

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NAYARIT
POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICO AGROPECUARIAS



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NAYARIT



SISTEMA DE BIBLIOTECAS

**Modelo bioeconómico
de la producción semíintensiva
de camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*)**

MARGARITA ESTRADA PÉREZ

Tesis presentada como requisito para la obtención del grado de:

**Doctorado en Ciencias
en el Área de Ciencias Pesqueras**

Xalisco, Nayarit. Diciembre, 2016.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NAYARIT
POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICO AGROPECUARIAS

CBAP/274/16.

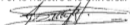
Xalisco, Nayarit; 09 de diciembre de 2016.

ING. ALFREDO GONZÁLEZ JÁUREGUI
DIRECTOR DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
P R E S E N T E.

Con base al oficio de fecha 09 de diciembre del presente, enviado por los CC. Dr. Javier Marcial de Jesús Ruíz Velasco Arce, Dr. Alfredo Hernández Llamas, Dr. Emilio Peña Messina, Dr. José Trinidad Nieto Navarro y Dr. Oscar Iram Zavala Leal, donde se indica que el trabajo de tesis cumple con lo establecido en forma y contenido, y debido a que ha cumplido con los demás requisitos que solicita el Posgrado en Ciencias Biológico Agropecuarias; dependiente de la Universidad Autónoma de Nayarit, se autoriza al M.C. Margarita Estrada Pérez, continúe con los trámites necesarios para la presentación de grado de Doctorado, en el Área de Ciencias Pesqueras.

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
"Por lo Nuestro a lo Universal"



Dr. Diego García Paredes
Coordinador del Posgrado



C.c.p.- Expediente

Amém

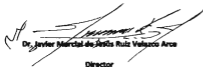
DR. J. DIEGO GARCÍA PAREDES

COORDINADOR DEL POSGRADO (CBAP)

PRESENTE

Los suscritos integrantes del Cuerpo Tutorial para asesorar la Tesis titulada: **Modelo bioeconómico de la producción semintensiva de camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*)**; que presenta la M. en C. Margarita Estrada Pérez para obtener el Grado de Doctora en Ciencias con opción terminal en Ciencias Pesqueras, damos nuestra aprobación para que continúe con los trámites correspondientes para la obtención de su grado.

ATENTAMENTE


Dr. Javier Marcial de Jesús Ruiz Velasco Arce
Director


Dr. Alfredo Hernández Llopis
Co-director


Dr. Emilio Peña Messina
Asesor


Dr. José Trinidad Nieto Navarro
Asesor


Dr. Oscar Juan Zavala Leal
Asesor

DEDICATORIA

A mi hijo Pablo Emmanuel.

Porque desde que llegaste a mi vida, la has iluminado con tu sola presencia

¿Tú eres mi madre?

Porque a pesar de las dificultades de la vida, muchas las has enfrentado valeroso

¿Me quieres?

Porque eres mi aliento de vida, la razón de mi existir, mi moxxo hermoso

¿Hasta dónde?

Porque te amo y te amare toda mi vida, mi bebé, mi niño...

¿Con todo el corazón?

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por otorgar la beca para realizar mis estudios a nivel doctorado, reconociendo la ardua labor del coordinador del posgrado en Ciencias Biológico Agropecuarias, el Dr. Juan Diego García Paredes, quien con su dirección ha llevado la ejecución de este programa con éxito.

A cada uno de los integrantes del cuerpo académico Ecología, Evaluación y Manejo Responsable de los Recursos Pesqueros, en especial a mi grupo de asesores: Dr. Emilio Peña Messina, Dr. José Trinidad Nieto Navarro y Dr. Oscar Irán Zavala Leal que en todas y cada una de mis evaluaciones aportaron sus conocimientos en la mejora de mi proyecto de investigación.

En esta ocasión, quiero destacar y agradecer el apoyo de mis directores de tesis, el Dr. Javier Marcial de Jesús Ruiz Velasco Arce y el Dr. Alfredo Hernández Llamas, ambos tan parecidos en ciertos aspectos, sin ser consanguíneos o como yo lo menciono en algunas ocasiones cuando me refiero a ustedes, "el maestro de mi maestro"... que siempre merecerán y tendrán mi respeto y espero no haber agotado su paciencia y emprender muchos más proyectos juntos para seguir aprendiendo de ustedes.

También quiero agradecer a dos personas, Sr. Enrique Jiménez Ortiz y Sr. Venancio Torres Valera que más que representantes legales de Granjas Acuícolas han sabido ser líderes, portavoces de productores que comparten la misma problemática y necesidades que sus socios. Porque además de compartir y crecer en el ámbito profesional, me hacen sentir respaldada.

A Encarnación Torres García y Benito Torres García por estar siempre dispuestos a resolver algunas de mis dudas técnicas en el cultivo, no importando el día ni la hora y antes que nada por ser mis amigos desde hace ya varios años y esperando que sean muchos más... ya verás Beni. Pero sobre todo gracias por estar ahí para mi hijo que los quiere tanto.

Hablando de lo más importante en vida... que es mi hijo... quiero agradecer a quien en todo momento han sabido estar para él, primero a mis padres, que lo hacen parte de sus mañanas interminables y después a mis hermanas y a veces hasta las de él, por estar siempre...

Además, me hubiera sido imposible culminar este reto que estuve a punto de dejar inconcluso, sin el apoyo de mi familia entera...

Gracias a todos los que de alguna manera confiaron en mi y me apoyaron... desde las personas que considero mis colegas hasta las que conviven conmigo de manera cotidiana y sin título alguno...

INDICE

I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	3
OBJETIVO GENERAL	3
OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	3
HIPÓTESIS	3
III. REVISIÓN DE LITERATURA	4
IV. MATERIALES Y MÉTODOS	9
4.1. Modelo bioeconómico y esquemas de manejo.....	9
4.1.1. Elementos estocásticos.....	16
4.2. Variabilidad de la producción biológica.....	17
4.3. Análisis de riesgo económico.....	17
4.4. Análisis de sensibilidad.....	17
5. RESULTADOS.....	18
5.2. Variabilidad de la producción.....	18
5.3. Análisis de riesgo económico.....	25
5.3.1. Utilidad.....	25
5.3.2. Relación beneficio-costo.....	32
5.3.3. Tamaño de granja.....	35
5.4. Análisis de sensibilidad.....	37
5.4.1. Producción.....	37
5.4.2. Utilidad.....	37
5.4.3. Relación costo-beneficio.....	37
VI. DISCUSIÓN.....	47
VII. CONCLUSIONES	52
VIII. LITERATURA CITADA.....	53
CURRICULUM VITAE	57
Anexo 1. Distribuciones de probabilidad de la relación beneficio-costo por ciclo.....	58
Anexo 2. Distribuciones de probabilidad del tamaño de granja (2 y 40 estanques) ciclos anuales.....	62
Anexo 3. Publicaciones derivadas de la tesis doctoral.....	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ajuste de la función polinómica a los precios mensuales del camarón.....	14
Figura 2. Ajuste de una ecuación lineal simple a los precios anuales de postlarvas de camarón	15
Figura 3. Ajuste de una ecuación lineal simple a los precios anuales de alimento balanceado .	16
Figura 4. Distribuciones de probabilidad de la producción para el ciclo Mayo-Agosto.....	19
Figura 5. Distribuciones de probabilidad de la producción para el ciclo Agosto-Noviembre. ..	20
Figura 6. Distribuciones de probabilidad de la producción para el ciclo Marzo-Junio.....	21
Figura 7. Producción en función de los esquemas de manejo en el ciclo Mayo-Agosto. Las líneas discontinuas indican \pm desviación estándar y los valores indicados corresponden al coeficiente de variación.....	22
Figura 8. Producción en función de los esquemas de manejo en el ciclo Agosto-Noviembre. Las líneas discontinuas indican \pm desviación estándar y los valores indicados corresponden al coeficiente de variación.....	23
Figura 9. Producción en función de los esquemas de manejo en el ciclo Marzo-Junio. Las líneas discontinuas indican \pm desviación estándar y los valores indicados corresponden al coeficiente de variación.....	23
Figura 10. Producción en función de los esquemas de manejo para los ciclos anuales Mayo-Agosto – Agosto-Noviembre (a) y Marzo-Junio – Agosto-Noviembre (b). Las líneas discontinuas indican \pm desviación estándar y los valores indicados corresponden al coeficiente de variación.....	24
Figura 11. Distribuciones de probabilidad de la utilidad para el ciclo Mayo-Agosto.....	26
Figura 12. Distribuciones de probabilidad de la utilidad para el ciclo Agosto-Noviembre.....	27
Figura 13. Distribuciones de probabilidad de la utilidad para el ciclo Marzo-Junio.....	28
Figura 14. Utilidad estimada mediante el modelo bioeconómico en el ciclo Mayo-Agosto, para cada uno de los 5 niveles de manejo establecidos. Se indican los valores del coeficiente de variación.....	29
Figura 15. Utilidad estimada mediante el modelo bioeconómico en el ciclo Agosto-Noviembre para cada uno de los 5 niveles de manejo establecidos. Se indican los valores del coeficiente de variación.....	30

Figura 16. Utilidad estimada mediante el modelo bioeconómico en el ciclo Marzo-Junio, para cada uno de los 5 niveles de manejo establecidos. Se indican los valores del coeficiente de variación.....	30
Figura 17. Utilidad estimada mediante el modelo bioeconómico para los ciclos anuales Mayo-Agosto – Agosto-Noviembre (a) y Marzo-Junio – Agosto-Noviembre (b) para cada uno de los 5 niveles de manejo establecidos. Se indican los valores del coeficiente de variación.....	31
Figura 18. Relación beneficio-costo estimada mediante el análisis bioeconómico en el ciclo Mayo-Agosto, para cada uno de los 5 niveles de manejo establecidos. Se indican los valores del coeficiente de variación.....	32
Figura 19. Relación beneficio-costo estimada mediante el análisis bioeconómico en el ciclo Agosto-Noviembre, para cada uno de los 5 niveles de manejo establecidos. Se indican los valores del coeficiente de variación.....	33
Figura 20. Relación beneficio-costo estimada mediante el análisis bioeconómico en el ciclo Marzo-Junio, para cada uno de los 5 niveles de manejo establecidos. Se indican los valores del coeficiente de variación.....	33
Figura 21. Relación beneficio-costo anual estimada mediante el análisis bioeconómico, para el ciclo Mayo-Agosto – Agosto-Noviembre (a) y Marzo-Junio – Agosto-Noviembre (b), para cada uno de los 5 niveles de manejo establecidos. Se indican los valores del coeficiente de variación.....	34
Figura 24. Utilidad para el ciclo anual Mayo-Agosto – Agosto-Noviembre obtenible para diferentes tamaños de granja con los diferentes niveles de manejo. Se indican los valores numéricos en las curvas que corresponden al coeficiente de variación, los de la parte superior corresponden al tamaño de granja de 1 ha ⁻¹ y los de la parte inferior al de 20 ha ⁻¹ . DE es la desviación estándar.....	36
Figura 25. Utilidad para el ciclo anual Marzo-Agosto – Agosto-Noviembre obtenible para diferentes tamaños de granja con los diferentes niveles de manejo. Se indican los valores numéricos en las curvas que corresponden al coeficiente de variación, los de la parte superior corresponden al tamaño de granja de 1 ha ⁻¹ y los de la parte inferior al de 20 ha ⁻¹ . DE es la desviación estándar.....	36
Figura 28. Análisis de sensibilidad de la producción para el ciclo Mayo-Agosto. Valores absolutos más altos del coeficiente de regresión (CR) indican una mayor sensibilidad.....	38

Figura 29. Análisis de sensibilidad de la producción para el ciclo Agosto-Noviembre. Valores absolutos más altos del coeficiente de regresión (CR) indican una mayor sensibilidad.	39
Figura 30. Análisis de sensibilidad de la producción para el ciclo Marzo-Junio. Valores absolutos más altos del coeficiente de regresión (CR) indican una mayor sensibilidad.	40
Figura 31. Análisis de sensibilidad de la utilidad para el ciclo Mayo-Agosto. Valores absolutos más altos del coeficiente de regresión (CR) indican una mayor sensibilidad.	41
Figura 32. Análisis de sensibilidad de la utilidad para el ciclo Agosto-Noviembre. Valores absolutos más altos del coeficiente de regresión (CR) indican una mayor sensibilidad.	42
Figura 33. Análisis de sensibilidad de la utilidad para el ciclo Marzo-Junio. Valores absolutos más altos del coeficiente de regresión (CR) indican una mayor sensibilidad.	43
Figura 34. Análisis de sensibilidad de la relación beneficio-costos para el ciclo Mayo-Agosto. Valores absolutos más altos del coeficiente de regresión (CR) indican una mayor sensibilidad.	44
Figura 35. Análisis de sensibilidad de la relación beneficio-costos para el ciclo Agosto-Noviembre. Valores absolutos más altos del coeficiente de regresión (CR) indican una mayor sensibilidad.	45
Figura 36. Análisis de sensibilidad de la relación beneficio-costos para el ciclo Marzo-Junio. Valores absolutos más altos del coeficiente de regresión (CR) indican una mayor sensibilidad.	46

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Investigaciones realizadas con modelos bioeconómicos para cultivos de algunas especies de camarón.	6
Tabla 2. Valores promedio \pm desviación estándar (DE) de las variables de la calidad del agua y de manejo del cultivo de <i>Litopenaeus vannamei</i>	9
Tabla 3. Valores correspondientes a cada nivel de manejo para las variables de manejo densidad de siembra (D) en postlarvas-m ² y duración del cultivo (DC) en semanas, del cultivo semi-intensivo de <i>Litopenaeus vannamei</i>	10
Tabla 4. Submodelo biológico. Las relaciones establecidas se obtuvieron mediante regresión lineal múltiple.	11
Tabla 5. Submodelo tecnológico. Las relaciones establecidas se obtuvieron mediante regresión lineal múltiple.	11
Tabla 6. Submodelo de variables de calidad de agua y de manejo.	12
Tabla 7. Submodelo Económico.....	12
Tabla 8. Listado de precios base por mes del kilogramo (\$·kg ⁻¹) de camarón en Nayarit, México.	13
Tabla 9. Lista de precio promedio anual por millar de postlarvas de camarón y por kilogramo de alimento balanceado en la industria de Nayarit, México.	15
Tabla 10. Parámetros de costos y sus valores.	14

RESUMEN

Se desarrolló un modelo bioeconómico estocástico que permitió el análisis de la variabilidad y el riesgo de la producción y de las utilidades económicas del cultivo semi-intensivo del camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*), a partir de bases de datos aportadas por productores del estado de Nayarit. El tamaño de la muestra fue de 31 casos (estanques), representativos de condiciones de cultivo semi-intensivo correspondientes a tres ciclos de producción, dos en el año 2009 y uno en el año 2010. El modelo bioeconómico quedó integrado por cuatro tipos de submodelos: biológico, tecnológico, de variables de calidad de agua y de manejo y económico. Se analizaron distintos esquemas de manejo, en términos de la densidad de siembra (postlarvas-m⁻²) y duración del cultivo (semanas) para tres ciclos por separado (Mayo-Agosto, Agosto-Noviembre y Marzo-Junio) y dos ciclos anuales (Mayo-Agosto – Agosto-Noviembre y Marzo-Junio – Agosto-Noviembre) y diferentes tamaños de granja (2 y 40 ha⁻¹). El riesgo se evaluó en términos del coeficiente de variación. Los mejores resultados del rendimiento de la producción y la utilidad se obtuvieron en el ciclo Mayo-Agosto donde el valor promedio de la producción fue de 1,239 kg-ha⁻¹ y el de las utilidades fue de \$14,379-ha⁻¹, mientras que en el ciclo anual Mayo- Agosto – Agosto-Noviembre fue de 2,213 kg-ha⁻¹ en la producción y de \$26,472ha⁻¹ en las utilidades. Se destaca que en todos los casos analizados, el máximo rendimiento de la producción y de la utilidad se obtuvieron empleando las máximas densidades de siembra (37, 25 y 17 postlarvas-m⁻²) y las máximas duraciones de cultivo (13, 14 y 12 semanas) contenidas en la base de datos, y que, en general, la menor variabilidad y el menor riesgo se obtuvieron con densidades de siembra y duraciones de cultivo correspondientes al Nivel de manejo 4. Se estimó que el riesgo económico, basado en el cálculo de utilidades y dependiendo del ciclo de producción anual, puede reducirse en 439% o 445% al operar una granja constituida por cuarenta estanques de una hectárea cada uno, en vez de operar una granja integrada por dos de dichos estanques. Un análisis de sensibilidad también permitió determinar que el precio de venta y el peso final del camarón son los factores de riesgo económico más importantes. Se concluye que el objetivo general del trabajo, consistente en lograr el desarrollo del modelo bioeconómico, se cumple satisfactoriamente, y que es aceptable la hipótesis relativa a que, una vez establecidas relaciones entre los parámetros de producción y variables de manejo, resulta posible establecer recomendaciones específicas para incrementar las utilidades y/o reducir el riesgo.

ABSTRACT

A stochastic bioeconomic model was developed for analysis of variability and risk in production and net revenues obtained when cultivating the whiteleg shrimp (*Litopenaeus vannamei*) under semiintensive conditions, using databases from shrimp producers of Nayarit state. A sample of 31 cases (ponds) representative of three semiintensive production cycles, two during 2009 and one during 2010, was used. The bioeconomic model was integrated by four submodels: biologic, technologic, water quality and management variables, and economic. Alternative management schemes were analyzed in terms of stocking density (postlarvae m^{-2}) and duration of cultivation (weeks) for three production cycles (May-August, August-November and March-June) and annual cycles (May- August - August-November and March-June - August -November), and two farm sizes (2 and 40 ha). Risk was measured using the coefficient of variation. The highest production and net revenues were obtained with the May-August cycle averaging $1,239 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ and $\$14,379\cdot\text{ha}^{-1}$, and with the annual cycle May-August - August-November averaging $2,213 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ and $\$26,472\cdot\text{ha}^{-1}$. In all the cases analyzed, the higher production and net revenues were obtained by stocking at 37, 25 y 17 postlarvae m^{-2} and harvesting after 13, 14 y 12 weeks and, in general, lower variability and risk were calculated when stocking and harvesting weeks corresponding to the management level 4. Depending on the annual production cycle, it was estimated that economic risk could be reduced by 439% or 445% when operating a farm integrated by forty ponds, rather than a farm operating two ponds. A sensitivity analysis also showed that the most important factors of economic risk were shrimp price and the weight of shrimp. It is concluded that the objective of developing a bioeconomic model was satisfactorily accomplished, and that it is acceptable the hypothesis regarding the possibility of relating production parameters with management variables could allow specific recommendations for risk management.

I. INTRODUCCIÓN

Según las estadísticas recopiladas por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) a nivel mundial, la producción acuícola para consumo humano alcanzó en el año 2012 66.6 millones de toneladas (equivalentes a 137,700 millones dólares americanos). Por su valor, el camarón sigue siendo el producto más importante, pues en 2012 representó el 15% del valor total de los productos pesqueros comercializados a nivel internacional. Los volúmenes de producción mundial de camarón cultivado descendieron en 2012 y, en particular, en 2013, principalmente debido a problemas relacionados con enfermedades como el síndrome de mortalidad temprana, en algunos países de Asia y América Latina (FAO, 2014).

México también se vio afectado por esta problemática al pasar de una producción de camarón de cultivo de 100,321 toneladas en 2012, a 60,292 toneladas en 2013, generando una disminución de 40% (CONAPESCA, 2013). El camarón, por su volumen, se encuentra posicionado en el cuarto lugar de la producción pesquera en México, sin embargo, por su valor, se encuentra en primer lugar. Aproximadamente el 94% de las granjas camaroneras del país están situadas en los estados de Sinaloa, Sonora, Baja California Sur y Nayarit, donde se genera más del 80% de la producción nacional de camarón cultivado. De acuerdo con el Anuario Estadístico de Acuicultura y Pesca (CONAPESCA, 2013), en 2013, Sinaloa, fue la entidad con mayor producción de camarón cultivado con 28,244 toneladas, el segundo productor fue Sonora con 14,258 toneladas, seguido de Baja California Sur con 4,890 toneladas y Nayarit con 3,352 toneladas. La especie que se cultiva en México es *Litopenaeus vannamei*, el camarón blanco del Pacífico, y el tipo de tecnología de producción semi-intensiva es el más difundido (FIRA, 2009).

En Nayarit, las unidades de producción de camarón se localizan en la región norte del estado, y aproximadamente 96% de éstas emplean tecnología semi-intensiva. La distribución de las granjas se define, por zona acuícola, en: zona norte, zona centro y zona sur donde, por orden de mención, la superficie productiva disminuye, aunque los rendimientos por hectárea aumentan (CESANAY, 2016).

El camarón de cultivo en Nayarit ha sido afectado por enfermedades de alto impacto que han puesto en peligro la actividad. Sin embargo, ante todas las adversidades, los productores se han esforzado por mantener su fuente de empleo, y dentro de las actividades que actualmente realizan de manera rutinaria, están las Buenas Prácticas de Producción Acuícola. Un problema importante a destacar, en el contexto del presente estudio, es que la mayor parte de los productores realizan registros de datos muy limitados, lo que impide un monitoreo adecuado de sus operaciones de cultivo. Se requieren bases de datos adecuadas, para que una vez analizadas e interpretadas, permitan una mejora en la toma de decisiones.

Dada la problemática en la producción de camarón cultivado, en este trabajo de investigación desarrolló un modelo bioeconómico que incorporó elementos estocásticos, a partir de bases de datos obtenidas de granjas semi-intensivas en Nayarit, a fin de analizar y evaluar la producción y el riesgo asociado a las variaciones de los precios de postlarvas, alimento balanceado y camarón, de parámetros de calidad del agua y de parámetros de producción. A partir del modelo realizan recomendaciones de manejo, a fin de mejorar la producción y las expectativas económicas de las granjas camaroneras.

II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un modelo bioeconómico estocástico para analizar la variabilidad (el riesgo) de la producción y de las utilidades económicas sobre los costos de producción del cultivo semi-intensivo del camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*), para las condiciones prevalecientes en el estado de Nayarit, con el fin de establecer recomendaciones para su manejo.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Construir un modelo bioeconómico que incorpore elementos estocásticos a partir de bases de datos de granjas de cultivo de *Litopenaeus vannamei* con tecnología semi-intensiva.
- Analizar y proponer diferentes esquemas de manejo del cultivo para disminuir la variabilidad de la producción y el riesgo económico, así como incrementar la producción y la rentabilidad económica.
- Realizar un análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo bioeconómico, con la finalidad de establecer cuáles son los más importantes.

HIPÓTESIS

Si existen influencias de las variables de manejo en la producción del camarón, entonces deben poderse establecer relaciones funcionales entre los parámetros de un modelo matemático que prediga dicha producción y variables de manejo y de calidad de agua, de manera que puedan definirse, mediante un modelo bioeconómico estocástico, combinacione de valores de las variables de manejo que permitan minimizar el riesgo económico.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

En su definición más general, se entiende por bioeconomía a la administración eficiente de recursos biológicos (Clark, 1974). La bioeconomía acuícola, tiene su origen a partir del desarrollo de cultivo de especies a una escala industrial. Durante la década de 1980, los aspectos técnicos y biológicos fueron el primer desafío en un contexto de mercado que se definió por una demanda significativa de especies de alto valor monetario. Estas circunstancias permitieron la obtención de márgenes operativos que eran lo suficientemente grandes como para compensar las limitaciones de manejo y las escalas de producción bajas. Durante la década de 1990, la estandarización de los procesos de producción, la reducción en el mercado de los precios mediante el aumento de la oferta y la disminución progresiva de los márgenes de ganancia demostraron que los aspectos económicos y de manejo eran vitales para el desarrollo sostenible de la acuicultura. Al mismo tiempo, los enfoques económicos no podían pasar por alto la importancia de los aspectos técnicos/biológicos inherentes a esta actividad (Llorente y Luna, 2015). En este contexto, el análisis bioeconómico en la acuicultura surge en respuesta a la necesidad de integrar los factores económicos, biológicos, técnicos y ambientales, con el fin de estudiar el proceso de creación de valor dentro de las empresas y mejorar su eficiencia. Para ese propósito, resulta indispensable el uso de técnicas matemáticas para modelar el comportamiento de los sistemas de producción biológica que están sujetos a las limitaciones económicas, biológicas y técnicas (Allen *et al.*, 1984; Cuenco, 1989).

Básicamente, los modelos bioeconómicos consisten en un sub-modelo biológico que se interrelaciona con un submodelo económico, con el fin de tener en cuenta los aspectos económicos e implicaciones de cualquier cambio en los parámetros de producción y en los mercados (Llorente y Luna, 2013). Por otra parte, se suelen considerar otros factores, tales como las variables ambientales y de manejo, disposiciones de sanidad y la capacidad de producción y sus limitaciones. Por su carácter interdisciplinario, se puede considerar que la bioeconomía acuícola es un instrumento que facilita la interacción de productores con investigadores, lo que permite resolver problemáticas de esta industria que no pueden abordarse desde el ámbito de una única disciplina (Ruiz-Velazco, 2011).

De acuerdo con la revisión realizada por Llorente y Luna (2016) sobre modelos de bioeconomía acuícola, la línea de investigación menos desarrollada pero más relevante desde el punto de vista comercial, es el análisis de riesgo económico, que hasta la fecha ha sido desarrollada principalmente en México y se ha aplicado al cultivo de camarón en diferentes sistemas. Esos trabajos abordan la cuestión relevante de cómo afecta la incertidumbre al proceso de decisión así como los resultados económicos, aunque las fuentes de riesgo y las maneras de medir el rendimiento económico difieren entre ellos. Sus resultados ponen de manifiesto la importancia del manejo de la incertidumbre en las empresas acuícolas. Tomando en cuenta tal importancia del análisis de riesgo, en el presente trabajo de investigación se realiza una revisión de la literatura sobre el tema definiendo primeramente conceptos básicos y relevantes para después resumir lo realizado por los diferentes autores.

En un primer momento, la falta de investigaciones sobre la acuicultura y las dificultades para acceder a datos de producción que facilitara la investigación empírica, dio lugar a que la mayor parte de los primeros trabajos en el modelado bioeconómico se basaran en modelos teóricos. El trabajo de Allen *et al.* (1984), constituye el primer intento de aplicar la bioeconomía acuícola, después de identificar 22 ejemplos específicos del modelado de los procesos de producción acuícola del periodo 1974-1983. Otros autores interesados en el tema son Leung (1994), Pomeroy *et al.* 2008 y recientemente Llorente *et al.* (2015), donde se constata que, con el tiempo, aparecieron los primeros estudios empíricos y se hicieron cada vez más frecuentes. En la actualidad, la mayoría de los estudios que aplican el modelado bioeconómico en la acuicultura son empíricos, y sólo unos pocos autores desarrollan modelos teóricos, como Yu y Leung (2006, 2009). Además, la creciente importancia de esta área de conocimiento, no sólo se confirmó a través de una mayor cantidad de estudios, sino también a través de una creciente consideración de especies, lugares y aplicaciones.

En este documento se identifican seis estudios teóricos y empíricos que en los últimos doce años han desarrollado o utilizado modelos bioeconómicos teniendo en cuenta cómo afecta la incertidumbre distintos acuicultivos (Tabla 1).

Tabla 1. Investigaciones realizadas con modelos bioeconómicos para cultivos de algunas especies de camarón.

Autores	Especies	Modelo de crecimiento	Modelo de supervivencia	Variables de manejo	País
Seijo (2004)	En general	von-Bertalanffy	Exponencial decreciente	Tiempo de cosecha	México
Hernández-Llamas <i>et al.</i> (2004)	<i>L. stylirostris</i>	Parametrización alternativa de von-Bertalanffy	Exponencial decreciente	Densidad de siembra y duración de cultivo	México
Sánchez-Zazueta y Martínez-Cordero (2009)	<i>L. vannamei</i>	No se especifica	No se especifica	Densidad de siembra y duración del cultivo	México
Ruiz-Velazco (2011)	<i>L. vannamei</i>	Parametrización alternativa de von-Bertalanffy	Exponencial decreciente y con restricción de dominio	Tamaño de estanque, inicio de aireación, densidad de siembra y duración del cultivo	México
Hernández-Llamas y Zarain-Herzberg (2011)	<i>L. vannamei</i>	Parametrización alternativa de von-Bertalanffy	Exponencial decreciente	Densidad de siembra y duración del cultivo	México
González-Romero <i>et al.</i> (2014)	<i>L. vannamei</i>	Parametrización alternativa de von-Bertalanffy	Exponencial decreciente y con restricción de dominio	Tamaño de estanque	México

Seijo (2004), basándose en una serie de indicadores bioeconómicos publicados en la literatura y bajo un caso hipotético de cultivo de camarón, llevó a cabo un análisis de riesgo, centrándose en aspectos de manejo relacionado con los tiempos de cosecha. Para el análisis se consideraron los efectos del tiempo de cosecha (como variable de manejo) y las incertidumbres del precio del camarón y de la mortalidad natural, sobre el riesgo que se genera de exceder dos límites de puntos de referencia bioeconómicos (una producción de 8.0 ton-ha⁻¹ y una utilidad de 25,000 dólares-ha⁻¹).

Hernández-Llamas *et al.* (2004), construyeron un modelo con datos de una granja comercial de Sinaloa, México. En dicho trabajo evaluaron la variación estocástica de los parámetros de crecimiento y mortalidad y el factor de conversión alimenticia (FCA) para la producción intensiva del camarón azul (*Litopenaeus stylirostris*). Incluyeron un análisis de riesgo correspondiente a dos ciclos de producción intensiva y además fue realizado un análisis de sensibilidad.

Sánchez-Zazueta y Martínez-Cordero (2009), evaluaron el riesgo económico de una granja con tecnología semi-intensiva de camarón en Sinaloa, México, en el que consideraron ajustes de tipo económico y de manejo con la finalidad de reducir el riesgo de enfermedades.

Ruiz Velazco (2011), construyó un modelo bioeconómico que permitió evaluar el riesgo implicado en la producción intensiva del camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*), utilizando bases de datos aportadas por productores del estado de Nayarit, que incorporaron 86 casos (estanques), en 49 de los cuales se presentó la enfermedad de la mancha blanca. Se analizaron distintos esquemas de manejo, en términos de las variables de manejo implicadas. El riesgo se evaluó mediante el indicador rendimiento por unidad de riesgo. Adicionalmente se llevó a cabo un análisis de sensibilidad para determinar la importancia de las variables y parámetros utilizados.

Hernández-Llamas and Zarain-Herzberg (2011), utilizaron un modelo bioeconómico para analizar el riesgo del cultivo de *L. vannamei* en jaulas flotantes en el noroeste de México

y determinar si los precios más altos para el camarón después de la temporada de huracanes (noviembre) compensaría el riesgo por impacto de huracanes.

González-Romero *et al.* (2014), utilizaron un modelo bioeconómico estocástico que ha sido desarrollado y calibrado para simular condiciones operativas de granjas intensivas en Nayarit, a fin de analizar la producción intensiva del camarón *Litopenaeus vannamei* en condiciones de operación normales o de afectación por la enfermedad de la mancha blanca (EMB). El objetivo principal fue optimizar el diseño de granjas para la producción intensiva de camarón, mediante la definición del tamaño más conveniente de los estanques.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Modelo bioeconómico y esquemas de manejo.

Para el presente estudio se construyó un modelo bioeconómico a partir de bases de datos aportadas por productores del estado de Nayarit. El tamaño de la muestra fue de 31 casos (estanques), representativos de condiciones de cultivo semi-intensivo correspondientes a tres ciclos de producción, dos en el año 2009 y uno en el año 2010.

Las fechas de siembras y cosechas del cultivo para cada ciclo se realizaron respetando las disposiciones implementadas por el Comité Estatal de Sanidad Acuicola del estado (CESANAY) que emite el permiso correspondiente.

Las variables incluidas en la base de datos fueron: temperatura, oxígeno disuelto en el agua, crecimiento en peso del camarón, supervivencia, rendimiento de la producción, densidad inicial de siembra, tamaño del estanque y duración del cultivo, de las cuales las dos primeras corresponden a variables de la calidad de agua y las últimas tres, a variables de manejo (Tabla 2).

Tabla 2. Valores promedio \pm desviación estándar (DE) de las variables de la calidad del agua y de manejo del cultivo de *Litopenaeus vannamei*.

Variable	Ciclo de producción		
	Mayo-Agosto	Agosto-Noviembre	Marzo-Junio
Temperatura (°C)	31.98 \pm 0.36	31.57 \pm 2.04	31.15 \pm 2.22
Oxígeno disuelto (mg·L ⁻¹)	3.96 \pm 0.60	4.29 \pm 1.00	5.12 \pm 2.79
Densidad (PL·m ⁻³)	26.50 \pm 21.00	19.50 \pm 11.50	15.00 \pm 4.00
Tamaño del estanque (ha)	1.50 \pm 1.80	2.00 \pm 1.70	1.75 \pm 1.50
Duración del cultivo (semanas)	11.25 \pm 3.50	11.50 \pm 5.00	10.75 \pm 2.50

Los esquemas de manejo que fueron analizados corresponden a los determinados por Estrada-Pérez (2012) para granjas semiintensivas en el estado de Nayarit (Tabla 3).

Tabla 3. Valores correspondientes a cada nivel de manejo para las variables de manejo densidad de siembra (D) en postlarvas·m⁻² y duración del cultivo (DC) en semanas, del cultivo semi-intensivo de *Litopenaeus vannamei*.

Niveles de Manejo	2009-I		2009-II		2010	
	Mayo-Agosto		Agosto-Noviembre		Marzo-Junio	
	D	DC	D	DC	D	DC
1	16	9.5	14	9	13	9.5
2	21.25	10.375	16.75	10.25	14	10.125
3	26.5	11.25	19.5	11.5	15	10.75
4	31.75	12.125	22.25	12.75	16	11.375
5	37	13	25	14	17	12

Los niveles de manejo antes descritos se utilizaron para predecir la producción, la utilidad y la relación beneficio-costo por ciclo (Mayo-Agosto, Agosto-Noviembre y Marzo-Junio) y anual (Mayo-Agosto – Agosto-Noviembre y Marzo-Junio – Agosto-Noviembre).

El modelo bioeconómico se integró por cuatro tipos de submodelos:

- Submodelo biológico (Tabla 4),
- Submodelo tecnológico (Tabla 5),
- Submodelo de variables de calidad de agua y de manejo (Tabla 6) y
- Submodelo económico (Tabla 7).

Tabla 4. Submodelo biológico. Las relaciones establecidas se obtuvieron mediante regresión lineal múltiple.

Ecuación

Relaciones establecidas

$$b_i = w_i \cdot n_i$$

Donde, b_i es la biomasa, w_i es el peso individual de los organismos y n_i es el número de organismos sobrevivientes al tiempo t .

$$w_n = w_0 + (w_f - w_0) \left\{ \frac{(t - k^c)}{(t - k^c)^2} \right\}$$

Donde, w_n es el peso del camarón después de que han transcurrido n eventos en el tiempo, w_0 es el peso inicial, w_f es el peso final, k es una constante de crecimiento y c es n al tiempo de cosecha.

$$n_t = n_0 e^{z \cdot t}$$

Donde, n_t es el número de sobrevivientes, n_0 es el número de individuos al momento de la siembra, t es el tiempo y z es la tasa instantánea de mortalidad.

$$w_f = -25.2436 + 0.9678 T + 0.5329 DC$$

Donde, T es la temperatura y DC es la duración del cultivo.

$$z = 0.0916 - 0.0081 OD + 0.0010 D - 0.0034 DC$$

Donde, OD es el oxígeno disuelto, D es la densidad de siembra y DC es la duración del cultivo.

Tabla 5. Submodelo tecnológico. Las relaciones establecidas se obtuvieron mediante regresión lineal múltiple.

Ecuación

Relaciones establecidas

$$FCA_t = a_F \cdot t + b_F$$

Donde, FCA_t es el factor de conversión alimenticia en función del tiempo, y a_F y b_F son coeficientes de regresión.

$$b_F = 1.491887 - 0.0316577 T$$

Donde, T es la temperatura.

de los variables de calidad de agua y de manejo.

Ecuación

$$OD = -0.036D - 0.1175DC$$

Donde, D es la densidad de siembra y DC es la duración del cultivo.

Tabla 7. Submodelo Económico.

Ecuación

$$U_i = I_i - C_i$$

Donde, U_i es la utilidad, I_i son los ingresos totales y C_i son los costos de operación del cultivo.

$$I_i = b_i \cdot p_{vi}$$

Donde, I_i son los ingresos totales, b_i y p_{vi} son la biomasa y el precio comercial del camarón, respectivamente.

$$p_{vi} = -0.023t^4 + 0.6371t^3 - 5.4207t^2 + 13.062t + 38.792 + wt^{(n)}$$

Donde p_{vi} es el precio comercial del camarón, t es el tiempo y wt es el peso base del camarón (tomado de Estrada Pérez, 2012).

$$C = C_f + C_v$$

Donde, C son los costos de producción del cultivo, C_f (costos fijos) son materiales diversos, mano de obra y mantenimiento y C_v (costos variables) son las postlarvas, los fertilizantes, el alimento balanceado y el costo de la electricidad utilizados durante el cultivo.

(*) El precio base (Tabla 8) se usa para calcular el precio comercial del camarón "adicionándole" en pesos, el peso promedio del camarón en gramos (w), lo que se conoce como "precio más gramo", por ejemplo: el precio base de Agosto es de \$28.00 y si el peso de camarón en ese mes es de 15 g, el valor del precio comercial del camarón será de \$43.00 por kg.

Tabla 8. Lista de precios base por mes del kilogramo ($\text{\$}\cdot\text{kg}^{-1}$) de camarón en Nayarit, México.

Precio base por mes	
Mes	Precio ($\text{\$}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Enero	41
Febrero	41
Marzo	50
Abril	51
Mayo	35
Junio	32
Julio	31
Agosto	28
Septiembre	28
Octubre	32
Noviembre	34
Diciembre	38

En la Figura 1 se presenta el ajuste de la ecuación polinómica usada por Estrada-Pérez (2012) para granjas semiintensivas en el estado de Nayarit, en función del tiempo, para el cálculo de los precios base de la Tabla 8.

En el caso de los costos, se consideraron los valores incluidos en la Tabla 9. Tomando en cuenta que los costos asociados a postlarvas y al alimento balanceado normalmente son los más importantes en la producción de camarón, se realizó un análisis de la evolución de los precios de dichos insumos de los años 2006 al 2013 (Tabla 10).

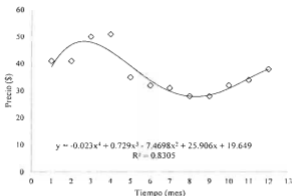


Figura 1. Ajuste de la función polinómica a los precios mensuales del camarón.

Tabla 9. Parámetros de costos y sus valores.

Parámetro	Costo (\$)
Postlarva (\$-millar ⁻¹)	60
Alimento balanceado (\$-kg ⁻¹)	12
Fertilizantes (\$-kg ⁻¹)	12
Electricidad (\$-kwh ⁻¹)	2.63
Preparación de estanque (\$-ha ⁻¹ -año ⁻¹)	1.500
Mano de obra (\$-ha ⁻¹ -año ⁻¹)	30,576
Mantenimiento (\$-ha ⁻¹ -año ⁻¹)	6.255
Administración (\$-ha ⁻¹ -año ⁻¹)	2,045
Cosecha (\$-kg/camarón)	2

Tabla 10. Lista de precio promedio anual por millar de postlarvas de camarón y por kilogramo de alimento balanceado en la industria de Nayarit, México.

Año	Precio (\$-millar ⁻¹)	Precio (\$-kg ⁻¹)
2006	42.30	7.80
2007	54.00	8.06
2008	52.90	9.15
2009	66.00	9.80
2010	55.30	11.80
2011	55.30	11.62
2012	56.90	12.00
2013	58.00	12.50

En las Figuras 2 y 3 se presentan los ajustes de regresión lineal simple correspondientes a las tendencias en los precios de ambos insumos.

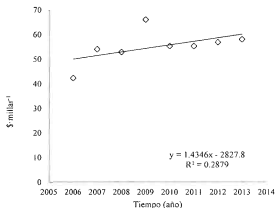


Figura 2. Ajuste de una ecuación lineal simple a los precios anuales de postlarvas de camarón

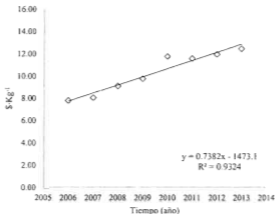


Figura 3. Ajuste de una ecuación lineal simple a los precios anuales de alimento balanceado

4.1.1. Elementos estocásticos.

Para el presente trabajo se incorporaron elementos estocásticos en los valores de los parámetros de los submodelos biológicos y tecnológicos, añadiendo los errores residuales resultantes de los ajustes de regresión lineal múltiple usados para establecer relaciones entre dicho parámetro y las variables de calidad de agua y de manejo ("Relaciones establecidas" de las Tablas 4 y 5). Para el caso de las variables de calidad de agua (oxígeno disuelto) también se utilizó un método similar, mediante la adición de errores residuales resultantes del ajuste de la regresión múltiple correspondiente (Ecuación de la Tabla 6). Los errores residuales se obtuvieron y añadieron a partir de distribuciones normales ajustadas para cada caso.

También se incorporaron elementos estocásticos a los precios de venta del camarón, añadiendo a los valores predichos con la función polinómica presentada en la Figura 1, los errores residuales resultantes del ajuste de dicha función. En el caso de los precios de las postlarvas y del alimento balanceado, a los valores promedio de los precios correspondientes a 2016 se le añadieron los errores residuales resultantes de los ajustes de las ecuaciones lineales simples correspondientes (Figura 2 y 3). Los errores residuales de los precios se obtuvieron y añadieron a partir de distribuciones normales ajustadas para cada caso.

4.2. Variabilidad de la producción biológica.

Se analizó la variabilidad infiriendo distribuciones de probabilidad de los rendimientos de la producción a partir de valores estocásticos de los parámetros del submodelo biológico y de variables de calidad de agua y de manejo. Se utilizó la técnica de simulación Monte Carlo disponible en @Risk 5.5, con tamaños de muestra que fueron determinados automáticamente cuando se tuvo 95% de confiabilidad en la estimación de la media de las distribuciones de los rendimientos. Para la simulación, se tomaron en cuenta la correlación significativa existente entre los valores residuales de los parámetros del submodelo biológico y las relaciones establecidas entre las variables de calidad del agua y de manejo. El efecto del manejo se evaluó en términos de cambios en los valores del coeficiente de variación (CV), calculado como el cociente de la desviación estándar entre la media, y en el que un menor valor de este indicador significa menor incertidumbre y riesgo.

4.3. Análisis de riesgo económico.

El análisis de riesgo se efectuó tanto para las utilidades como para la relación beneficio-costos para todos los ciclos de producción y niveles de manejo, calculando dichos indicadores para una hectárea productiva.

Adicionalmente, con el objeto de estimar el efecto del tamaño de la granja sobre la magnitud del riesgo, se calcularon las utilidades para granjas de 2 y 40 estanques de una hectárea cada uno, es decir, para granjas con superficies productivas de 2 y 40 hectáreas en total. Para este análisis se consideraron todos los niveles de manejo en los ciclos de producción anuales.

4.4. Análisis de sensibilidad.

Se llevó a cabo un análisis de sensibilidad, tanto de la producción biológica como de los indicadores económicos para cada ciclo de producción, a la variabilidad aleatoria en los parámetros de producción, tecnológicos así como de las variables de calidad de agua en función de las distribuciones de probabilidad. Esto permitió determinar los factores más importantes que afectan la producción biológica y los indicadores económicos.

5. RESULTADOS.

5.2. Variabilidad de la producción.

Como resultados del presente trabajo, se presentan las distribuciones de probabilidad de la producción que se obtuvieron mediante la simulación de Monte Carlo considerando los valores de los diferentes esquemas de manejo (Figuras 4, 5 y 6).

De acuerdo con las distribuciones de probabilidad, con 95% de confianza, se predice que la producción que se obtiene para el ciclo Mayo-Agosto con el Nivel de manejo 1, varía entre 0.788 a 1.409 $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$, con una media de 1.081 $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$, y para el Nivel de manejo 5 entre 1.749 a 3.032 $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$, con una media de 2.320 $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Figura 4). Para el ciclo Agosto-Noviembre con el Nivel de manejo 1, la producción se establece entre 0.641 a 1.242 $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$, con una media de 0.932 $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$ y, para el Nivel de manejo 5 entre 1.421 a 2.505 $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$ con una media de 1.906 $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Figura 5). Para el ciclo Marzo-Junio con el Nivel de manejo 1, la producción varía entre 0.662 a 1.151 $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$ con una media de 0.892 $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$, y para el Nivel de manejo 5 entre 0.991 a 1.690 $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$, con una media de 1.313 $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Figura 6).

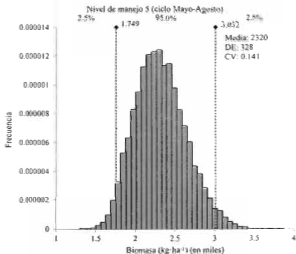
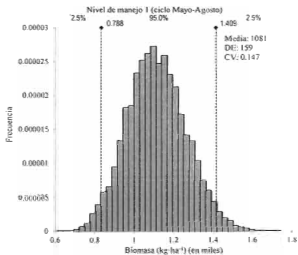


Figura 4. Distribuciones de probabilidad de la producción para el ciclo Mayo-Agosto.

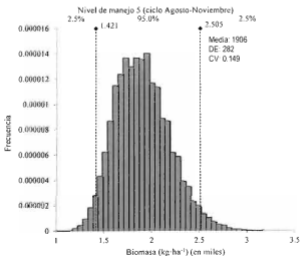
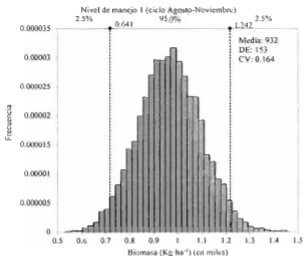


Figura 5. Distribuciones de probabilidad de la producción para el ciclo Agosto-Noviembre.

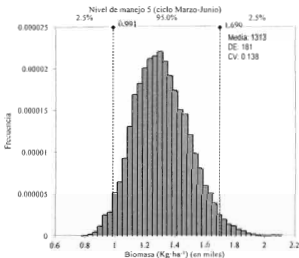
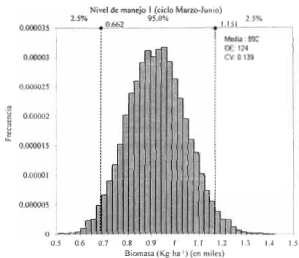


Figura 6. Distribuciones de probabilidad de la producción para el ciclo Marzo-Junio.

Como consecuencia de la mejora en el manejo (incremento de las densidades de siembra empleadas y prolongación del cultivo), las producciones medias se incrementaron conforme se pasó del Nivel de manejo 1 al Nivel 5, mientras que el coeficiente de variación tendió a disminuir, en general, conforme se pasó del nivel de manejo 1 al 4, con un ligero repunte en el nivel 5 (Figura 7, 8 y 9).

Cuando se operan dos ciclos en un año, es decir, en los ciclos anuales Mayo-Agosto-Agosto-
Noviembre y Marzo-Agosto-Agosto-
Noviembre se observa que como consecuencia de la mejora en el manejo, las producciones medias se incrementaron conforme se pasó del Nivel de manejo 1 al Nivel 5, mientras que los valores más bajos del coeficiente de variación se obtuvieron con el Nivel 3 (Figura 10).

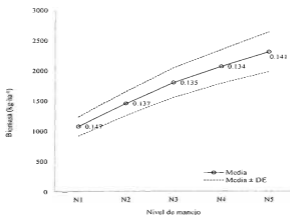


Figura 7. Producción en función de los esquemas de manejo en el ciclo Mayo-Agosto. Las líneas discontinuas indican \pm desviación estándar y los valores indicados corresponden al coeficiente de variación.

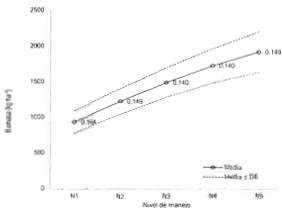


Figura 8. Producción en función de los esquemas de manejo en el ciclo Agosto-Noviembre. Las líneas discontinuas indican \pm desviación estándar y los valores indicados corresponden al coeficiente de variación.

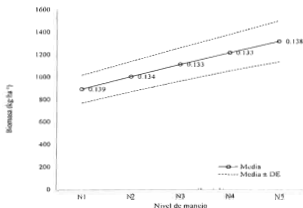


Figura 9. Producción en función de los esquemas de manejo en el ciclo Marzo-Junio. Las líneas discontinuas indican \pm desviación estándar y los valores indicados corresponden al coeficiente de variación.

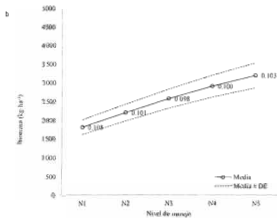
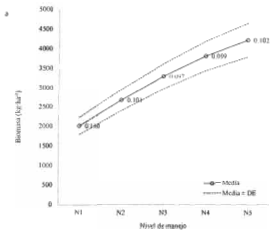


Figura 10. Producción en función de los esquemas de manejo para los ciclos anuales Mayo-Agosto - Agosto-Noviembre (a) y Marzo-Junio - Agosto-Noviembre (b). Las líneas discontinuas indican \pm desviación estándar y los valores indicados corresponden al coeficiente de variación.

5.3. Análisis de riesgo económico.

5.3.1. Utilidad.

Con el 95% de confianza, se predice que la utilidad que se obtiene para el ciclo Mayo-Agosto con el Nivel de manejo 1 varía entre \$8,000 y \$20,600 ha^{-1} , con una media de \$4,133 ha^{-1} , mientras que con el Nivel 5 varía entre -\$8,900 y \$53,700 ha^{-1} , lo que promedia en \$16,148 ha^{-1} (Figura 11). Las menores utilidades se obtuvieron para el ciclo Agosto-Noviembre con el Nivel de manejo 1, con una variación entre -\$7,880 y \$18,350 ha^{-1} , con una media de \$3,197 ha^{-1} , en tanto que para el Nivel 5 fluctuaron entre -\$7,500 y \$43,600 ha^{-1} , con un promedio de \$14,929 ha^{-1} (Figura 12). Las mayores utilidades se obtuvieron para el ciclo Marzo-Junio, variando entre -\$1,250 y \$24,650 ha^{-1} , lo que promedia en \$10,035 ha^{-1} , con el Nivel de Manejo 1, mientras que con el Nivel 5 variaron entre \$2,000 y \$41,200 ha^{-1} , con una media de \$19,084 ha^{-1} (Figura 13).

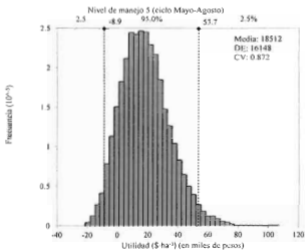
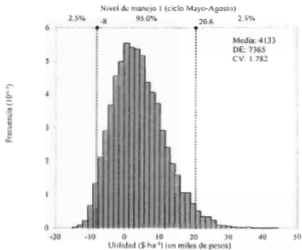


Figura 11. Distribuciones de probabilidad de la utilidad para el ciclo Mayo-Agosto.

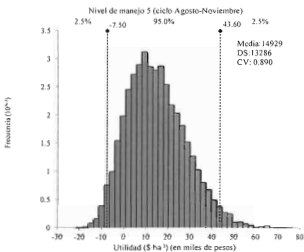
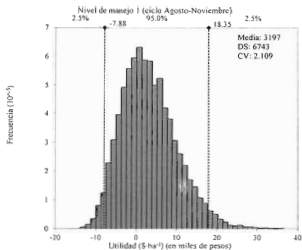


Figura 12. Distribuciones de probabilidad de la utilidad para el ciclo Agosto-Noviembre.

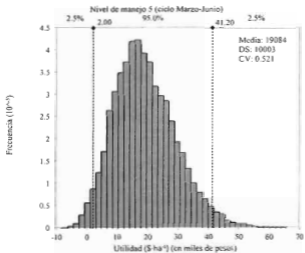
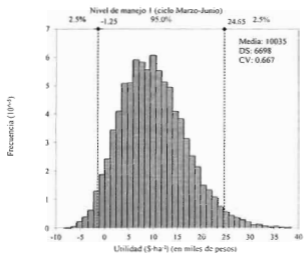


Figura 13. Distribuciones de probabilidad de la utilidad para el ciclo Marzo-Junio.

Como consecuencia de la mejora en el manejo, en los ciclos Mayo-Agosto (Figura 14) y Agosto-Noviembre (Figura 15), las utilidades medias se incrementaron conforme se pasó del Nivel de manejo 1 al 5, aunque el menor valor del coeficiente de variación, y la menor incertidumbre y riesgo, se obtuvieron con el Nivel 4. Para el ciclo Marzo-Junio la mayor producción y la menor incertidumbre se obtuvieron con el Nivel 5 (Figura 16).

Para los ciclos anuales, las utilidades medias se incrementaron conforme se pasó del Nivel de manejo 1 al 5, pero la menor incertidumbre y riesgo, de acuerdo con el coeficiente de variación, se obtuvo con el nivel 4 (Figura 17).

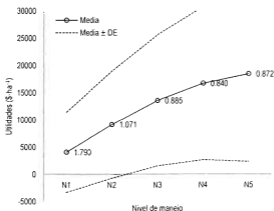


Figura 14. Utilidad estimada mediante el modelo bioeconómico en el ciclo Mayo-Agosto, para cada uno de los 5 niveles de manejo establecidos. Se indican los valores del coeficiente de variación.

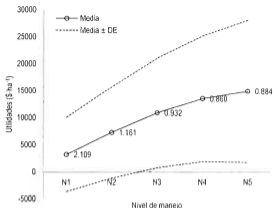


Figura 15. Utilidad estimada mediante el modelo bioeconómico en el ciclo Agosto-Noviembre para cada uno de los 5 niveles de manejo establecidos. Se indican los valores del coeficiente de variación.

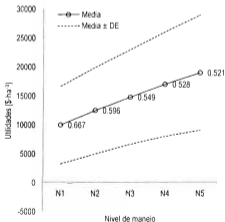


Figura 16. Utilidad estimada mediante el modelo bioeconómico en el ciclo Marzo-Junio, para cada uno de los 5 niveles de manejo establecidos. Se indican los valores del coeficiente de variación.

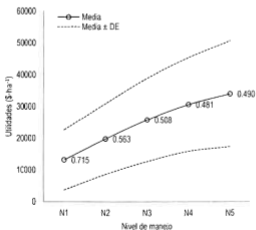
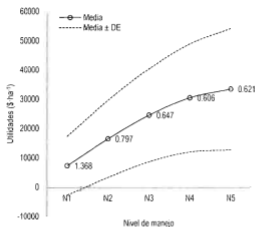


Figura 17. Utilidad estimada mediante el modelo bioeconómico para los ciclos anuales Mayo-Agosto - Agosto-Noviembre (a) y Marzo-Junio - Agosto-Noviembre (b) para cada uno de los 5 niveles de manejo establecidos. Se indican los valores del coeficiente de variación.

5.3.2. Relación beneficio-costos.

En general y en contraste con las utilidades, la relación beneficio-costos no se vio tan afectada por los esquemas de manejo analizados. Se observó una tendencia a que el promedio de la relación se incremente en todos los casos, aunque también se observó que el coeficiente de variación y el riesgo correspondiente, fueron menores cuando se usa el nivel 4 para el ciclo Marzo-Junio y para el ciclo anual Marzo-Junio – Agosto-Noviembre (Figuras 18, 19, 20 y 21).

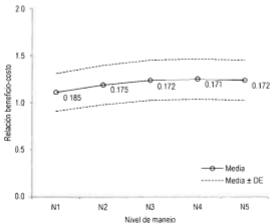


Figura 18. Relación beneficio-costos estimada mediante el análisis bioeconómico en el ciclo Mayo-Agosto, para cada uno de los 5 niveles de manejo establecidos. Se indican los valores del coeficiente de variación.

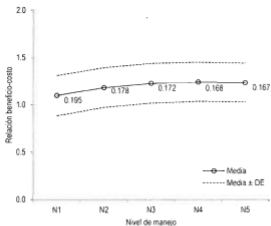


Figura 19. Relación beneficio-costo estimada mediante el análisis bioeconómico en el ciclo Agosto-Noviembre, para cada uno de los 5 niveles de manejo establecidos. Se indican los valores del coeficiente de variación.

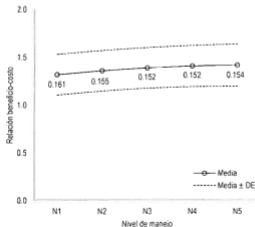


Figura 20. Relación beneficio-costo estimada mediante el análisis bioeconómico en el ciclo Marzo-Junio, para cada uno de los 5 niveles de manejo establecidos. Se indican los valores del coeficiente de variación.

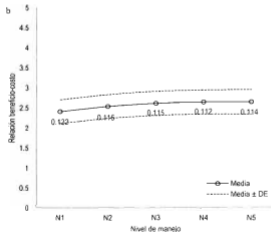
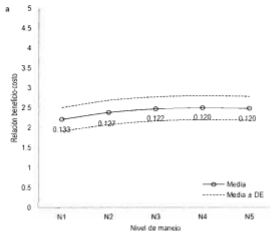


Figura 21. Relación beneficio-costo anual estimada mediante el análisis bioeconómico, para el ciclo Mayo-Agosto – Agosto-Noviembre (a) y Marzo-Junio – Agosto-Noviembre (b), para cada uno de los 5 niveles de manejo establecidos. Se indican los valores del coeficiente de variación.

5.3.3. Tamaño de granja

El análisis de riesgo de las utilidades para granjas de 2 y 40 estanques para los diferentes niveles de manejo y, considerando los ciclos anuales Mayo-Agosto – Agosto-Noviembre (Figura 25) y Marzo-Junio – Agosto-Noviembre (Figura 26). Indicó que como consecuencia de la mejora en el manejo, las utilidades medias se incrementaron conforme se pasó del Nivel de manejo 1 al 5, aunque el menor valor del coeficiente de variación, y la menor incertidumbre y riesgo, se obtuvieron con el Nivel 4. Asimismo, con este Nivel de manejo 4, la incertidumbre y el riesgo disminuyen en 439% cuando la granja está constituida por 40 estanques, comparado con una granja constituida por 2 estanques para el ciclo anual Mayo-Agosto – Agosto-Noviembre y 445% para el ciclo anual Marzo-Junio – Agosto-Noviembre.

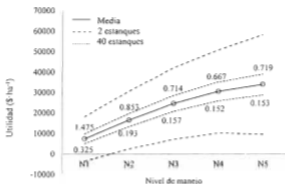


Figura 22. Utilidad para el ciclo anual Mayo-Agosto – Agosto-Noviembre obtenible para diferentes tamaños de granja con los diferentes niveles de manejo. Se indican los valores numéricos en las curvas que corresponden al coeficiente de variación, los de la parte superior corresponden a una granja de 2 estanques y los de la parte inferior a una granja de 40 estanques. DE es la desviación estándar.

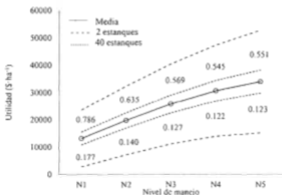


Figura 23. Utilidad para el ciclo anual Marzo-Agosto – Agosto-Noviembre obtenible para diferentes tamaños de granja con los diferentes niveles de manejo. Se indican los valores numéricos en las curvas que corresponden al coeficiente de variación, los de la parte superior corresponden a una granja de 2 estanques y los de la parte inferior a una granja de 40 estanques. DE es la desviación estándar.

5.4. Análisis de sensibilidad

5.4.1. Producción.

El análisis de sensibilidad indicó que el peso final (W_f) y la tasa instantánea de mortalidad (z) de los camarones fueron los parámetros que, en general, más influyeron en la variabilidad de la producción, seguidos de la temperatura y el oxígeno disuelto, tanto para el peor y mejor esquema de manejo como para los distintos ciclos de producción (Figuras 28, 29 y 30).

5.4.2. Utilidad.

El análisis de sensibilidad indicó que el precio base de venta a pie de granja (S base), el peso final (W_f) de los camarones y la tasa instantánea de mortalidad (z) son, en general, los factores más importantes que influyen en la variabilidad de la utilidad, independientemente del nivel de manejo y del ciclo de producción (Figuras 31, 32 y 33).

5.4.3. Relación costo-beneficio.

El análisis de sensibilidad indicó que, en general, el precio base de venta a pie de granja (S base), el peso final (W_f) de los camarones y la pendiente de la ecuación para el cálculo del factor de conversión alimenticia (a_F), son los factores más importantes que influyen en la variabilidad de la relación beneficio-costo, independientemente del nivel de manejo y del ciclo de producción (Figuras 34, 35 y 36).

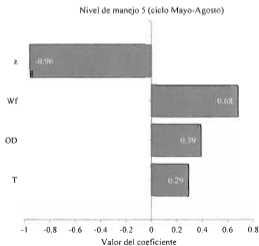
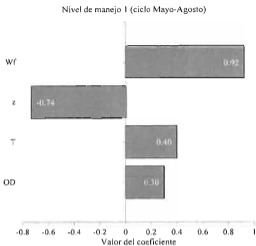


Figura 24. Análisis de sensibilidad de la producción para el ciclo Mayo-Agosto. Valores absolutos más altos del coeficiente de regresión (CR) indican una mayor sensibilidad.

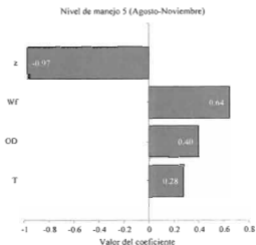
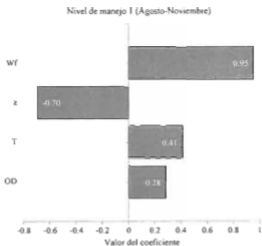


Figura 25. Análisis de sensibilidad de la producción para el ciclo Agosto-Noviembre. Valores absolutos más altos del coeficiente de regresión (CR) indican una mayor sensibilidad.

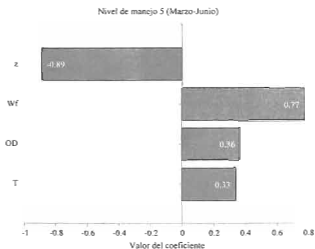
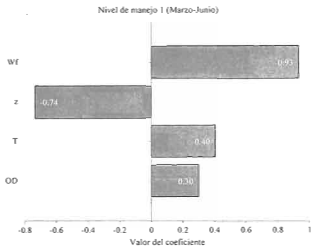


Figura 26. Análisis de sensibilidad de la producción para el ciclo Marzo-Junio. Valores absolutos más altos del coeficiente de regresión (CR) indican una mayor sensibilidad.

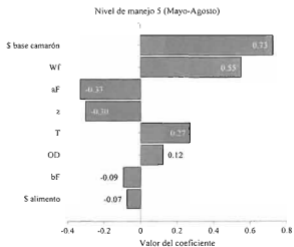
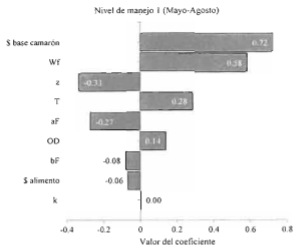


Figura 27. Análisis de sensibilidad de la utilidad para el ciclo Mayo-Agosto. Valores absolutos más altos del coeficiente de regresión (CR) indican una mayor sensibilidad.

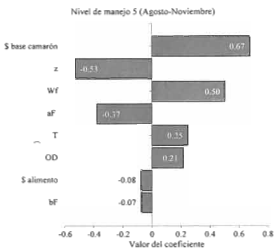
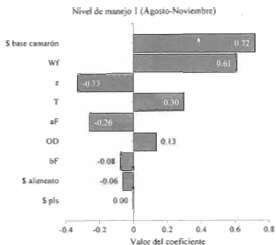


Figura 28. Análisis de sensibilidad de la utilidad para el ciclo Agosto-Noviembre. Valores absolutos más altos del coeficiente de regresión (CR) indican una mayor sensibilidad.

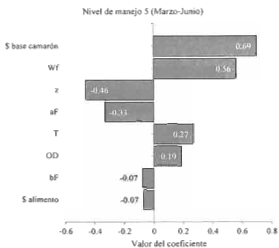
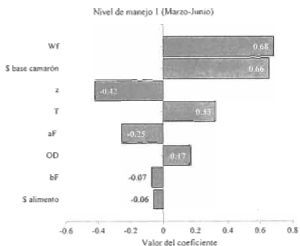


Figura 29. Análisis de sensibilidad de la utilidad para el ciclo Marzo-Junio. Valores absolutos más altos del coeficiente de regresión (CR) indican una mayor sensibilidad.

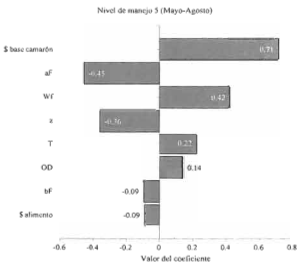
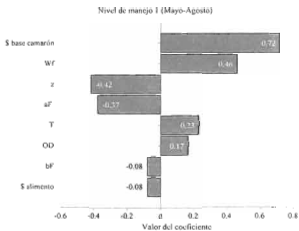


Figura 30. Análisis de sensibilidad de la relación beneficio-costos para el ciclo Mayo-Agosto. Valores absolutos más altos del coeficiente de regresión (CR) indican una mayor sensibilidad.

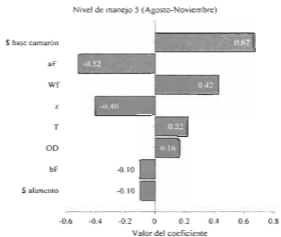
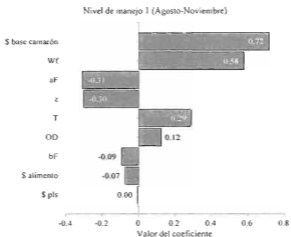


Figura 31. Análisis de sensibilidad de la relación beneficio-costo para el ciclo Agosto-Noviembre. Valores absolutos más altos del coeficiente de regresión (CR) indican una mayor sensibilidad.

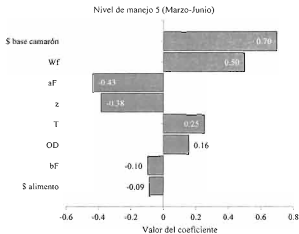
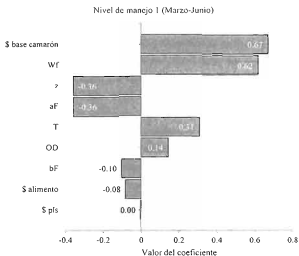


Figura 32. Análisis de sensibilidad de la relación beneficio-costo para el ciclo Marzo-Junio. Valores absolutos más altos del coeficiente de regresión (CR) indican una mayor sensibilidad.

VI. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos indican que las máximas producciones de biomasa se obtienen utilizando las máximas densidades de siembra y duraciones de cultivo, es decir, empleando el mejor manejo (Nivel de manejo 5), en cada uno de los ciclos por separado (Mayo-Agosto, Agosto-Noviembre y Marzo-Junio) y en cada ciclo anual (Mayo-Agosto – Agosto-Noviembre y Marzo-Junio – Agosto-Noviembre). Estos resultados coinciden con los obtenidos por Ruíz-Velazco *et al.* (2010a) cuando analizaron la producción intensiva de camarón con la misma especie de camarón, pues encontraron que las mejores producciones se obtienen utilizando la máxima densidad de siembra y la máxima duración de cultivo para los ciclos de verano e invierno (60 y 90 postlarvas·m⁻²; 20 y 13 semanas de cultivo).

Los mismos autores encuentran que estanques más pequeños benefician el crecimiento del camarón. En el presente estudio, sin embargo, no se encontró evidencia de que el tamaño de los estanques afectara el crecimiento y la mortalidad de los camarones. No obstante, es posible que se presente un efecto en estanques de menor o mayor tamaño que los analizados.

Aunque en diversos estudios se ha reportado un efecto negativo de la densidad de siembra sobre el crecimiento del camarón (Wyban *et al.*, 1987, Moss y Moss, 2004; Araneda *et al.*, 2008 y Ruíz-Velazco 2011b), en el presente estudio no se estableció una relación de afectación del crecimiento del camarón por la densidad. Este resultado coincide con los estudios de Sandifer *et al.* (1991), quienes analizaron la talla final de *L. vannamei* para densidades de siembra entre 20 y 200 postlarvas·m⁻² y no encontraron una tendencia a que el camarón disminuyera su talla por efecto de las altas densidades. También, en un análisis de 23 granjas semi-intensivas e intensivas de camarón, realizado por Hopkins y Villalón (1992), se encontró que las relaciones entre el peso final del camarón y la densidad de siembra es apenas discernible. De acuerdo con la presente investigación, el peso final en el camarón está más influenciado por la temperatura y la duración del cultivo que por otros factores.

En el caso de la tasa instantánea de mortalidad, se encontró influenciada por la duración del cultivo y el oxígeno disuelto, mismo que, a su vez, dependió de la densidad de

siembra. Altas densidades provocaron mayores demandas de oxígeno disuelto y, en consecuencia menores concentraciones de oxígeno disuelto, lo que provocó también mayores tasas de mortalidad (Tabla 4). Lo anterior contrasta con lo reportado por Ruiz-Velazco *et al.* (2010a), donde no se encontró evidencia de que exista una relación entre la densidad de siembra y la tasa instantánea de mortalidad, seguramente debido a que los niveles de oxígeno fueron controlados mediante aireación artificial, ya que se trató de un estudio sobre cultivos intensivos.

El análisis de sensibilidad de la producción indicó consistencia en el modelo al predecir el comportamiento de la mortalidad. La tasa instantánea de mortalidad (z) pasó a ser el factor más importante cuando se incrementó la densidad al pasar del Nivel de manejo 1 al 5. Al incrementarse la densidad, se predijo una menor concentración de oxígeno disuelto y, consiguientemente, una mayor mortalidad, lo que se reflejó en una mayor sensibilidad en la variabilidad de la producción a los cambios de la tasa de mortalidad. El incremento de la densidad también se reflejó en un aumento de la sensibilidad de la producción a los cambios de oxígeno disuelto, por la razón antes expuesta.

Al igual que lo observado para los rendimientos de producción, se observó que los valores máximos de utilidad y de relación beneficio-coste, se obtienen empleando las máximas densidades de siembra y duraciones de cultivo, es decir, empleando el Nivel de manejo 5, para todos los ciclos de producción analizados. Cabe destacar, sin embargo, que a pesar de que en el ciclo Marzo-Junio se obtienen los menores rendimientos de producción, es en dicho ciclo en el que se obtienen los mayores beneficios económicos. Lo anterior obedece a la estacionalidad del precio del camarón, ya que, para los ciclos analizados, es durante junio cuando se presentan mayores precios del camarón en el mercado, caso contrario al ciclo Mayo-Agosto en el que, a pesar de que se obtienen las máximas producciones, los rendimientos económicos son los más bajos, pues los precios del camarón son también los más bajos. De lo anterior se deduce que el uso de las densidades de siembra más altas en el ciclo Mayo-Agosto, parece ser la forma más conveniente para incrementar los rendimientos de producción, a fin de compensar los bajos precios en ese ciclo.

Los resultados también muestran que la variabilidad relativa de la producción y de los indicadores económicos, presentan tendencias similares en todos los ciclos. La variabilidad disminuye conforme se mejora el manejo del Nivel 1 al 4, mientras que con el nivel 5, los coeficientes de variación se incrementan presentando mayor variabilidad de la producción y riesgo económico. Lo anterior obedece a que, si bien con ese nivel se obtienen los mayores valores promedio de la producción y de los beneficios económicos, el incremento en los mismos, al pasar del nivel 4 al 5, no es lo suficientemente grande para compensar el incremento en la variabilidad absoluta de los indicadores. Por lo tanto, de manera general, queda establecido que para el presente estudio, el Nivel de manejo 4 es el que ofrece el menor riesgo desde los puntos de vista productivo y económico.

Estos resultados coinciden con los referidos por Valderrama y Engle (2002) y Sánchez Zazueta y Martínez-Cordero (2009), quienes encontraron que el menor riesgo económico se obtiene con densidades de siembra bajas e intermedias en cultivos semi-intensivos (específicamente, estrategias de producción de 15 postlarvas-m²-21 semanas y 12 postlarvas-m²-19 semanas), en comparación con las estrategias que usan mayores densidades de siembra (20 y 25 postlarvas-m²) y diferentes tiempos de cultivo. Sin embargo, dichos autores mencionan que las mismas estrategias que conducen a minimizar el riesgo también son las que producen las máximas ganancias, lo que contrasta con lo obtenido en el presente trabajo de investigación ya que, como se indicó, las máximas ganancias se obtienen utilizando, en general, las mayores densidades de siembra.

En general, cabe esperar que las estrategias para el manejo del riesgo sean altamente dependientes de las condiciones operativas de cada granja, lo que incluye el tipo de tecnología de cultivo que se emplea. En condiciones de cultivo intensivo del camarón blanco, por ejemplo, Ruiz Velazco *et al.* (2010ab) recomiendan utilizar las máximas densidades de siembra y las máximas duraciones de cultivo (equivalente al nivel de manejo 5 de este estudio) con el fin de obtener los mejores rendimientos de la biomasa y las mayores utilidades y minimizar el riesgo.

Las recomendaciones que pueden establecerse con base en análisis bioeconómicos como los referidos, así como el llevado a cabo en esta investigación, pueden ser directas, cuando un determinado nivel de manejo conduce a minimizar el riesgo, a la vez que a maximizar la expectativa del promedio de las ganancias (como es el caso de la recomendación de Ruiz-Velazco *et al.* 2010ab). No obstante, en otros casos (como en el presente estudio), tales recomendaciones no pueden hacerse porque pueden existir objetivos en conflicto. Es decir, si bien se observa que el menor riesgo se tiene usando el Nivel de manejo 4, puede presentarse la situación en la que un productor prefiera arriesgarse a usar el Nivel de manejo 5 con el fin de incrementar la expectativa promedio de sus ganancias. Tales situaciones conflictivas deben abordarse con metodología específica de la teoría de decisiones, en la que se toma en cuenta la actitud del tomador de decisiones respecto al riesgo (aversión o proclividad), con el fin de construir una función de utilidad que conduzca a tomar una decisión definitiva (Clemen y Reilly, 2014). El empleo de tal metodología, sin embargo, se encuentra fuera del ámbito de presente trabajo de investigación y requiere, además, de la identificación de tomador(es) de decisiones específico(s) y la participación de expertos.

Valderrama y Engle (2002) analizaron tres escenarios de tamaño de granjas semiintensivas de camarón en Honduras y encontraron que existe mayor riesgo económico en granjas de menor tamaño que en las de mayor tamaño, lo que concuerda con los resultados de la presente investigación. La razón fundamental por la que se presenta esta situación obedece al teorema del límite central de la estadística, que establece que la desviación estándar de la distribución del promedio de la utilidad o de la relación beneficio/costo de las muestras (estanques), tiende a disminuir conforme el número de estanques (el tamaño de la muestra) se incrementa. Es decir, en el análisis llevado a cabo en este trabajo, la variabilidad en la producción o en los indicadores económicos que puede ocurrir en algunos estanques, se compensa más fácilmente por la variabilidad que ocurre, en sentido opuesto, en otros estanques cuando hay un mayor número de éstos (40), que cuando hay sólo unos pocos (2).

El análisis de sensibilidad de la utilidad indicó que los parámetros más sensibles en cada uno de los ciclos analizados resultaron ser el precio base del camarón y el peso final de los organismos, los cuales, al combinarse, determinan el precio final del camarón y los

ingresos que se obtienen. Resultados similares los han obtenido Hatch *et al.* (1987), Hernández-Llamas *et al.* (2004) y Sánchez-Zazueta & Martínez-Cordero (2009) quienes encontraron que las variaciones del precio de venta del camarón tuvieron un importante efecto sobre el rendimiento económico de los cultivos.

De acuerdo a lo reportado por FIRA con datos del Departamento de Comercio de los EE. UU., NOAA, National Marine Fisheries Services (FIRA, 2009), el mercado de camarón en México se concentra en 7 productos principales: camarón pacotilla, camarón chico con o sin cabeza, camarón mediano con o sin cabeza y camarón grande con sin cabeza. En el caso del camarón cultivado, se comercializa chico y mediano con cabeza, es decir, no se le da valor agregado pre-cocinándolo o descabezándolo. Además, los precios del camarón registran estacionalidad más de la mitad del año, presentando precios bajos entre Septiembre y Octubre de cada año, debido a que en esa temporada ocurre la captura en las costas del Pacífico, así como las cosechas de las granjas acuícolas. En contraste, se presentan precios altos de Febrero a Mayo, debido al incremento de la demanda por motivo de cuaresma y semana santa. Lo anterior influye en los precios de venta de camarón de acuicultura de tallas medianas y chicas destinadas al mercado interno como se muestra en la Figura 1 de precios de venta de camarón a pie de granja en Nayarit.

Por otra parte, también es sabido que el precio del camarón cultivado se encuentra fuertemente determinado por pérdidas en la producción asociadas a enfermedades, observándose, típicamente, que una menor oferta asociada a esas pérdidas conduce a un incremento de los precios del camarón (Hernández-Llamas *et al.* 2014). La alta sensibilidad de los indicadores económicos al precio de camarón conduce a la necesidad de establecer mecanismos de seguimiento puntual de la evolución de los precios, así como a la construcción de bases de datos adecuadas y más completas, que permitan mejorar la toma de decisiones y el manejo de los cultivos, particularmente en lo relativo a los calendarios de siembra y cosecha de los ciclos de producción.

VII. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el presente trabajo de tesis permiten concluir que el objetivo general establecido para el mismo se ha logrado satisfactoriamente, ya que resultó posible desarrollar un modelo bioeconómico estocástico que permitió el análisis de la variabilidad y el riesgo de la producción y de los indicadores económicos del cultivo semi-intensivo del camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*), así como establecer recomendaciones para su manejo en condiciones representativas del estado de Nayarit.

Asimismo, puede concluirse que la hipótesis establecida para el presente trabajo es aceptable, toda vez que resultó factible establecer relaciones funcionales entre parámetros zootécnicos del cultivo y variables de manejo y de calidad de agua, lo que a su vez facilitó definir esquemas de manejo que permitieron analizar y minimizar el riesgo económico.

VIII. LITERATURA CITADA

- Allen, P., Botsford, L., Schuur, A., and Johnston, W. (1984). Bioeconomics of aquaculture, developments in aquaculture and fisheries science.
- Araneda, M., Pérez, E. P., and Gasca-Leyva, E. (2008). White shrimp *Penaeus vannamei* culture in freshwater at three densities: condition state based on length and weight. *Aquaculture*, 283(1), 13-18.
- Clark, C. W. (1974). Mathematical bioeconomics. In *Mathematical Problems in Biology* (pp. 29-45). Springer Berlin Heidelberg.
- Clement, R., and Reilly, T. (2014). *Making Hard Decisions with Decision Tools: An Introduction to Decision Analysis*. Stamford CT: Cengage. ISBN 0-538-79757-6.
- CESANAY 2016. Producción 2015. Comité Estatal de Sanidad Acuicola de Nayarit, A. C. Disponible en <http://www.cesanay.com>
- CONAPESCA 2016. Anuario Estadístico 2013. Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca . Disponible en <http://www.conapesca.sagarpa.gob.mx>
- Cuenco, M. L. (1989). *Aquaculture Systems Modeling: An introduction with emphasis on warmwater aquaculture* (Vol. 549). WorldFish.
- Estrada-Pérez, M. 2012. Modelo bioeconómico para el análisis de la producción semiintensiva de camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*). Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Nayarit, Posgrado en Ciencias Biológico Agropecuarias. 53 p.
- FAO 2014. El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2014. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, 2014.
- Gonzalez-Romero, M. A., Hernandez-Llamas, A., Ruiz-Velazco, J. M., Plascencia-Cuevas, T. N., and Nieto-Navarro, J. T. (2014). Stochastic bio-economic optimization of pond size for intensive commercial production of whiteleg shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture*, 433, 496-503.
- Hatch, U., Sindelar, S., Rouse, D., and Perez, H. (1987). Demonstrating the Use of Risk Programming for Aquacultural Farm Management. *Journal of the World Aquaculture Society*, 18(4), 260-269.

- Hernandez-Llamas, A., Gonzalez-Becerril, A., Hernandez-Vazquez, S., and Escutia-Zuñiga, S. (2004). Bioeconomic analysis of intensive production of the blue shrimp *Litopenaeus stylirostris* (Stimpson). *Aquaculture Research*, 35(2), 103-111.
- Hernández-Llamas, A., Ruiz-Velazco, J. M., and Gomez-Muñoz, V. M. (2011). A stochastic approach for analysis of the influence of white spot disease, zootechnical parameters, water quality, and management factors on the variability of production of shrimp *Litopenaeus vannamei* cultivated under intensive commercial conditions. *Aquacultural engineering*, 45(2), 66-73.
- Hernandez-Llamas, A., and Zarain-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), 261-268.
- Hernandez-Llamas, A., Cabanillas-Ramos, J., and Magallon-Barajas, F. J. (2014). Estimating impact of white spot disease on economic risk in semi-intensive shrimp farms in Mexico: the case of the State of Sinaloa. *Reviews in Aquaculture*.
- Hopkins, J. S., and Villalón, J. (1992). Synopsis of industrial panel input on shrimp pond management. In *Proceedings of the Special Session on Shrimp Farming* (pp. 138-143). World Aquaculture Society Baton Rouge, Louisiana.
- Leung PS (1994) Bioeconomic modeling in aquaculture after two decades. In: Shang YC, Leung PS, Lee CS, Su MS, Liao IC (eds) Socioeconomics of aquaculture, TungKang Marine Laboratory, Taiwan. Conference proceedings, vol 4, pp 115-137
- Llorente, I., and Luna, L. (2013). The competitive advantages arising from different environmental conditions in seabream, *Sparus aurata*, production in the Mediterranean Sea. *Journal of the World Aquaculture Society*, 44(5), 611-627.
- Llorente, I., and Luna, L. (2015). Bioeconomic modelling in aquaculture: an overview of the literature. *Aquaculture International*, 1-18.
- Moss, K. R., and Moss, S. M. (2004). Effects of artificial substrate and stocking density on the nursery production of pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Journal of the World Aquaculture Society*, 35(4), 536-542.

- Pomeroy, R., Bravo-Ureta, B. E., Solis, D., and Johnston, R. J. (2008). Bioeconomic modelling and salmon aquaculture: an overview of the literature. *International Journal of Environment and Pollution*, 33(4), 485-500.
- Reyes Moreno, J. L., Tellez Castañeda, M., y González Sánchez, J. A. (2009). Situación actual y perspectivas del camarón en México. *FIRA Boletín Informativo. Dirección General Adjunta de Inteligencia Sectorial. Subdirección de Comunicación Institucional. México.*
- Ruiz-Velazco J.M.J. 2010. Modelos bioeconomicos en acuicultura, con énfasis en la camaricultura. Tema de examen predoctoral. Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. 35 p.
- Ruiz-Velazco J.M.J. 2011. Modelo bioeconómico para el análisis de riesgo del cultivo intensivo de camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*). Tesis Doctoral. Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. 168 p.
- Ruiz-Velazco, J. M., Hernández-Llamas, A., Gomez-Muñoz, V. M., and Magallon, F. J. (2010a). Dynamics of intensive production of shrimp *Litopenaeus vannamei* affected by white spot disease. *Aquaculture*, 300(1), 113-119.
- Ruiz-Velazco, J. M., Hernández-Llamas, A., and Gomez-Muñoz, V. M. (2010b). Management of stocking density, pond size, starting time of aeration, and duration of cultivation for intensive commercial production of shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Aquacultural engineering*, 43(3), 114-119.
- Sanchez-Zazueta, E., and Martínez-Cordero, F. J. (2009). Economic risk assessment of a semi-intensive shrimp farm in Sinaloa, Mexico. *Aquaculture Economics & Management*, 13(4), 312-327.
- Sandifer, P. A., Stokes, A. D., Hopkins, J. S., and Smiley, R. A. (1991). Further intensification of pond shrimp culture in South Carolina. *Shrimp culture in North America and the Caribbean. Advances in world aquaculture*, 4, 84-96.
- Seijo, J. C. (2004). Risk of exceeding bioeconomic limit reference points in shrimp aquaculture systems. *Aquaculture Economics & Management*, 8(3-4), 201-212.
- Valderrama, D., and Engle, C. R. (2002). Economic optimization of shrimp farming in Honduras. *Journal of the World Aquaculture Society*, 33(4), 398-409.
- Vose, D. (2008). *Risk analysis: a quantitative guide*. John Wiley & Sons.

- Wyban, J. A., Lee, C. S., Sato, V. T., Sweeney, J. N., and Richards, W. K. (1987). Effect of stocking density on shrimp growth rates in manure-fertilized ponds. *Aquaculture*, 61(1), 23-32.
- Yu, R., and Leung, P. (2006). Optimal partial harvesting schedule for aquaculture operations. *Marine Resource Economics*, 301-315.
- Yu, R., Leung, P., and Bienfang, P. (2009). Modeling partial harvesting in intensive shrimp culture: a network-flow approach. *European Journal of Operational Research*, 193(1), 262-271.

CURRICULUM VITAE

Nombre: Margarita Estrada Pérez.

Lugar y fecha de nacimiento: Tehuantepec, Oaxaca. 11/04/83.

Formación académica:

Institución: Universidad Autónoma de Nayarit.

Nivel de estudios: Licenciatura.

Nombre de la carrera: Licenciatura en Biología.

Fecha de titulación: 14/05/10

Tesis: "Análisis de la producción semiintensiva de una granja comercial de camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*) en San Blas, Nayarit". Aprobada por unanimidad.

Institución: Universidad Autónoma de Nayarit.

Nivel de estudios: Maestría en el Área de Ciencias Pesqueras.

Nombre de la carrera: Posgrado en Ciencias Biológicas Agropecuarias.

Fecha de titulación: 21/11/12

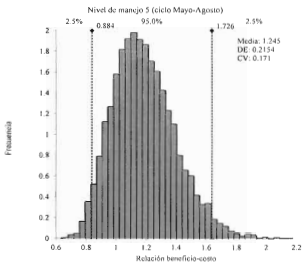
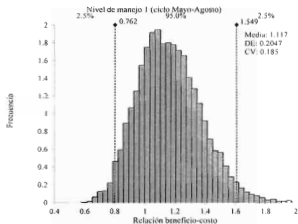
Tesis: "Modelo bioeconómico para el análisis de la producción semiintensiva de camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*)". Aprobada por mención honorífica.

Publicaciones derivadas de la tesis doctoral:

- Stock model and multivariate analysis for prediction of semi-intensive production of shrimp *Litopenaeus vannamei* as a function of water quality and management variables: A stochastic approach.
- A bio-economic approach to analyze the role of alternative seeding-harvesting schedules, water quality, stocking density and duration of cultivation in semi-intensive production of shrimp in Mexico.

Anexo. 1

Distribuciones de probabilidad de
la relación beneficio-costo por ciclo



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAHÍA



SISTEMA DE BIBLIOTECAS

Figura 1.1. Distribuciones de probabilidad de la relación beneficio-coste para el ciclo Mayo-Agosto.

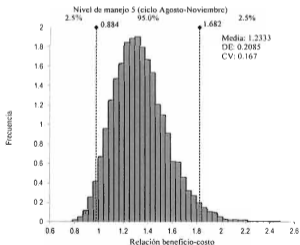
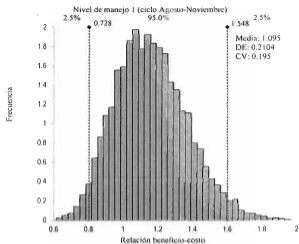


Figura 1.2. Distribuciones de probabilidad de la relación beneficio-costo para el ciclo Agosto-
Noviembre.

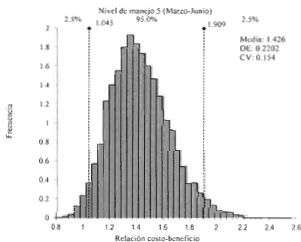
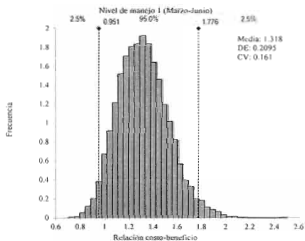


Figura 1.3. Distribuciones de probabilidad de la relación beneficio-costo para el ciclo Marzo-Junio.

Anexo 2.

Distribuciones de probabilidad del
tamaño de granja (2 y 40 estanques) ciclos anuales

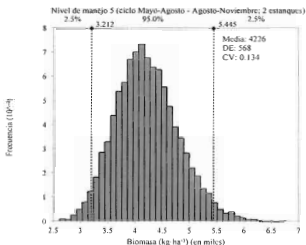
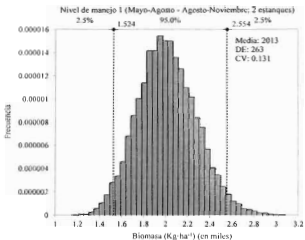


Figura 2.1. Distribución de probabilidad de la producción para el ciclo anual Mayo-Agosto – Agosto-Noviembre que corresponde a una granja de 2 estanques. Se indican intervalos de confianza del 95%.

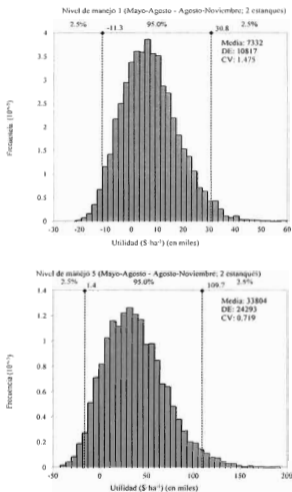


Figura 2.2. Distribución de probabilidad de la utilidad para el ciclo anual Mayo-Agosto - Agosto-Noviembre que corresponde a una granja de 2 estanques. Se indican intervalos de confianza del 95%.

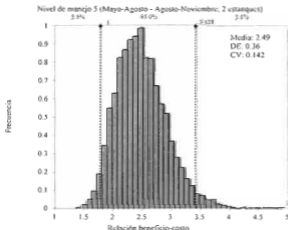
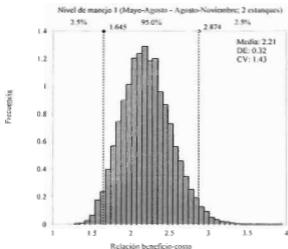


Figura 2.3. Distribución de probabilidad de la relación beneficio-costo para el ciclo anual Mayo-Agosto - Agosto-Noviembre que corresponde a una granja de 2 estanques. Se indican intervalos de confianza del 95%.

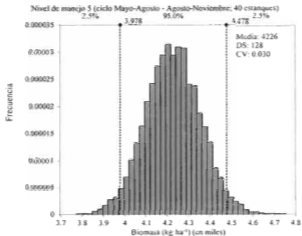
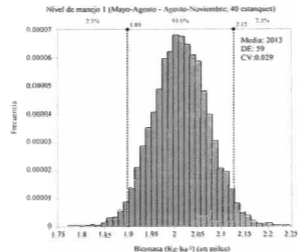


Figura 2.4. Distribución de probabilidad de la producción para el ciclo anual Mayo-Agosto – Agosto-Noviembre que corresponde a una granja de 40 estanques. Se indican intervalos de confianza del 95%.

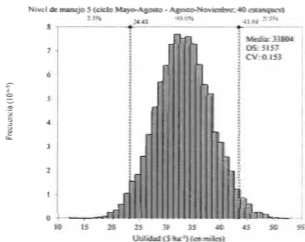
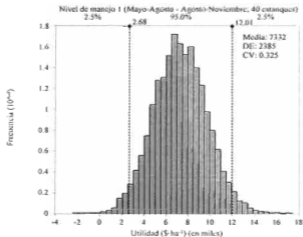


Figura 2.5. Distribución de probabilidad de la utilidad para el ciclo anual Mayo-Agosto - Agosto-Noviembre que corresponde a una granja de 40 estanques. Se indican intervalos de confianza del 95%.

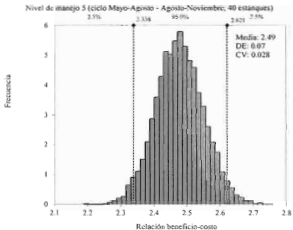
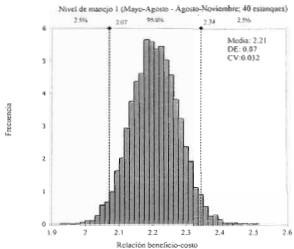


Figura 2.6. Distribución de probabilidad de la relación beneficio-costó para el ciclo anual Mayo-Agosto - Agosto-Noviembre que corresponde a una granja de 40 estanques. Se indican intervalos de confianza del 95%.

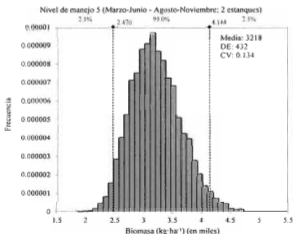
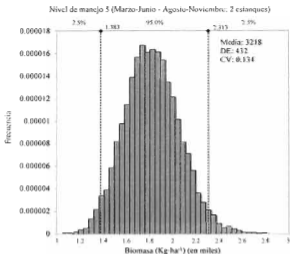


Figura 2.7. Distribución de probabilidad de la producción para el ciclo anual Marzo-Junio – Agosto-Noviembre que corresponde a una granja de 2 estanques. Se indican intervalos de confianza del 95%.

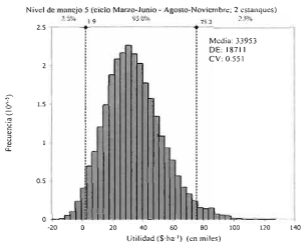
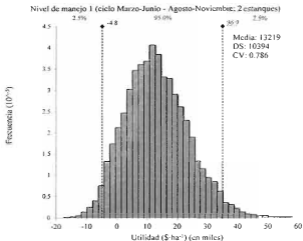


Figura 2.8. Distribución de probabilidad de la utilidad para el ciclo anual Marzo-Junio – Agosto-Noviembre que corresponde a una granja de 2 estanques. Se indican intervalos de confianza del 95%.

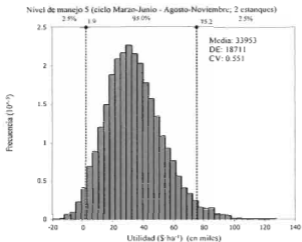
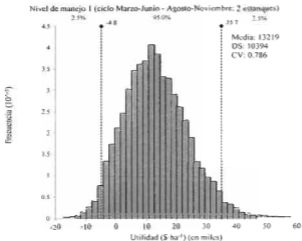


Figura 2.8. Distribución de probabilidad de la utilidad para el ciclo anual Marzo-Junio - Agosto-Noviembre que corresponde a una granja de 2 estanques. Se indican intervalos de confianza del 95%.

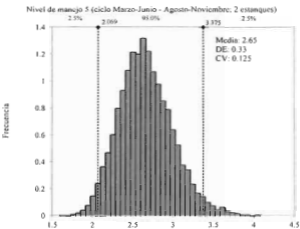
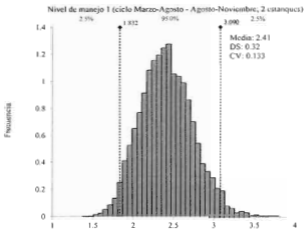


Figura 2.9. Distribución de probabilidad de la relación beneficio-costo para el ciclo anual Marzo-Junio - Agosto-Noviembre que corresponde a una granja de 2 estanques. Se indican intervalos de confianza del 95%.

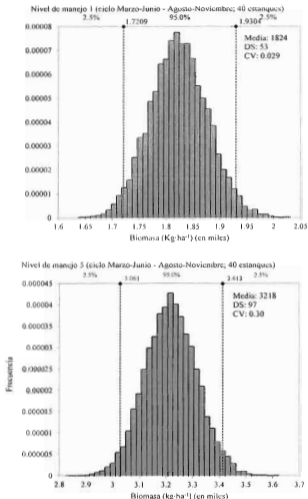


Figura 2.10. Distribución de probabilidad de la producción para el ciclo anual Marzo-Junio – Agosto-Noviembre que corresponde a una granja de 40 estanques. Se indican intervalos de confianza del 95%.

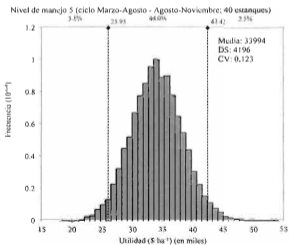
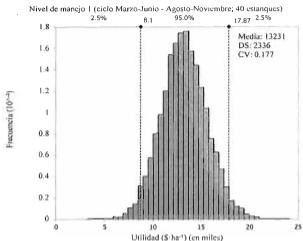


Figura 2.11. Distribución de probabilidad de la utilidad para el ciclo anual Marzo-Junio – Agosto-Noviembre que corresponde a una granja de 40 estanques. Se indican intervalos de confianza del 95%.

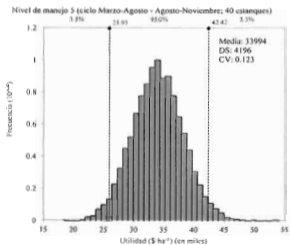
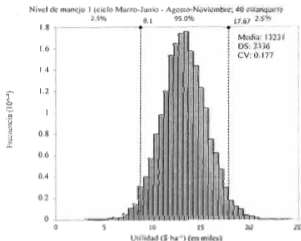


Figura 2.11. Distribución de probabilidad de la utilidad para el ciclo anual Marzo-Junio – Agosto-Noviembre que corresponde a una granja de 40 estanques. Se indican intervalos de confianza del 95%.

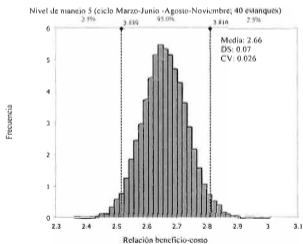
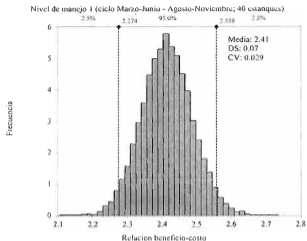


Figura 2.12. Distribución de probabilidad de la relación beneficio-costo para el ciclo anual Marzo-Junio – Agosto-Noviembre que corresponde a una granja de 40 estanques. Se indican intervalos de confianza del 95%.

Anexo 3.

Publicaciones derivadas de la tesis doctoral



Stock model and multivariate analysis for prediction of semi-intensive production of shrimp *Litopenaeus vannamei* as a function of water quality and management variables: A stochastic approach

Pier M.J. Ruiz-Velazco^{a,b}, Margarita Estrada-Pérez^b, Alfredo Hernández-Llamas^c,
José T. Nieto-Navarro^{a,b}, Emilio Peña-Messina^{a,b}

^a Centro Nacional de Investigación Programa, Universidad Autónoma de Nayarit, Bahía de Mouquén, Km. 12, Carravento a las Grutas, San Blas, Nayarit 62746, México

^b Programa de Posgrado en Ciencias Biológicas Agropecuarias (CBAF), Universidad Autónoma de Nayarit, Cd. de la Cultura Ananda Nemo (h), Tepic, Nayarit 625, México

^c Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), Instituto Politécnico Nacional 195, Col. Playa Palo de San. Río, La Paz, B.C.S. 23076, México

ARTICLE INFO

Article history:

Received 2 October 2012

Accepted 22 April 2013

Keywords:

Multivariate analysis

Litopenaeus vannamei

Stochastic modeling

ABSTRACT

We use a stock model, multivariate analysis, and a stochastic approach to predict shrimp production under commercial semi-intensive conditions as a function of water quality and alternative management schemes. Larger final weight of shrimp was obtained when temperature and duration of cultivation increased. Increases in the mortality of shrimp were associated with lower dissolved oxygen levels, shorter durations of cultivation, and higher stocking densities. There was a direct relationship between temperature and stocking density, while dissolved oxygen was inversely related with stocking density and duration of cultivation. Stocking density was inversely correlated with pond size and directly correlated with duration of cultivation. The lowest yields were predicted, using the lowest stocking densities and shortest duration of cultivation; the highest yields were predicted using the highest stocking densities and longest duration of cultivation. Yields increased from 938 to 2326 kg ha⁻¹ (spring production cycle), and from 982 to 1907 kg ha⁻¹ (summer production cycle). Improved management resulted in increased shrimp production and diminished variability. Sensitivity analysis indicates that final weight of shrimp and stocking density were the major factors affecting variability of shrimp yields. We conclude that stock models, multivariate analysis, and a stochastic approach constitute an effective method for studying the relationships between production parameters, water quality, and management variables, and, for analyzing variability of semi-intensive shrimp production.

© 2013 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Cultivation of shrimp is one of the main aquacultural activities in Mexico. During 2008, shrimp production reached 130,000 t, 66% of aquaculture production (CONAPESCA, 2010). More than 90% of shrimp production comes from the States of Sonora, Sinaloa, and Nayarit in northwestern Mexico, where semi-intensive cultivation systems are the most common.

Shrimp *Litopenaeus vannamei* is the main species used in shrimp cultivation in Mexico and worldwide (FAO, 2011). The role of water quality and management variables have on growth and survival parameters of *L. vannamei*, when cultivated under

semi-intensive conditions has been analyzed using experimental data (Griffin et al., 1981; Parry et al., 1983). There are no antecedents of investigations studying the role that such variables have on growth and survival parameters of *L. vannamei* using stock models and multivariate analysis; nor are there antecedents of studies specifically dealing with the stochastic variability of shrimp yields in semi-intensive commercial farms.

In this study, we follow the methodological approach presented by Ruiz-Velazco et al. (2010a,b) who established relationships between the parameters of a stock model and water quality and management variables for predicting shrimp production under intensive cultivation. We used the stock model of Ruiz-Velazco et al. (2010a) and a multivariate analysis to predict shrimp production under semi-intensive conditions as a function of water quality and alternative management schemes. We also studied the stochastic variability of shrimp yields under alternative management schemes. In this case, we determined the management

Corresponding author.

E-mail addresses: marcelo@uic.edu.mx (P.M.J. Ruiz-Velazco),

jtnieto@uic.edu.mx (J.T. Nieto-Navarro).

scheme that maximized production and minimized variability. The model was calibrated with a database from semi-intensive commercial farms in the State of Nayarit.

2. Materials and methods

2.1. Data survey

A database of operations in 2009 and 2010 were used, where 31 operation units were 31 ponds selected after confirming that biometric data, water quality, and management variables were adequately monitored, and that there was no evidence that the shrimp were affected by disease. For each pond, the following variables were analyzed: mean individual body weight of shrimp (g), number of survivors, biomass yield (kg ha^{-1}), dissolved oxygen (mg l^{-1}), water temperature ($^{\circ}\text{C}$), salinity (ppt), initial stocking density of postlarvae (PLM^{-2}), pond size (ha), and duration of cultivation (weeks).

Farmers conducted estimates of shrimp growth using 0.01 and 0.001 g precision balances (Ohaus, Pine Brook, NJ). Dissolved oxygen in pond water temperature were monitored daily at 0600 h and 18:00 h, using an oxymeter (Model 55, YSI, Yellow Springs, OH), salinity were measured weekly with a refractometer (Aqua fauna Biomarine, Hawthorne, CA).

2.2. Stock model

The stock model presented by Ruiz-Velazco et al. (2010a) was used. The model predicts shrimp biomass as a function of time as the product of individual mean weight of shrimp and surviving shrimp population. Individual mean weight of shrimp was calculated, using:

$$w_n = w_0 + [w_f - w_0] \left[\frac{(1 - k^n)}{(1 - k^h)} \right] \quad (1)$$

where w_n is the shrimp weight (g) after n time events have passed, w_0 is the initial weight (g), w_f is the final weight (g), k is a growth coefficient (dimensionless), and h is the number of time events that have passed until harvesting time. The equation applies when the time intervals are equally spaced and the initial time is zero, that is when the number of time events analyzed is numerically equivalent to elapsed time. For estimating the parameters, there must be a single estimate of mean weight for each time. Since the model is nonlinear in its parameters, residual sum of squares was used for fitting (Ratkowsky, 1990; Quinn and Keough, 2002). Growth parameters were estimated using nonlinear regression procedures available in Statistica 6.0 (StatSoft, Tulsa, OK).

The exponential equation used to calculate the surviving shrimp population:

$$n_t = n_0 e^{-\alpha t} \quad (2)$$

where n_0 is the initial population and α is the instantaneous mortality rate (weeks^{-1}), which was estimated from Eq. (2) as:

$$\alpha = \frac{\ln(n_0/n_t)}{t} \quad (3)$$

where n_t is the surviving population at harvest.

2.3. Multivariate analysis

Relationships between parameters of the stock model and water quality and management variables were analyzed using multiple linear equations in the form:

$$Q = a_0 + a_1 T + a_2 DO + a_3 SD + a_4 PS + a_5 DC + \epsilon \quad (4)$$

Table 1
Range and mean values of water quality and management variables used for multivariate analysis.

Variable	Production cycle					
	Spring			Summer		
	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	20.9	32.2	21.3	20.5	31.6	28.1
Dissolved oxygen (mg l^{-1})	3.0	8.5	4.8	1.4	4.8	4.1
Stocking density (PLM^{-2})	13.0	37.0	19.8	14.0	25.0	20.1
Pond size (ha)	1.0	2.3	1.7	1.1	1.0	2.5
Duration of cultivation (weeks)	9.5	13.9	11.0	9.0	14.0	12.0

where Q represents any of the stock model parameters, w_f , k , 0–4, depending on pond water temperature (T), dissolved oxygen (DO), initial stocking density (SD), pond size (PS), duration of cultivation (DC), a_0 – a_5 are regression coefficients, and ϵ is the statistical error. Salinity was not considered for analysis after ANOVA showed that it did not vary significantly among ponds ($P > 0.05$).

To predict stochastic values of the stock model parameters, 10 values in Eq. (1) were predicted, using normal distributions fitted to residual values resulting from regression analysis. When no significant regressions were established, normal distributions were directly fitted to values of the stock model parameters. The Shapiro–Wilk test was used to test for normality of the residual values (Zar, 2010).

The relationship of temperature and dissolved oxygen with management variables were in turn determined using:

$$W = a_0 + a_1 SD + a_2 PS + a_3 DC + \epsilon \quad (5)$$

where W is either temperature or dissolved oxygen. Stochastic elements in these relationships were incorporated by predicting ϵ values following the same method used to predict stochastic values of the stock model parameters, as explained above.

Eq. (4) was fitted as follows: (1) parameters of Eq. (1) were estimated separately for every case (pond); (2) datasets consisting of parameters estimated in step (1) and the corresponding water quality and management variables were integrated for each case; (3) the 31 datasets integrated in the previous step were used together to conduct multiple regression analysis. The mean values of water quality variables during the cultivation period were used for analysis. The range of these mean values, together with the range of management variables is presented in Table 1. Additionally, correlation analyses between water quality and management variables were conducted. Eq. (5) was fitted similarly to Eq. (4), existing that the dependent variables were not the parameters of Eq. (1), but the water quality variables.

2.4. Parsimony and predictive capability of the models

Parsimony and predictive capability of the models were evaluated in two steps. Step 1 uses a stepwise procedure for selecting predictor variables in the multivariate analysis. The backward stepwise regression procedure in Stat 10 (StatCorp, College Station, TX) was used with $P < 0.05$ to accept or reject predictors. This regression procedure deals automatically with collinearity, according to the methods described in Rencher (2002).

Following Model (1974), Step 2 tests whether the proposed multiple linear regression models were adequate and whether most of the significant factors affecting the parameters of the stock model were included. For Step 2, the coefficients estimated from multiple regression analyses were used to calculate the expected biomass at harvest for each pond; this was compared with the corresponding observed yield in the database. Following this, a simple linear regression analysis between observed and expected shrimp biomass was performed, setting the intercept to zero. After

determining that the regression slope did not differ significantly from 1 (*t*-test), an equivalence test (Chow and Liu, 2004) was used to protect against falsely not rejecting the corresponding null hypothesis (Type-II statistical error; Zar, 2010; Hauck and Anderson, 1986). The residuals resulting from this simple linear regression were tested for normality, using the Shapiro-Wilk test. Equivalence was tested with a tolerance error of 5% (Garrett, 1997).

2.5. Management schemes

Shrimp production was calculated corresponding to alternative management schemes, using the stock model, the multiple regression equations, and the corresponding stochastic elements. Alternative management schemes were defined by determining, in a first step, the values of the management variables that minimized (the worst scheme) and maximized (the best scheme) mean production and, in a second step, using intermediate values of the management variables that produced intermediate levels of production.

Monte Carlo simulation (10,000 iterations) was used to predict stochastic variability of shrimp production corresponding to the alternative management schemes. Variability in production was measured using the coefficient of variation (CV; Muir, 2006):

$$CV = \frac{\text{standard deviation}}{\text{mean}} \quad (6)$$

Variability in production was standardized to kg ha⁻¹.

2.6. Sensitivity analysis

Sensitivity of shrimp production to stochastic variability of technical parameters and water quality variables was determined with multivariate stepwise regression, where the values of the regression coefficients indicate the sensitivity of production to inputs. Sensitivity analysis was also used to determine the contribution that management variables have on the variability of shrimp production. For this, the minimum and maximum values of the management variables in the database were used in the calculations (Table 1).

2. Software

Normality tests and regression and correlation analyses were conducted, using Statistica 6.0 and Stata 10.0, setting significance at $\alpha < 0.05$. The stock model was programmed in worksheets of Excel 2007 and the stochastic elements were programmed using @Risk 5.5. The genetic algorithm available in @Risk Optimizer 5.5 was used to determine the worst and best management schemes. For this, the minimum and maximum values of the decision variables (stocking density and duration of cultivation) were used as restrictions, and the objective function was to maximize and minimize mean production for the worst and best schemes, respectively. Procedures available in @Risk 5.5 were used for simulation and sensitivity analysis.

3. Results

From regression ANOVA, there were significant results when fitting parameters of the growth model (Eq. (1)). The model adequately fitted the different types of growth curves (Fig. 1) described in the 31 cases contained in the database.

Multivariate analysis indicated that larger final weight of shrimp was obtained when temperature and duration of cultivation increased (Table 2), increases in the instantaneous mortality rate were associated with lower dissolved oxygen, higher stocking densities, and shorter durations of cultivation (Table 2). The growth

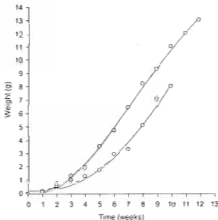


Fig. 1. Sampled growth curves used Eq. (1). The two typical types of growth curves observed in the database are presented, regardless of the cultivation cycle.

Table 2

Multiple regression models relating final weight of shrimp and instantaneous mortality rate to temperature, duration of cultivation, dissolved oxygen, and stocking density.

Model	F
$W_f = -25.2468 + 0.0678T + 0.52320C$	0.0032
$Z = 0.0235 - 0.0001027 + 0.001459D - 0.00340C$	0.0018

W_f , final weight (g); Z , instantaneous mortality rate (weeks⁻¹); T , temperature (°C); C , duration of cultivation (weeks); D , dissolved oxygen (mg l⁻¹); S , stocking density (PL m⁻²).

coefficient (k) was not significantly associated with any water quality and management variables ($P > 0.05$).

Multivariate analysis also indicated that there was a direct relationship between temperature and stocking density, while dissolved oxygen was inversely related to stocking density and duration of cultivation (Table 3). Correlation analysis confirmed these findings (Table 4). Additionally, stocking density was inversely correlated with pond size, and directly correlated with duration of cultivation (Table 4).

There was a significant linear relationship between production of shrimp biomass in the database and production calculated by the stock model, using the equations listed in Tables 2 and 3 (Fig. 2). The coefficient from the linear regression did not differ significantly from 1 and equivalence between the coefficient and 1 was determined, meaning that there were not statistical differences between observed and predicted shrimp biomass. Residual analysis did not indicate directional deviations from the fitted straight line and no

Table 3

Multiple regression models relating pond water temperature and dissolved oxygen to stocking density and duration of cultivation.

Model	P
$T = 30.36 + 0.0493C$	0.011
$DO = 6.50 - 0.02640D - 0.0175DC$	0.007

T , temperature (°C); S , stocking density (PL m⁻²); DO , dissolved oxygen (mg l⁻¹); DC , duration of cultivation (weeks).

Table 4
Values of the significant coefficients of correlation between water quality and management variables.

	T	DO	SD	PS	DC
$r_{T,DC}$			0.447		
$r_{DO,DC}$	0.447		-0.437		
$r_{SD,DC}$				-0.468	
$r_{PS,DC}$					-0.427
$r_{T,SD}$		-0.405			

T, temperature (°C); DO, dissolved oxygen (mg L^{-1}); SD, stocking density (PL m^{-2}); PS, pond size (ha); DC, duration of cultivation (weeks).

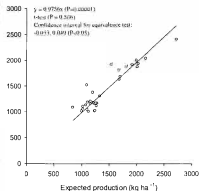


Fig. 2. Relationship between observed and predicted production, using the stock model and the multiple regression models.

vidence was found that the residual values were not normally distributed. We concluded that: (1) The functional relationships used were correct; (2) Most of the significant factors affecting biomass yields were included; and (3) There was no need for predictors other than those considered in the multivariate analysis (Eqs. (4) and (5)).

Using the stock and regression models resulted in the lowest predicted production when stocking densities were low and the duration of cultivation was short; highest production was predicted when stocking densities were high and the duration of cultivation was long (Fig. 3). Yields increased from 938 to 2326 kg ha^{-1} (spring production cycle; Fig. 3a), and from 982 to 1907 kg ha^{-1} (summer production cycle; Fig. 3b). The management schemes resulting in the lowest and highest production, together with the schemes for intermediate production are predicted (Table 5).

Table 5
Values of the management variables used to define the alternative management schemes.

Management strategy	Production cycle			
	Spring		Summer	
	DC	SD	DC	SD
Lowest	9.5	13	9	14
	10.37	19	10.25	16.75
	11.25	25	11.5	19.5
Highest	12.12	31	12.75	22.25
	13	37	14	25

DC, duration of cultivation (weeks); SD, stocking density (PL m^{-2}).

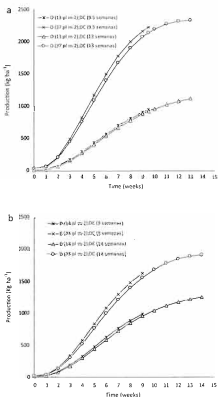


Fig. 3. Predicted shrimp production for alternative management schemes of stocking density (SD) and duration of cultivation (DC). (a) Spring cycle and (b) summer cycle.

The mean values and standard deviation of the normal distribution obtained after fitting the error distribution (ϵ) in Eqs. (4) and (5) are presented in Table 6. No significant relationship was found between the growth coefficient (k) and water quality and

Table 6
Values of mean and standard deviation of the normal distribution obtained when fitting the distribution to residual values (ϵ) in Eqs. (4) and (5). The distribution was directly fitted to k values contained in the database, after no significant regression was obtained.

	Q			W		
	w_1	σ	δ	σ	σ	DO
Mean	0	0	0.8296	0	0	0
SD	1.389	0.0001	0.03534	0.61	0	0.6

Q, stock model parameters; W, water quality variables; w_1 , final weight (g); σ , instantaneous mortality rate (week^{-1}); δ , growth coefficient (dimensionless); F, temperature (°C); DO, dissolved oxygen (mg L^{-1}).

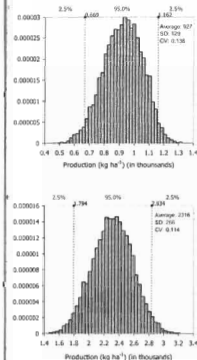


Fig. 4. Output probability distributions of shrimp production for the spring cycle: (a) Management strategy 1 (worse) and (b) management strategy 2 (best). See Table 5. SD is standard deviation, CV is the coefficient of variation.

management variables; the normal distribution was directly fitted to k values. Using these values of mean and standard deviation resulted in output probability distributions of shrimp production for spring (Fig. 4) and summer (Fig. 5) production cycles under the worst and best management schemes presented in Table 5. Mean production increased and the coefficient of variation diminished, as consequence of improving management in both production cycles. The stochastic variability of shrimp production predicted for the alternative management schemes are presented in Fig. 6. Mean production increased and the coefficient of variation diminished, as management progressively improved.

Sensitivity analysis indicated that final weight of shrimp (w_f) and stocking density (SD) were the most sensitive zootechnical parameter and management variable influencing the variability in shrimp production (Table 7 and Fig. 7).

4. Discussion

The modeling approach allowed us to analyze and satisfactorily predict the semi-intensive production of *L. vannamei*, as evidenced from alternative management schemes and seeding schedules.

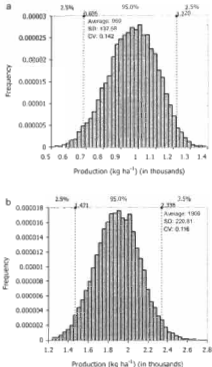


Fig. 5. Output probability distributions of shrimp production for the summer cycle: (a) Management strategy 1 (worse) and (b) management strategy 2 (best). See Table 5. SD is the standard deviation, CV is the coefficient of variation.

Table 7
Sensitivity analysis of shrimp production to stochastic variation of parameters of the stock model and water quality variables. Higher absolute values of response coefficient (RC) indicates higher sensitivity.

Production cycle	Spring		Summer	
	Parameter or variable	RC	Parameter or variable	RC
Worst strategy	w_f	0.678	w_f	0.9279
	T	0.293	T	0.164
	DO	0.282	DO	0.265
	K	0.090	h	0.000
	Z	0.000	z	0.000
	Best strategy	w_f	0.807	w_f
DO		0.474	DO	0.506
T		0.232	T	0.150
K		0.080	h	0.000
Z		0.000	z	0.000

w_f , final weight (g); DO, dissolved oxygen (mg L^{-1}); T, temperature ($^{\circ}\text{C}$); K, growth coefficient (dimensionless); L, instantaneous mortality rate (week^{-1}).

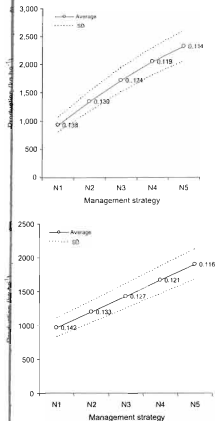


Fig. 6. Shrimp production as a function of management strategies, as defined in Fig. 5. Dashed lines indicate \pm SD and the plotted values correspond to the coefficient of variation.

Multiple regression models are considered predictive, rather than explanatory tools, yet the established functional relationships are in general agreement with reports by other authors regarding the correlations between growth and survival parameters and water quality and management factors (Sadeh et al., 1986; Jackson and Wing, 1994; Wannamaker and Rice, 2000; Eby and Crowder, 2002; Videmana and Engle, 2002; Ruiz-Velazco et al., 2010a,b). This indicates consistency and reliability in the predictability of the models. Moreover, it was not necessary to study predictors other than those stated (Eq. (4)), after finding that the functional relationships we used were correct, that there was linear relationships between dependent and independent variables, and that there was no evidence of exclusion of significant factors affecting shrimp production.

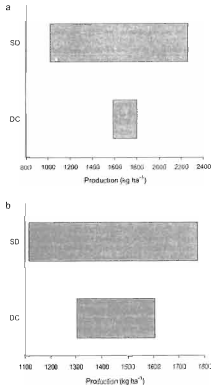


Fig. 7. Sensitivity analysis of shrimp production to water quality and management variables for alternative seeding schedules: (a) Spring cycle and (b) summer cycle. The wider the bar, the higher the sensitivity. SD is the stocking density and DC is the duration of cultivation.

Maximum shrimp production was consistently predicted by using the highest stocking densities and longest cultivation periods. This coincides with the results obtained by Ruiz-Velazco et al. (2010a,b), when they analyzed intensive production of *L. vannamei* when affected by white spot disease or under normal operating conditions. Sánchez-Zazueta and Martínez-Cordero (2009) analyzed semi-intensive production of *L. vannamei* from the economic perspective and concluded that schemes with lower stocking densities and intermediate cultivation times generated the highest probabilities of achieving superior economic performance. A bio-economic analysis using the stock and multiple regression models presented here should be conducted to determine whether the maximum economic profits could be achieved by using the stocking densities and durations of cultivation that maximized shrimp biomass production.

Stocking density was the most important management variable determining the variability of shrimp production. Sensitivity

analyses conducted by Ruiz-Velazco et al. (2010a) and Hernández-Lizarraga et al. (2011) have also demonstrated that stocking density is the most important variable influencing intensive commercial production of *L. vannamei* under normal operating conditions or when affected by white spot disease. The influence that stocking density has on production parameters of shrimp has been extensively studied. A negative influence of stocking density on growth and survival has been generally reported. Yet, we did not find evidence that shrimp growth (final weight) was affected by cultivation density, although survival was negatively affected, as in the case reported by Valderama and Engle (2002).

A survey of 23 extensive, semi-intensive and intensive farms, Higgins and Viliaton (1992) found that the relationship between final shrimp size and stocking density was barely discernible. Vasilier (1991) analyzed final size of *L. vannamei* for stocking densities ranging from 20 to 200 PLm⁻² and did not find a tendency of shrimp size to decline as stocking density increased. We are inclined to think that expertise in cultivation management is an important factor that compensates for the potential negative effects of high stocking densities on growth of shrimp.

In our study, higher mortality was associated with increased stocking density. More adverse cultivation conditions are expected in ponds stocked at high densities, resulting in increased mortality and availability of feed for the surviving shrimp. This helps to explain the final size of shrimp in ponds stocked at high densities, which is not different from the final size in ponds stocked at lower densities. Increases in growth rate follow self-thinning of population of the blue shrimp *Litopenaeus stylirostris* (Parry et al., 1983; Hernández-Lizarraga et al., 1993). Kautsky et al. (2009) propose that high stocking densities is a risk factor for transmission of shrimp diseases. We did not find evidence that differences in mortality in ponds stocked at different densities could be attributed to disease outbreaks.

Sensitivity analysis indicated that final weight of shrimp is the most important zootechnical parameter influencing variability in production. As expected, final shrimp size was directly related to the duration of cultivation. On the other hand, there is no a priori reason to assume that the duration of cultivation could affect the instantaneous mortality rate, yet we found that higher mortality was associated with shorter periods of cultivation. This may be a consequence of increased relative mortality during early stages of cultivation. Detailed population monitoring is necessary to study this.

Small ponds have been recommended for improving shrimp cultivation; it is generally acknowledged that they can be stocked at higher densities, compared with large ponds (Islam et al., 2005; Madsen et al., 2005; Ruiz-Velazco et al., 2010a,b). We did not find evidence that pond size affected growth and mortality of shrimp, yet because of the high stocking densities, the smaller ponds had higher production.

The role of dissolved oxygen on carrying capacity of ponds and shrimp production has been discussed, particularly for intensive production using artificial aeration (Hopkins et al., 1991; Ruiz-Velazco et al., 2010a). Water exchange is the main control of dissolved oxygen in semi-intensive systems and little is known about the relationships between stocking density, dissolved oxygen and carrying capacity. Using our models, we determined and quantified the relationships between mortality rates, dissolved oxygen, and stocking density. Apparently, there is a causal relationship: high stocking densities – low dissolved oxygen – high mortality. Studies on the carrying capacities of alternative sizes of semi-intensive ponds are needed.

It is well established that increasing pond temperature enhances shrimp growth (Sadeh et al., 1986; Ruiz-Velazco et al., 2010a). We confirmed this relation, but there was no evidence that mortality was influenced by temperature. Temperature was directly

correlated with stocking density. We attribute this to the higher stocking densities in small ponds which, in turn, tend to be warmer than large ponds, as suggested by a close-to-significant negative correlation coefficient between temperature and pond size ($P=0.10$).

We observed that lower dissolved oxygen occurred when high stocking densities and long durations of cultivation were used. This is expected to occur since increasing both management factors result in both, higher shrimp biomass and oxygen demand by shrimp. Accumulation of organic matter in ponds may result in higher oxygen consumption (Madsen et al., 2005). Increased organic matter in ponds where long durations of cultivations were used may also be a factor contributing to explain our results.

The inverse correlation we observed between stocking density and pond size is a consequence of the preference of farmers to stock small ponds at higher stocking densities, compared with large ponds. On the other hand, our results indicate that longer durations of cultivation were needed when high stocking densities were used. This is a consequence of the time required by shrimp to reach harvest size at high densities.

From our results, improved management resulted in increased production and diminished variability. There is no a priori reason to assume that management practices leading to increased production should necessarily produce less variability; however, we found that good management practices produced both benefits. This result is consistent with the findings of Hernández-Lizarraga et al. (2011) when they analyzed the variability of shrimp production in intensive commercial farms. Here, we demonstrate the influence of alternative management strategies on variability of semi-intensive shrimp production. Studies with a bio-economic approach for optimal management of risk are necessary.

We conclude that using stock models, multivariate analysis, and a stochastic approach are an effective approach for studying the relationships between production parameters and water quality and management variables and analyzing the variability of semi-intensive shrimp production. The approach can be used for modeling production of other aquaculture species when suitable databases are available.

Acknowledgements

The authors are grateful to the shrimp farmers in the State of Nayarit for their cooperation, especially Encarnación Torres García. Ira Fogel of CIBNOR provided valuable editorial services. M.J.P. was a recipient of a graduate fellowship from Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología of Mexico.

References

- Chow, S.C., Liu, J.P., 2004. Design and Analysis of Clinical Trials: Concepts and Methodologies. Vol. 01 John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.
- CONAPESCA (Comisión Nacional de Pesca y Acuicultura), 2010. Anuario Estadístico de Acuicultura y Pesca 2008. <http://www.conapescapn.gob.mx>.
- Eby, L.A., Crowder, L.B., 2002. Program-based habitat suitability indexes as the Great Lakes. Final user-dependent index with National Institute of Environmental and Human Health, Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 23, 952–965.
- FAO (Food and Agricultural Organization of the United Nations), 2010. El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2010. In: <http://www.fao.org/fishery>.
- Garber, S.A., 1997. Use of statistical tests of equivalence to compare treatments on glass pathology. *Psychopharmacology* 87, 232–239.
- Griffith, W.L., Hanson, J.S., Brick, R.W., Johns, M.A., 1981. Stocking density and growth of channel catfish in a large outdoor pond. *Journal of the World Aquaculture Society* 12, 99–100.
- Hauck, W.W., Anderson, S., 1986. A process for the overpacking and overpacking in general studies. *Statistics in Medicine* 5, 911–919.
- Hernández-Lizarraga, A., Hernández-Lizarraga, J.L., González-Carbayo, M., Magalhães-Barajas, F.J., 1993. Growth and survival response of shrimp, *Litopenaeus stylirostris*, to artificial pond feed and stocking density as culture ponds. *Aquaculture and Fishery Management* 24, 57–60.

- Rodríguez-Llamas, A., Ruiz-Velazco, J.M.J., Gómez-Muñoz, V.M., 2011. A practical approach for analysis of the influence of white spot disease, stocking rate, ammonia, water quality, and management factors on the variability of production of shrimp (penaeus vannamei) cultivated under extensive (extensive) conditions. *Agricultural Engineering* 43, 66–73.
- Hogg, J.S., Stokes, A.D., Rowley, C.L., Sandifer, P.A., 1991. The relationship between feeding rate, pond/ha, and expected shrimp yield and expected disease in intensive shrimp ponds. *Aquacultural Engineering* 10, 281–290.
- Hogg, J.S., Villalón, J., 1992. Symptom of bacterial gillnet effect on shrimp pond management. In: *Wuhan J. (ed.) Proceedings of the Special Session on Shrimp Farming*. World Aquaculture Society, Baton Rouge, Louisiana, pp. 138–143.
- Ma, M.S., Mubarek, A., Wahab, M.A., Kamal, A.H.M., Dewan, S., 2009. Production of extensive shrimp of shrimp aquaculture in coastal ponds of different water depth different management regimes. *Aquaculture International* 17, 409–416.
- Saifan, C.J., Wang, Y.G., 1998. Modeling growth rate of *Penaeus monodon* in ponds extensively managed ponds: effects of temperature, pond age and stocking density. *Aquaculture Research* 29, 27–36.
- Kirby, N., Ruzibakki, P., Tedengren, M., Threl, M., 2006. Farmer's perspective of management of disease in shrimp pond farming. *Aquaculture* 161, 145–151.
- Mohant, 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, 501–510.
- Magill, 2006. *Applied Matrix Computation, Best Practice Analysis, Forecasting of Optimization Techniques*. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.
- Par, K., Griffin, W.L., Johns, M.A., Lawrence, A.L., 1983. A preliminary economic analysis of water quality strategies for pond shrimp culture. *Journal of the World Aquaculture Society* 14, 40–43.
- Proff, R.W., 1974. *Shrimp Production and Shrimp Farming*. FAO, Rome, Italy.
- Quinn, G.P., Keough, M.J., 2002. *Experimental Design and Data Analysis for the Behavioral Sciences*. Cambridge University Press, London, UK.
- Rakovsky, D.A., 1990. *Handbook of Statistical Concepts*. Sage, Thousand Oaks, New York, NY.
- Recher, A.A., 2002. *Methods of Multivariate Analysis*. 2nd ed. Springer, London, Wiley & Sons.
- Ruiz-Velazco, J.M.J., Fernández-Llamas, A., Gómez-Muñoz, V.M., 2010a. Management of stocking density, pond age, stocking time of ammonia, and duration of cultivation for extensive production of shrimp (*Penaeus vannamei*). *Agricultural Engineering* 41, 114–119.
- Ruiz-Velazco, J.M.J., Rodríguez-Llamas, A., Gómez-Muñoz, V.M., Magallán, F.J., 2010b. Dynamics of ammonia production in shrimp ponds under extensive culture under intensive management. *Aquaculture* 286, 113–119.
- Saifan, A., Parfy, C.B., Griffin, W., Lawrence, A., 1985. Shrimp growth rate and survival from temperature variation in growth—dynamics of intensive growth. *Texas Journal of Science* 35, 109–122.
- Sánchez-Zamora, E., Martínez-Cabrera, F.J., 2005. Economic risk assessment of a semi-intensive shrimp farm in Galicia, Mexico. *Aquaculture, Economics and Management* 11, 113–127.
- Sandifer, P.A., 1994. Further investigation of pond shrimp culture: shrimp culture in South Carolina. In: *Shrimp Culture in North America and the Caribbean*. Advances in World Aquaculture. The World Aquaculture Society, Baton Rouge, LA, pp. 84–93.
- Valdivia, D., Engel, C.R., 2002. Separate optimization of shrimp farming in Honduras. *Journal of the World Aquaculture Society* 33, 190–199.
- Watanabe, C.M., Rice, J.A., 2000. Effect of nitrogen on composition and behavior of selected rotifers (*Brachionus calyciflorus*) from the freshwater pond culture. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 267, 181–187.
- Zar, J.H., 2010. *Biostatistical Analysis*, 5th ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.

Research Article

A bio-economic approach to analyze the role of alternative seeding-harvesting schedules, water quality, stocking density and duration of cultivation in semi-intensive production of shrimp in Mexico

Margarita Estrada-Pérez¹, Javier M.J. Ruiz-Velazco²
Alfredo Hernandez-Llamas³ & Iram Zavala-Leal²

¹Programa de Posgrado en Ciencias Biológico Agropecuarias (CBAP), Universidad Autónoma de Nayarit
Cd. de La Cultura Amado Nervo s/n, Tepic, Nayarit 63255, Mexico

²Escuela Nacional de Ingeniería Pesquera, Universidad Autónoma de Nayarit
Bahía de Matanchen Km 12, Carretera a los Cocos, San Blas, Nayarit 63740, Mexico

³Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), Instituto Politécnico Nacional
195 Col. Playa Palo de Sta. Rita Sur, La Paz, B. C. S. 23096, Mexico

Corresponding author: Alfredo Hernandez-Llamas (ahllamas04@cibnor.mx)

ABSTRACT. We used a bio-economic model to analyze the role that alternative seeding-harvesting schedules, temperature, dissolved oxygen, stocking density, and duration of cultivation play in the economic performance of semi-intensive shrimp cultivation in Mexico. The highest production was predicted for the May-August schedule (1130-2300 kg ha⁻¹), while the lowest yields were obtained for the March-June schedule (949-1300 kg ha⁻¹). The highest net revenues were projected for the August-November schedule (US\$354-1444 ha⁻¹), while the lowest was projected for the May-August schedule (US\$330-923 ha⁻¹). The highest annual net revenues were predicted for the combination of the March-June and August-November schedules (US\$1432-2562 ha⁻¹). Sensitivity analysis indicated temperature and dissolved oxygen were the most important factors determining net revenues in March-June schedule. For the May-August and August-November schedules, stocking density was the most important factor. Duration of cultivation was the least sensitive variable. Break-even production analysis confirmed that the combination of the March-June and August-November schedules were more efficient from an economic perspective. We recommend test some ponds with higher stocking density in the March-June and August-November schedules, and in the latter case, seeding in June or July rather than August.

Keywords: bio-economics, shrimp, seeding, harvesting, water quality, aquaculture.

Enfoque bio-económico para analizar el papel de programas de siembra-cosecha alternativos, calidad del agua, densidad de siembra y duración del cultivo en la producción semi-intensiva de camarón en México

RESUMEN. Se utilizó un modelo bio-económico para analizar el papel de programas de siembra-cosecha alternativos, temperatura, oxígeno disuelto, densidad de siembra y duración del cultivo en el desempeño económico del cultivo semi-intensivo de camarón en México. La mayor producción se predijo para el programa mayo-agosto (1130-2300 kg ha⁻¹), mientras que los rendimientos más bajos se obtuvieron con el programa marzo-junio (949-1300 kg ha⁻¹). Los mayores ingresos netos se proyectaron para el programa agosto-noviembre (US\$354-1444 ha⁻¹), mientras que los menores se proyectaron para el programa mayo-agosto (US\$330-923 ha⁻¹). El ingreso neto anual más alto se predijo para la combinación de los programas marzo-junio y agosto-noviembre (US\$1432-2562 ha⁻¹). Un análisis de sensibilidad indicó que la temperatura y oxígeno disuelto fueron los factores más importantes en determinar los ingresos netos en el programa marzo-junio. Para los programas de mayo-agosto y agosto-noviembre la densidad de siembra fue el factor más importante. La duración del cultivo fue la variable menos sensible. El análisis de la producción en el equilibrio confirmó que la combinación de los

programas marzo-junio y agosto-noviembre fue más eficiente desde una perspectiva económica. Se recomienda ensayar ataques con mayores densidades de siembra en los programas de marzo-junio y agosto-noviembre, y en el último caso, siembra en junio o julio, en vez de agosto.

Palabras clave: bio-economía, camarón, siembra, cosecha, calidad del agua, acuicultura.

INTRODUCTION

During 2012, shrimp farms in Mexico produced 100,000 ton (CONAPESCA, 2013). About 95% of production comes from northwestern Mexico, where semi-intensive cultivation of whiteleg shrimp *Litopenaeus setiferus* is most common. Several studies have been published on bio-economics of shrimp cultivation; however, there are few antecedents in the literature of bio-economic analysis of semi-intensive production of shrimp in Mexico. Using a bio-economic model, Hernández-Llamas & Magallón-Barajas (1991) conducted a sensitivity analysis to determine the most convenient way to improve cultivation of shrimp. Sánchez-Zaneta & Martínez-Cordero (2009) used a bio-economic approach to evaluate the economic of farm management adjustments as a response to disease risks.

Previously, we conducted a study of semi-intensive production of shrimp in northwestern Mexico and determined that cultivation programs that seeded in spring resulted in higher production of shrimp biomass compared with production using a cultivation program that seeded in summer (Ruiz-Velazco *et al.*, 2013). Given the seasonality of shrimp market prices and the variability of costs among the alternative cultivation programs, the question arose whether higher production obtained when seeding in spring would also result in better economic performance, compared with seeding in summer. In this study, we use a bio-economic model to analyze the role that alternative seeding-harvesting schedules play in determining economic performance of semi-intensive shrimp cultivation in Mexico. In addition, we analyze the relative importance of management variables (stocking density and duration of cultivation) and water quality variables (temperature and dissolved oxygen) from a bio-economic perspective. This management and water quality variables are considered critical for semi-intensive production of shrimp (Hernández-Llamas & Villarreal-Colmeneros, 1999). The bio-economic model was calibrated from databases of farms operating in the State of Nayarit under normal conditions, that is, they were not affected by disease.

MATERIALS AND METHODS

Stock model and feed conversion ratio model

A stock model was used to predict shrimp biomass as the product of individual mean weight of shrimp and the number of surviving shrimp at different harvesting times.

In a previous study (Ruiz-Velazco *et al.*, 2013), we developed and presented the stock model together with the relationships between its parameters and water quality and management variables. The corresponding equations are presented in Table 1. Growth and survival equations were used to predict w_t and n_t in the stock model, and their parameters were made dependent on pond water temperature, dissolved oxygen, stocking density and duration of cultivation using 31 cases (ponds) and multiple linear equations. The same modeling approach was used for the feed conversion ratio model. The mean values of temperature and dissolved oxygen recorded throughout the cultivation periods were used for analysis.

Seeding-harvesting schedules

Three seeding-harvesting schedules were analyzed: March-June, May-August, and August-November. The values of water quality and management variables that correspond to the alternative schedules are presented in Table 2.

Economic model

Net revenue (nr) was calculated in US\$ as a function of time: $nr_t = I_t - C_t$, where income (I_t) is the product of shrimp biomass from the stock model and shrimp market price and C_t are the costs considered for analysis, namely:

$$C_t = cfeed + cfer + ce + cPL + cpp + cl + cmu + cm + ch$$

where $cfeed$ is the cost of feed, $cfer$ is the cost of fertilizer, ce is the cost of energy, cPL is the cost of post-larvae, cpp is the cost of pond preparation, cl is the cost of labor, cmu is the cost of maintenance, cm is miscellaneous costs and ch is the cost of harvesting.

Farmed shrimp in Mexico is typically sold according to a farm-gate base price, and the actual sale

Table 1. Equations and functional dependence on water quality and management variables Ruiz-Velazco *et al.* (2013) used for the stock and feed conversion ratio models.

Equation	Functional dependence on water quality and management variables
$w_t = w_0 + (w_f - w_0) [(1 - k)^t / (1 - k^h)]^t$	$w_t = -25.24 + 0.96 T + 0.53 DC$
where, w_0 = shrimp weight after t time events have passed, w_f = initial weight, w_t = final weight, k = growth coefficient, h = time events that have passed until harvesting time	where, T = pond water temperature, DC = duration of cultivation
$n_t = n_0 e^{-\lambda t}$	$z = 0.0916 - 0.0081 DO + 0.0010 D - 0.0034 DC$
where, n_t = surviving shrimp at time t , n_0 = initial population, λ = mortality rate	where, DO = dissolved oxygen, D = stocking density
$FCR_t = a + bt$	$a = 1.49 - 0.031 T$
where, FCR = feed conversion ratio and a and b = regression coefficients	

Table 2. Range values of water quality and management variables corresponding to the alternative production programs.

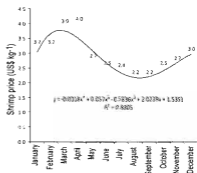
Variable	Production program					
	March-June		May-August		August-November	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
Temperature (°C)	30.04	32.2	31.8	32.1	30.5	32.6
Dissolved oxygen (mg L ⁻¹)	3.73	6.5	3.6	4.2	3.8	4.8
Stocking density (postlarvae m ⁻²)	13	17	16	37	14	25
Duration of cultivation (weeks)	9.5	12	9.5	13	9	14

price is calculated by adding, to the base price, US\$ 0.074 for every gram corresponding to the mean individual weight of shrimp. For example, if the base price is US\$2.22 kg⁻¹ and the mean weight of shrimp is 15 g, the sale price is US\$3.7 kg⁻¹. Shrimp price was predicted on a monthly basis from January through December, using a fourth order polynomial (Fig. 1). The estimates of costs analyzed are presented in Table 3.

Break-even production (bep) was calculated according to Parkin (1996): $bep = c_f / (i - c_v)$, where c_f are fixed costs, i is the income per kilogram of produced shrimp and c_v are the variable costs needed to produce a km of shrimp.

Management schemes

In a previous work (Ruiz-Velazco *et al.*, 2013), we determined the combinations of stocking density and duration of cultivation that minimize and maximize production of shrimp biomass in the seeding-harvesting schedules. The lowest stocking density and the shortest duration of cultivation minimize production, whereas the highest stocking density and longest duration of cul-

**Figure 1.** Seasonal variability of shrimp prices and polynomial curve fitted for prediction.

tivation maximize production. Intermediate values of the management variables were used to define complementary management schemes, and the corresponding

Table 3. Costs considered for analysis.

Cost	US\$
Postlarvae (\$/thousand)	4.62
Feed (\$ kg ⁻¹)	0.92
Fertilizers (\$ kg ⁻¹)	0.92
Energy (\$ kWh ⁻¹)	0.20
Pond preparation (\$ ha ⁻¹ yr ⁻¹)	115.38
Labour (\$ ha ⁻¹ yr ⁻¹)	2,352.00
Maintenance (\$ ha ⁻¹ yr ⁻¹)	481.15
Miscellaneous (\$ ha ⁻¹ yr ⁻¹)	157.31
Harvesting (\$ shrimp kg ⁻¹)	0.15

production was calculated. We use a similar approach to determine if the lowest and highest net revenues would be obtained using the combinations of values of the management variables that minimized and maximized production. The combination of values for the management variables corresponding to the three schedules and management schemes are presented in Table 4.

Software and sensitivity analysis

As described in Ruiz-Velazco *et al.* (2013), the multiple linear regression procedure available in Stata 13 (Stata Corp, College Station, TX) was used to fit the equations that allowed predicting parameters of the stock model as a function of water quality and management variables. According to the methods described in Rencher (2002), this is a regression procedure dealing automatically with multicollinearity; tests for violation of linear regression assumptions available in Stata 13 indicated normality and homoscedasticity in the data.

Sensitivity of net revenues to changes in the values of the water quality and management variables was determined using the range of values of the variables recorded in the database. This analysis allowed us to determine the contribution, that is, the importance that each variable has on economic output. The bio-economic model was programmed using worksheets of Excel 2007, and sensitivity analysis was conducted with procedures available in @Risk 5.5 Industrial (Palisade, Ithaca, NY).

RESULTS

Predicted shrimp production increased from management scheme 1 through management scheme 5 in all the seeding-harvesting schedules (Fig. 2). Higher yields were predicted for the May-August schedule (1,130-2,300 kg ha⁻¹) and lower yields were predicted for the March-June schedule (949-1,300 kg ha⁻¹).

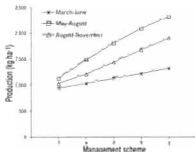


Figure 2. Shrimp production calculated for alternative management schemes and cultivation schedules.

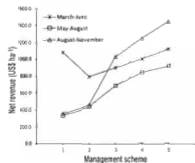


Figure 3. Net revenues calculated for alternative management schemes and three cultivation schedules.

Net revenues varied with the schedules and management schemes (Fig. 3). For March-June, revenues varied from US\$1,078 ha⁻¹ (scheme 1) to US\$1,118 ha⁻¹ (scheme 5); for May-August revenues varied from US\$330 ha⁻¹ (scheme 1) to US\$923 ha⁻¹ (scheme 5); for August-November, revenues varied from US\$354 ha⁻¹ (scheme 1) to US\$1,444 ha⁻¹ (scheme 5).

Annual net revenues from the combination of production schedules varied (Fig. 4). For the combination of March-June and August-November, net revenues varied from US\$1,432 ha⁻¹ (scheme 1) to US\$2,562 ha⁻¹ (scheme 5). For the combination of May-August and August-November net revenues varied from US\$684 ha⁻¹ (scheme 1) to US\$2,367 ha⁻¹

Table 4. Values of the management variables used to define the management schemes for the alternative cultivation programs.

Management schemes	Cultivation program					
	March-June		May-August		August-November	
	Stocking density (postlarvae m ⁻²)	Duration of cultivation (weeks)	Stocking density (postlarvae m ⁻²)	Duration of cultivation (weeks)	Stocking density (postlarvae m ⁻²)	Duration of cultivation (weeks)
1	13	9.5	16	9.5	14	9
2	14	10.125	21.25	10.375	16.75	10.25
3	15	10.75	26.5	11.25	19.5	11.5
4	16	11.375	31.75	12.125	22.25	12.75
5	17	12	37	13	25	14

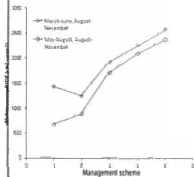


Figure 4. Net revenues calculated for alternative management schemes and combinations of cultivation schedules.

(scheme 5). The differences in net revenue when using schemes 1 and 5 represent increases of 246.0% for the first combination and 78.9% for the second one.

Sensitivity analysis indicated that temperature and dissolved oxygen were the most influential factors determining net revenues in the March-June schedule (Fig. 5). Stocking density was the most influential factor in the May-August and August-November schedules. Duration of cultivation was the least sensitive variable in the schedules.

Break-even production analysis showed that the combination of the March-June and August-November schedules was more efficient, from the economic point of view, than the combination of May-August and August-November. For the first combination, and depending on the management scheme, it was necessary to produce 543-647 kg ha⁻¹ yr⁻¹ to obtain a break-even condition, whereas for the second combination it was necessary to produce 766-936 kg

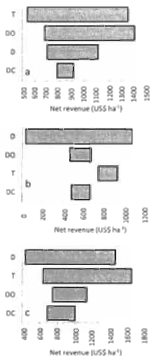


Figure 5. Sensitivity of net revenues to temperature (T), dissolved oxygen (DO), stocking density (D), and duration of cultivation (DC) for three schedules: a) March-June, b) May-August, and c) August-November. Wider bars indicate higher sensitivity.

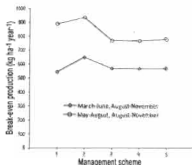


Figure 6. Break-even production calculated for alternative management schemes and combinations of cultivation programs.

ha⁻¹ yr⁻¹ (Fig. 6). This means that it was necessary to use at least 17.6%-28.8% (first combination) and 18.3%-41.1% (second combination) of the total production capacity to obtain a break-even condition.

DISCUSSION

The highest net revenues were obtained for the August-November schedule. Using this schedule, together with the March-June schedule resulted in the highest annual net revenues. The May-August schedule yielded the highest biomass production of shrimp, although it also produced the lowest net revenues, indicating that economic performance of the seeding-harvesting schedules was strongly influenced by the seasonal variability of shrimp prices.

The importance of shrimp price cannot be overemphasized. Previous analyses show that it is a major factor determining economic outcome of semi-intensive and intensive cultivation of shrimp (Hernandez-Llamas & Magallón-Barajas, 1991; Hernandez-Llamas & Zarain-Herzberg, 2011; Hernandez-Llamas *et al.*, 2013). In this study, net revenues rose as stocking density and duration of cultivation increased from management scheme 1 to scheme 5, with the exception of scheme 1 of the March-June schedule. In this case, the use of the shortest cultivation period simulated harvesting in May, when shrimp prices are still relatively high, resulting in net revenue similar to that obtained when using the best scheme 5. The best economic performance occurred for the August-November schedule, when shrimp prices tend to rise (September to November). The May-August schedule

had the highest stocking densities and produced the highest shrimp biomass; however, it produced the poorest economic output. This was a consequence of low shrimp prices in August (lowest during the year). The relevance of shrimp price for designing and scheduling cultivation programs calls for implementing detailed databases of shrimp prices and accounting for changes in price on a weekly, rather than a monthly basis.

Sensitivity analysis indicated the relevance of water quality and management variables in determining net revenues. The relevance of the variables is dependent on: (1) the role they play within the structure of the bio-economic model, and (2) variability they show in the database, which reflects what historically has occurred at the farms that were studied. Stocking density was most important, except in the March-June schedule when the range in stocking density was narrow (13 to 17 postlarvae m⁻²). In contrast, the range of dissolved oxygen for this production schedule is wider, compared to the two other schedules, resulting in dissolved oxygen as the most important factor during March-June. Duration of cultivation was consistently the least sensitive variable in all cases, indicating that farmers prefer to keep this management factor within narrow limits.

Ruiz-Velazco (2011) calculated that at least 43% of total production capacity should be used to obtain a break-even situation for intensive production of shrimp *L. vannamei*. Hernandez-Llamas *et al.* (2004) calculated that 53% of the total production capacity was necessary for a break-even situation for the intensive production of the blue shrimp *Litopenaeus stylirostris*. For semi-intensive production of whiteleg shrimp *L. vannamei*, we calculated a lower percentage than the amount previously reported, indicating possible operation and economic advantages of semi-intensive cultivation of whiteleg shrimp.

We found that the highest net revenues were obtained by using extended durations of cultivation and the highest stocking densities (management scheme 5). This agrees with reports on shrimp cultivation under intensive conditions, in floating cages and ponds (Hernandez-Llamas & Zarain-Herzberg 2011; Hernandez-Llamas *et al.*, 2013).

CONCLUSION

From an economic perspective, we conclude that the combination of the March-June and August-November schedules is preferable to the combination of May-August and August-November. We recommend testing some ponds with higher stocking density during the March-June and August-November schedules and, for

the latter schedule, seeding earlier in June or July rather than August.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to the shrimp farmers in the State of Nayarit for their cooperation, especially the firm of Encarnación Torres García. Ira Fogel of CTBNOR provided valuable editorial services. M.J.P. was a recipient of a graduate fellowship from Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México.

REFERENCES

- Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca (CONA-PESCA). 2013. Anuario estadístico de acuicultura y pesca. [http://www.conapesca.sagarpa.gob.mx/wb/cona/cona_anuario_estadistico_de_pesca]. Reviewed: 12 May 2014.
- Hernandez-Llamas, A. & F.J. Magallón-Barajas. 1991. Análisis bioeconómico del cultivo del camarón azul (*Penaeus stylirostris*) con fertilizantes orgánicos e inorgánicos y alimentación balanceada. Invest. Mar. CICIMAR, 6: 267-281.
- Hernandez-Llamas, A. & H. Villarreal-Colmenares. 1999. TEMA: a software reference to shrimp *Litopenaeus vannamei* farming practices. Aquacult. Econ. Manage., 3(3): 267-280.
- Hernandez-Llamas, A. & M. Zarain-Hertzberg, 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 zotechnical parameters. Aquaculture, 314: 61-268.
- Hernandez-Llamas, A., J.M.J. Ruiz-Velazco & V.M. Gómez-Muñoz. 2013. Economic risk associated with white spot disease and stochastic variability in economic, zotechnical and water quality parameters for intensive production of *Litopenaeus vannamei*. Rev. Aquacult., 5: 121-131.
- Hernandez-Llamas, A., A. Gonzalez-Becerril, S. Hernandez-Vazquez & S. Escutia-Zuñiga. 2004. Bioeconomic analysis of intensive production of the blue shrimp *Litopenaeus stylirostris* (Simpson). Aquacult. Res., 35: 103-111.
- Parkin, M. 1996. Microeconomía. Addison-Wesley Iberoamericana, México DF, 217 pp.
- Rencher, A.A. 2002. Methods of multivariate analysis. John Wiley & Sons, New York, 2: 708 pp.
- Ruiz-Velazco, J.M.J. 2011. Modelo bioeconómico para el análisis del riesgo del cultivo intensivo de camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*). Doctoral Thesis. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Instituto Politécnico Nacional, La Paz, B.C.S., 127 pp.
- Ruiz-Velazco, J.M.J., M. Estrada-Pérez, A. Hernandez-Llamas, J.T. Nieto-Navarro & E. Peña-Messina. 2013. Stock model and multivariate analysis for prediction of semi-intensive production of shrimp *Litopenaeus vannamei* as a function of water quality and management variables: a stochastic approach. Aquacult. Eng., 56: 34-41.
- Sánchez-Zazueta, E. & F.J. Martínez-Cordero. 2009. Economic risk assessment of a semi-intensive shrimp farm in Sinaloa, Mexico. Aquacult. Econ. Manage., 13: 312-327.

Received: 17 May 2014; Accepted: 24 December 2014