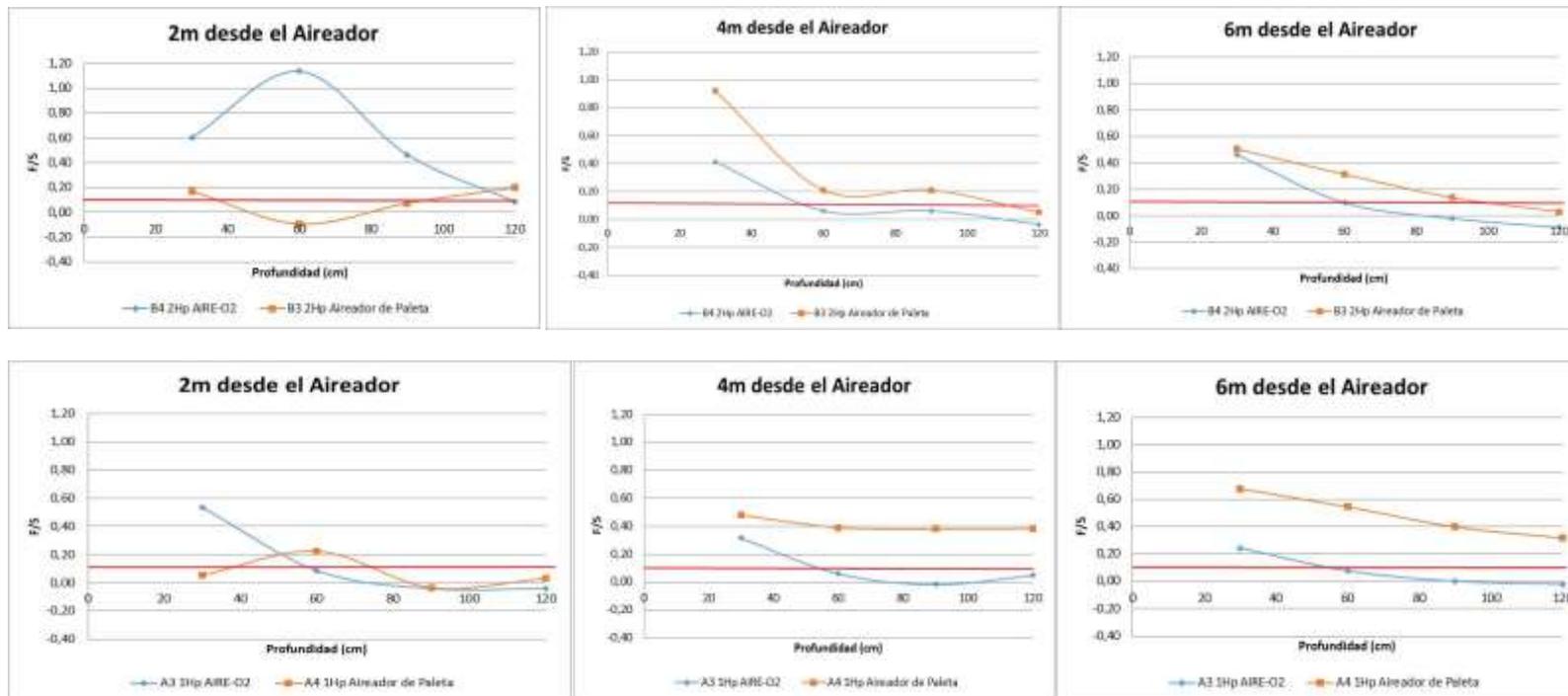
- Tretter, L., Patocs, A. & Chinopoulos, C. 2016. Succinate and intermediate in metabolism, signal transduction, ROS, hypoxia and tumorigenesis. *Biochimica et Biophysica Acta-Bioenergetics*. 1857(8): 1086-1101.
- Tseng, D.Y., Ho, P.L., Huang, S.Y., Cheng, S.C., Shiu, Y.L., Chiu, C.S. & Liu, C.H. 2009. Enhancement of immunity and disease resistance in the white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, by the probiotic, *Bacillus subtilis* E20. *Fish Shell- fish Immunol*. 26(2): 339–344.
- Tucker, C. & Hargreaves, J. 2004. Biology and culture of channel catfish. *Developments in Aquaculture and Fisheries Science*. Elsevier publication. 1st Edition.
- Ulaje-Fernández, S. A., 2015. Relación entre respuestas fisiológicas, contenido bioquímico y expresión del camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*) ante cambios agudos y crónicos de hipertermia e hipoxia. Tesis de Maestría. Usos, Manejo y Preservación de Recursos Naturales (Orientación Acuicultura). CIBNOR.
- Ulaje-Fernández, S. A., 2020. Expresión de genes de rutas metabólicas involucradas en la respuesta a estrés por hipertermia e hipoxia a corto y largo plazo en el camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*). Tesis de Doctorado. Usos, Manejo y Preservación de Recursos Naturales (Orientación Acuicultura). CIBNOR.
- Venero, J.A., McAbee, B., Lawson, A., Lewis, B.L., Stokes, A.D., Leffler, J.W. & Browdy, C.L. 2009. Greenhouse-enclosed superintensive shrimp production: alternative to traditional ponds in U.S. *Global Aquaculture Advocate*. 12 (1): 61–64.
- Verschuere, L. G., Rombault, P., Sorgeloos, & Verstraete, W. 2000. Probiotic bacteria as biological control agents in aquaculture. *Mol. Micr. Biol. Rev*. 64(4): 651-671.
- Villamil-Díaz, L. and Martínez-Silva, M.A. 2009. Probióticos como herramienta biotecnológica en el cultivo de camarón: reseña. *Biol. Invest. Mar. Cost*. 38(2): 165-187.
- Villarreal, H. (1989). Feeding, growth and energetics of the freshwater crayfish *Cherax tenuimanus* (Smith) with special emphasis on its potential for commercial culture. Ph.D. Thesis, Department of Zoology. University of Queensland. Australia.
- Villarreal, H. 2005. Tendencias en la producción comercial de crustáceos en sistemas con recambio de agua limitado. Curso de buenas prácticas de manejo y alimentación en acuicultura. CYTED. Managua Nicaragua.
- Villarreal, H., Hernandez-Llamas, A. & Hewitt, R. 2003. Effect of salinity on growth, survival and oxygen consumption of juvenile brown shrimp, *Farfantepenaeus californiensis* (Holmes). *Aquaculture Research*. 34(2): 187–193.
- Villarreal, H., Naranjo, J., Camacho, B. & Mercier, L. 2012. Advances in the intensive culture of white shrimp *Litopenaeus vannamei* in Baja California Sur, Mexico. Presentación oral, *Aquaculture America 2012*, 29 de febrero de 2012, Las Vegas, Estados Unidos.
- Villarreal, H., Naranjo, J. & Vargas, M. 2015. Evaluación comparativa de equipos de aireación para acuicultura. Informe Técnico Biohelis, Parque de Innovación tecnológica de CIBNOR. Comisionado por la empresa Aeration Industries International.
- Villarreal, H., Naranjo, J., Quadros, W., Hernández, J.A., Moreno, L.D. & Vargas, M. 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., Naranjo, J., Vargas, M., Hernández, A., Moreno L.D. & Hernández, J. A., 2018. Bioeconomic analysis. Intensive white shrimo (*L. vannamei*) production in a

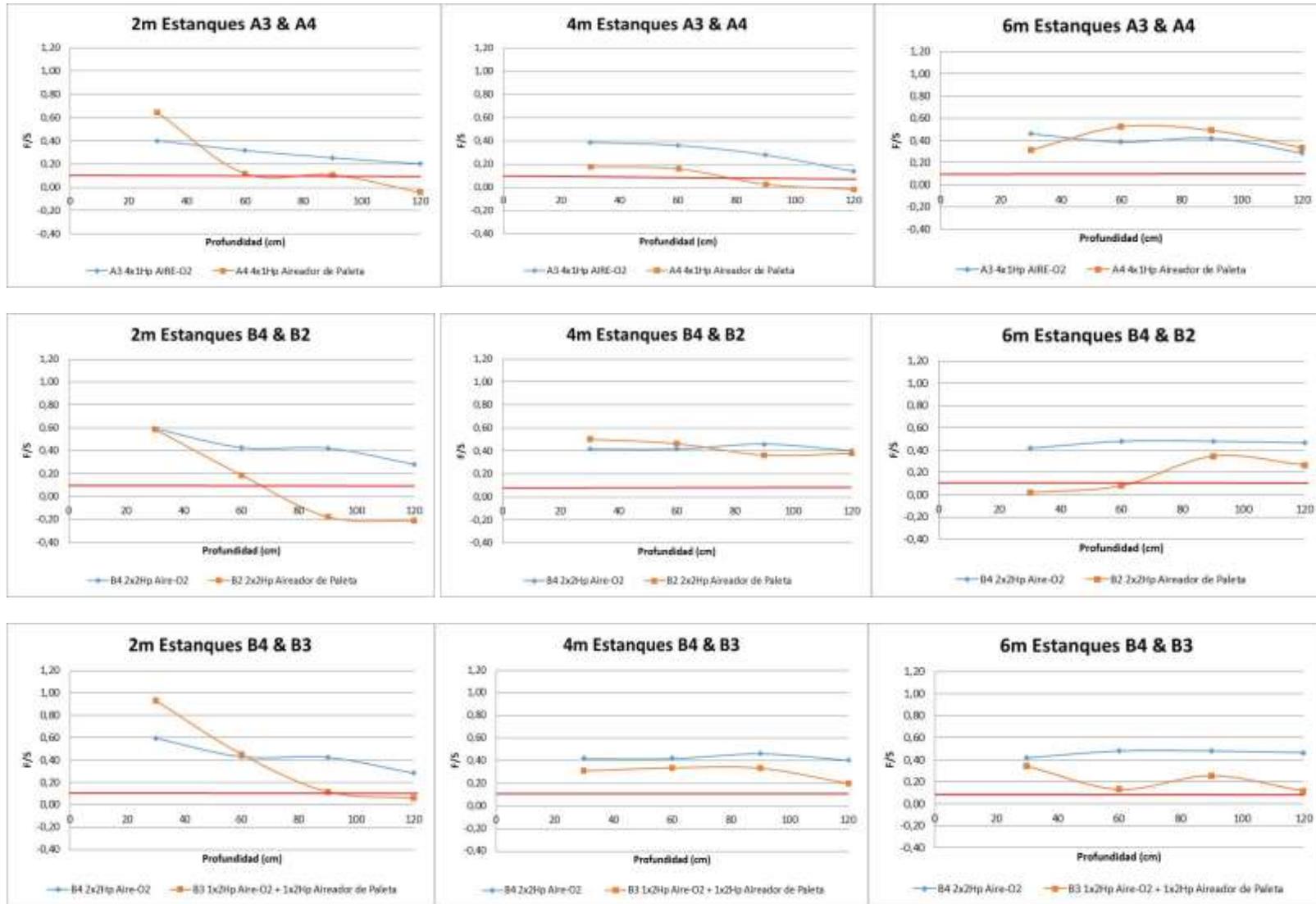
- photoheterotrophic system with minimal seawater addition in a semi-arid region. AQUACULTURE America 2018, Las Vegas.
- Villarreal, H., Naranjo, J., Vargas, M., Hernández, A., Moreno L.D. & Hernández, J. A., 2019. Bioeconomic analysis of the use of different aeration equipment in an intensive photoheterotrophic system for *Litopenaues. vannamei* in Baja California Sur, Mexico. AQUACULTURE 2019, New Orleans.
- Villarreal, H. & Rivera, J. A. 1993. Effect of temperature and salinity on the oxygen consumption of laboratory produced *Penaeus californiensis* postlarvae. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology. 106 (1): 103-107.
- Vinatea, L., Carvalho, J.W. 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. Aq. Eng. 37(2): 73-78.
- Vinatea, L., Galvez, A.O., Browdy, C.L., Stokes, A., Venero, J., Haveman, J., Lewis, B.L., Lawson, A., Shuler, A. & Leffler, J.W. 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. Aquacultural Engineering. 42(1): 17-24.
- Waselesky, W., Atwood, H., Stokes, A., Browdy, C. 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(1-4): 396-403.
- Wickins, J. F. (1976). The tolerance of warm-water prawns to recirculated water. Aquaculture. 9(1): 19-37.
- Williams, A.S., Davis, D.A. & Arnold, C.R. 1996. Density-dependent growth and survival of *Penaeus setiferus* and *Penaeus vannamei* in a semi-closed recirculating system. J. Wor. Aq. Soc. 1(27): 107-112.
- Wu R. S.S (2002). Hypoxia: from molecular responses to ecosystem responses, Marine Pollution Bulletin 45(1-12): 35–45.
- Wyban, J., Walsh, W.A. & Godin, D.M., 1995. Temperature effects on growth, feeding rate and feed conversion of the pacific white shrimp (*Penaeus vannamei*). Aquaculture. 138(1-4): 267–279.
- Yao, S. Shufang, Z, Jufa, C., Yunli, S. 2001. Supplement and consumption of dissolved oxygen and their seasonal variations in shrimp pond. Marine Science Bulletin.3(2): 89-96.
- Yusoff, F.M., Law, A.T. & Soon, J., 2003. The effects of oxidized and reduced conditions on phosphorus and ammonia concentrations in pond water sediment microcosm. Journal of Aquaculture in the Tropics. 18(1): 25-33
- Zhang, P., Zhang, X., Li, J. & Huang, G. 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(1-4): 579-587.
- Zhu, S., Chen, S. 2001. Effects of organic carbon on nitrification rate in fixed film biofilters. Aquacult. Eng. 25(1): 1-11.

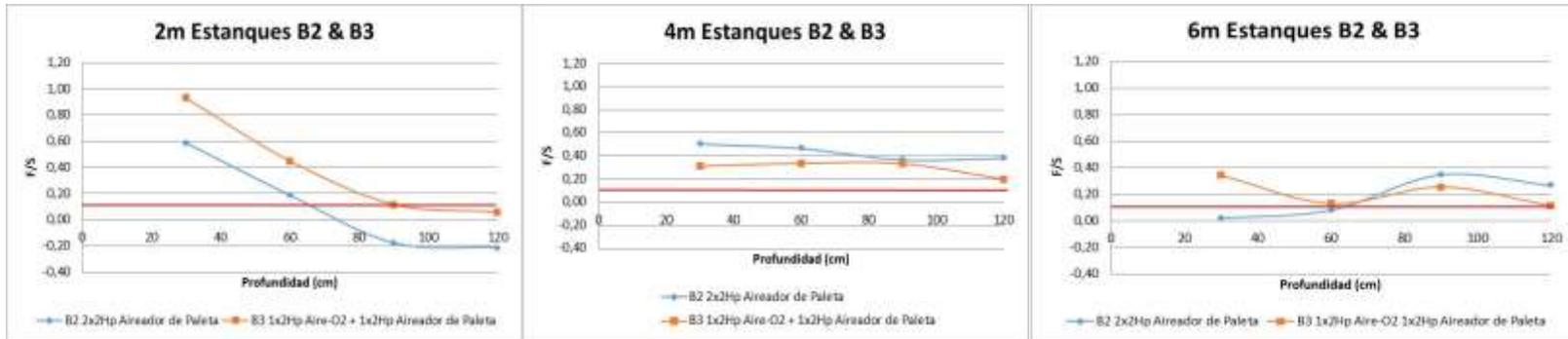
11. ANEXOS

Comparaciones de velocidad de corrientes en estanques de engorda de camarón, al inicio, mitad y final del cultivo con equipos de aireación de 2 HP y 1 HP.

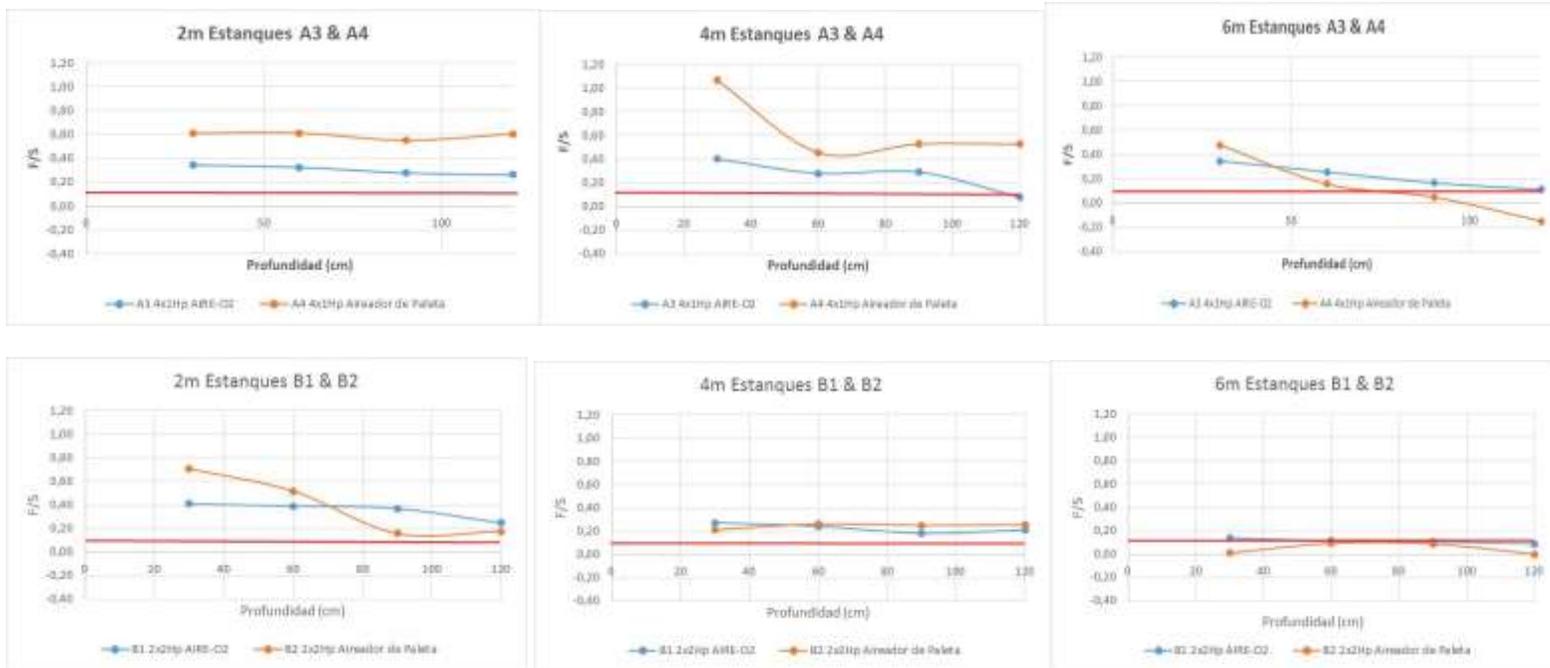
Velocidad de corriente al inicio de la engorda de camarón

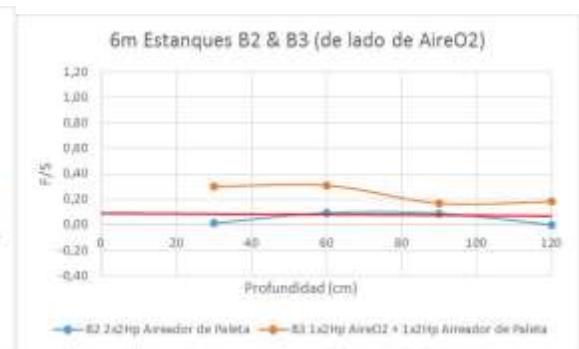
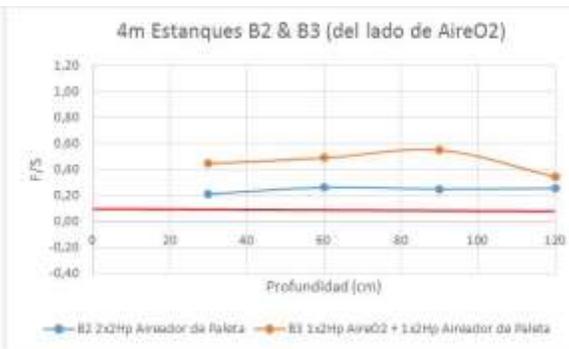
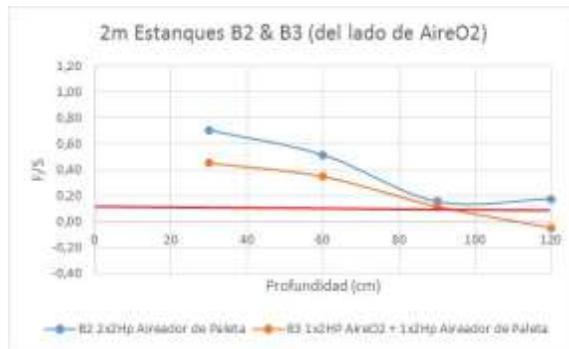
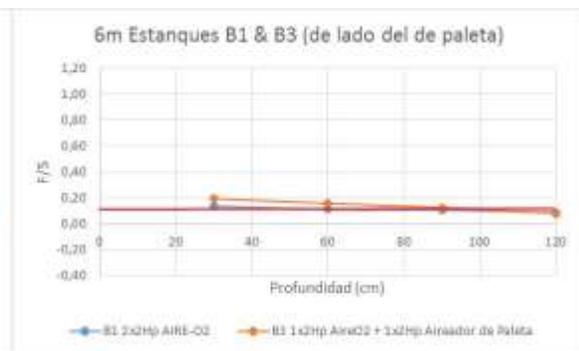
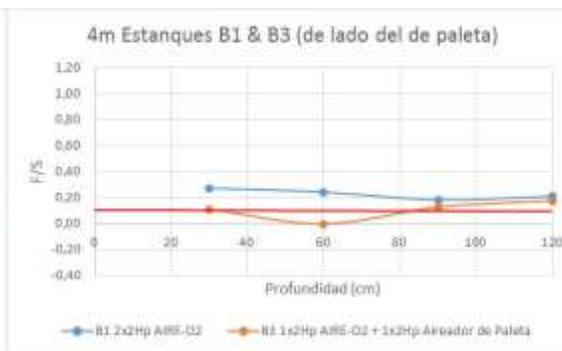
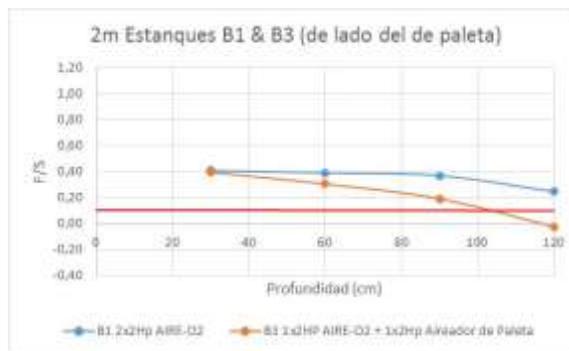
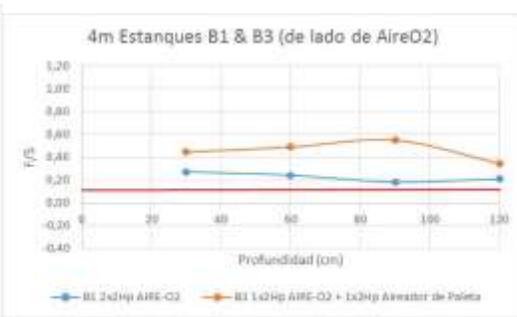






Velocidad de corriente a mitad de la engorda de camarón







Velocidad de corriente al final de la engorda de camarón

