



INSTITUTO POLÍTECNICO NACIONAL
CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS



MODELO BIOECONÓMICO PARA EL ANÁLISIS
DE RIESGO DEL CULTIVO INTENSIVO DE
CAMARÓN BLANCO (*Litopenaeus vannamei*)

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR
EN
CIENCIAS MARINAS

PRESENTA

JAVIER MARCIAL DE JESÚS RUIZ VELAZCO ARCE

LA PAZ, B. C. S. MAYO DE 2011

DEDICATORIAS

A Dios: Por permitirme llegar con bien al final de la conclusión de mi tesis doctoral

A mi Esposa Verónica: quien valerosa asumió las consecuencias de mi ausencia, motivándome para alcanzar mis objetivos y apoyándome en todo momento.

A mis hijas Anahí y Karla Verónica: quienes me apoyaron en todo momento y soportaron mi ausencia durante todo el camino de mi formación. Gracias por comprenderme.

A mi Madre: por brindarme siempre palabras de aliento, aún en las adversidades.

A mis amigos: Por su apoyo, gracias

AGRADECIMIENTOS

A las autoridades de la Universidad Autónoma de Nayarit por las facilidades brindadas para mi formación, especialmente al exrector M en C. Omar Wicab Gutiérrez y al rector C.P. Juan López Salazar.

A Porfirio López Lugo, Secretario General del SPAUAN, excelente amigo y gestor incansable de la problemática sindical de profesores en la Universidad.

Al CONACYT y PROMEP instituciones que financiaron en sus distintos rubros mi estancia en el Programa de Doctorado.

Al Programa PIFI del IPN por los apoyos recibidos.

Al Dr. Alfredo Hernández Llamas, por ser un excelente guía durante mi formación, por la entrega, dedicación y compromiso que mostró en todo momento, a cualquier hora del día y de la semana. A quien le aprendí no solo lo relacionado con la bioeconomía, sino también la práctica de la ciencia y a resolver problemas relacionados con ella.

Al Dr. Víctor M. Gómez Muñoz, por los consejos, el compromiso y respaldo que demostró durante mi formación. Excelente formador con principios intachables. Por todo el tiempo invertido y sus comentarios atinados. Por la responsabilidad que siempre mostró en los momentos determinantes.

Al Dr. Germán Ponce Díaz, por sus aportes atinados. Por ser un extraordinario ser humano y asesor comprometido, por el apoyo decidido para cumplir las metas de mi formación.

A la Dra. Silvie Dumas, por las críticas certeras y aportes recibidos durante mi formación, por su participación como asesora de mi tesis, muchas gracias.

Al Dr. Sergio Martínez Díaz. Excelente asesor, quien mostró siempre disposición para atender mis dudas. Por los valiosos aportes y comentarios recibidos durante mi estancia en el CICIMAR.

Al Dr. Agustín Hernández Herrera, a quien le debo no solo el techo durante mi estancia, sino también sus consejos y disponibilidad cuando fue necesario.

Al Dr. Rafael González Duarte, por su apoyo como alumno y como representante de alumnos, quien mostró disponibilidad para resolver los problemas inherentes a los estudiantes.

A todos mis compañeros, quienes mostraron lealtad y compromiso en el tiempo de estancia en el CICIMAR y durante mi gestión como representante de alumnos, a todos ustedes, gracias por su apoyo.



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., siendo las 12:00 horas del día 25 del mes de Marzo del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICIMAR para examinar la tesis titulada:

MODELO BIOECONÓMICO PARA EL ANÁLISIS DE RIESGO DEL CULTIVO INTENSIVO DE CAMARÓN BLANCO (Litopenaeus vannamei)

Presentada por el alumno:

RUIZ VELAZCO
Apellido paterno

ARCE
materno

JAVIER MARCIAL DE JESÚS
nombre(s)

Con registro: A 0 8 0 0 8 9

Aspirante de:

DOCTORADO EN CIENCIAS MARINAS

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

LA COMISION REVISORA

Directores de Tesis

DR. VÍCTOR MANUEL GÓMEZ MUÑOZ
Director de Tesis

DR. ALFREDO HERNÁNDEZ LLAMAS
Director de Tesis

DR. SERGIO FRANCISCO MARTÍNEZ DÍAZ

DRA. SILVIE DUMAS

DR. GERMÁN PONCE DÍAZ

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

DR. RAFAEL CERVANTES DUARTE



IPN
CICIMAR
DIRECCION



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., el día 22 del mes Marzo del año 2011
el (la) que suscribe MC. JAVIER MARCIAL DE JESÚS RUIZ VELAZCO ARCE alumno(a) del
Programa de DOCTORADO EN CIENCIAS MARINAS
con número de registro A080089 adscrito al CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS
manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de tesis, bajo la dirección de:
DR. VÍCTOR MANUEL GÓMEZ MUÑOZ y DR. ALFREDO HERNÁNDEZ LLAMAS
y cede los derechos del trabajo titulado:

"MODELO BIOECONÓMICO PARA EL ANÁLISIS DE RIESGO DEL CULTIVO
INTENSIVO DE CAMARÓN BLANCO (*Litopenaeus vannamei*)"

al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Éste, puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: vgomez@ipn.mx - ahllamas04@cibnor.mx - marcialdejesus@hotmail.com
Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.


MC. JAVIER MARCIAL DE JESÚS RUIZ VELAZCO ARCE
nombre y firma

Índice	Página
Glosario de términos	i
Glosario de símbolos y abreviaturas	iii
Lista de figuras	v
Lista de tablas	ix
Resumen	xi
Abstract	xii
I. Introducción	1
1.1. Antecedentes	3
1.2. Justificación	8
1.3. Objetivos	9
II. Materiales y métodos	10
2.1. Base de datos	10
2.2. Modelo bioeconómico	11
2.2.1. Submodelo biológico	11
2.2.2. Submodelos tecnológicos	13
2.2.3. Submodelos de variables ambientales y de manejo	14
2.2.3.1. Análisis de la producción biológica para casos con operaciones normales	16
2.2.3.2. Análisis de la producción biológica para casos con mancha blanca	16
2.2.4. Submodelo económico	17
2.3. Variabilidad de la producción	21
2.4. Análisis de riesgo económico	25
2.5. Análisis de sensibilidad	25
2.6. Validación del modelo bioeconómico	26

III. Resultados	27
3.1. Modelo de stock y análisis de la producción biológica para casos con operaciones normales	27
3.2. Modelo de stock y análisis de la producción biológica para casos con mancha blanca	31
3.3 Submodelos tecnológicos	40
3.3.1. Submodelo de variables ambientales y de manejo para el factor conversión alimenticia para operaciones normales	40
3.3.2. Submodelo de variables ambientales y de manejo para el factor conversión alimenticia cuando la enfermedad estuvo presente	41
3.3.3. Submodelo de variables ambientales y de manejo para la aireación para operaciones normales	41
3.3.3. Submodelo de variables ambientales y de manejo para la aireación cuando la enfermedad estuvo presente	42
3.4. Análisis de la variabilidad de la producción	44
3.5. Análisis de sensibilidad en la producción	50
3.6. Análisis de riesgo económico (utilidad)	53
3.6.1. Análisis de riesgo después de impuestos (utilidad)	59
3.7. Análisis de sensibilidad de la utilidad	61
3.8. Análisis de riesgo económico (relación beneficio-costos)	64
3.8.1. Análisis de riesgo después de impuestos (relación beneficio-costos)	70
3.9. Análisis de sensibilidad de la relación beneficio-costos	72
3.10. Producción en el punto de equilibrio (PPE) bajo el esquema de mejor manejo para un granja de 50 ha	75
IV. Discusión	79
V. Conclusiones	93
VI. Bibliografía	94
Anexo 1. Propuesta de modificación del modelo de crecimiento de Hernández Llamas y Ratkowsky (2004)	102

Anexo 2. Distribución de frecuencias estacionales de la producción	105
Anexo 3. Distribución de frecuencias estacionales de la utilidad	108
Anexo 4. Distribución de frecuencias estacionales de la relación beneficio-costos.	111
Anexo 5. Distribución de frecuencias de la producción anual	113
Anexo 6. Distribución de frecuencias de la utilidad anual	118
Anexo 7. Distribución de probabilidades de la relación beneficio-costos anual	123
Anexo 8. Publicaciones derivadas de la tesis doctoral	128

Glosario de términos

Acido sulfhídrico: En disolución acuosa, es un ácido inorgánico de fórmula H_2S . Este gas, más pesado que el aire, es inflamable, incoloro, tóxico y su olor es el de la materia orgánica en descomposición, como los huevos podridos. A pesar de ello, desempeña en el organismo del ser humano funciones esenciales.

Aireación: Proceso mecánico que proporciona oxígeno adicional a un sistema acuícola.

Análisis de sensibilidad: Simulaciones estocásticas de escenarios mediante los cuales se busca observar los cambios en los resultados del modelo.

Costo variable: Es aquel que se modifica de acuerdo a variaciones del volumen de producción.

Costo fijo: Costo que no varía ante cambios en el nivel de producción.

Costos financieros: Gastos correspondientes a los intereses de las obligaciones financieras.

Depreciación: Reducción del valor contable o de mercado de un activo. Representa un gasto no erogable, por lo que no afecta el flujo de fondos de la empresa.

Economías de escala: Proceso mediante el cual los costos unitarios de producción disminuyen al aumentar la cantidad de unidades producidas.

Enfermedad de la mancha blanca: Es causada por un virus WSSV de doble hélice que provoca en los camarones infectados manchas blanca de 0.5 a 2.0 mm de diámetro en el interior de la superficie de la cutícula, resultado de depósitos anormales de sales de calcio.

Estrés oxidativo: Es causado por un desequilibrio entre la producción de especies reactivas del oxígeno y la capacidad de un sistema biológico de detoxificar rápidamente los reactivos intermedios o reparar el daño resultante.

Factor de conversión alimenticia: razón entre el peso del alimento balanceado proporcionado y el peso del camarón producido.

Hipoxia Es una enfermedad en el cual el cuerpo por completo (hipoxia generalizada), o una región del cuerpo (hipoxia de tejido), se ve privado del suministro adecuado de oxígeno.

Indicador económico: Estadística o cifra que da una idea aproximada de la rentabilidad de una empresa.

Ingreso: Ingreso proveniente de las operaciones normales de una empresa.

Método Monte Carlo o Simulación Monte Carlo: Se agrupan una serie de procedimientos que analizan distribuciones de variables aleatorias usando simulación de números aleatorios. El algoritmo de Simulación Monte Carlo Crudo o Puro está fundamentado en la generación de números aleatorios por el método de Transformación Inversa, el cual se basa en las distribuciones acumuladas de frecuencias:

Punto de equilibrio: Es el punto en donde los ingresos igualan a los costos.

Respuesta inmune: Actuación integrada de un gran número de mecanismos heterogéneos de defensa contra sustancias y agentes extraños.

Simulación. Es el proceso de experimentación numérica con un modelo diseñado previamente de un sistema real, con la finalidad de comprender su comportamiento

Tasa impositiva: Tasa que se aplica para el pago de impuestos.

Glosario de símbolos y abreviaturas

b_t	Biomasa en el tiempo
w_t	Peso individual de los organismos en el tiempo
n_t	Número de organismos sobrevivientes al tiempo t .
w_i	Peso inicial
w_f	Peso final
k	Se refiere a la velocidad a la cual el peso cambia de su valor inicial a su valor final
c	Tiempo de duración del cultivo
n_0	Número de individuos al momento de la siembra
z	Tasa instantánea de mortalidad.
t_w	Tiempo en que se presenta la mortalidad por la enfermedad
m	Porcentaje de organismos que mueren por la enfermedad.
FCA_t	Factor de conversión alimenticia en función del tiempo
a_F	Pendiente del FCA
b_F	Intercepto del FCA
i_F	Incremento del factor de conversión alimenticia inmediatamente después de que ocurre la mortalidad por la enfermedad
AT_t	Aireación total en el tiempo
A_0	Aireación inicial
A_F	Aireación final
d	Parámetro de ajuste de la aireación para operaciones normales
b	Parámetro de ajuste de la aireación para operaciones normales
a_A	Pendiente del modelo de aireación para casos con enfermedades
b_A	Intercepto del modelo de aireación para casos con enfermedades
Q	Valor genérico que adoptan los parámetros de los submodelos
r	Valor residual
T	Temperatura
OD	Oxígeno disuelto
S	Salinidad
D	Densidad de siembra
TE	Tamaño de los estanques
DC	Duración del cultivo

I_a	Inicio de aireación
OD_w	Valor de oxígeno disuelto previo a que ocurriera la enfermedad
R	Retraso en que se presentó la enfermedad después de que inició la aireación
U_t	Utilidad en el tiempo
I_t y	Ingresos totales en el tiempo
C_t	Costos de producción del cultivo en el tiempo.
UDI	Utilidad después de impuestos
U_g	Utilidad gravable
I_m	Tasa impositiva
C_{fn}	Costos financieros
D_p	Costos de la depreciación
B/C_t	Relación beneficio-costo en el tiempo
P_{C_t}	Precio comercial del camarón en el tiempo
C_f	Costos fijos
C_v	Costos variables
PPE	Producción en el punto de equilibrio
IU	Ingreso unitario por kilogramo de camarón producido,
CVU	Costo variable unitario por kilogramo del total producido.
PACI	Porcentaje de aprovechamiento de la capacidad instalada
PT	Producción total
R_a	Valor residual del precio del alimento para camarón
R_{pc}	Valor residual del precio del camarón
P_{a_t}	Precio histórico del alimento balanceado
P_{ca_t}	Precio histórico del camarón
CV	Coefficiente de variación
IV	Índice de variabilidad
RUR	Rendimiento por unidad de riesgo
MB	Mancha blanca

Lista de Figuras	Página
Figura 1. Diagrama de flujo para la simulación del porcentaje de ocurrencia interanual e interestacional de eventos con y sin la enfermedad de la mancha blanca.	24
Figura 2. Ejemplos de curvas ajustadas de crecimiento para los ciclos de invierno (a) y verano (b) y de supervivencia durante el invierno (c) y verano (d) para casos con operaciones normales (los ejes de las escalas están reducidos para mayor claridad).	28
Figura 3. Relación entre la biomasa observada y la estimada usando el modelo de stock y los coeficientes de la regresión de la Tabla 3, para los casos con operaciones normales.	29
Figura 4. Predicción de la producción de camarón en función de la densidad de siembra, tamaño del estanque (TE), inicio de aireación (la) y duración del cultivo durante los ciclos de invierno (a y b) y verano (c y d) (nótese que los ejes de las escalas no coinciden).	30
Figura 5. Ejemplos de los ajustes de las ecuaciones de crecimiento a las curvas de los datos correspondientes a siembras en invierno (a) y verano (b) y supervivencia para casos con enfermedad para invierno (a) y verano (b). Las flechas indican el momento en que se presenta la mortalidad por la enfermedad (nótese que cada gráfica tiene sus propias escalas).	32
Figura 6. Relación entre los rendimientos de la biomasa observada y estimada utilizando el modelo de stock y los coeficientes de la Tabla 6.	37
Figura 7. Producción de camarón en función del tiempo, de la aireación total (a) y del inicio de la aireación (b) durante el verano	38
Figura 8. Producción de camarón en función del tiempo, de la aireación total (a) y del inicio de la aireación (b) durante el invierno.	39
Figura 9. Ejemplos de resultados del ajuste de las ecuaciones para el cálculo del factor de conversión alimenticia (FCA) (a) y de la aireación (b) cuando estuvo presente, o no, la enfermedad (MB).	40
Figura 10. Relación entre los valores observados en la base de datos y los estimados por los modelos tecnológicos utilizando los diferentes modelos y los coeficientes de la regresión lineal múltiple. (a) FCA con operaciones normales; (b) FCA cuando afectó la enfermedad; (c) Aireación para operaciones normales; (d) Aireación para operaciones con presencia de la enfermedad (nótese que cada gráfica tiene sus propias escalas).	43
Figura 11. Producción obtenible en un estanque para los diferentes niveles de manejo presentados en la Tabla 2. (a) Cuando la granja operó normalmente durante el invierno; (b) cuando la granja operó normalmente durante el verano; (c) cuando la producción se vio afectada por la enfermedad en el invierno; (d) cuando la producción	45

se vio afectada por la enfermedad en el verano. Los valores numéricos en las curvas son los coeficientes de variación para cada nivel de manejo y DE es la desviación estándar ((nótese que cada gráfica tiene sus propias escalas).

Figura 12. Producción anual obtenible para una granja de 2.5 ha y 50 ha para los diferentes niveles de manejo. (a) Cuando la granja operó normalmente; (b) cuando se vio afectada por la enfermedad en ambos ciclos; (c) cuando se vio afectada por la enfermedad en el invierno; (d) cuando se vio afectada por la enfermedad en el verano. Los valores numéricos en las curvas son los coeficientes de variación para cada nivel de manejo; los de la izquierda corresponden a una granja de 2.5 ha y los de la derecha a una granja de 50 ha. DE es la desviación estándar (nótese que cada gráfica tiene sus propias escalas).

Figura 13. Producción anual obtenible para los diferentes niveles de manejo, según se describen en la Tabla 2, para una granja de 2.5 ha (a) y otra de 50 ha (b). Las líneas punteadas son los valores de los percentiles 2.5 y 97.5 % y los valores numéricos en las curvas son los del índice de variabilidad (IV).

Figura 14. Distribución de frecuencias de la producción de acuerdo a los distintos factores de riesgo analizados. Se indican los intervalos de 95% de confianza de la producción y el nivel de producción correspondiente al 55% de probabilidad acumulada, a partir de la cual la enfermedad no afecta la producción (nótese que cada gráfica tiene sus propias escalas).

Figura 15. Sensibilidad de la producción a las variables de manejo en invierno (a) y verano (b) cuando la granja operó normalmente, y cuando es afectada por la enfermedad en invierno (c) y verano (d). TE es el tamaño del estanque, D la densidad del cultivo, la el inicio de aireación y DC la duración del cultivo (nótese que cada gráfica tiene sus propias escalas).

Figura 16. Pérdidas y utilidades obtenibles en un estanque para los diferentes niveles de manejo. (a) Cuando la granja operó normalmente durante el invierno; (b) cuando la granja operó normalmente durante el verano; (c) cuando la producción se vio afectada por la enfermedad en el invierno; (d) cuando la producción se vio afectada por la enfermedad en el verano. Los valores numéricos en las curvas son los rendimientos por unidad de riesgo para cada nivel de manejo y DE es la desviación estándar (nótese que cada gráfica tiene sus propias escalas).

Figura 17. Pérdidas y utilidades anuales obtenible para una granja de 2.5 ha y 50 ha para los diferentes niveles de manejo. (a) Cuando la granja operó normalmente; (b) cuando se vio afectada por la enfermedad en ambos ciclos; (c) cuando se vio afectada por la enfermedad en el invierno; (d) cuando se vio afectada por la enfermedad en el verano. Los valores numéricos en las curvas son el rendimiento por unidad de riesgo para cada nivel de manejo; los de la izquierda corresponden a una granja de 2.5 ha y los de la derecha a

una granja de 50 ha. DE es la desviación estándar (nótese que cada gráfica tiene sus propias escalas)..

Figura 18. Figura 18. Utilidad anual obtenible para los diferentes niveles de manejo, según se describen en la Tabla 2, para una granja de 2.5 ha (a) y otra de 50 ha (b). Las líneas punteadas son los valores de los percentiles 2.5 y 97.5 % y los valores numéricos en las curvas son del rendimiento por unidad de riesgo. 57

Figura 19. Distribución de frecuencias de la utilidad Se indican los intervalos de 95% de confianza de la utilidad y el nivel de utilidad correspondiente al 55% de probabilidad acumulada, a partir de la cual la enfermedad no afecta la producción (nótese que cada gráfica tiene sus propias escalas). 58

Figura 20. Distribución de frecuencias de la utilidad después de impuestos. Se indican los intervalos de 95% de confianza de la utilidad y el nivel de utilidad correspondiente al 55% de probabilidad acumulada, a partir de la cual la enfermedad no afecta la producción. 60

Figura 21. Sensibilidad de la utilidad a las variables de manejo durante invierno (a) y verano (b), cuando la granja operó normalmente; y verano (c), cuando es afectada por la enfermedad. TE es el tamaño del estanque, D la densidad del cultivo, la el inicio de aireación y DC la duración del cultivo (nótese que cada gráfica tiene sus propias escalas).. 63

Figura 22. Relación beneficio-costos obtenible en un estanque para los diferentes niveles de manejo descritos en la Tabla 2. (a) Cuando la granja operó normalmente durante el invierno; (b) cuando la granja operó normalmente durante el verano; (c) cuando la producción se vio afectada por la enfermedad en el invierno; (d) cuando la producción se vio afectada por la enfermedad en el verano. Los valores numéricos en las curvas son los rendimientos por unidad de riesgo y DE es la desviación estándar (nótese que cada gráfica tiene sus propias escalas). 65

Figura 23. Relación beneficio-costos anual obtenible para una granja de 2.5 ha y 50 ha para los diferentes niveles de manejo descritos en la Tabla 2. (a) Cuando la granja operó normalmente; (b) cuando se vio afectada por la enfermedad en ambos ciclos; (c) cuando se vio afectada por la enfermedad en el invierno; (d) cuando se vio afectada por la enfermedad en el verano. Los valores numéricos en las curvas son los rendimientos por unidad de riesgo para cada nivel de manejo; los de la izquierda corresponden a una granja de 2.5 ha y los de la derecha a una granja de 50 ha. DE es la desviación estándar (nótese que cada gráfica tiene sus propias escalas). 67

Figura 24. Relación beneficio-costos obtenible para los diferentes niveles de manejo, según se describen en la Tabla 2, para granjas de 2.5 ha (a) y 50 ha (b). Las líneas punteadas son los valores de los percentiles 2.5 y 97.5 % y los valores en las curvas son los indicadores del rendimiento económico por unidad de riesgo. 68

Figura 25. Distribución de frecuencias de la relación beneficio-costo. Se indican los intervalos de 95% de confianza y el nivel correspondiente al 55% de probabilidad acumulada, a partir de la cual la enfermedad no afecta la producción (nótese que cada gráfica tiene sus propias escalas).	70
Figura 26. Distribución de frecuencias de la utilidad después de impuestos, de acuerdo a los distintos factores de riesgo analizados. Se indican los intervalos de 95% de confianza de la utilidad y el nivel de utilidad correspondiente al 55% de probabilidad acumulada, a partir de la cual la enfermedad no afecta la producción.	71
Figura 27. Sensibilidad de la relación beneficio-costo a las variables de manejo para los ciclos de invierno (a) y verano (b) cuando la granja operó normalmente; y verano (c) cuando estuvo presente la enfermedad. TE es el tamaño del estanque, D la densidad del cultivo, la el inicio de aireación y DC la duración del cultivo (nótese que cada gráfica tiene sus propias escalas).	74
Figura 28. Producción en el punto de equilibrio cuando se opera una granja en condiciones normales..	75
Figura 29. Producción en el punto de equilibrio cuando la enfermedad se presenta en invierno.	76
Figura 30. Producción en el punto de equilibrio cuando la enfermedad se presenta en el verano.	76
Figura 31. Producción en el equilibrio (PACI) (como % de la capacidad instalada) cuando se opera una granja en condiciones normales.	77
Figura 32. Producción en el equilibrio (PACI) (como % de la capacidad instalada) cuando la enfermedad se presenta en invierno.	78
Figura 33. Producción en el equilibrio (PACI) (como % de la capacidad instalada) cuando la enfermedad se presenta en el verano.	78

Lista de Tablas	Página
Tabla 1. Valores de los parámetros económicos.	20
Tabla 2. Niveles de manejo utilizados para el análisis de riesgo.	23
Tabla 3. Submodelos ambientales y de manejo para el modelo de stock, usado en los casos sin afectación por la enfermedad de la mancha blanca	27
Tabla 4. Contribución de las variables de manejo a incrementos de la biomasa de camarón. Los valores para cada variable son los porcentajes mínimos, máximos y medios de los incrementos de la biomasa obtenida de los incrementos calculados para cada combinación de valores extremos (dentro de los paréntesis) de las mismas variables de manejo. Los valores medios indican la contribución de cada variable.	31
Tabla 5. Matriz de correlación entre parámetros de los modelos de crecimiento y supervivencia con las variables ambientales y de manejo. Se presentan los coeficientes de correlación que fueron significativos.	33
Tabla 6. Submodelos ambientales y de manejo para los casos afectados por la enfermedad de la mancha blanca.	34
Tabla 7. Relaciones del tiempo en que ocurrió la mortalidad por la enfermedad (t_w) y el porcentaje de dicha mortalidad (m) con el oxígeno disuelto (OD), así como respecto a valores de oxígeno disuelto previo a la mortalidad por la enfermedad (OD_w).	34
Tabla 8. Media (\pm error estándar) de las variables ambientales, densidad de siembra, y aireación para siembras en verano del 2004 y 2005 (letras diferentes indican diferencias significativas)	35
Tabla 9. Relaciones entre el oxígeno disuelto y la aireación total y el tiempo de inicio de aireación	36
Tabla 10. Relaciones del tiempo en que se presentó la mortalidad por la enfermedad, porcentaje de mortalidad, retraso en la ocurrencia de la mortalidad por la enfermedad subsecuente al inicio de aireación, con la aireación total y tiempo en que la aireación se inició.	36
Tabla 11. Submodelos ambientales y de manejo para el modelo de factor de conversión alimenticia usado durante operaciones normales.	41
Tabla 12. Submodelos ambientales y de manejo para el modelo de factor de conversión alimenticia usado en los casos afectados por la enfermedad de la mancha blanca.	41
Tabla 13. Submodelos ambientales y de manejo para el modelo de aireación durante operaciones normales.	42
Tabla 14. Submodelos ambientales y de manejo para el modelo de aireación usado para operaciones con afectación por la enfermedad.	42

Tabla 15. Resultados del análisis de sensibilidad de la producción para un estanque bajo las condiciones más desfavorables (nivel de manejo 1) y las más favorables (nivel de manejo 5), tanto para operaciones normales como con presencia de la enfermedad de la mancha blanca.	51
Tabla 16. Resultados del análisis de sensibilidad de la utilidad para un estanque bajo las condiciones más desfavorables (nivel de manejo 1) y las más favorables (nivel de manejo 5), tanto para operaciones normales como con presencia de la enfermedad de la mancha blanca. CR es el coeficiente de regresión correspondiente y MB indica la presencia de la enfermedad.	62
Tabla 17. Resultados del análisis de sensibilidad de la relación beneficio-costo para un estanque bajo las condiciones más desfavorables (nivel de manejo 1) y las más favorables (nivel de manejo 5), tanto para operaciones normales como con presencia de la enfermedad de la mancha blanca.	73

Resumen

Se 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. El modelo bioeconómico quedó integrado por varios submodelos: biológico, de variables ambientales y de manejo, tecnológicos y económico. 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. Los mejores resultados del rendimiento de la producción y beneficios económicos se presentaron cuando se utilizaron estanques pequeños, inicios de aireación a la primera semana, la mayor densidad de siembra y las máximas duraciones del cultivo (mejor esquema de manejo). Se determinó que bajo el mejor esquema de manejo, cuando se analiza un ciclo anual una vez descontados los impuestos, la producción promedio fue de 20,500 kg ha⁻¹ con utilidades de \$ 267,000 pesos ha⁻¹ y una relación beneficio-costo de 1.31, en operaciones normales; 13,700 kg ha⁻¹, \$ 16,200 pesos ha⁻¹ y una relación beneficio-costo de 1.04 cuando la enfermedad se presentó en el invierno; y 17,600 kg ha⁻¹ una utilidad de \$ 125,300 pesos ha⁻¹ y una relación beneficio-costo de 1.15 cuando se presentó en verano. No se obtuvieron beneficios económicos cuando la enfermedad se presentó en ambos ciclos de producción. También se determinó que, a fin de no tener pérdidas económicas con un 95% de confianza la granja debe trabajar cuando menos al 43.07 % de la capacidad instalada durante operaciones normales, al 60.38 % cuando la enfermedad afecta solamente al ciclo de invierno, y al 61.97 % cuando la enfermedad afecta al ciclo del verano. Se encontró que la enfermedad constituye un factor que incrementa el riesgo consistentemente y que, conforme se mejoran los esquemas de manejo y se incrementa la escala de producción, el riesgo disminuye. El análisis de sensibilidad mostró que el oxígeno disuelto es el principal factor de riesgo, y que el tiempo de inicio de aireación es el principal instrumento para controlar y disminuir dicho riesgo. Se concluye que el objetivo de evaluar el riesgo de la producción intensiva de *Litopenaeus vannamei* se alcanzó satisfactoriamente.

Abstract

A bioeconomic model was developed to assess the risk associated with intensive production of whiteleg shrimp (*Litopenaeus vannamei*). The model was calibrated using databases from producers in the State of Nayarit, which incorporated 86 cases (ponds), of which 49 were affected by white spot disease. The bioeconomic model integrated four submodels considering biological, environmental, management, technological, and economic variables. Risk was evaluated using “return per unit risk”. Alternative management schemes, in terms management variables were analyzed. Sensitivity analysis determined the importance of variables and parameters. The highest production of shrimp and profit were obtained by using small ponds, early start of aeration, and maximum stocking density and duration of cultivation (best management scheme). In terms of annual production and economic benefits after taxes, using the best management scheme produced 20,500 kg ha⁻¹, profits about MX\$ 267,000 ha⁻¹ and benefit/cost ratio was about 1.31 for normal operations; 13,700 kg ha⁻¹, MX\$ 16,200 ha⁻¹ and benefit/cost ratio about 1.04 when the disease affected winter production; and 17,600 kg ha⁻¹, profits about MX\$ 125,300 ha⁻¹ and benefit/cost ratio about 1.15 when affecting summer production. We found that, to guarantee obtaining profits (with 95% confidence for normal operations), at least 43.07% of the installed production capacity should be used, 60.38% when the disease was present during winter, and 61.97% when the disease was present during summer. We observed that the disease is a factor that consistently increased risk and that risk can be reduced by improving management or increasing the size of the farm. Sensitivity analysis indicates that, dissolved oxygen is the main risk factor, and starting time of aeration is the main instrument to control and reduce risk. We conclude that risk assessment of intensive production of *Litopenaeus vannamei* was successfully achieved.

I Introducción

La acuicultura es una actividad que ha crecido rápidamente y se ha convertido en una alternativa viable para la producción de alimentos. Según la FAO (2007), en 2004 la actividad acuícola aportó 43% de la producción de recursos acuáticos a escala mundial. Por otra parte, en términos de valor de la producción, el camarón es el producto más importante y representa 16.5% del valor total de los productos pesqueros comercializados internacionalmente (FAO, 2007).

El cultivo de camarón es una de las actividades de mayor importancia en la acuicultura de México. De las 130,200 toneladas producidas en 2008, alrededor del 66.33 % corresponden al camarón cultivado, cantidad superior a la reportada para la producción de peces cultivados (CONAPESCA, 2008).

El Pacífico mexicano aporta alrededor del 95% de la producción nacional y los estados de Sonora, Sinaloa y Nayarit destacan con el 94% del total (CONAPESCA, 2008). El camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*) es la especie acuícola de mayor importancia desde el punto de vista económico debido a que es la que más contribuye a la producción (CONAPESCA, 2008) y la que se prefiere para fines de cultivo, debido a su versatilidad para adaptarse a los diferentes sistemas de producción, y por la buena aceptación que tiene en el mercado nacional e internacional.

El análisis de riesgo es una herramienta para la toma de decisiones. Van Gigh (1987) define al riesgo como el conocimiento del valor de los posibles resultados de un evento y de sus probabilidades relativas. A pesar de la utilidad que representa este tipo de análisis para la industria camaronera, los trabajos son escasos, y no se han registrado antecedentes de investigaciones que, de manera explícita y específica, aborden el problema de analizar y evaluar el riesgo de pérdidas económicas asociadas a la enfermedad de la mancha blanca, actuando en conjunto con otros factores en el cultivo de camarón.

La producción intensiva de camarón blanco ha enfrentado el riesgo asociado a la enfermedad provocada por el denominado virus del síndrome de la mancha blanca (WSSV), problema que ha afectado severamente a la industria camaronícola mundial

desde los años 90's. En México, los primeros casos fueron detectados en 1999 (Galavíz-Silva *et al.*, 2004; Peinado-Guevara & López-Meyer, 2006). En los años posteriores, el impacto económico fue muy elevado, ya que afectó alrededor de 6,500 hectáreas de producción (Galavíz-Silva *et al.*, 2004).

Los posibles aspectos que favorecen la incidencia de esta enfermedad son diversos. Por ejemplo, frecuentemente ocurren altas mortalidades en los primeros cuarenta días de siembra (Brock & Bullis, 2001; Rodríguez *et al.*, 2003; Pérez *et al.*, 2005), siendo las posibles causas los fenómenos climáticos como las lluvias, que originan cambios en la temperatura y la salinidad (Peinado-Guevara & López-Meyer, 2006). Estos cambios climáticos producen estrés en los organismos cultivados y los hace susceptibles a la enfermedad (Guan *et al.*, 2003; Yu & Guan, 2003). Otros estudios han demostrado una relación entre la respuesta inmune del camarón con los eventos de hipoxia (LeMonullac *et al.*, 1998; Magallón *et al.*, 2006a), con la alcalosis y con la toxicidad del amonio (Chen & Chen, 2000; Kautsky *et al.*, 2000; Cheng & Chen, 2002; Jiang *et al.*, 2004; Magallón *et al.*, 2006b).

Dada la problemática en la producción de camarón cultivado, en este trabajo de investigación se desarrolla un modelo bioeconómico que incorpora elementos estocásticos, a partir de bases de datos obtenidas de granjas intensivas del estado de Nayarit, para analizar y evaluar el riesgo asociado a pérdidas por efecto de la enfermedad, así como a variaciones en los precios del camarón y del alimento balanceado, de parámetros de la calidad del agua y de parámetros zootécnicos. A partir del modelo se hacen recomendaciones de manejo, a fin de mejorar las expectativas económicas.

1.1. Antecedentes

El análisis bioeconómico constituye una herramienta útil para el manejo acuícola, y tiene su origen en el manejo de recursos naturales renovables (Clark, 1974), cuyos principios han sido adaptados para el manejo de recursos acuícolas con distintos propósitos (Allen *et al.*, 1984).

En términos de la aplicación de la bioeconomía, el trabajo de Allen *et al.* (1984) constituye el primer intento formal de integrar la teoría bioeconómica a las actividades acuícolas. Posteriormente, Cacho (1997) realizó una revisión de los trabajos relacionados con la bioeconomía acuícola en el contexto de análisis de sistemas. En dicho trabajo destaca la importancia del modelado bioeconómico aplicado en la acuicultura con la finalidad de simplificar, para efecto de análisis, el sistema constituido por una granja acuícola.

Entre los trabajos de bioeconomía sobre cultivo de camarón, caben destacar los siguientes:

Adams *et al.* (1980), con un modelo que incluyó los componentes biológico, de ingeniería y económico, realizaron un análisis presupuestario para estudiar la producción de camarón. En dicho trabajo analizaron el efecto del tamaño de los estanques y el tamaño de la granja sobre los costos de producción.

Pardy *et al.* (1983), mediante un modelo de simulación, analizaron el efecto de las densidades en el crecimiento de *L. vannamei* y *Litopenaeus stylirostris*. Los autores evaluaron el impacto en los indicadores económicos a partir de diferentes estrategias de densidades de siembra y ciclos de producción.

Sadeh *et al.* (1983) realizaron un análisis preliminar, mediante simulación, con una modificación a los modelos utilizados por Pardy *et al.* (1983). El trabajo se realizó para un policultivo hipotético de camarón con las especies *L. stylirostris* y *L. vannamei* con la finalidad de analizar los efectos de la densidad en los parámetros de producción y en la rentabilidad económica.

Hernández-Llamas & Magallón-Barajas (1991) presentaron un análisis para un cultivo experimental con tecnología semi-intensiva. En su trabajo utilizaron diferentes

esquemas de alimentación y fertilización, y realizaron un análisis de sensibilidad para determinar la importancia de los parámetros del modelo bioeconómico.

Tian *et al.* (2000), mediante el desarrollo de un modelo de simulación, analizaron la economía de producción de camarón bajo diferentes estrategias de siembras, cosechas programadas y tamaño de la granja.

Keys *et al.* (2004) desarrollaron un modelo para cuantificar la viabilidad económica de la producción comercial de las dos especies de camarón más cultivadas en Australia. Estimaron la relación beneficio-costos que permitiera que *Penaeus esculentus* pudiera ser cultivado con rentabilidad similar a *Penaeus monodon*. Los autores presentan un análisis de escenarios para identificar los valores críticos de varios parámetros que harían a *P. esculentus* tan rentable como *P. monodon*.

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

Sadeh *et al.* (1986) reportaron el uso de un modelo de simulación estocástico para evaluar el efecto de la variación de la temperatura en el crecimiento del camarón cultivado (*L. stylirostris*) y sus resultados económicos. En dicho trabajo el número de cosechas por ciclo y fechas de siembras fueron considerados como variables de control.

Karp *et al.* (1986) utilizaron un modelo de control óptimo para establecer tiempos de cosechas y resiembras. Con base en datos experimentales, presentaron un modelo determinista para el caso en que la producción ocurre en un ambiente controlado. En su trabajo incluyen también elementos estocásticos para el caso en que el ambiente no es controlado.

Hochman *et al.* (1990) utilizaron datos de siete pruebas experimentales de producción de camarón, con la finalidad de desarrollar un modelo dinámico

estocástico. Dicho modelo permitió evaluar el potencial de la tecnología del cultivo de camarón en estanques circulares, practicado en el Instituto Oceánico de Hawai. El modelo provee un programa de siembras y cosechas óptimas utilizando un calendario de decisiones semanales durante un año.

Martínez & Seijo (2001) construyeron un modelo para comparar el rendimiento económico de un sistema de cultivo con bajo recambio de agua con aireación, contra un sistema con bajo recambio sin aireación. Realizaron un análisis de riesgo para evaluar el efecto que tiene sobre la rentabilidad, la incertidumbre en el precio de la semilla, la tasa de crecimiento del camarón, la tasa de mortalidad y el precio comercial del camarón.

Seijo (2004), basándose en una serie de indicadores bioeconómicos publicados en la literatura y bajo un caso hipotético de cultivo de camarón, llevó a cabo un análisis de riesgo, centrándose en aspectos de manejo relacionado con los tiempos de cosecha. Para el análisis se consideraron los efectos del tiempo de cosecha y la incertidumbre del precio y de la mortalidad natural, sobre el riesgo que se genera de exceder dos límites de puntos de referencia bioeconómicos (una producción de 8.0 ton/ha 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 (*L. stylirostris*). En dicho trabajo se incluye un análisis de riesgo correspondiente a dos ciclos de producción intensiva, y se realiza un análisis de sensibilidad de los indicadores económicos a la variación de los parámetros bioeconómicos.

Yu *et al.* (2006) utilizaron una versión ampliada del modelo de programación desarrollado por Yu & Leung (2005). Con el modelo, presentan estrategias óptimas de cosechas para multiciclos y multiestanques e intentan demostrar el impacto de la variabilidad de la tasa de supervivencia, tasa de crecimiento, restricciones de precios estacionales y disponibilidad de mano de obra, sobre el calendario de producción óptima y sus resultados económicos. La influencia de estos factores se describe cuantitativamente en el contexto de una granja de camarón comercial que opera en

Hawai. El objetivo está dirigido hacia la programación de un escenario que maximiza la utilidad mediante el uso de 40 estanques en un horizonte planificado de dos años.

Por otro lado, se tienen escasos antecedentes de trabajos que mencionan el efecto de enfermedades en el cultivo de camarón, en el contexto del análisis de riesgo. Al respecto, Leung *et al.* (2000) evaluaron, para las condiciones prevalecientes en países asiáticos y mediante un modelo logístico, la probabilidad de presencia de enfermedades en función de factores de riesgo. En dicho trabajo, sin embargo, no se distinguen las enfermedades analizadas ni se estima el efecto de su impacto en términos económicos, sino únicamente en la producción.

Valderrama & Engle (2002) hacen uso de la programación dinámica para la optimización del cultivo de camarón en Honduras, y utilizan elementos estocásticos a fin de realizar un análisis de riesgo, entendido éste como la proporción entre la desviación aleatoria de los ingresos netos que se pueden obtener (respecto a un nivel de ingreso libre de riesgo), y el ingreso neto que efectivamente pueda obtenerse. Si bien los autores mencionan que entre la variabilidad que analizan se encuentran incluidos los efectos de enfermedades, no se estima el efecto específico de ellas ni en conjunto, ni por separado. También, cabe destacar que el estudio se basa en las probabilidades de ocurrencia sobre valores de supervivencias y rendimientos estimados por Hatch *et al.* (1987) para Panamá quince años antes, donde no se hace mención alguna de la presencia de enfermedades.

Sánchez-Zazueta & Martínez-Cordero (2009) evaluaron el riesgo económico de una granja con tecnología semi-intensiva de camarón en Sinaloa, México, en el que consideran ajustes de tipo económico y de manejo con la finalidad de reducir el riesgo de enfermedades. Sin embargo, al igual que Valderrama & Engle (2002), no se aprecia cuantitativamente el impacto de dichas enfermedades ni se especifica cuales de ellas se analizaron.

Nazmul *et al.* (2007) también refieren la evaluación económica de granjas camaroneras en Bangladesh afectada por la presencia de enfermedades. A partir de una encuesta calcularon estadísticos (media y valores mínimos y máximos) de la producción e ingresos económicos netos, pero no se estima el riesgo asociado a los diferentes escenarios de producción y económicos que se evalúan, ni se asocian

valores altos o bajos de la producción o de ingresos a la ausencia o presencia de enfermedades. De hecho, los propios autores no enmarcan su trabajo en el contexto del análisis de riesgo, sino en el de, únicamente, una evaluación económica.

El único trabajo que analiza la enfermedad de la mancha blanca, desde el punto de vista del riesgo, es el realizado por Corsin *et al.* (2001) quienes evaluaron diferentes factores de riesgo asociados a la enfermedad en el camarón asiático *Penaeus monodon*, haciendo uso de regresión logística, en la que la variable de respuesta es cualitativa, indicando únicamente presencia o ausencia de la enfermedad. Cabe aclarar, sin embargo, que la enfermedad no se considera como factor de riesgo en la producción en conjunto con otros factores, ni se evalúa su impacto desde el punto de vista económico.

1.2. Justificación

De acuerdo con lo explicado anteriormente, puede decirse que la importancia de la presente investigación se basa en:

- i) Intentar dar respuesta a la problemática que priva en la camaronicultura, ya que no existen antecedentes de estudios científicos encaminados a analizar y evaluar el riesgo implicado en el cultivo intensivo de camarón blanco, considerando la enfermedad de la mancha blanca, de manera explícita y específica, en conjunto con otros factores de riesgo.
- ii) La relevancia que el tema tiene para el sector productivo ya que, de acuerdo con los Comités de Sanidad Acuícola, la enfermedad de la mancha blanca es la más importante, pudiendo generar pérdidas de alrededor de 40% en la producción.
- iii) Las recomendaciones de manejo del riesgo que se derivan del análisis, a fin de mejorar las expectativas de los rendimientos económicos evaluados con base en distintos indicadores (utilidad, relación beneficio-costos y producción en el punto de equilibrio).

1.3. Objetivos

Objetivo general

Evaluar el riesgo en la producción intensiva de camarón blanco (*L. vannamei*) para las condiciones prevalecientes en el estado de Nayarit

Objetivos específicos

Desarrollar un modelo bioeconómico que incorpore elementos estocásticos, a partir de las bases de datos de granjas de cultivo de camarón blanco (*L. vannamei*) con tecnología intensiva.

Llevar a cabo un análisis de riesgo bajo condiciones de operación normales (sin afectación por la enfermedad de la mancha blanca), y bajo condiciones de afectación por la enfermedad.

Analizar y proponer diferentes esquemas de manejo del cultivo a fin de disminuir el riesgo e 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 y emitir recomendaciones para el manejo del cultivo.

II. Materiales y Métodos

2.1. Base de datos

Para la presente investigación, se seleccionaron dos de las tres granjas con tecnología intensiva del cultivo de camarón en Nayarit. La selección se basó en la disponibilidad de la información que estuviera más completa y en un adecuado diagnóstico de la enfermedad provocada por el virus de la mancha blanca (WSSV). Dichas bases de datos fueron aportadas por productores del estado de Nayarit.

Las variables analizadas fueron: el crecimiento en peso del camarón, la supervivencia, rendimiento de la producción, densidad inicial de siembra, tamaño del estanque, duración del cultivo, tasas de aireación, tiempos de inicio de aireación, temperatura, salinidad y oxígeno disuelto en el agua. La medición de las variables se realizó, de acuerdo con los productores, conforme a la siguiente metodología:

- 1) El peso del camarón se determinó semanalmente utilizando una balanza digital de 0.01 y 0.1 g de precisión (Ohaus Corp., Prine Brook, Nj). La supervivencia se estimó mediante estudios poblacionales utilizando atarrayas camaroneras de 1.5 m de radio construidas con material de monofilamento, y la luz de malla varió entre 3.2 y 25.4mm², dependiendo del tamaño del camarón.
- 2) El seguimiento para determinar la presencia de la enfermedad se realizó mensualmente utilizando un equipo PCR comercial Kit Diagnostic (IQ2000, Farming IntelliGene Tech Corp., Taiwan). Cuando se observaron los síntomas de la enfermedad, se realizaron pruebas adicionales en laboratorios certificados para su debida confirmación. Una vez que el diagnóstico se confirmó, el seguimiento se llevó a cabo cada semana.
- 3) La tasas de aireación se registraron diariamente, el oxígeno disuelto en el agua y la temperatura del agua se determinaron dos veces al día (6:00 y 18:00 horas) mediante oxímetros con celda sumergible (Model 55,YSI Yellow Springs, OH). La salinidad se registró cada semana con refractómetros (Aquafauna Biomarine, Hawthorne, CA).

Para efectos de la presente investigación, los datos se analizaron mediante hojas de cálculo del programa Excel, @Risk 5.5 y Risk Optimizer 5.5. El tamaño de la muestra fue de 86 casos (estanques) representativos de condiciones de cultivo invernales (34 estanques) y de verano (52 estanques), tanto para operaciones normales como aquéllas afectadas por la enfermedad. Para los casos en que las granjas operaron normalmente, se utilizaron 37 estanques, de los cuales 22 correspondieron a ciclos de siembra en invierno (2003 y 2004) y 15 al periodo de siembras en verano (2004 y 2005). Para los casos en que la enfermedad afectó a los cultivos, se utilizaron 49 estanques, 12 correspondieron a siembras en invierno durante el año 2006 y 37 estanques que fueron sembrados durante el verano (2004 y 2005).

2.2. Modelo bioeconómico

El modelo bioeconómico se integró por cuatro tipos de submodelos: un submodelo biológico, submodelos tecnológicos (de factor de conversión alimenticia, y de aireación), submodelos de variables ambientales y de manejo y un submodelo económico.

2.2.1. Submodelo biológico

Se utilizó un modelo de stock (Leung & El-Gayar, 1997) para predecir la biomasa (b_t) en función del tiempo mediante la ecuación:

$$b_t = w_t n_t \quad (1)$$

donde w_t es el peso individual de los organismos y n_t es el número de organismos sobrevivientes al tiempo t .

Para el cálculo del peso individual se utilizó el modelo:

$$w_t = w_i + (w_f - w_i) \left(\frac{1 - k^t}{1 - k^c} \right)^3 \quad (2)$$

donde w_i es el peso inicial, w_f es el peso final, k se refiere a la velocidad a la cual el peso cambia de su valor inicial a su valor final y c es el tiempo de duración del cultivo. Esta ecuación es una modificación al modelo de crecimiento en peso propuesto por Hernández-Llamas & Ratkowsky (2004) (Ver anexo 1)

Para determinar el número de sobrevivientes en los ciclos en que no se presentó la enfermedad de la mancha blanca se utilizó la ecuación:

$$n_t = n_0 e^{-z \cdot t} \quad (3)$$

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

Para la determinación del número de sobrevivientes en los casos en que la enfermedad de la mancha blanca estuvo presente, se utilizó un modelo con restricción de dominio:

$$\begin{aligned} n_t &= n_0 e^{-z_1 \cdot t} && \text{para } t \leq t_w \\ n_t &= (n_0 e^{-z_1 \cdot t_w} - m) e^{-z_2 \cdot (t - t_w - 1)} && \text{para } t > t_w \end{aligned} \quad (4)$$

donde n_t son los organismos sobrevivientes al tiempo t , n_0 son los organismos sembrados inicialmente, t_w es tiempo en que se presenta la mortalidad por la enfermedad y m es el porcentaje de organismos que mueren por la enfermedad.

2.2.2. Submodelos tecnológicos

Se construyeron dos submodelos, uno para el factor de conversión alimenticia (FCA: razón entre el peso del alimento balanceado proporcionado y el peso del camarón producido) y otro para la aireación, tanto para operaciones normales como con presencia de la enfermedad.

Para los casos con operaciones normales, el factor de conversión alimenticia en función del tiempo, se calculó de acuerdo con la ecuación lineal:

$$FCA_t = a_F t + b_F \quad (5)$$

donde a_F y b_F son coeficientes de regresión

Cuando se presentó la enfermedad se usó:

$$\begin{aligned} FCA_t &= a_{F1} t + b_F \quad \text{para } t \leq t_w \\ FCA_t &= ((a_{F1} t_w + b_F) + i_F) + (a_{F2} (t - t_w - 1)) \quad \text{para } t > t_w \end{aligned} \quad (6)$$

donde a_{F1} y b_F son la pendiente y el intercepto de una línea recta antes del tiempo en que ocurre la mortalidad por la enfermedad (t_w), i_F es el incremento del factor de conversión alimenticia inmediatamente después de que ocurre la mortalidad por la enfermedad y a_{F2} es la pendiente de una línea recta después de que se presentó la mortalidad por la enfermedad.

Para el cálculo de la aireación en función del tiempo cuando la granja operó normalmente, se utilizó la ecuación:

$$AT_t = A_0 + \frac{A_F - A_0}{1 + e^{d(b-t)}} \quad (7)$$

donde AT_t es la aireación total (en $Hp \cdot h$) en el tiempo, A_0 es la aireación inicial, A_F es la aireación final y d y b son parámetros de ajuste.

Para modelar la aireación total en el tiempo, cuando la enfermedad se presentó, se utilizó la ecuación lineal:

$$AT_t = a_A t + b_A \quad (8)$$

donde a_A y b_A son coeficientes de regresión.

2.2.3. Submodelos de variables ambientales y de manejo

Se utilizaron modelos de regresión lineal múltiple para relacionar, a excepción de w_i , n_0 y A_0 , cada uno de los parámetros de los submodelos biológico y tecnológicos (designado por Q) con las variables ambientales del agua de los estanques (de calidad del agua) y las de manejo del cultivo. Entre las primeras se analizaron temperatura (T), oxígeno disuelto (OD) y salinidad (S); y entre las segundas, densidad de siembra (D), tamaño de los estanques (TE), duración del cultivo (DC) e inicio de aireación (la)

$$Q = a_0 + a_1 T + a_2 OD + a_3 S + a_4 D + a_5 TE + a_6 DC + a_7 la \quad (9)$$

donde a_0 , hasta a_7 son coeficientes de regresión, mismos que se estimaron a partir de los casos registrados en la base de datos. Posteriormente el componente estocástico en los valores de cada uno de los parámetros Q , se incluyó modificando el valor determinista de Q que se predice con la ecuación anterior, utilizando:

$$Q_e = Q + r \quad (10)$$

donde Q_e es el valor estocástico que puede adquirir el parámetro, y r es el valor residual calculado a partir de una distribución normal ajustada a los valores

residuales resultantes de la regresión múltiple correspondiente. Asimismo, el oxígeno disuelto se hizo depender, en relación inversamente proporcional y mediante regresión lineal simple, del tiempo en que dio inicio la aireación (*Ia*). El valor del oxígeno calculado de esa manera se modificó para simular variaciones aleatorias añadiendo, de forma similar a lo expresado en la ecuación 10, valores calculados a partir de una distribución normal ajustada a los valores estocásticos residuales obtenidos del análisis de regresión lineal simple.

Para la regresión lineal múltiple se construyeron los modelos en dos etapas: en la primera se utilizó el procedimiento “backward stepwise” para seleccionar las variables independientes, y en la segunda etapa se probó la capacidad de predicción de los modelos.

La capacidad de predicción de los submodelos biológico y tecnológicos se evaluó mediante una función de identidad, en que el coeficiente (pendiente) de una regresión lineal simple (con intercepto igual a cero) entre los valores observados en la base de datos y los pronosticados por los modelos, no fuera significativamente diferente que 1 (Poole, 1974). Posteriormente, se llevó a cabo una prueba de equivalencia (Chow & Liu, 2004) a fin de no aceptar falsamente la hipótesis nula correspondiente (error tipo II de la estadística; Hauck & Anderson, 1986; Zar, 2010). Para la prueba de equivalencia, se utilizó una tolerancia del 5% del valor de la pendiente (Garret, 1997).

Los coeficientes de los modelos de regresión lineal simple y múltiple se estimaron mediante el programa STATA 10.0, el cual utiliza los métodos descritos en Rencher (2002) para el análisis de colinealidad. La normalidad de los valores residuales se determinó mediante la prueba estadística de Shapiro-Wilk's disponible en STATISTICA 6.0. y los parámetros de las distribuciones fueron estimados con el programa @Risk 5.5.

2.2.3.1. Análisis de la producción biológica para casos con operaciones normales

Una vez establecidas las relaciones entre los parámetros del modelo de stock y las variables ambientales y de manejo, se procedió a predecir la dinámica de la producción para estrategias de manejo alternativas, considerando la influencia de la densidad de siembra, del tamaño del estanque y del inicio de aireación. La predicción se llevó a cabo con el modelo de stock, junto con los coeficientes estimados mediante análisis de regresión.

También se calculó la contribución que tuvo cada variable de manejo en la variación de los rendimientos de biomasa. Para ello, se calculó el porcentaje de incremento en biomasa que puede obtenerse usando los valores extremos de una variable determinada. Dicho cálculo, a su vez, se realizó para cada combinación de valores extremos del resto de las variables de manejo. La contribución de la variable se estableció identificando los porcentajes de incremento mínimo, máximo y medio. De esa forma, mayores incrementos medios indicaron contribuciones más importantes de la variable.

2.2.3.2. Análisis de la producción biológica para casos con mancha blanca

Se analizaron las correlaciones existentes entre los parámetros del modelo de stock y las variables ambientales y de manejo, tanto para siembras en invierno como en verano. También se realizaron pruebas t para establecer si existieron condiciones similares de las variables ambientales y de manejo entre los ciclos de verano 2004 y 2005. Una vez que se probó que existieron diferencias en el manejo entre dichos ciclos, se establecieron las siguientes relaciones mediante modelos de regresión lineal simple: entre la mortalidad ocasionada por la enfermedad de la mancha blanca y el oxígeno disuelto, entre el oxígeno disuelto y el tiempo en que se presentó la mortalidad de la mancha blanca, y entre el valor de oxígeno disuelto previo a que ocurriera la enfermedad (OD_w) y el tiempo en que se presentó la mortalidad por la enfermedad.

Además, se establecieron las relaciones: niveles de oxígeno - aireación total, oxígeno disuelto - inicio de aireación, mortalidad por la enfermedad - aireación total, tiempo en que ocurrió la mortalidad - aireación total, mortalidad - inicio de aireación, y retraso (R) en que se presentó la enfermedad después de que inició la aireación - inicio de aireación. Para esta última relación se utilizaron el 88% de los estanques en los cuales la enfermedad ocurrió después de que inició la aireación.

Los análisis de correlación y regresión lineal simple se llevaron a cabo con el programa STATISTICA 6.0.

2.2.4. Submodelo económico

El submodelo económico calculó, para los diferentes esquemas de manejo de cultivo, la utilidad en el tiempo (U_t) (en pesos mexicanos) y la relación beneficio-costos BC_t sobre los costos de producción. Para el conjunto de valores de las variables de manejo que produjeron el mejor resultado, se calculó la utilidad y la relación beneficio-costos antes y después de impuestos, la producción en el punto de equilibrio (PPE) y la producción en el equilibrio (PE) (Parkin, 2006). La utilidad se calculó como:

$$U_t = I_t - C_t \quad (11)$$

donde I_t son los ingresos totales en el tiempo y C_t son los costos de producción del cultivo en el tiempo.

La utilidad después de impuestos (UDI) se calculó como:

$$UDI = U_g (1 - I_m) \quad (12)$$

donde U_g es la utilidad gravable e I_m es la tasa impositiva (28%). La utilidad gravable, a su vez, se determinó mediante:

$$U_g = U_t - C_{fn} - D_p \quad (13)$$

donde C_{fn} son los costos financieros, definidos como los intereses (a una tasa de 12 %) que se le paga al banco por el préstamo del 80% de los costos de operación del cultivo, y D_p son los costos de la depreciación de la instalación de la granja, calculados como el 10 % de los costos de construcción de una granja equipada (FIRA, 2009).

La relación beneficio-costos estuvo dada por:

$$B/C_t = I_t/C_t \quad (14)$$

A su vez, los ingresos se calcularon de acuerdo con:

$$I_t = b_t P_{C_t} \quad (15)$$

donde b_t es la biomasa de camarón en el tiempo y p_t es el precio comercial del camarón, el cual fue determinado, en función del tiempo, mediante un polinomio de tercer grado ajustado ($p < 0.05$) de acuerdo con:

$$P_{C_t} = -0.1155t^3 + 1.597t^2 - 0.7162t + 10.04 \quad (16)$$

Calculado con los datos de precios a pie de granja que fueron proporcionados por los productores para junio de 2008 a julio de 2009.

Los costos de producción del cultivo dependen de los costos fijos (C_f) y los costos variables (C_v), y se calcularon mediante la ecuación:

$$C = C_f + C_v \quad (17)$$

donde los costos fijos son de administración, materiales diversos, mano de obra y mantenimiento; y los costos variables fueron los de las postlarvas, el alimento balanceado y el de la electricidad utilizados durante el cultivo.

La PPE es aquella para la que los ingresos son iguales a la suma de los costos variables y costos fijos y, por lo tanto, no se registran pérdidas ni ganancias, y se calculó a partir de:

$$PPE = Cf / (IU - CVU) \quad (18)$$

donde IU es el ingreso unitario por kilogramo de camarón producido, y CVU es el costo variable unitario por kilogramo del total producido.

Considerando que los cálculos de la producción total se realizaron tomando en cuenta toda la capacidad de la granja instalada, el punto de equilibrio (PE) se definió como el porcentaje de aprovechamiento de esa capacidad instalada correspondiente al punto de la producción en equilibrio (PACI) y se calculó conforme a:

$$PACI = (PPE / PT) * 100 \quad (19)$$

donde PT es la producción total.

De forma similar a lo señalado para los submodelos anteriores, se incorporaron elementos estocásticos (R_a y R_{pc}) a partir de los valores residuales de curvas ajustadas que describieron los precios del alimento balanceado (Pa_t) y del camarón (Pca_t), de acuerdo con los precios históricos de ambas variables en la industria de la camaronicultura (CONAPESCA, 2008). Las ecuaciones ajustadas utilizadas mediante el programa STATISTICA 6.0 fueron:

$$Pa_t = 0.032t^3 - 0.38t^2 + 1.59t + 4.88 + Ra \quad (\text{Alimento}) \quad (20)$$

$$Pca_t = \frac{57.70}{1 - 10.86 \cdot t^{0.3}} + Rpc \text{ (Precio del camarón)} \quad (21)$$

Los parámetros de precios de venta del camarón y los costos utilizados en el análisis se presentan en la Tabla 1. El precio base se usa para calcular el precio comercial del camarón adicionándole en pesos, el peso promedio del camarón en gramos, lo que se conoce como peso mas gramo; por ejemplo: El precio base de julio es de \$ 10.00 y si el peso de camarón en ese mes es de 15 g, el valor del precio comercial del camarón será de \$ 25.00 por kilogramo.

Tabla 1. Valores de los parámetros económicos

Parámetro	Costo (\$)	Precio base por mes	
		Precio (\$ kg ⁻¹)	mes
Postlarva (\$ millar ⁻¹)	55	10	Julio
Alimento balanceado (\$ kg ⁻¹)	10	15	Agosto
Fertilizantes (\$ kg ⁻¹)	12	20	Septiembre
Electricidad (\$ kwh ⁻¹)	1.15	25	Octubre
Mano de obra (\$ ha ⁻¹ año ⁻¹)	69,436	30	Noviembre
Cosecha (\$ ha ⁻¹ año ⁻¹)	19,317	40	Diciembre
Administración (\$ ha ⁻¹ año ⁻¹)	11,550	45	Enero
Combustibles y Vehículos (\$ ha ⁻¹ año ⁻¹)	16,500	45	Febrero
Mantenimiento (\$ ha ⁻¹ año ⁻¹)	8,988	48	Marzo
Diversos (\$ ha ⁻¹ año ⁻¹)	16,342	47	Abril
Oficina (\$ ha ⁻¹ año ⁻¹)	4,266	45	Mayo
Preparación (\$ ha ⁻¹ año ⁻¹)	1,600	30	Junio

Nota: Los costos corresponden al año 2009 y los precios corresponden a los meses del periodo de julio de 2008 a julio de 2009

2.3. Variabilidad de la producción

Se analizó la variabilidad infiriendo distribuciones de probabilidad de los rendimientos de producción a partir de valores estocásticos de los parámetros del submodelo biológico (ecuación 10) y de las relaciones entre el inicio de aireación y el oxígeno disuelto en el agua. En el caso de la salinidad y la temperatura se les ajustaron distribuciones de probabilidad a los valores de ambas variables contenidos en la base de datos.

Se utilizó la técnica de simulación Montecarlo 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 las correlaciones significativas que existieron entre los valores residuales de los parámetros del submodelo biológico.

El efecto que tienen las variables de manejo en los rendimientos de producción se analizó determinando, en un primer paso, aquellas combinaciones de valores de dichas variables que producen los valores medios mínimo y máximo de los rendimientos de biomasa y, en un segundo paso, evaluando el efecto de combinaciones de valores intermedios de las variables de manejo (Tabla 2).

El efecto del manejo se evaluó también en términos de cambios en los valores del coeficiente de variación (CV), calculado como: $CV = \text{desviación estándar} / \text{media}$. Para el caso de distribuciones multimodales se utilizaron los percentiles 2.5 y 97.5 divididos entre la mediana como indicador de variabilidad. La ecuación utilizada fue: Índice de variabilidad (IV) = $(\text{percentil } 97.5 - \text{percentil } 2.5) / \text{mediana}$.

La determinación de los valores promedio de los máximos y mínimos de la producción se obtuvo mediante el programa RiskOptimizer 5.5.

El análisis de variabilidad se efectuó para los diferentes niveles de manejo considerando:

- 1) La variabilidad que presenta un estanque individual durante cada ciclo de producción estacional afectada o no por la enfermedad.
- 2) La variabilidad anual atribuible al tamaño de la granja (2.5 ha y 50 ha) con estanques de 2.5 ha, tomando en cuenta el porcentaje de estanques afectados por la enfermedad, según el ciclo de producción estacional (100% de afectación en invierno y 70% en verano).
- 3) La variabilidad anual considerada en 2), además de la probabilidad de ocurrencia anual de la enfermedad, según información proporcionada para el periodo 2001 al 2009 por las granjas y el Comité de Sanidad Acuícola del Estado de Nayarit (CESANAY) (en 45% de los años no hubo afectación por la enfermedad, en 55% sí la hubo, y dentro de ese 55%, en 33% de los años afectó al cultivo en ambos ciclos, mientras que en el 11% sólo afectó el ciclo de invierno y el restante 11% el ciclo de verano).

Tabla 2. Niveles de manejo utilizados para el análisis de riesgo.

Nivel de manejo	Inicio de aireación (Semanas)		Duración del cultivo (Semanas)			Densidad (postlarvas m ⁻²)			Tamaño del estanque (ha)
	I y V	I (MB*)	I	V (MB)	V	I y V (MB)	I	V	I y V
N1 (peor)	5	7	13	11	13	40	40	40	8
N2	4	6.5	13	13.25	14.75	45	52.5	45	6.5
N3	3	6	13	15.5	16.5	50	65	50	5
N4	2	5.5	13	17.75	18.25	55	77.5	55	3.5
N5 (mejor)	1	5	13	20	20	60	90	60	2

*MB se refiere a la presencia de la enfermedad de la mancha blanca durante el invierno (I) o el verano (V)

A partir de los registros de eventos de la enfermedad antes mencionados, se determinó, mediante una prueba de aleatoriedad de categorías de escala nominal (Zar, 2010), que los eventos de enfermedad ocurrieron al azar en el tiempo ($p > 0.05$). Asimismo, se determinó, mediante una prueba de contingencia (Zar, 2010), que los eventos de la enfermedad ocurrieron con independencia del ciclo estacional, es decir, que los eventos, cuando ocurrieron en alguna estación, no influyeron en que la enfermedad se presentara o no en la otra ($p > 0.05$).

Una vez determinada la independencia en la ocurrencia interanual e interestacional de los eventos de la enfermedad, se procedió, con base en los mismos registros históricos, a estimar la probabilidad de ocurrencia de la enfermedad de acuerdo a lo mencionado en el inciso 3 (Fig. 1).

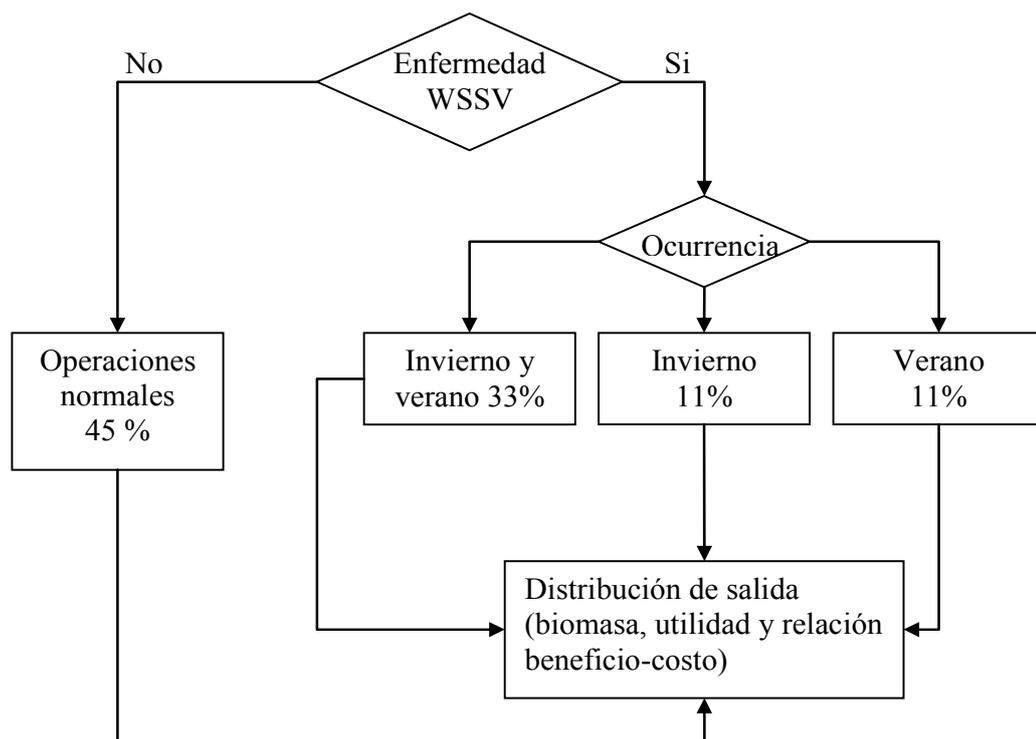


Figura 1. Diagrama de flujo para la simulación del porcentaje de ocurrencia interanual e interestacional de eventos con y sin la enfermedad de la mancha blanca.

2.4. Análisis de riesgo económico

Se siguió la misma metodología que para el análisis de la variabilidad en la producción. Para este análisis, sin embargo, además del modelo de stock, se utilizaron los submodelos tecnológicos y el submodelo económico.

Los indicadores utilizados para el análisis de riesgo económico fueron la utilidad y la relación beneficio-costado calculado antes de impuestos para todos los niveles de manejo. Para la utilidad y la relación beneficio-costado después de impuestos, así como la producción en el punto de equilibrio (PPE) y producción en el equilibrio (PE), solamente se consideraron los resultados que determinó el mejor nivel de manejo. Por lo tanto, no se consideró en el análisis los casos en que la enfermedad afectó a los dos ciclos de producción.

Tanto para la utilidad como para la relación beneficio-costado se utilizó, como indicador de riesgo, el inverso del coeficiente de variación, el cual se calcula como la razón de la media entre la desviación estándar que, de acuerdo con Mun (2006), se interpreta como el rendimiento obtenido por unidad de riesgo (RUR) en el que un mayor valor de este indicador significa menor riesgo. Para el caso de las distribuciones multimodales se utilizaron la mediana y la diferencia (percentil 97.5 – percentil 2.5) en vez de la media y la desviación estándar.

2.5. Análisis de sensibilidad

Se analizó la sensibilidad de los rendimientos de producción a la variabilidad aleatoria en los parámetros de los submodelos biológicos y de variables ambientales y de manejo. Lo anterior se hizo para un estanque individual cuando la enfermedad estuvo presente o ausente en los diferentes ciclos de producción, y considerando las peores y mejores condiciones de manejo del cultivo.

Para el análisis se utilizó el método de regresión múltiple disponible en @Risk 5.5. En este método, los coeficientes calculados para cada variable cuantifican la sensibilidad de la variable de salida.

También se analizó la sensibilidad de los rendimientos económicos a la variabilidad aleatoria en los parámetros del modelo bioeconómico. Al igual que en el análisis de sensibilidad en la producción, se realizó para un estanque individual cuando la enfermedad estuvo presente o ausente en los diferentes ciclos de producción, y considerando las peores y mejores condiciones de manejo del cultivo.

2.6. Validación del modelo bioeconómico

El modelo bioeconómico se especificó para efectuar predicciones descriptivas y prescriptivas, y para su validación se utilizaron los criterios descritos por Naylor (1982) para modelos de simulación de sistemas económicos. Para las predicciones descriptivas se usó la validación empírica mediante la predicción retrospectiva de datos históricos disponibles en las bases de datos aportados por los productores de las granjas.

El criterio para la aceptación del modelo fue la significación de las pruebas de hipótesis (análisis de variancia de la regresión y pruebas de equivalencia) implicadas en los análisis descritos previamente. En el caso de las prescriptivas, se pronosticó el comportamiento de ciclos de producción a operar en el futuro, con la finalidad de seleccionar los mejores resultados obtenidos.

La validación de las predicciones prescriptivas, de acuerdo con Overton (1977), sólo pueden ser teóricas y se fundamentaron en la compatibilidad del comportamiento del modelo con el conocimiento general existente del cultivo de camarón, y en particular, con la información contenida en las bases de datos utilizadas para la interpolación de los diferentes niveles de manejo.

III. Resultados

3.1. Modelo de stock y análisis de la producción biológica para casos con operaciones normales.

Se obtuvieron resultados significativos en la construcción del submodelo biológico ($p < 0.05$), en términos del análisis de varianza de la regresión no lineal. El modelo de crecimiento mostró flexibilidad para describir los diferentes tipos de curvas observadas en la base de datos (Fig. 2a). Asimismo, el modelo de supervivencia describió de manera adecuada la mortalidad en todos los casos (Fig. 2b).

En la Tabla 3 se presentan las relaciones establecidas, mediante regresión lineal múltiple, entre los parámetros de los modelos de stock y las variables ambientales y de manejo. La probabilidad de error p indica la significación del ajuste. De acuerdo con esos resultados, mayores niveles de oxígeno disuelto en el agua favorecen el crecimiento. Con estanques pequeños, menores salinidades y bajas densidades de siembra se obtienen mayores pesos finales (w_f); la tasa instantánea de mortalidad (z) aumenta con menores temperaturas; y la constante de crecimiento (k) se relacionó inversamente con la temperatura y el oxígeno disuelto en el agua, y directamente con la duración del cultivo.

Tabla 3. Submodelos ambientales y de manejo para el modelo de stock, usado en los casos sin afectación por la enfermedad de la mancha blanca.

Modelo	p
$w_f = -2.55 + 1.144OD - 0.235S - 0.091D - 0.964TE + 1.656DC$	0.00001
$k = 1.03 - 0.0063T - 0.012OD + 0.009DC$	0.00001
$z = 0.04 - 0.00096T$	0.02950

El oxígeno disuelto se relacionó significativamente con el inicio de aireación ($OD = -0.068 \cdot Ia + 10.18$). El inicio temprano de la aireación provocó altos niveles de oxígeno. Esta relación fue utilizada para estimar cómo los parámetros w_f y k podrían ser controlados a través del inicio de aireación.

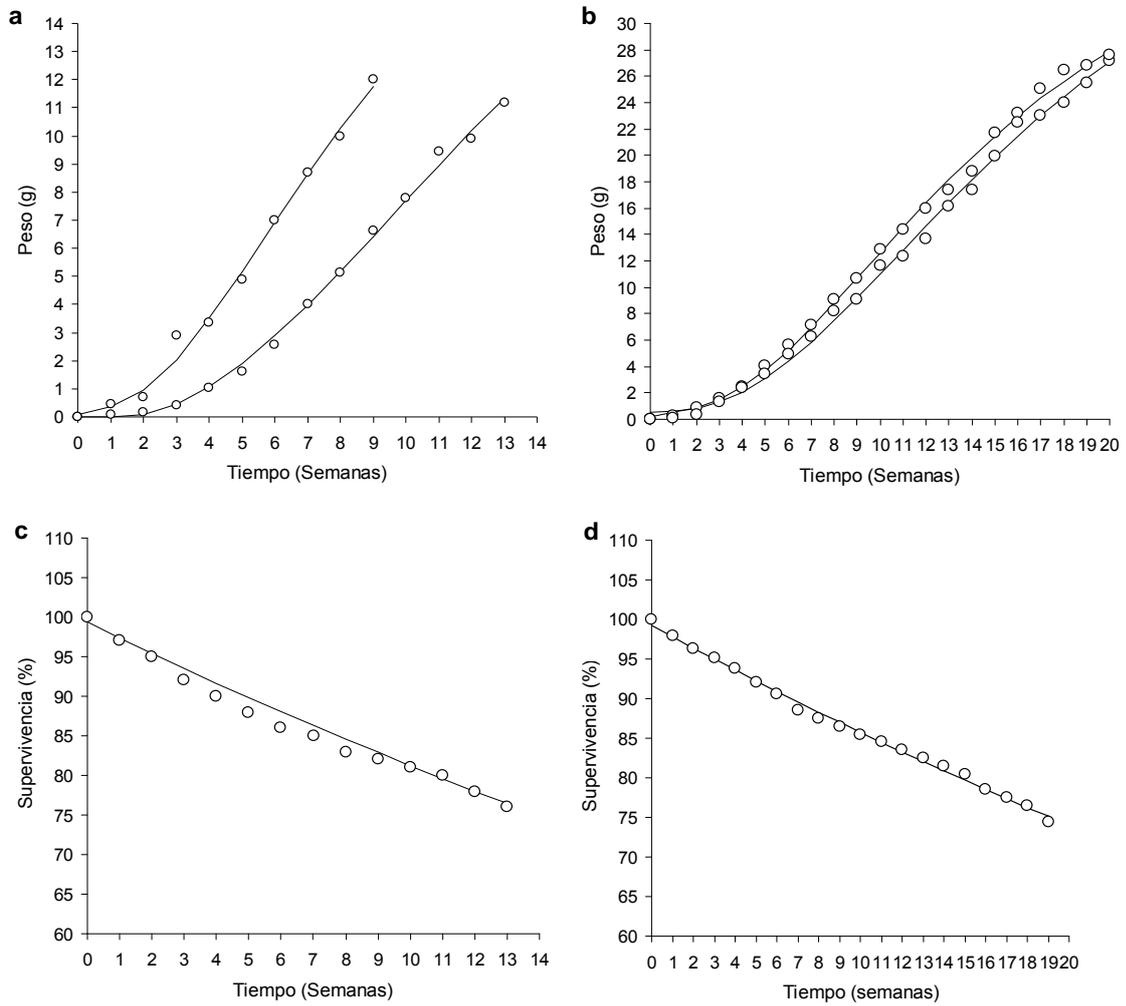


Figura 2. Ejemplos de curvas ajustadas de crecimiento para los ciclos de invierno (a) y verano (b) y de supervivencia durante el invierno (c) y verano (d) para casos con operaciones normales (los ejes de las escalas están reducidos para mayor claridad).

Se encontró una relación significativa entre los rendimientos observados en la base de datos y los estimados por el modelo de stock usando los coeficientes de los modelos de regresión lineal múltiple listados en la Tabla 3. Los resultados de la regresión lineal simple entre los valores de rendimiento observados y estimados, y la prueba de equivalencia correspondiente, permitieron concluir que la pendiente es igual a 1, indicando una capacidad predictiva satisfactoria del modelo de stock.

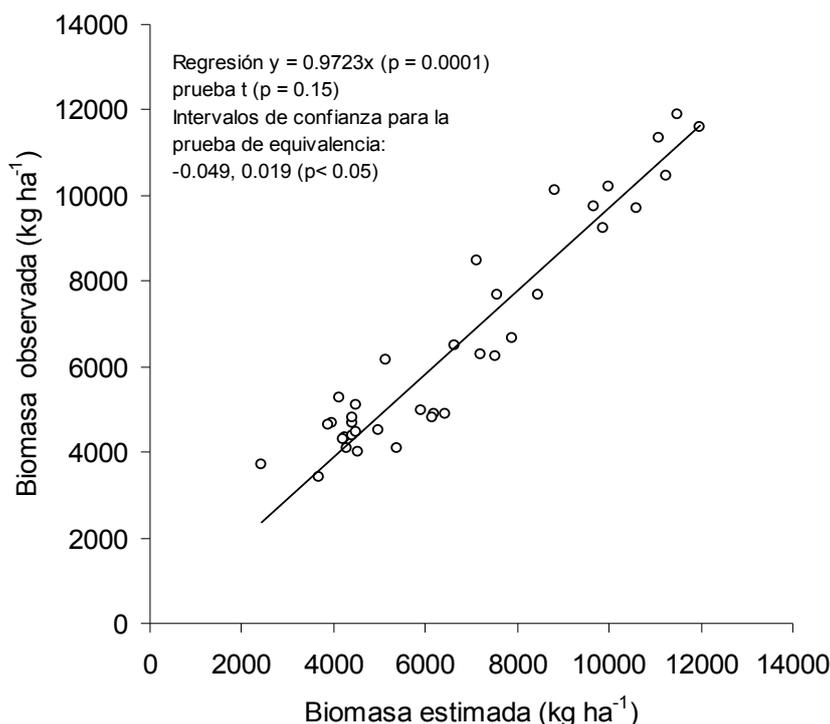


Figura 3. Relación entre la biomasa observada y la estimada usando el modelo de stock y los coeficientes de la regresión de la Tabla 3, para los casos con operaciones normales.

Cuando se utilizó el modelo de stock para predecir la producción en función del tiempo, se observó que los más altos rendimientos se obtuvieron empleando los periodos más largos del cultivo (13 semanas para el invierno y 20 semanas para el verano) (Fig. 4). Esos periodos de cultivo fueron utilizados para calcular los rendimientos de la producción de camarón.

La mayor producción calculada (invierno $6,900 \text{ kg ha}^{-1}$; verano $12,600 \text{ kg ha}^{-1}$) se encontró cuando se utilizaron 60 postlarvas m^{-2} , estanques pequeños (2 ha), e iniciando la aireación a la primera semana del periodo del cultivo (Fig. 4b y d). Los

más bajos rendimientos se estimaron con 40 postlarvas m^{-2} , estanques grandes (8 ha) y retrasando el inicio de aireación hasta la quinta semana de iniciado el cultivo (invierno, 2,600 $kg\ ha^{-1}$; verano, 6,000 $kg\ ha^{-1}$) (Fig. 4a y c). De acuerdo con lo anterior, los más altos rendimientos se vieron incrementados en un 38% en el invierno y en un 48% en el verano, cuando se pasó del peor al mejor esquema de manejo.

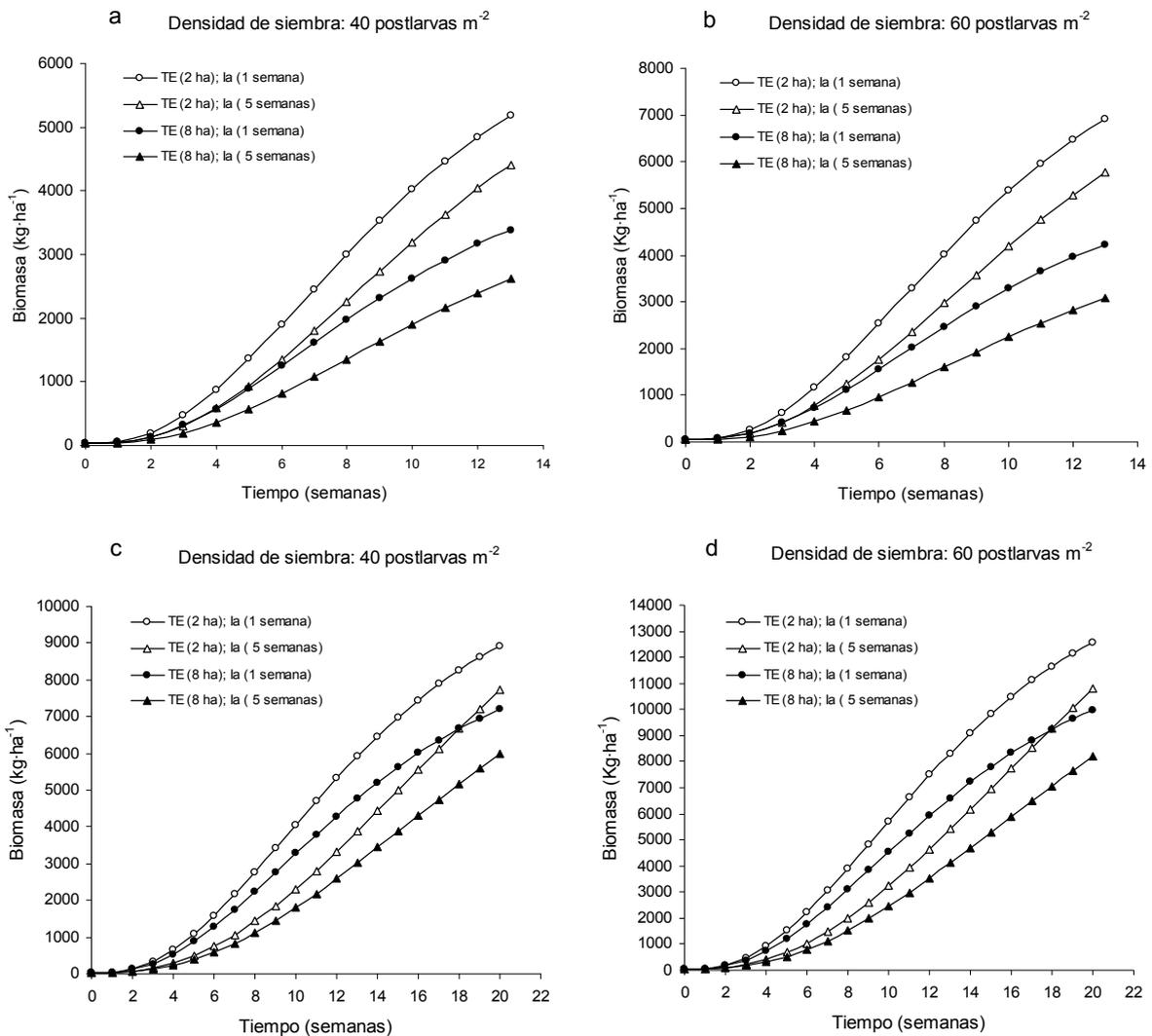


Figura 4. Predicción de la producción de camarón en función de la densidad de siembra, tamaño del estanque (TE), inicio de aireación (la) y duración del cultivo durante los ciclos de invierno (a y b) y verano (c y d) (nótese que los ejes de las escalas no coinciden).

El análisis de la contribución de cada variable de manejo a cambios en los rendimientos de la biomasa mostró que el tamaño del estanque fue particularmente importante en los ciclos de invierno (Tabla 4), mientras que la densidad de siembra y el inicio de aireación contribuyeron menos. En contraste, el tamaño del estanque tuvo menor importancia durante los ciclos de verano, mientras que la densidad de siembra fue la variable más sensible.

Tabla 4. Contribución de las variables de manejo a incrementos de la biomasa de camarón. Los valores para cada variable son los porcentajes mínimos, máximos y medios de los incrementos de la biomasa obtenida de los incrementos calculados para cada combinación de valores extremos (dentro de los paréntesis) de las mismas variables de manejo. Los valores medios indican la contribución de cada variable.

	Porcentaje		
	Mínimo	Máximo	Media
Invierno:			
Densidad de siembra (40-60 postlarvas m ⁻²)	17.8	33.7	26.8
Tamaño del estanque (2-8 ha)	53.0	87.0	68.0
Inicio de aireación (1-5 semanas)	17.2	37.0	24.1
Verano:			
Densidad de siembra (40-60 postlarvas m ⁻²)	36.4	40.8	38.9
Tamaño del estanque (2-8 ha)	24.0	31.7	27.6
Inicio de aireación (1-5 semanas)	15.4	21.8	18.4

3.2. Modelo de stock y análisis de la producción biológica para casos con mancha blanca

Al igual que los casos en que la granja operó normalmente, se obtuvieron resultados significativos ($p < 0.05$) en la construcción del submodelo biológico, en términos del análisis de varianza de la regresión no lineal, cuando se ajustaron las curvas de crecimiento (Fig. 5a) y supervivencia (Fig. 5b). En este caso, el modelo de supervivencia describió de manera adecuada la mortalidad causada por la

enfermedad (mortalidad, en lo sucesivo) cuando ésta se presentó al inicio, a mediados o al final del periodo de cultivo.

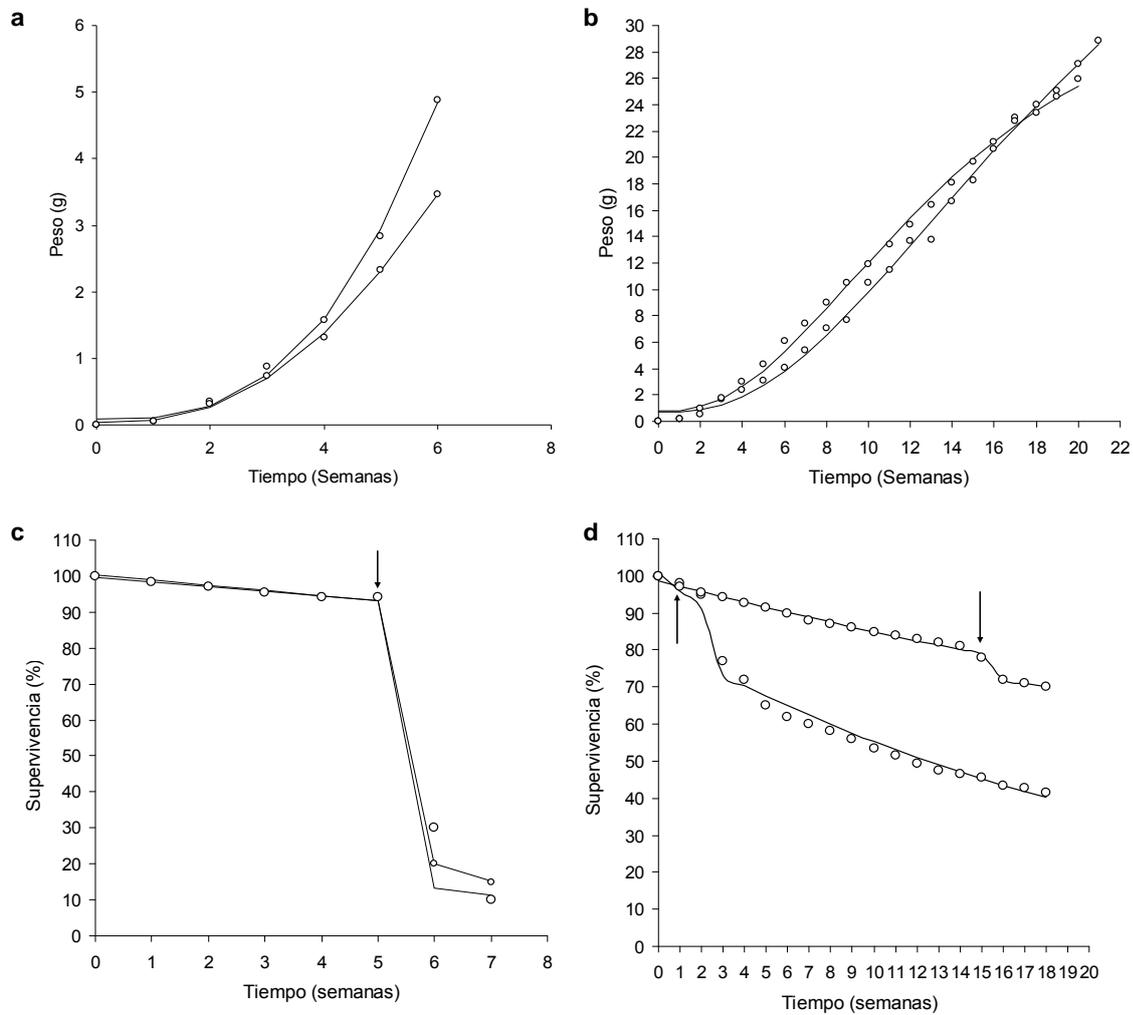


Figura 5. Ejemplos de los ajustes de las ecuaciones de crecimiento a las curvas de los datos correspondientes a siembras en invierno (a) y verano (b) y supervivencia para casos con enfermedad para invierno (a) y verano (b). Las flechas indican el momento en que se presenta la mortalidad por la enfermedad (nótese que cada gráfica tiene sus propias escalas).

El análisis de correlación arrojó resultados significativos dependiendo del ciclo de producción. El peso final del camarón (w_f) se correlacionó positivamente con la temperatura en el invierno pero inversamente con la salinidad en el verano (Tabla 5). Los valores más altos de la tasa instantánea de mortalidad (z_1) se produjeron en el invierno, cuando los niveles de oxígeno disuelto disminuyeron. La mortalidad (m) debido a la enfermedad fue menor al aumentar la temperatura en el invierno y el oxígeno disuelto en ambas estaciones, o cuando la salinidad disminuyó en el verano. Se observó una aparición temprana de la enfermedad (t_w) en el verano en los casos con menor oxígeno disuelto, o cuando se utilizaron estanques grandes. No se observaron correlaciones significativas de los parámetros de producción con la densidad inicial del cultivo.

Tabla 5. Matriz de correlación entre parámetros de los modelos de crecimiento y supervivencia con las variables ambientales y de manejo. Se presentan los coeficientes de correlación que fueron significativos.

Parámetro	Temperatura		Salinidad	Oxígeno disuelto		Tamaño del estanque
	Verano	Invierno	Verano	Verano	Invierno	Verano
w_f		0.53	-0.51		0.73	
z_1	0.34			-0.73		0.34
t_w	-0.35			0.73		-0.37
m		-0.65	0.36	-0.54	-0.49	
z_2	0.43		0.26	-0.61		0.50

Los resultados de regresión múltiple, en general, son consistentes con los observados en el análisis de correlación (Tabla 6). Se predijo mayor peso final del camarón (w_f) con el aumento de la temperatura del agua y valores de salinidad más bajos. Descensos en la mortalidad (m) por la enfermedad se asociaron con aumentos en la temperatura y el oxígeno disuelto, y las tasas instantáneas de mortalidad (z_1 y z_2) aumentaron al disminuir el oxígeno disuelto. Se presentaron retrasos en la mortalidad causada por la enfermedad (t_w) cuando la temperatura y el oxígeno

disuelto fueron mayores. En consistencia con el análisis de correlación, no se obtuvieron resultados significativos para el parámetro k y la densidad de cultivo.

Tabla 6. Submodelos ambientales y de manejo para los casos afectados por la enfermedad de la mancha blanca.

Modelo	p
$w_f = -41.5985 + 2.8044T - 0.7941S$	0.00001
$z_1 = 0.2382 - 0.0027T - 0.0109 OD - 0.0006D$	0.00070
$t_w = -79.5836 + 1.8603T + 3.7632 OD$	0.00001
$m = 296.5821 - 8.5830T - 4.4808OD + 0.9929S$	0.00001
$z_2 = 0.1014 - 0.0085OD$	0.00001

Los modelos de regresión lineal simple mostraron que el tiempo en que se presentó la enfermedad (t_w) y el porcentaje de mortalidad causada por la enfermedad (m) se relacionaron directamente e inversamente con el oxígeno disuelto en el agua, respectivamente (Tabla 7).

Los resultados fueron similares cuando los valores medios de oxígeno disuelto, previos a que ocurriera la enfermedad, se relacionaron con t_w y m (Tabla 7). Esto constituyó evidencia directa de la importancia de los altos niveles de oxígeno disuelto para la reducción del impacto de la infección por el virus de la mancha blanca.

Tabla 7. Relaciones del tiempo en que ocurrió la mortalidad por la enfermedad (t_w) y el porcentaje de dicha mortalidad (m) con el oxígeno disuelto (OD), así como respecto a valores de oxígeno disuelto previo a la mortalidad por la enfermedad (OD_w).

Ecuación	p	Estación
$t_w = 4.44 OD - 26.3$	0.0001	Verano
$t_w = 3.50 OD_w - 17.8$	0.0001	Invierno
$m = -4.00 OD + 46.6$	0.0001	Verano
$m = -2.67 OD_w + 34.9$	0.008	Verano
$m = -6.88 OD + 126.8$	0.043	Invierno

Las pruebas encaminadas a determinar diferencias entre las variables ambientales y de manejo de los ciclos de las siembras de verano en 2004 y 2005 indicaron que la temperatura y la salinidad no difirieron significativamente, aunque se encontraron diferencias significativas entre la densidad inicial de siembra, intensidad de la aireación, el tiempo de inicio de la aireación y el oxígeno disuelto (Tabla 8).

Durante 2004 la aireación fue más intensa, habiendo iniciado dentro de las primeras tres semanas del periodo de cultivo. En contraste, en 2005, algunos estanques no usaron aireación sino hasta la semana 14, dando como resultado valores promedio bajos de aireación y tiempos de inicio de aireación tardíos. Las diferencias encontradas en el manejo de la aireación, por lo tanto, produjeron altos niveles de oxígeno en 2004 y bajos niveles en 2005 (Tabla 8).

El análisis de regresión lineal simple mostró, para los dos ciclos de verano, que el oxígeno disuelto tuvo una relación directa con la aireación total, mientras que se observó una relación inversamente proporcional entre el oxígeno disuelto y el tiempo en que inició la aireación (Tabla 9).

Tabla 8 Media (\pm error estándar) de las variables ambientales, densidad de siembra, y aireación para siembras en verano del 2004 y 2005 (letras diferentes indican diferencias significativas)

Variable	2004	2005
Temperatura ($^{\circ}$ C)	31.5 \pm 0.07a	31.7 \pm 0.10a
Salinidad	25.9 \pm 0.26a	25.6 \pm 0.78a
Densidad de siembra (postlarvas m ⁻²)	50.7 \pm 1.5a	55.4 \pm 2.3b
Inicio de aireación (semanas)	1.4 \pm 0.2a	5.2 \pm 1.1b
Aireación total (Hp h ha ⁻¹)	11811.1 \pm 192.0a	10163.1 \pm 587.2b
Oxígeno disuelto (mg l ⁻¹)	9.3 \pm 0.09a	7.5 \pm 0.18b
Oxígeno disuelto (OD_w) [*] (mg l ⁻¹)	9.2 \pm 0.11a	7.2 \pm 0.23b
[*] OD_w = Valores promedios de oxígeno, previo a la mortalidad por la enfermedad (t_w)		

Tabla 9. Relaciones entre el oxígeno disuelto y la aireación total y el tiempo de inicio de aireación

Ecuación	p	Estación (año)
$OD = 0.0002 AT + 6.15$	0.02	Verano (2004 y 2005)
$OD = - 0.232 la + 9.62$	0.039	Verano (2004)
$OD = - 0.099 la + 8.05$	0.009	Verano (2005)
$OD = - 9.33 - 0.169 la$	0.0003	Invierno (2006)
$OD = - 9.076 - 0.9 la$	0.00001	Verano (2004 y 2005)

También, se encontró que el tiempo en que se presentó la enfermedad y el porcentaje de mortalidad se relacionaron positivamente y negativamente con la aireación total, respectivamente (Tabla 10). Por otro lado, se encontró una relación directa entre la mortalidad y el tiempo en que se inició la aireación (Tabla 10). Asimismo, el retraso en la ocurrencia de la mortalidad por la enfermedad subsecuente al inicio de aireación, se relacionó de manera inversa con el inicio de la aireación (Tabla 10).

Tabla 10. Relaciones del tiempo en que se presentó la mortalidad por la enfermedad, porcentaje de mortalidad, retraso en la ocurrencia de la mortalidad por la enfermedad subsecuente al inicio de aireación, con la aireación total y tiempo en que la aireación se inició.

Ecuación	p	Estación / año
$t_w = 0.0012AT + 2.84$	0.005	Verano 2004
$t_w = 0.0005AT - 0.3352$	0.043	Verano 2005
$t_w = 0.0013AT + 4.58$	0.052	Invierno 2006
$m = - 0.0011AT + 24.66$	0.039	Verano
$m = 0.9949la + 10.72$	0.042	Invierno 2005
$R = - 3.0952la + 16.90$	0.02	Verano
$R = - 0.72la + 4.22$	0.0001	Invierno

Al igual que cuando la granja operó normalmente, se encontró una relación significativa entre los rendimientos en la base de datos y los estimados por el modelo de stock usando los coeficientes de los modelos de regresión lineal múltiple listados

en la Tabla 6. Los resultados de la regresión lineal simple entre los valores de rendimiento observados y estimados, y la prueba de equivalencia correspondiente, permitieron concluir que la pendiente es igual a 1, indicando una capacidad predictiva satisfactoria del modelo de stock.

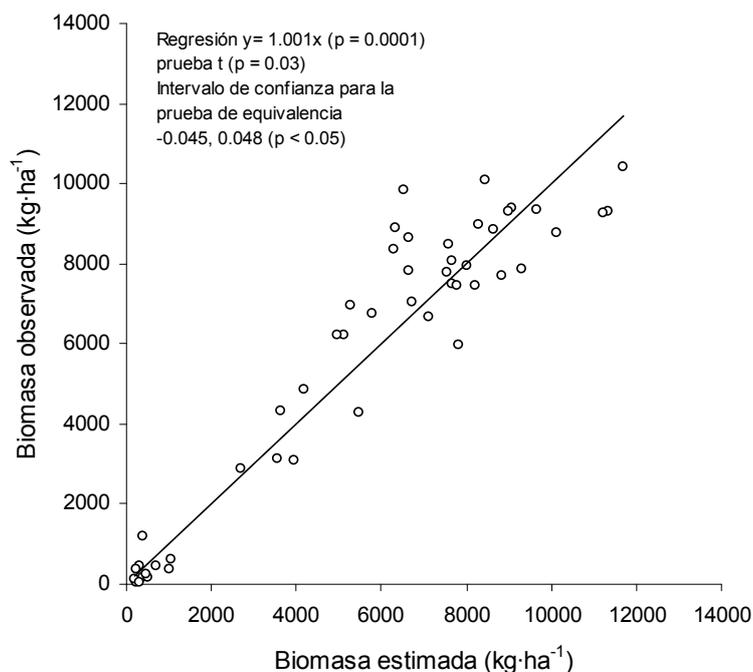


Figura 6. Relación entre los rendimientos de la biomasa observada y estimada utilizando el modelo de stock y los coeficientes de la Tabla 6.

La producción en función del tiempo que se predijo con el modelo mostró que, para el verano, existen reducciones en el porcentaje de mortalidad y retrasos en la aparición de la enfermedad cuando se incrementan los niveles de aireación (Fig. 7a). Se observó que incrementos de 9,000 a 14,000 $\text{Hp}\cdot\text{h ha}^{-1}$ correspondieron a incrementos en la producción de 6,610 a 8,750 kg ha^{-1} , representando un 32% de biomasa adicional.

Los resultados fueron similares cuando la producción fue predicha en función del inicio de la aireación (Fig. 7b). Cuando se compararon los rendimientos obtenidos cuando la aireación inició a la primera semana y la aireación se retrasó hasta la quinta semana, se observó una reducción en la producción de 8,360 kg ha^{-1} a 6,840 kg ha^{-1} , representando una pérdida del 18% en la biomasa de camarón. Durante el

ciclo de invierno, utilizando 700 Hp·h ha⁻¹, en lugar de 300 Hp·h ha⁻¹, produjo 90% de incremento en la biomasa (Fig. 8a), mientras que iniciando la aireación a la semana 5 en lugar de la semana 3, redujo la biomasa en 92% (Fig. 8b).

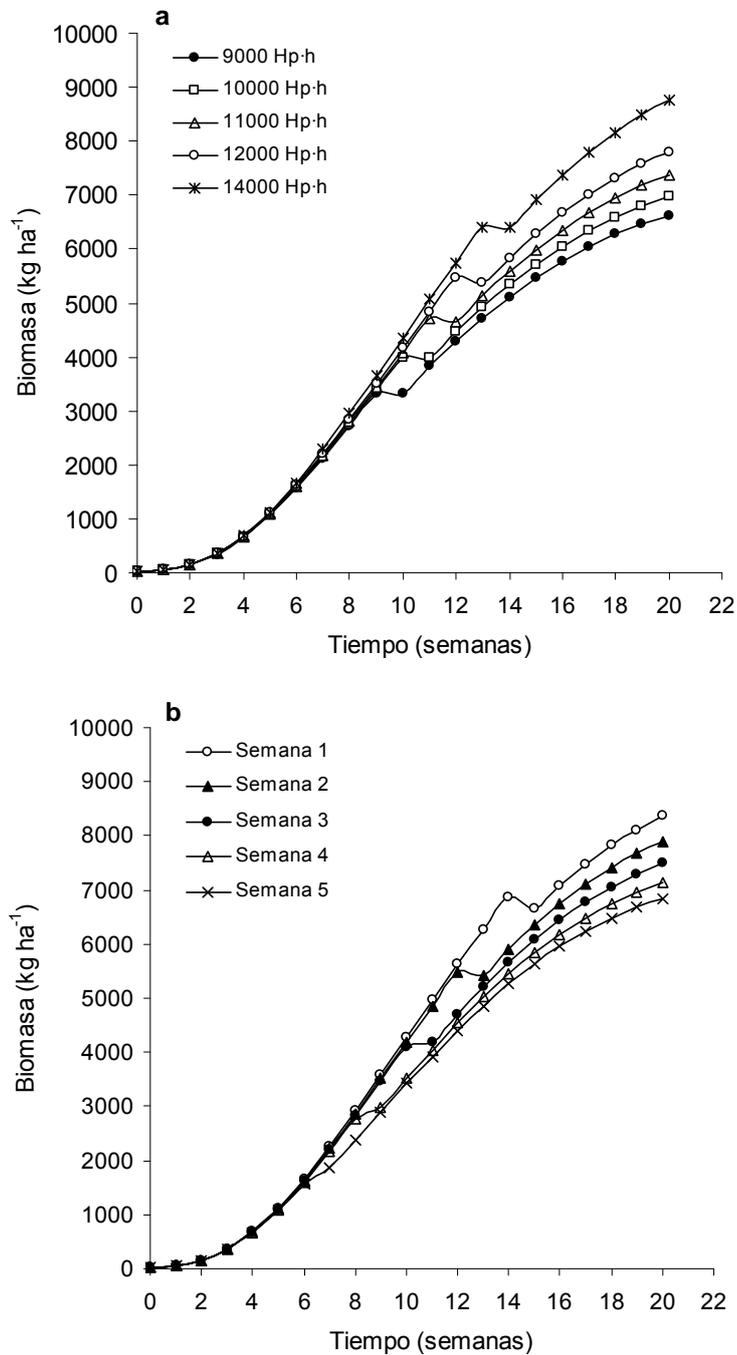


Figura 7. Producción de camarón en función del tiempo, de la aireación total (a) y del inicio de la aireación (b) durante el verano.

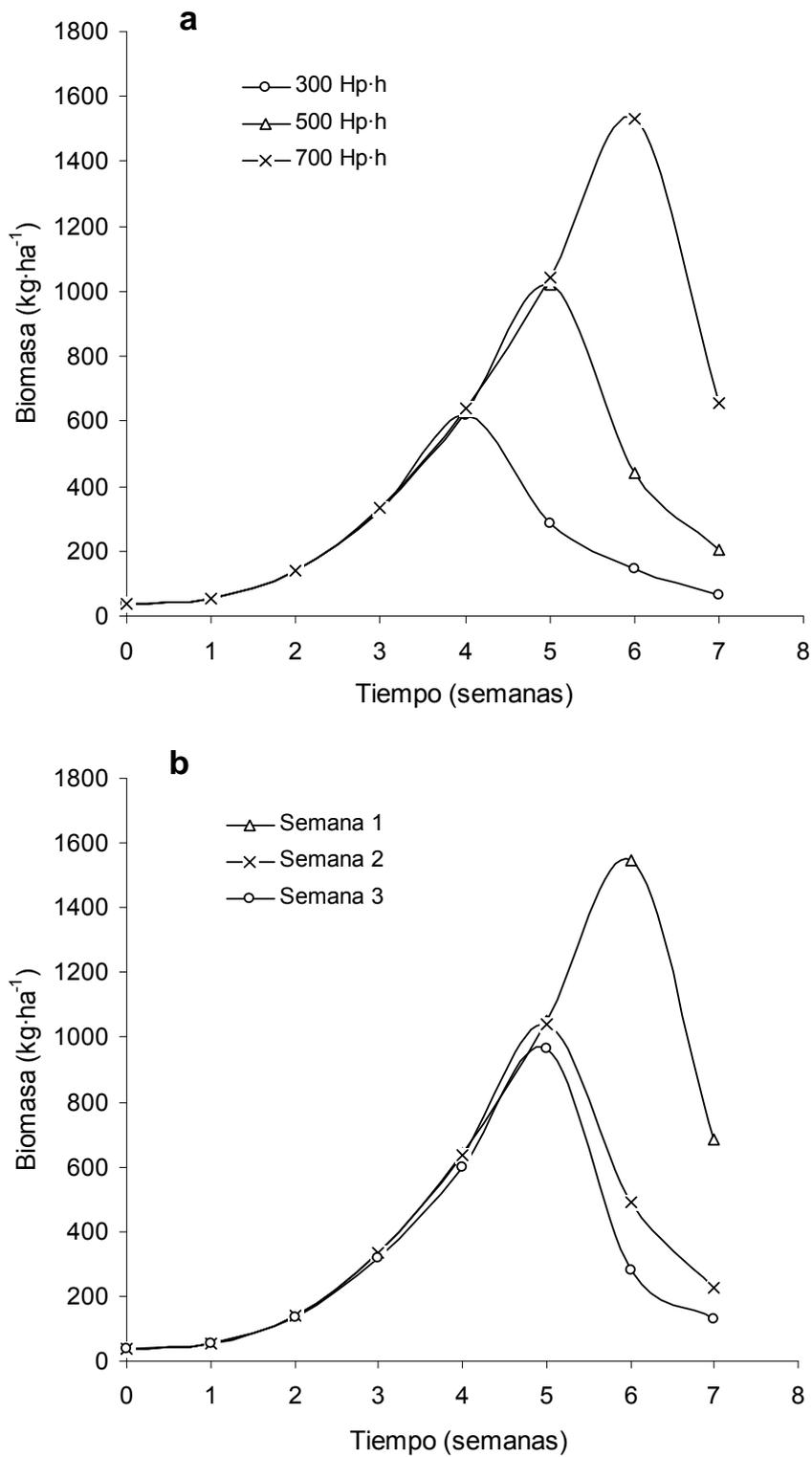


Figura 8. Producción de camarón en función del tiempo, de la aireación total (a) y del inicio de la aireación (b) durante el invierno.

3.3 Submodelos tecnológicos

Se obtuvieron resultados significativos ($p < 0.05$), en términos del análisis de varianza de regresión, cuando se ajustaron las ecuaciones 7 y 8 correspondientes al factor de conversión alimenticia, y 9 y 10 a la aireación. Las ecuaciones describieron de manera adecuada las situaciones para los casos cuando ocurre, o no, la enfermedad (Fig. 9).

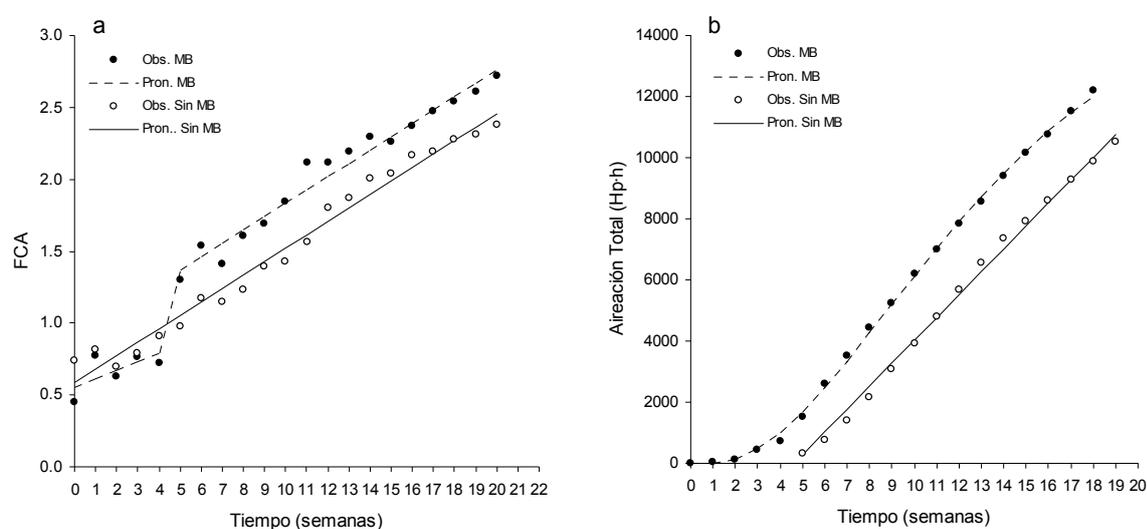


Figura 9. Ejemplos de resultados del ajuste de las ecuaciones para el cálculo del factor de conversión alimenticia (FCA) (a) y de la aireación (b) cuando estuvo presente, o no, la enfermedad (MB).

3.3.1. Submodelo de variables ambientales y de manejo para el factor conversión alimenticia para operaciones normales.

En los casos en que no se presentó la enfermedad, los resultados indicaron que la pendiente del modelo que predice el FCA (a_F) se relacionó positivamente con el oxígeno disuelto en el agua, mientras que el intercepto de dicho modelo (b_F) se relacionó de manera inversa con el oxígeno disuelto, la temperatura, la salinidad y el tamaño del estanque (Tabla 11).

Tabla 11. Submodelos ambientales y de manejo para el modelo de factor de conversión alimenticia usado durante operaciones normales.

Modelo	p
$a_F = 0.0168 + 0.00858OD$	0.00001
$b_F = 2.82 - 0.0441T - 0.059OD - 0.02477S - 0.0216TE$	0.00001

3.3.2. *Submodelo de variables ambientales y de manejo para el factor conversión alimenticia cuando la enfermedad estuvo presente.*

Los resultados indicaron que el incremento del factor de conversión alimenticia (i_F) se relacionó de manera inversa con la temperatura (Tabla 12), mientras que el tiempo en que se presentó la enfermedad (t_w) se relacionó positivamente con la temperatura, el oxígeno disuelto y la duración del cultivo. No se encontraron relaciones con las pendientes antes o después de que se presentó la enfermedad, ni con el intercepto del modelo utilizado (Tabla 12).

Tabla 12. Submodelos ambientales y de manejo para el modelo de factor de conversión alimenticia usado en los casos afectados por la enfermedad de la mancha blanca.

Modelo	p
$i_F = 13.71 - 0.416T$	0.00001
$t_w = -79.58 + 1.86T + 3.76OD + 0.009DC$	0.00001

3.3.3. *Submodelo de variables ambientales y de manejo para la aireación para operaciones normales.*

Los resultados indicaron que la aireación final (A_F) se relacionó positivamente con la temperatura del agua y negativamente con el tamaño del estanque. El parámetro b del modelo de aireación se relacionó de manera positiva con la duración del cultivo e inversamente con la temperatura, y el parámetro d mostró una relación inversamente proporcional con la temperatura del agua. (Tabla 13).

Tabla 13. Submodelos ambientales y de manejo para el modelo de aireación durante operaciones normales.

Modelo	p
$A_F = -15468 - 649.77TE + 849.2T$	0.00001
$b = 13.50 + 0.34DC - 0.265T$	0.00550
$d = 1.92 - 0.049T$	0.00001

3.3.4. Submodelo de variables ambientales y de manejo para la aireación cuando la enfermedad estuvo presente.

Los resultados muestran que la pendiente (a_{At}) del modelo que predice la aireación total se relacionó positivamente con el inicio de la aireación, la temperatura y la densidad (Tabla 14), mientras que el intercepto del modelo (b_A), se relacionó de manera inversamente proporcional con el inicio de la aireación y la temperatura (Tabla 14).

Tabla 14. Submodelos ambientales y de manejo para el modelo de aireación usado para operaciones con afectación por la enfermedad.

Modelo	P
$a_{At} = -2213 + 82.83T + 4.52D + 2384/a$	0.00001
$b_{At} = 19296 - 623.28T - 945.56/a$	0.00001

La capacidad predictiva de los submodelos tecnológicos fue satisfactoria en todos los casos, según lo indicaron los análisis de regresión lineal simple entre los valores estimados y observados, y las pruebas de equivalencia correspondientes, (Fig. 10).

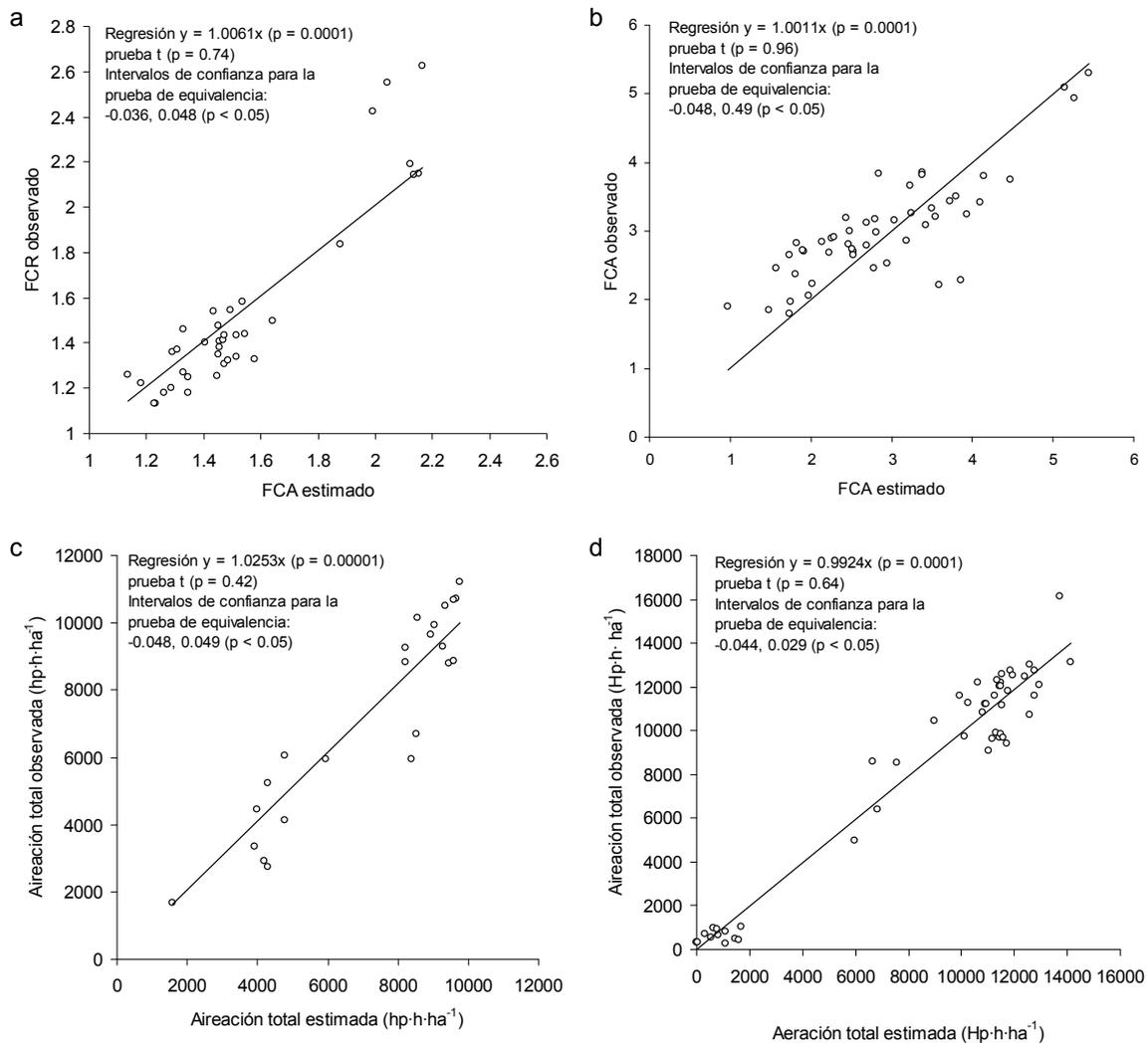


Figura 10. Relación entre los valores observados en la base de datos y los estimados por los modelos tecnológicos utilizando los diferentes modelos y los coeficientes de la regresión lineal múltiple. (a) FCA con operaciones normales; (b) FCA cuando afectó la enfermedad; (c) Aireación para operaciones normales; (d) Aireación para operaciones con presencia de la enfermedad (nótese que cada gráfica tiene sus propias escalas).

3.4. Análisis de la variabilidad de la producción

Las diferentes estrategias de manejo del cultivo tuvieron un efecto evidente sobre los rendimientos promedio de la producción y los coeficientes de variación que pueden obtenerse con cada una de ellas (Fig. 11).

Se encontró que entre el peor y mejor esquema de manejo, cuando el cultivo es operado normalmente, los rendimientos pasaron de 2,600 kg ha⁻¹ a 8,400 kg ha⁻¹ para el ciclo de invierno (Fig. 11a), mientras que en el verano la producción pasó de 3,000 kg ha⁻¹ a 12,600 kg ha⁻¹ (Fig. 11b). Por otro lado, cuando el cultivo es afectado por la enfermedad, la producción se incrementó de 220 kg ha⁻¹ a 1,300 kg ha⁻¹ para el ciclo de invierno (Fig. 11c), mientras que en el verano pasó de 2,800 kg ha⁻¹ a 8,100 kg ha⁻¹ (Fig. 11d).

A partir de los coeficientes de variación se observa que tanto en condiciones normales como en presencia de la enfermedad, la variabilidad es mayor en invierno que en verano. Asimismo, cuando se presenta la enfermedad, se observa la mayor variabilidad, que se agrava con el peor esquema de manejo (Fig. 11).

En el Anexo 2 se presentan las distribuciones de frecuencia para cada estación entre los niveles extremos de manejo sin y con presencia de la enfermedad.

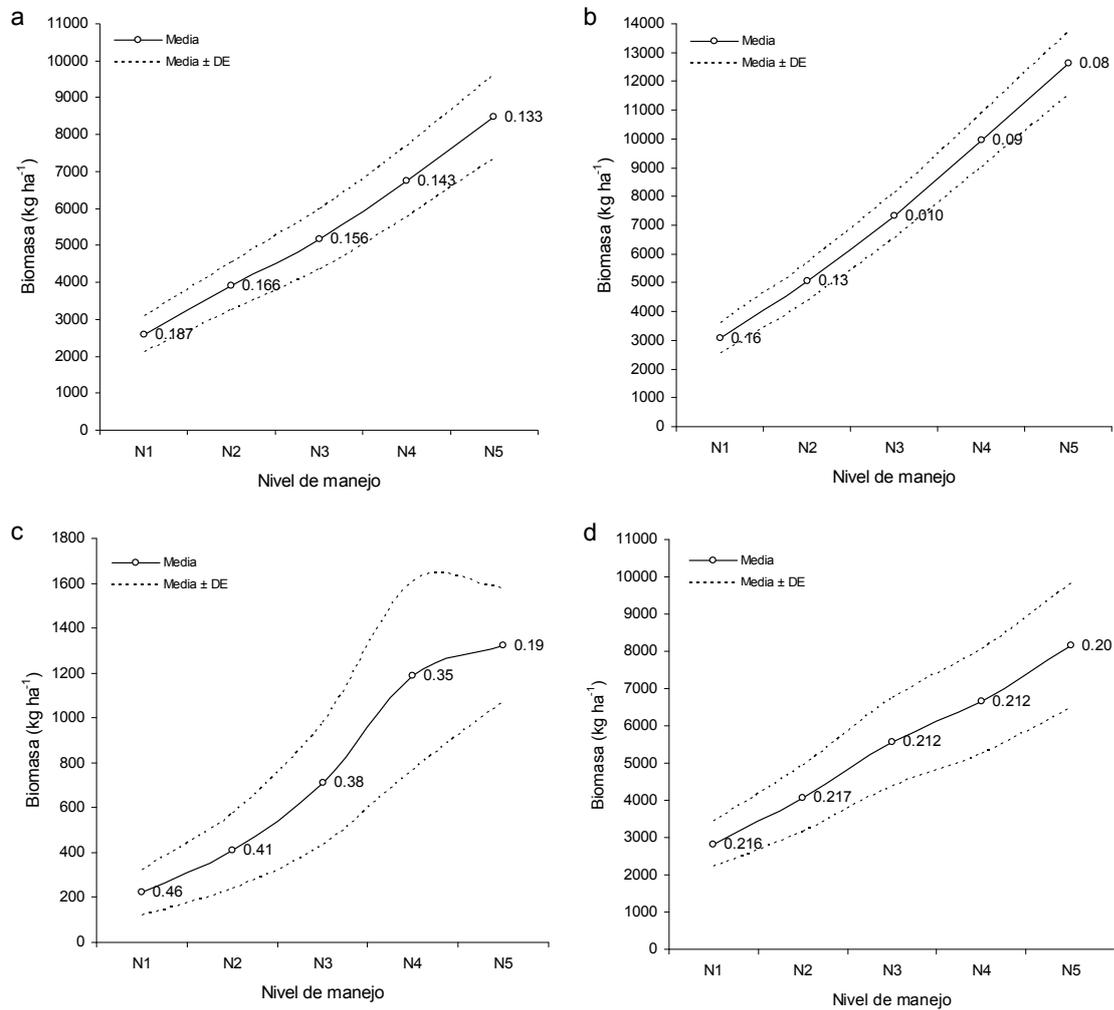


Figura 11. Producción obtenible en un estanque para los diferentes niveles de manejo presentados en la Tabla 2. (a) Cuando la granja operó normalmente durante el invierno; (b) cuando la granja operó normalmente durante el verano; (c) cuando la producción se vio afectada por la enfermedad en el invierno; (d) cuando la producción se vio afectada por la enfermedad en el verano. Los valores numéricos en las curvas son los coeficientes de variación para cada nivel de manejo y DE es la desviación estándar ((nótese que cada gráfica tiene sus propias escalas)).

En términos de la producción que se puede obtener en un ciclo de producción anual, independientemente de la presencia o ausencia de la enfermedad en un ciclo o en otro, los resultados muestran que la variabilidad de la producción disminuye conforme se mejora el manejo y cuando la escala de producción se incrementa (Fig. 12).

De acuerdo con los valores numéricos de los coeficientes de variación, siempre existió menor variabilidad de la producción cuando la enfermedad estuvo ausente (Fig. 12a) que cuando estuvo presente (Fig.12b). El rendimiento promedio de la producción, cuando se mejoró el manejo, pasó de 8,000 kg ha⁻¹ a 20,500 kg ha⁻¹ cuando las operaciones fueron normales (Fig. 12a). Lo mismo ocurrió cuando la enfermedad se presentó, incrementándose de 3,200 kg ha⁻¹ a 10,400 kg ha⁻¹ (Fig.12b).

Cuando la enfermedad afecta sólo al ciclo de siembras en invierno (Figura 12c), al mejorar las condiciones de manejo, la producción promedio se incrementó de 4,100 a 13,700 kg ha⁻¹ (Figura 12c).

El mismo patrón se presentó cuando la enfermedad afecta sólo al ciclo de siembras en verano (Figura 12d). Al mejorar el esquema de manejo, la producción pasó de 7,400 a 17,600 kg ha⁻¹ (Figura 12d).

Las distribuciones de frecuencia con las que se generaron las gráficas de la Figura 12 se presentan en el anexo 5 y corresponden a ejemplos de los dos extremos de los niveles de manejo presentados en este trabajo.

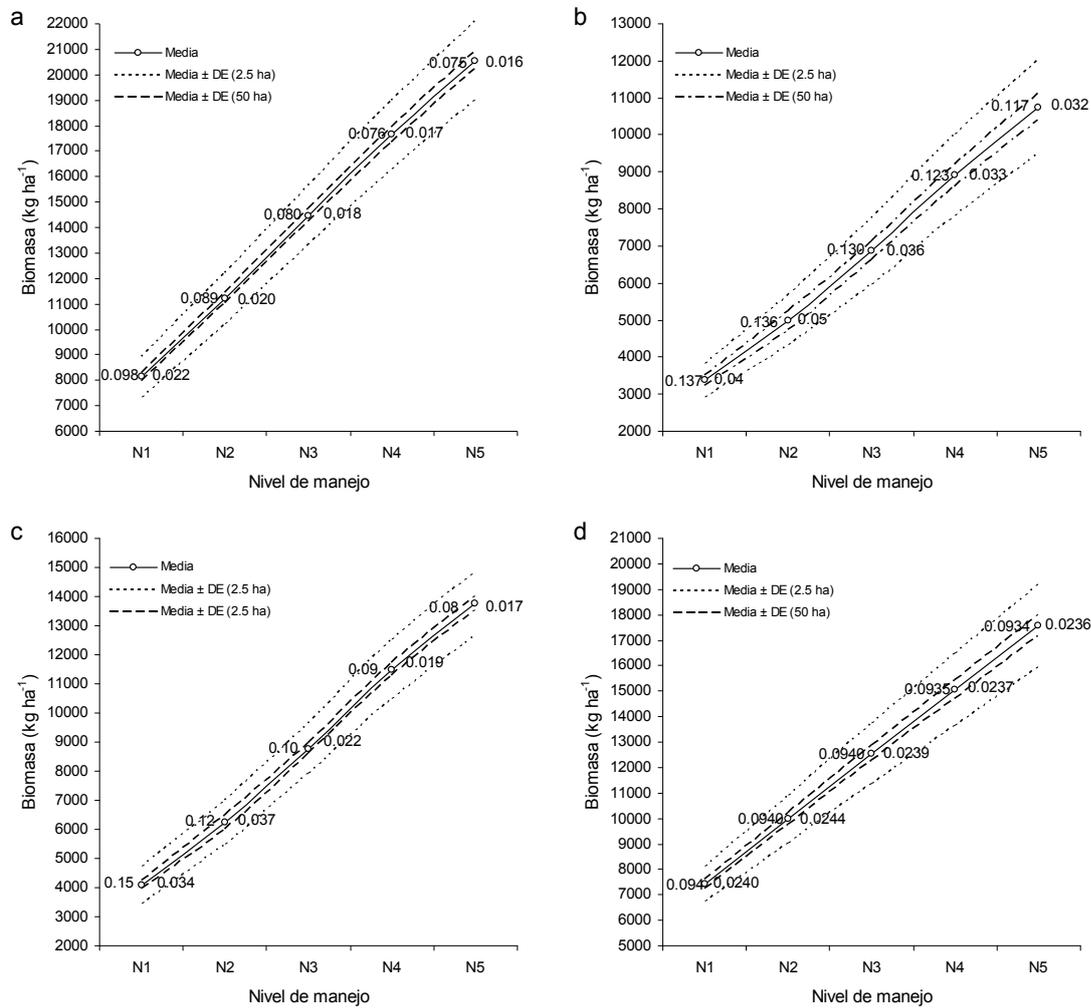


Figura 12. Producción anual obtenible para una granja de 2.5 ha y 50 ha para los diferentes niveles de manejo. (a) Cuando la granja operó normalmente; (b) cuando se vio afectada por la enfermedad en ambos ciclos; (c) cuando se vio afectada por la enfermedad en el invierno; (d) cuando se vio afectada por la enfermedad en el verano. Los valores numéricos en las curvas son los coeficientes de variación para cada nivel de manejo; los de la izquierda corresponden a una granja de 2.5 ha y los de la derecha a una granja de 50 ha. DE es la desviación estándar (nótese que cada gráfica tiene sus propias escalas).

Por otro lado, cuando se consideran los efectos de la probabilidad de ocurrencia interanual e interestacional de la enfermedad en los cultivos, se encontró que, si bien los valores de las medianas de la producción anual son aproximadamente los mismos para una granja de un estanque (2.5 ha) que para una granja de 20 estanques (50 ha), la variabilidad disminuyó conforme se incrementó la escala de la granja, según lo indicaron los valores del índice de variabilidad (IV). Asimismo, la reducción de la variabilidad fue notable cuando mejoraron las condiciones de manejo (Figura 13).

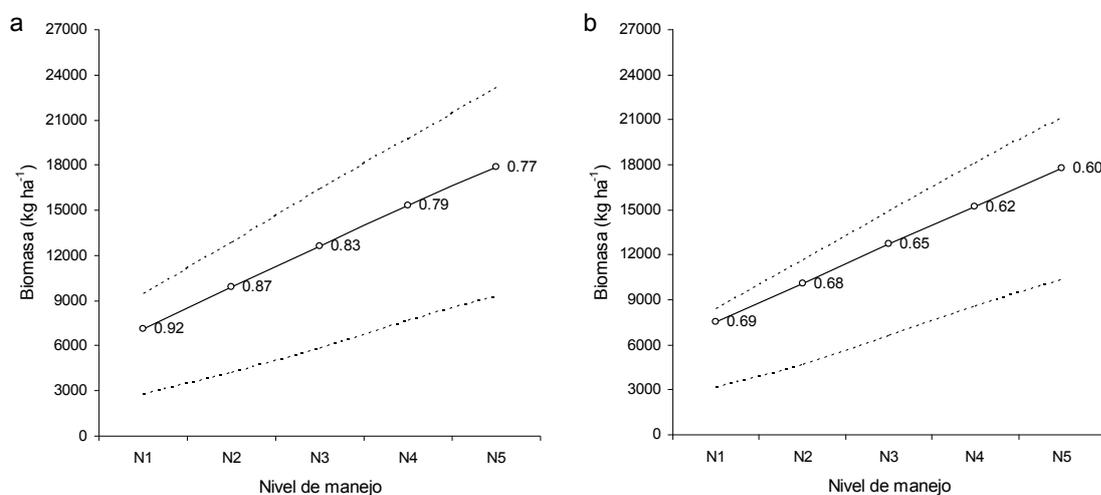


Figura 13. Producción anual obtenible para los diferentes niveles de manejo, según se describen en la Tabla 2, para una granja de 2.5 ha (a) y otra de 50 ha (b). Las líneas punteadas son los valores de los percentiles 2.5 y 97.5 % y los valores numéricos en las curvas son los del índice de variabilidad (IV).

Las distribuciones de frecuencia de la producción anual, inferidas a partir de las variaciones estocásticas de los parámetros del submodelo biológico y de las variables ambientales, mostraron los efectos de la probabilidad de ocurrencia interanual e interestacional de la enfermedad (Fig. 14). Los efectos fueron más claramente discernibles en la medida en que tanto el manejo del cultivo mejoró, como la escala de producción de la granja se incrementó. Cuando las condiciones de manejo fueron deficientes o el tamaño de la granja fue menor, se observan distribuciones bimodales (Fig. 14a y 14c), en donde el primer grupo de datos a la

izquierda corresponde a aquellas producciones que pueden obtenerse cuando la enfermedad afectó a los dos ciclos, o sólo al ciclo de invierno.

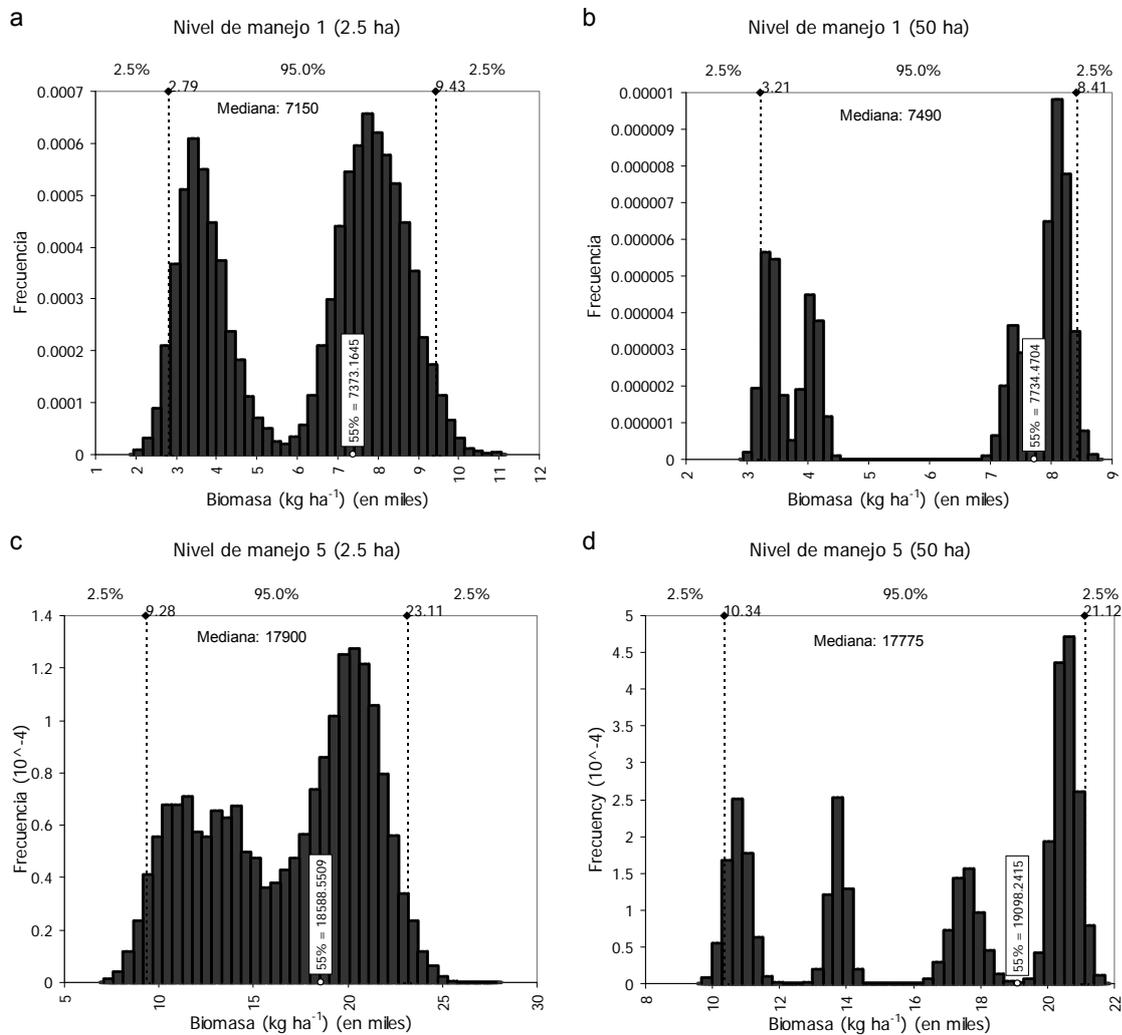


Figura 14. Distribución de frecuencias de la producción de acuerdo a los distintos factores de riesgo analizados. Se indican los intervalos de 95% de confianza de la producción y el nivel de producción correspondiente al 55% de probabilidad acumulada, a partir de la cual la enfermedad no afecta la producción (nótese que cada gráfica tiene sus propias escalas).

Los valores de producción agrupados alrededor de la segunda moda corresponden a aquellos eventos en que la enfermedad sólo afecta al ciclo de verano, o cuando estuvo ausente por completo.

Al mejorar el esquema de manejo o incrementar la escala de producción, el efecto de la ocurrencia de la enfermedad se hace aun más discernible, observándose

los valores de producción agrupados alrededor de cuatro valores modales (Fig. 14b y d) correspondiendo, de izquierda a derecha a: eventos en que la enfermedad se presentó en ambas estaciones, cuando se presentó sólo en invierno, cuando sólo se presentó en verano, y cuando se encontró ausente en ambas estaciones. Asimismo, los valores del índice de variabilidad (IV) indicaron que existe mayor variabilidad bajo el peor esquema de manejo y utilizando el menor tamaño de la granja. En contraste, la combinación del mejor esquema de manejo y la mayor escala, incrementó la producción y disminuyó la variabilidad.

3.5. Análisis de sensibilidad en la producción

Los resultados del análisis de sensibilidad muestran que, en general y para las peores condiciones de manejo, la producción fue más sensible a variaciones del oxígeno disuelto. Para las condiciones bajo el mejor manejo, el oxígeno disuelto disminuyó en importancia y la variabilidad en la producción tiende a explicarse mejor por variaciones en los valores del peso final del camarón y de su tasa de mortalidad. Las variaciones en la temperatura y salinidad tuvieron importancia intermedia o baja, mientras que los parámetros asociados a la presencia de la enfermedad, sólo fueron de mayor importancia en el caso de la mortalidad (m) causada por la misma en el invierno (Tabla 15).

Tabla 15. Resultados del análisis de sensibilidad de la producción para un estanque bajo las condiciones más desfavorables (nivel de manejo 1) y las más favorables (nivel de manejo 5), tanto para operaciones normales como con presencia de la enfermedad de la mancha blanca

Nivel de manejo 1							
Invierno		Verano		Invierno (MB)		Verano (MB)	
Parámetro	CR	Parámetro	CR	Parámetro	CR	Parámetro	CR
w _f	0.82	OD	0.64	OD	0.64	OD	0.61
OD	0.5	K	-0.61	m	-0.52	z ₁	-0.42
z	-0.23	w _f	0.37	w _f	0.46	S	-0.4
S	-0.17	Z	-0.25	z ₁	-0.42	T	0.38
T	0.07	S	-0.17	T	0.32	t _w	0.25
k	0.00	T	0.07	S	-0.25	m	-0.2
						w _f	0.2
						z ₂	-0.08

Nivel de manejo 5							
Invierno		Verano		Invierno (MB)		Verano (MB)	
Parámetro	CR	Parámetro	CR	Parámetro	CR	Parámetro	CR
w _f	0.79	Z	-0.75	w _f	0.99	OD	0.69
OD	0.48	w _f	0.52	S	-0.45	S	-0.46
z	-0.32	OD	0.35	T	0.42	T	0.44
S	-0.17	S	-0.24	OD	0.17	z ₁	-0.39
T	0.09	T	0.04	z ₁	-0.16	m	-0.36
k	0.00	K	0.00	m	0.00	z ₂	-0.32
						w _f	0.19
						t _w	0.01

CR es el valor del coeficiente de regresión
 MB indica la presencia de la enfermedad.

Con respecto a la sensibilidad de la producción a las variables de manejo en los casos con operaciones normales, se encontró que los ciclos con siembras en invierno, las variables más sensible fueron el tamaño del estanque, seguida por la

densidad de siembra y el inicio de aireación (Fig. 15a). Cuando las siembras fueron en verano, la variable que más contribuyó a la variabilidad de la producción fue la duración del cultivo, seguida por la densidad, el tamaño del estanque y el inicio de la aireación (Fig. 15b).

Por otro lado, se encontró que cuando la enfermedad estuvo presente, para las siembras en invierno, la variable que más contribuye a la producción fue la duración del cultivo, seguida por la densidad y el inicio de aireación (Fig. 15c). En el caso del verano, la variable de manejo que más contribuyó en la producción fue la densidad, seguida por la duración del cultivo y el inicio de aireación (Fig. 15d).

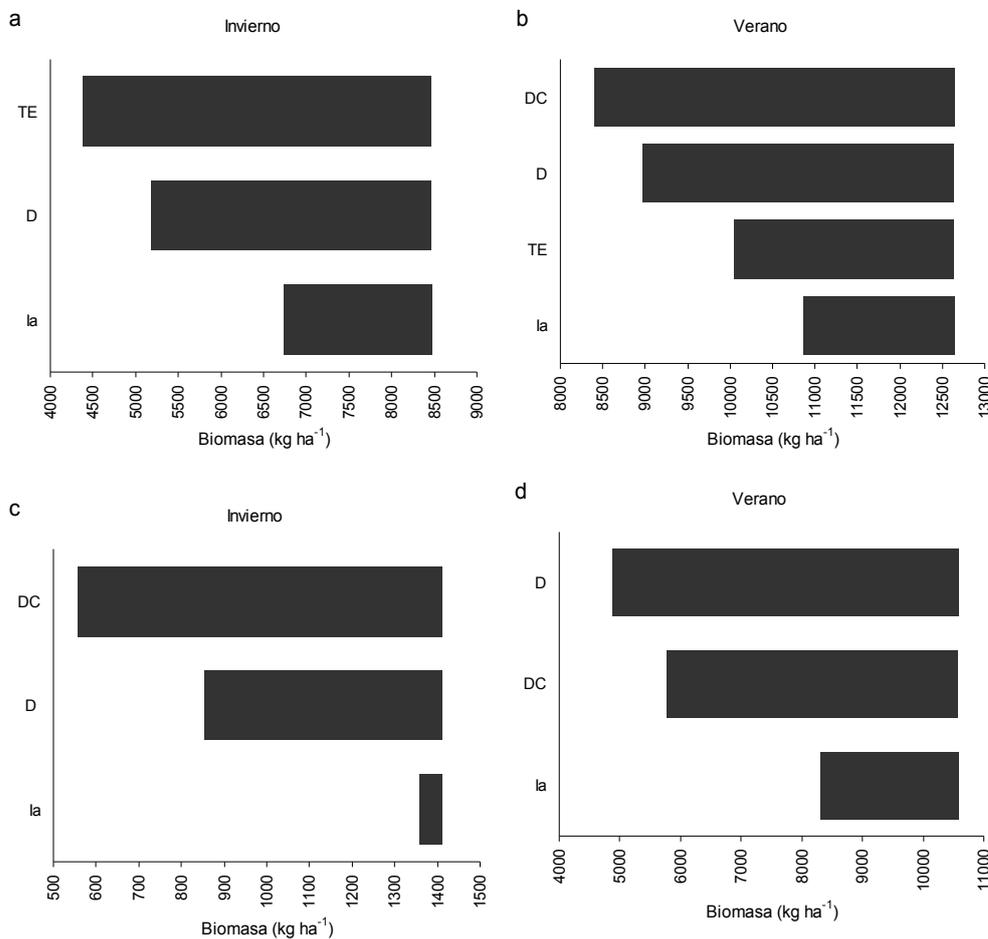


Figura 15. Sensibilidad de la producción a las variables de manejo en invierno (a) y verano (b) cuando la granja operó normalmente, y cuando es afectada por la enfermedad en invierno (c) y verano (d). TE es el tamaño del estanque, D la densidad del cultivo, la el inicio de aireación y DC la duración del cultivo (nótese que cada gráfica tiene sus propias escalas).

3.6. Análisis de riesgo económico (utilidad)

Este análisis indicó que las diferentes estrategias de manejo del cultivo tuvieron un efecto evidente sobre la utilidad y el rendimiento por unidad de riesgo que pueden obtenerse con cada una de ellas (Fig. 16).

Se encontró que para un estanque individual bajo condiciones normales de operación, durante el ciclo de invierno se presentaron pérdidas económicas con el peor esquema de manejo, estimándose en promedio en \$ -21,300 ha⁻¹ (Fig. 16a). Por otra parte, la máxima utilidad se estimó en \$ 271,000 ha⁻¹ (Fig. 16a) bajo el mejor esquema de manejo.

Para el caso de siembras en verano, se obtuvieron pérdidas en los dos primeros esquemas de manejo. La mayor de ellas se estimó en \$ -46,700 ha⁻¹, mientras que las mayores utilidades se calcularon en \$ 271,700 ha⁻¹ para el mejor esquema de manejo (Fig. 16b).

Cuando la enfermedad estuvo presente, se encontró que bajo todos los esquemas de manejo se registraron pérdidas económicas. Sin embargo, se destaca que en tanto las condiciones de manejo fueron mejoradas, las pérdidas se redujeron, ya que entre el peor y el mejor esquema de manejo disminuyeron de \$ -106,000 ha⁻¹ a \$ -80,000 ha⁻¹ (Fig. 16c) para el ciclo de invierno, mientras que en el ciclo de verano pasaron de \$ -79,000 ha⁻¹ a \$ -15,000 ha⁻¹ (Fig. 16d).

Los valores del rendimiento por unidad de riesgo se incrementaron, tanto en la medida en que se mejoró el manejo del cultivo como cuando la enfermedad estuvo ausente. También se aprecia que cuando la granja operó normalmente, existe mayor beneficio por unidad de riesgo para el ciclo de siembras en verano que para el ciclo de invierno.

En el Anexo 3 se presentan ejemplos de distribuciones de frecuencia para cada ciclo estacional y los niveles extremos de manejo, sin y con presencia de la enfermedad.

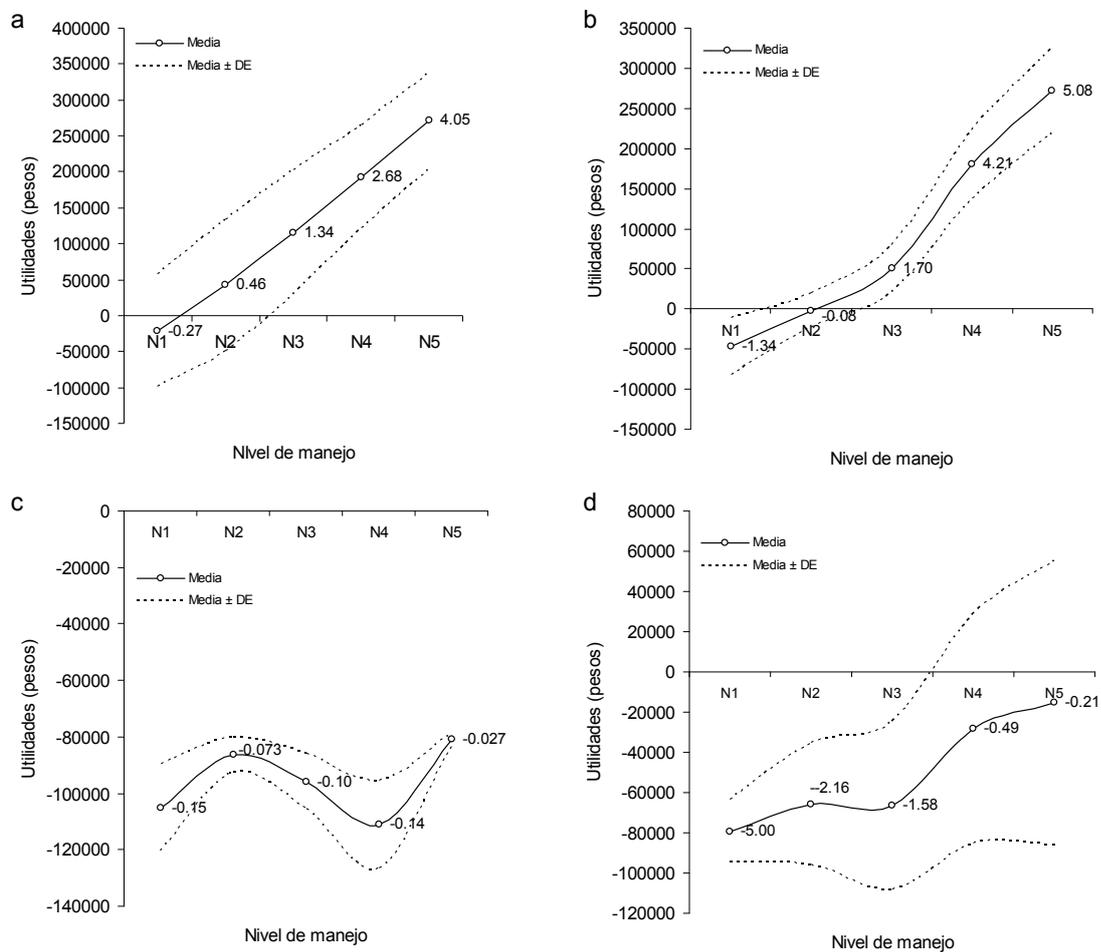


Figura 16. Pérdidas y utilidades obtenibles en un estanque para los diferentes niveles de manejo. (a) Cuando la granja operó normalmente durante el invierno; (b) cuando la granja operó normalmente durante el verano; (c) cuando la producción se vio afectada por la enfermedad en el invierno; (d) cuando la producción se vio afectada por la enfermedad en el verano. Los valores numéricos en las curvas son los rendimientos por unidad de riesgo para cada nivel de manejo y DE es la desviación estándar (nótese que cada gráfica tiene sus propias escalas).

También se encontró que, en términos de la producción anual, cuando la granja operó normalmente, no hubo pérdidas económicas, ya que, de acuerdo a los resultados, la utilidad promedio pasó de los \$ 98,100 ha⁻¹ con el peor manejo, a \$ 510,800 ha⁻¹ con el mejor manejo (Fig. 17a).

Cuando ocurrió la enfermedad en ambos ciclos de producción se presentaron pérdidas económicas, sin embargo las pérdidas se redujeron de \$ -166,400 ha⁻¹ a \$ -15,700 ha⁻¹ (Fig. 17b) al pasar del peor al mejor manejo.

Cuando ocurrió la enfermedad, solamente en el invierno se estimaron pérdidas (con los primeros tres esquemas de manejo). El valor promedio en el que se registró la mayor pérdida se estimó en \$ -124,100 ha⁻¹ en el peor de los casos, mientras que en el mejor esquema de manejo se estimaron utilidades de \$ 164,700 ha⁻¹ (Fig. 17c).

Cuando la enfermedad afectó al cultivo solamente en el verano, al mejorar las condiciones de manejo, las utilidades se incrementaron de \$ 56,500 ha⁻¹ a \$ 316,300 ha⁻¹ (Fig. 17d).

De acuerdo con los valores del rendimiento por unidad de riesgo, en general, cuando se mejoraron las condiciones de manejo en los estanques y cuando el tamaño de la granja se incrementó, el riesgo disminuyó (Fig. 17).

Las distribuciones de frecuencias con las que se generaron las gráficas de la Figura 17 se presentan en el anexo 6 y corresponden a ejemplos de los niveles de manejo extremos.

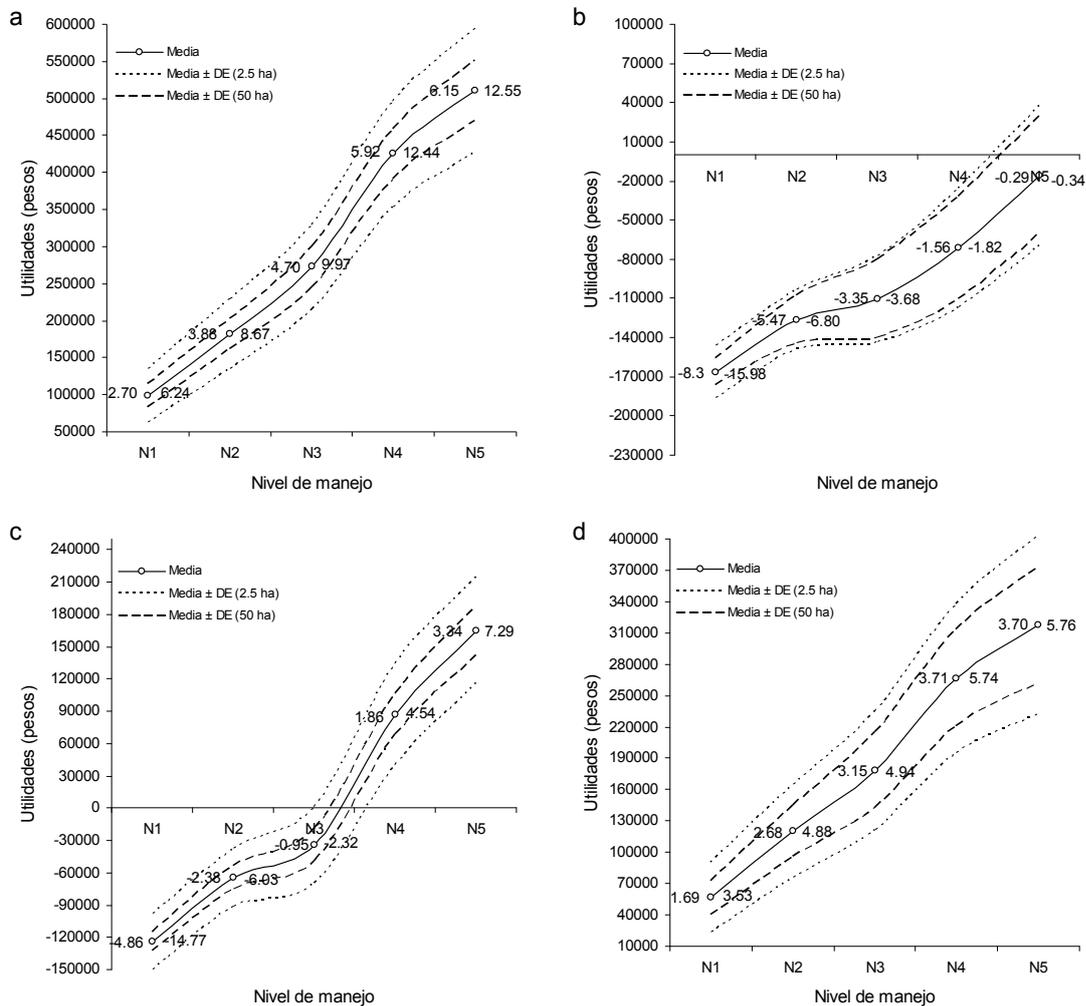


Figura 17. Pérdidas y utilidades anuales obtenible para una granja de 2.5 ha y 50 ha para los diferentes niveles de manejo. (a) Cuando la granja operó normalmente; (b) cuando se vio afectada por la enfermedad en ambos ciclos; (c) cuando se vio afectada por la enfermedad en el invierno; (d) cuando se vio afectada por la enfermedad en el verano. Los valores numéricos en las curvas son el rendimiento por unidad de riesgo para cada nivel de manejo; los de la izquierda corresponden a una granja de 2.5 ha y los de la derecha a una granja de 50 ha. DE es la desviación estándar (nótese que cada gráfica tiene sus propias escalas).

Por otro lado, cuando se consideran los efectos de la probabilidad de ocurrencia interanual e interestacional de la enfermedad en los cultivos, se encontró que los valores de las medianas de la utilidad se aproximan entre una granja de un estanque (2.5 ha) y una granja de 20 estanques (50 ha). Asimismo, el beneficio por unidad de riesgo se incrementó, tanto cuando se proyectó la mayor escala de producción, como cuando mejoraron las condiciones de manejo (Fig.18).

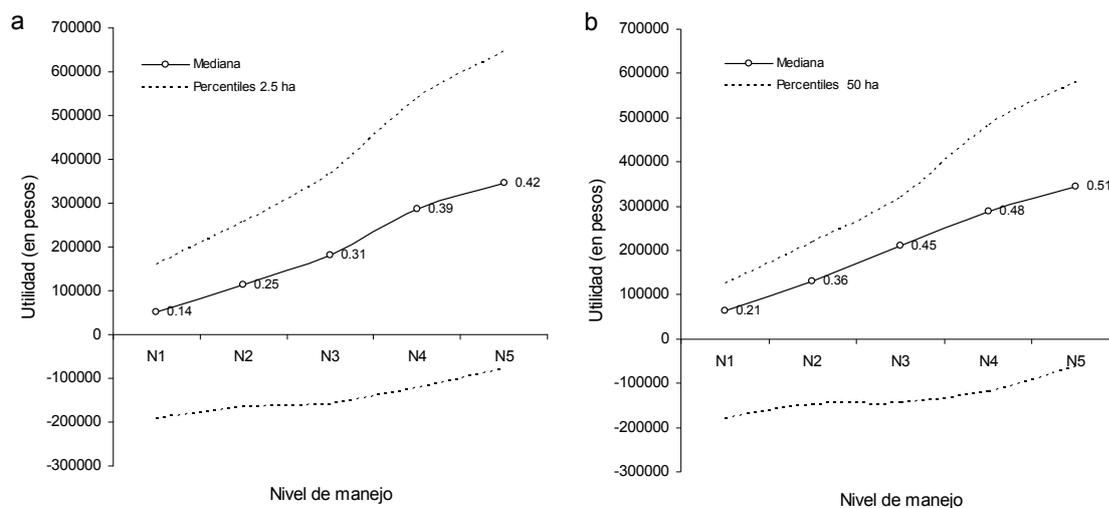


Figura 18. Utilidad anual obtenible para los diferentes niveles de manejo, según se describen en la Tabla 2, para una granja de 2.5 ha (a) y otra de 50 ha (b). Las líneas punteadas son los valores de los percentiles 2.5 y 97.5 % y los valores numéricos en las curvas son del rendimiento por unidad de riesgo.

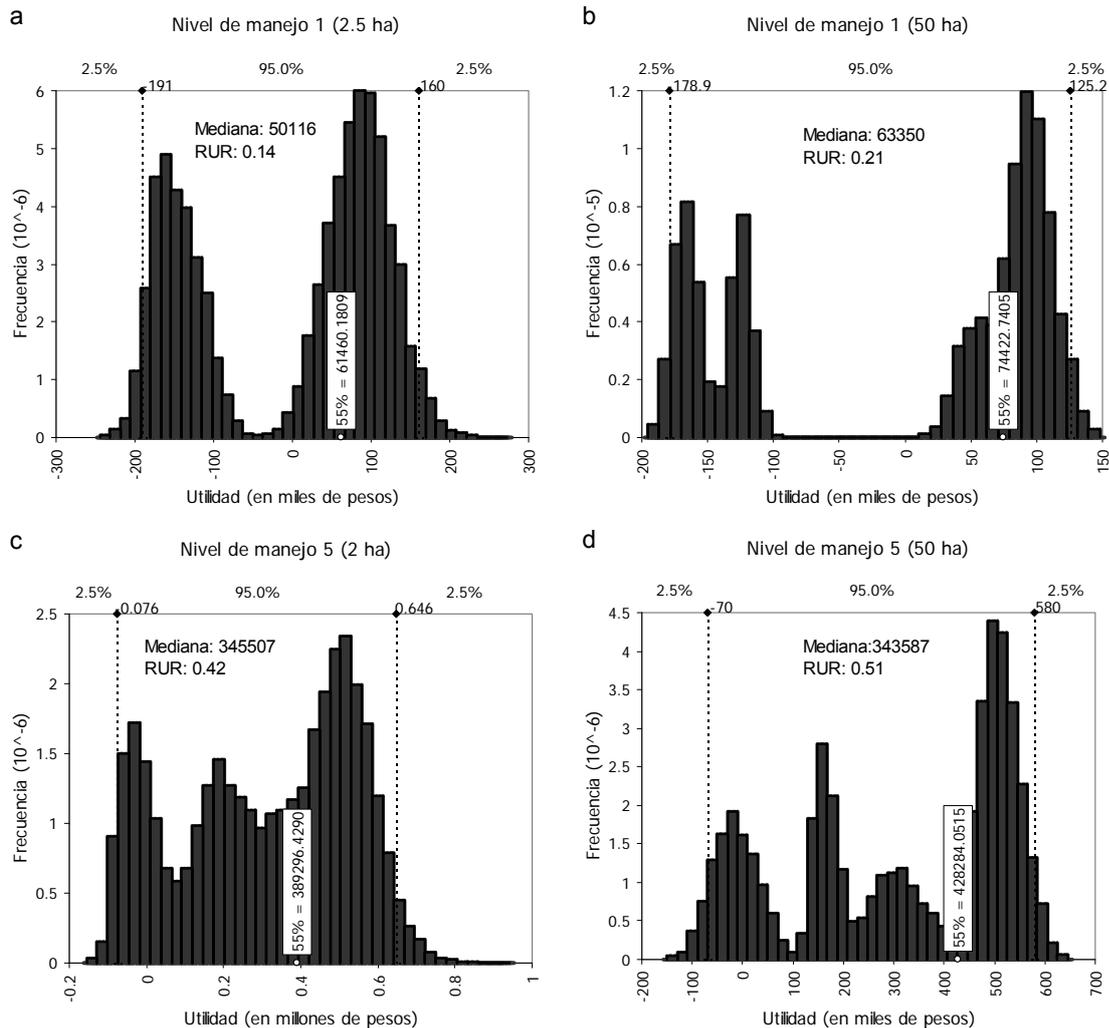


Figura 19. Distribución de frecuencias de la utilidad Se indican los intervalos de 95% de confianza de la utilidad y el nivel de utilidad correspondiente al 55% de probabilidad acumulada, a partir de la cual la enfermedad no afecta la producción (nótese que cada gráfica tiene sus propias escalas).

Las distribuciones de probabilidad de la utilidad anual, inferidas a partir de las variaciones estocásticas de los parámetros del modelo bioeconómico y de las variables ambientales, mostraron los efectos de la probabilidad de ocurrencia interanual e interestacional de la enfermedad (Fig. 19). Los efectos fueron más claramente discernibles en la medida en que tanto el manejo del cultivo mejoró, como la escala de producción de la granja se incrementó.

Cuando las condiciones de manejo fueron deficientes o la escala de producción fue menor, se observan distribuciones bimodales y trimodales. Para el

caso de la distribución bimodal, el primer grupo de datos a la izquierda corresponde a aquellas utilidades que pueden obtenerse cuando la enfermedad afectó a los dos ciclos, o sólo al ciclo de invierno, la segunda moda corresponde, complementariamente, a aquellos eventos en que la enfermedad sólo afecta al ciclo de verano, o cuando estuvo ausente por completo (Fig. 19a).

Cuando se presentaron distribuciones trimodales, el primer grupo de datos a la izquierda corresponde a aquellas utilidades que pueden obtenerse cuando la enfermedad afectó a los dos ciclos, la segunda moda corresponde a los casos en que la enfermedad sólo afectó al ciclo de invierno, y la tercera moda corresponde a los casos en que la enfermedad afectó solo al ciclo de verano y cuando la enfermedad estuvo ausente. (Fig. 19c).

Al incrementar la escala de producción, el efecto de la ocurrencia de la enfermedad se hace aun más discernible, observándose los valores de la utilidad agrupados alrededor de tres valores modales (Fig. 19b) correspondiendo, de izquierda a derecha a: eventos en que la enfermedad se presentó en ambas estaciones, cuando se presentó sólo en invierno y, cuando sólo se presentó en verano y cuando se encontró ausente en ambas estaciones.

Cuando se incrementó la escala de producción de la granja y se mejoró el manejo se presentaron cuatro valores modales (Fig. 19d). De izquierda a derecha, las utilidades corresponden a: eventos en que la enfermedad se presentó en ambas estaciones, cuando se presentó sólo en invierno, cuando sólo se presentó en verano, y cuando se encontró ausente en ambas estaciones. Asimismo, los valores de rendimiento por unidad de riesgo mostraron que existe mayor riesgo con el peor esquema de manejo y utilizando la menor escala de producción. La combinación del mejor esquema de manejo y la mayor escala de producción incrementó la utilidad y disminuyó el riesgo.

3.6.1. Análisis de riesgo después de impuestos (utilidad)

Las distribuciones de frecuencia de la utilidad anual después de impuestos para el mejor esquema de manejo y una granja de 50 ha, mostraron los efectos de la

probabilidad de ocurrencia interanual e interestacional de la enfermedad, correspondiendo a un valor de la mediana de \$ 145 452 ha⁻¹(Fig. 20).

De izquierda a derecha se aprecian cuatro modas: la primera corresponde al evento en que la enfermedad afectó a ambos ciclos de producción, presentándose pérdidas económicas; la segunda corresponde al caso en que la enfermedad afectó solamente al ciclo de invierno con una utilidad promedio de \$ 16,176 ha⁻¹, la tercera corresponde al evento en que la enfermedad afectó solamente al ciclo de verano, con un promedio en la utilidad de \$ 125,100 ha⁻¹; y por último; la cuarta corresponde al evento en que la granja operó normalmente en los dos ciclos de producción, calculándose un promedio en la utilidad de \$ 267,000 ha⁻¹.

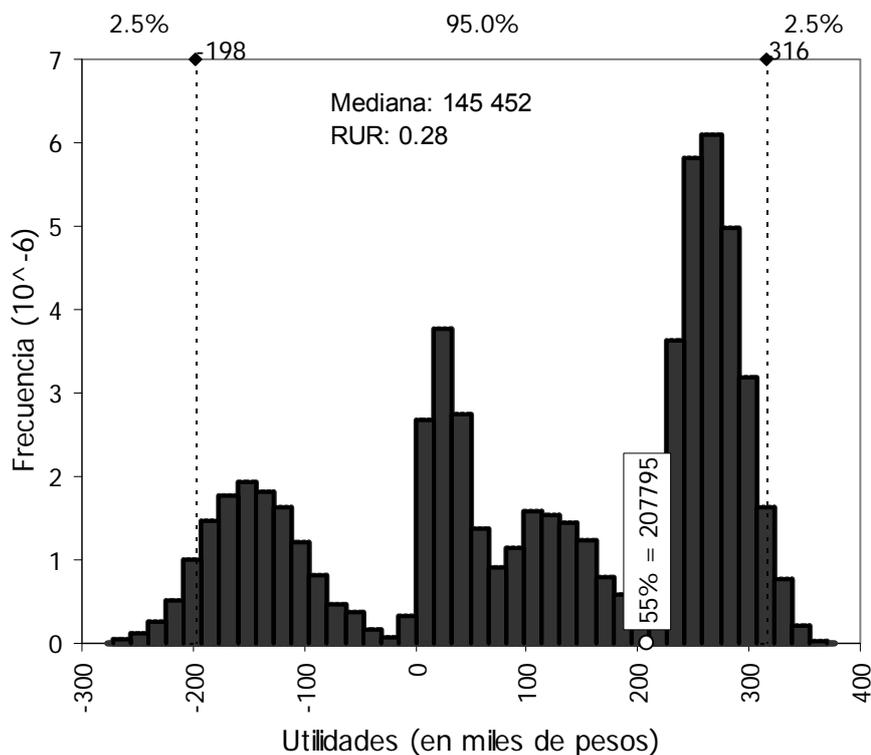


Figura 20. Distribución de frecuencias de la utilidad después de impuestos. Se indican los intervalos de 95% de confianza de la utilidad y el nivel de utilidad correspondiente al 55% de probabilidad acumulada, a partir de la cual la enfermedad no afecta la producción.

3.7. Análisis de sensibilidad de la utilidad

Los resultados muestran que, cuando la granja operó normalmente y para las peores condiciones de manejo, la utilidad fue más sensible a variaciones de los parámetros de crecimiento (k para el ciclo de invierno y w_f para el ciclo de verano), el oxígeno disuelto (para ambos ciclos) y la salinidad (para el ciclo de invierno).

En el caso en que la enfermedad se presentó, la utilidad fue más sensible, durante el ciclo de verano, a variaciones del incremento del factor de conversión alimenticia (i_F), al tiempo en que ocurrió la mortalidad por la enfermedad (t_w) y al oxígeno disuelto. No fue posible realizar el análisis de sensibilidad para el ciclo de invierno ya que el camarón no alcanzó la talla comercial y por lo tanto, no se registraron ingresos.

Para las condiciones bajo el mejor manejo, cuando la enfermedad estuvo ausente, el oxígeno disuelto disminuyó en importancia para el ciclo de verano y la variabilidad de las utilidades se explicó mejor por las variaciones en los valores del peso final, la tasa instantánea de mortalidad, el factor de conversión alimenticia y el precio del camarón. Para el ciclo de invierno, el peso final, el oxígeno disuelto, la tasa instantánea de mortalidad y el precio del camarón, fueron los más importantes en la sensibilidad de la utilidad.

Cuando la enfermedad estuvo presente, el incremento del factor de conversión alimenticia (i_F) fue el parámetro más importante para el ciclo de verano, seguido por la salinidad y el oxígeno disuelto. En general, las variaciones en los parámetros de la aireación tuvieron importancia baja cuando la enfermedad estuvo ausente o presente, independientemente del nivel de manejo entre las peores o mejores condiciones (Tabla 16).

Tabla 16. Resultados del análisis de sensibilidad de la utilidad para un estanque bajo las condiciones más desfavorables (nivel de manejo 1) y las más favorables (nivel de manejo 5), tanto para operaciones normales como con presencia de la enfermedad de la mancha blanca. CR es el coeficiente de regresión correspondiente y MB indica la presencia de la enfermedad.

Nivel de manejo 1					
Invierno	Verano		Verano (MB)		
Parámetro	CR	Parámetro	CR	Parámetro	CR
w _f	0.710	k	-0.592	i _F	-0.492
OD	0.434	OD	0.522	t _w	0.466
S	-0.139	w _f	0.310	OD	0.410
a _F	-0.043	Pc	0.115	T	0.361
Pc	0.036	a _F	-0.099	Pc	0.262
z	-0.035	S	-0.074	S	-0.238
b _F	-0.022	b _F	-0.050	z ₁	-0.142
T	0.018	z	-0.047	w _f	0.142
k	0.00	T	0.041	m	-0.066
Pa	0.00	Pa	-0.026	a _A	-0.054
A _f	0.00	A _f	-0.010	Pa	-0.050
Nivel de manejo 5					
Invierno	Verano		Verano (MB)		
Parámetro	CR	Parámetro	CR	Parámetro	CR
w _f	0.782	w _f	0.641	i _F	-0.599
OD	0.437	z	-0.490	T	0.487
z	-0.242	a _F	-0.442	S	-0.433
Pc	0.191	Pc	0.357	OD	0.421
a _F	-0.155	OD	0.229	w _f	0.240
S	-0.128	b _F	-0.153	z ₁	-0.189
T	0.119	S	-0.149	m	-0.176
b _F	-0.083	Pa	-0.100	z ₂	-0.175
Pa	-0.034	T	0.048	Pc	0.171
A _f	-0.006	A _f	-0.011	t _w	0.138
b	0.004	d	-0.005	Pa	-0.071
				a _A	-0.024

En relación con la sensibilidad que tuvo la utilidad a las variables de manejo, cuando la granja operó normalmente, se encontró que, en el ciclo de invierno, las variables más sensibles fueron el tamaño del estanque, el inicio de aireación y por último, la densidad de siembra (Fig. 21a). En el ciclo de verano, la variable que más contribuyó a la variabilidad de la utilidad fue la duración del cultivo, seguida por el tamaño del estanque, la densidad de siembra, y el inicio de aireación (Fig. 21b). Por otro lado, se encontró que cuando la enfermedad estuvo presente, para las siembras en verano, la variable de manejo que más contribuyó a explicar la variabilidad de la utilidad fue la densidad de siembra, seguida por el inicio de aireación y la duración del cultivo, respectivamente (Fig. 21c).

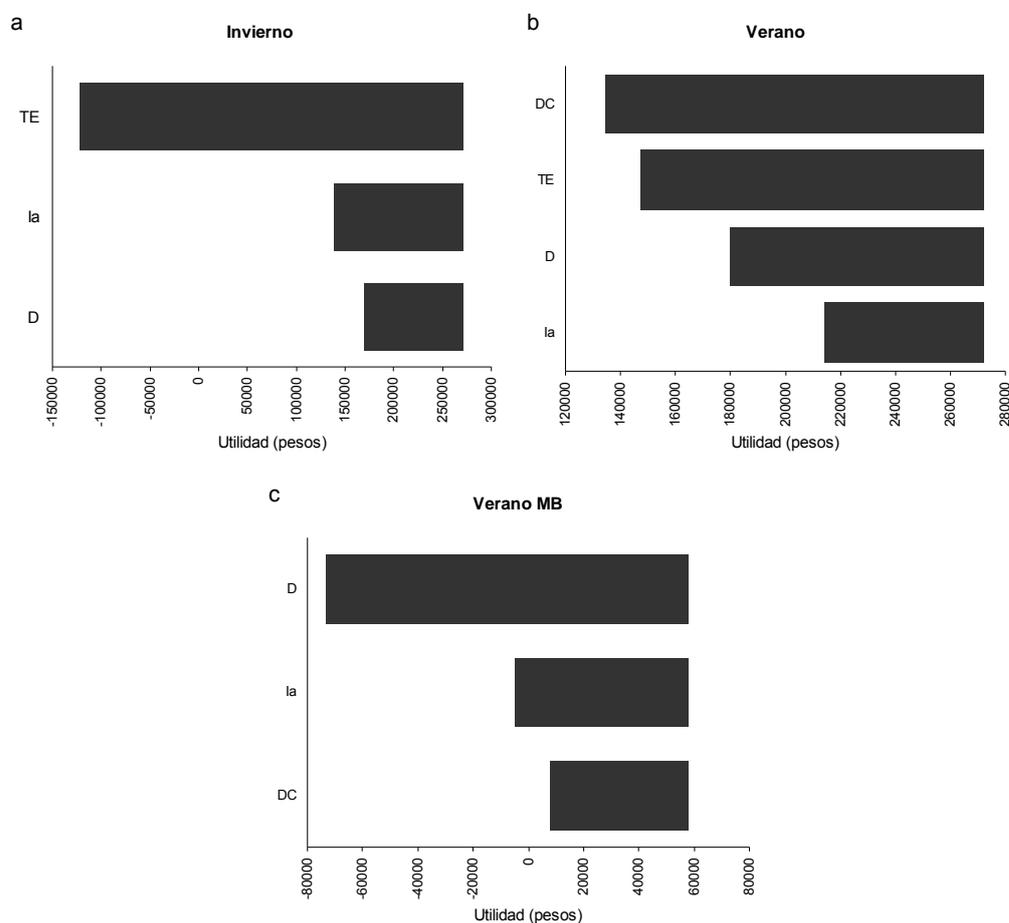


Figura 21. Sensibilidad de la utilidad a las variables de manejo durante invierno (a) y verano (b), cuando la granja operó normalmente; y verano (c), cuando es afectada por la enfermedad. TE es el tamaño del estanque, D la densidad del cultivo, la el inicio de aireación y DC la duración del cultivo (nótese que cada gráfica tiene sus propias escalas).

3.8. Análisis de riesgo económico (relación beneficio-costos)

El análisis mostró que, cuando se considera un estanque afectado por la enfermedad, las diferentes estrategias de manejo del cultivo tuvieron un efecto sobre la relación beneficio-costos y el rendimiento por unidad de riesgo (Fig. 22). Cuando el cultivo operó normalmente durante el ciclo de invierno y bajo el peor esquema de manejo, se estimó una relación beneficio-costos promedio de 0.79. Una vez que las condiciones de manejo fueron mejoradas, la máxima relación de este indicador se estimó en 2.17 (Fig. 22a).

Para el caso de siembras en verano, la relación beneficio-costos se calculó en un valor promedio de 0.6 para el peor esquema de manejo, mientras que para el mejor esquema de manejo esa relación se estimó en 1.67 (Fig. 22b).

Por otro lado, cuando la enfermedad estuvo presente en el verano, se encontró que tanto para el peor como para el mejor esquema de manejo se registraron valores bajos de este indicador calculándose, respectivamente, 0.475 y 0.95 (Fig. 22c). Cuando la enfermedad afectó durante el invierno, no fue posible realizar el cálculo de este indicador, ya que no se registraron ingresos producto de la venta del camarón cultivado.

Los valores del rendimiento por unidad de riesgo de este indicador, mostraron que existe mayor riesgo, tanto en la medida en que empeora el manejo del cultivo como cuando se encuentra presente el efecto de la enfermedad de la mancha blanca. También se presentó el mismo patrón que en la utilidad en el que se observa, cuando la granja operó normalmente, mayor rendimiento por unidad de riesgo para el ciclo de verano que para el de invierno.

En el anexo 4 se presentan distribuciones de frecuencia para cada ciclo estacional para los niveles extremos de manejo, cuando la enfermedad estuvo ausente o presente.

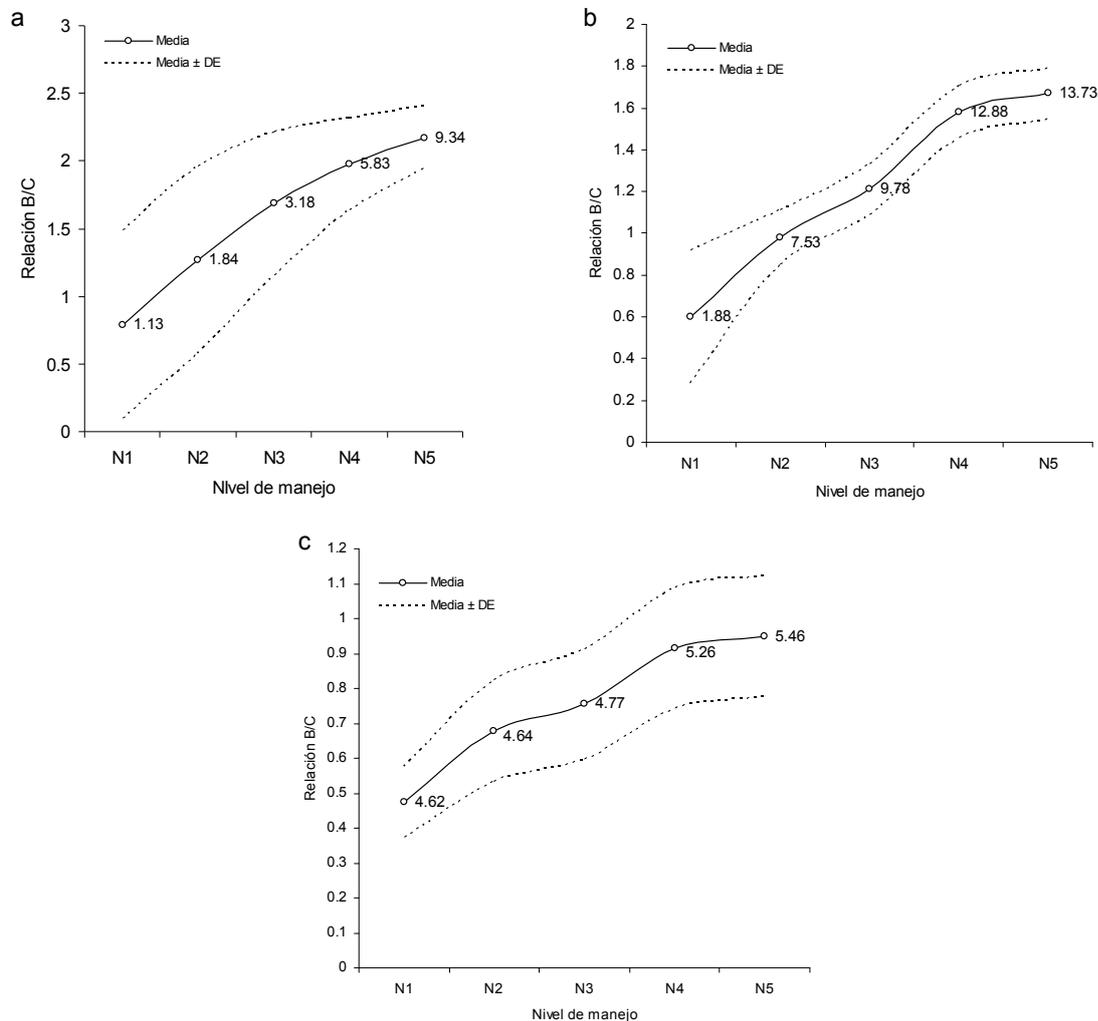


Figura 22. Relación beneficio-costo obtenible en un estanque para los diferentes niveles de manejo descritos en la Tabla 2. (a) Cuando la granja operó normalmente durante el invierno; (b) cuando la granja operó normalmente durante el verano; (c) cuando la producción se vio afectada por la enfermedad en el invierno; (d) cuando la producción se vio afectada por la enfermedad en el verano. Los valores numéricos en las curvas son los rendimientos por unidad de riesgo y DE es la desviación estándar (nótese que cada gráfica tiene sus propias escalas).

Cuando se analizaron los diferentes esquemas de manejo y las dos escalas de producción (2.5 ha y 50 ha) se encontró que, cuando la granja operó normalmente, la rentabilidad económica promedio, de acuerdo con la relación beneficio-costos, pasó de 1.35 a 1.83 (Fig. 23a).

Cuando ocurrió la enfermedad en ambos ciclos de producción se obtuvieron valores que no permitieron a la granja ser rentable; sin embargo, cuando se mejoraron los esquemas de manejo, la relación beneficio-costos se incrementó de 0.34 a 0.99 al pasar del peor al mejor esquema de manejo (Fig. 23b).

Cuando ocurrió la enfermedad solamente en el invierno, la relación beneficio-costos se estimó en 0.49 bajo el peor esquema de manejo, mientras que bajo el mejor esquema se calculó en 1.38 (Fig. 23c).

Para los casos en que la enfermedad afectó al cultivo solamente en el verano, la relación promedio de este indicador económico se incrementó de 1.2 a 1.5 al pasar del peor al mejor esquema de manejo (Fig. 23d).

De acuerdo con los valores del rendimiento por unidad de riesgo, en general, cuando se mejoraron las condiciones de manejo en los estanques y cuando la escala de producción se incrementó, los resultados en términos económicos mejoraron y disminuyó el riesgo, a excepción del caso en que la enfermedad se presentó en el verano, en el que el rendimiento por unidad de riesgo disminuyó ligeramente conforme se mejoró el manejo (Fig. 23).

Las distribuciones de frecuencia con las que se generaron las distribuciones de la Figura 23 se presentan en el anexo 7 y corresponden a ejemplos de los dos extremos de los niveles de manejo presentados en este trabajo.

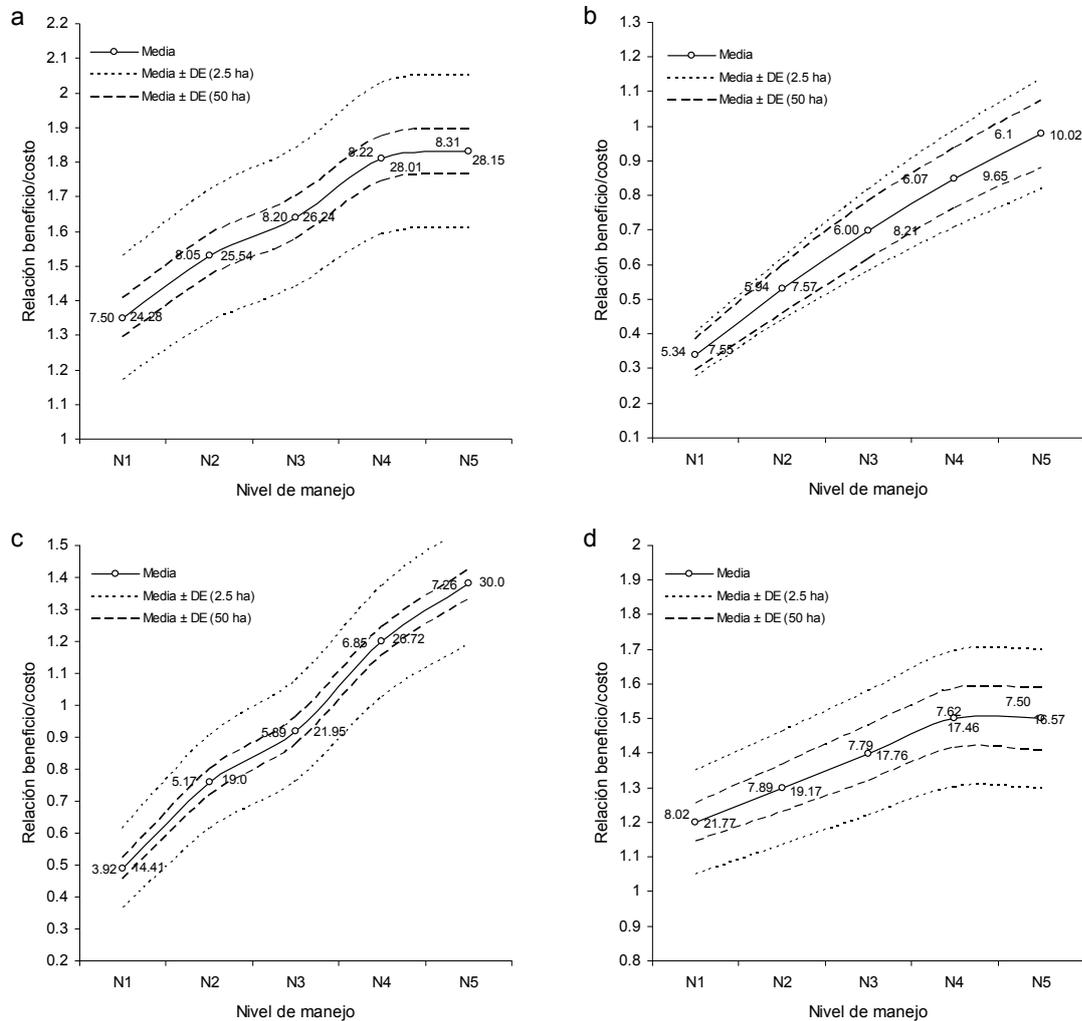


Figura 23. Relación beneficio-costo anual obtenible para una granja de 2.5 ha y 50 ha para los diferentes niveles de manejo descritos en la Tabla 2. (a) Cuando la granja operó normalmente; (b) cuando se vio afectada por la enfermedad en ambos ciclos; (c) cuando se vio afectada por la enfermedad en el invierno; (d) cuando se vio afectada por la enfermedad en el verano. Los valores numéricos en las curvas son los rendimientos por unidad de riesgo para cada nivel de manejo; los de la izquierda corresponden a una granja de 2.5 ha y los de la derecha a una granja de 50 ha. DE es la desviación estándar (nótese que cada gráfica tiene sus propias escalas).

Por otro lado, cuando se consideran las probabilidades de ocurrencia interanual e interestacional de la enfermedad en los cultivos, se encontró que, si bien los valores promedio de la relación beneficio-costos son aproximadamente los mismos para una granja de 2.5 ha que para una granja de 50 ha, el riesgo, según lo indicaron los valores del rendimiento por unidad de riesgo, disminuyó conforme se incrementó la escala de la granja. Asimismo, la reducción del riesgo fue notable cuando mejoraron las condiciones de manejo (Fig. 24).

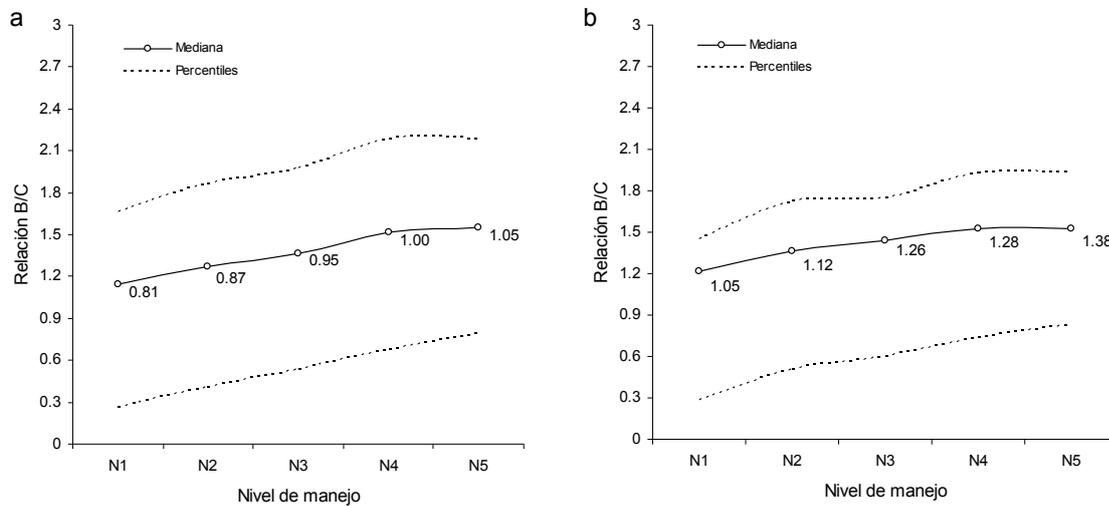


Figura 24. Relación beneficio-costos obtenible para los diferentes niveles de manejo, según se describen en la Tabla 2, para granjas de 2.5 ha (a) y 50 ha (b). Las líneas punteadas son los valores de los percentiles 2.5 y 97.5 % y los valores en las curvas son los indicadores del rendimiento económico por unidad de riesgo.

Las distribuciones de frecuencia de la relación beneficio-costo mostraron los efectos de la probabilidad de ocurrencia interanual e interestacional de la enfermedad (Fig. 25). Los efectos fueron más discernibles en la medida en que la escala de producción de la granja se incrementó.

Cuando las condiciones de manejo fueron deficientes, se observan distribuciones bimodales para la granja de 2.5 ha, en donde el primer grupo de datos a la izquierda corresponde a aquellas relaciones beneficio-costo que pueden obtenerse cuando la enfermedad afectó a los dos ciclos, o sólo al ciclo de invierno, mientras que la segunda moda agrupa a aquellos eventos en que la enfermedad sólo afecta al ciclo de verano, o cuando estuvo ausente por completo (Fig. 25a).

Cuando se incrementa la escala de producción a 50 ha, el efecto de la ocurrencia de la enfermedad se hace más discernible, observándose los valores de la relación beneficio-costo agrupados alrededor de tres valores modales, en donde la primera moda corresponde a eventos en que la enfermedad afectó a ambos ciclos de producción; la segunda moda, cuando la enfermedad afectó al invierno; y la tercera moda corresponde a eventos en que la enfermedad se presentó en el verano y cuando las operaciones fueron normales (Fig. 25b).

Bajo el mejor esquema de manejo y para la menor escala de producción, se presentó una distribución unimodal que correspondió a los cuatro posibles casos analizados en esta investigación (Fig. 25c). Al incrementar la escala de producción el efecto de la ocurrencia de la enfermedad se hace también más discernible, observándose los valores de la relación beneficio-costo agrupados alrededor de tres valores modales (Fig. 25d) correspondiendo, de izquierda a derecha, a: eventos en que la enfermedad se presentó en ambas estaciones, cuando se presentó sólo en el invierno o solo en el verano, y cuando se encontró ausente en ambas estaciones.

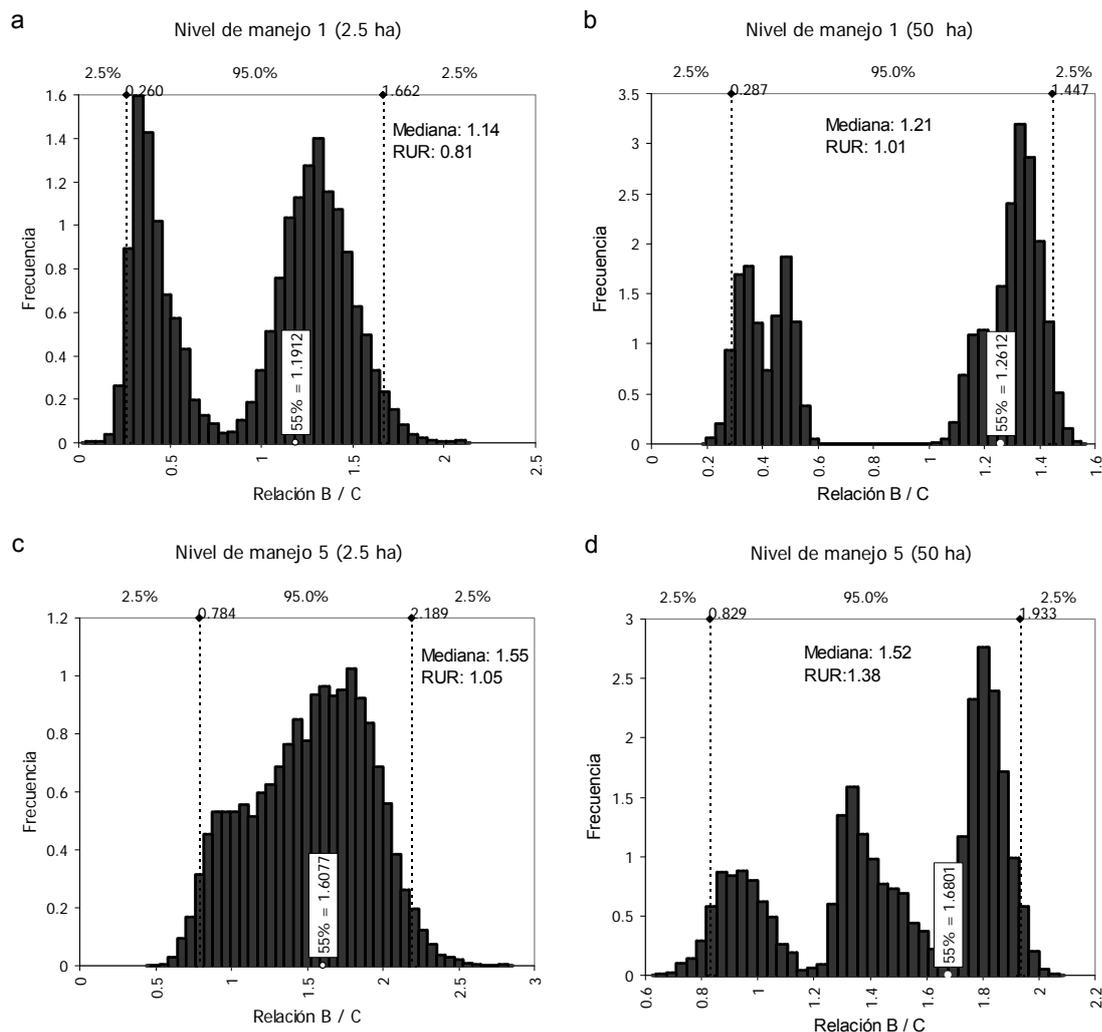


Figura 25. Distribución de frecuencias de la relación beneficio-costo. Se indican los intervalos de 95% de confianza y el nivel correspondiente al 55% de probabilidad acumulada, a partir de la cual la enfermedad no afecta la producción (nótese que cada gráfica tiene sus propias escalas).

3.8.1. Análisis de riesgo después de impuestos (relación beneficio-costo)

Las distribuciones de frecuencia de la relación beneficio-costo después de impuestos, para el mejor esquema de manejo y una granja de 50 ha, mostraron los efectos de la probabilidad de ocurrencia interanual e interestacional de la enfermedad, correspondiendo a un valor de la mediana de 1.174 (Fig. 26). De izquierda a derecha, se aprecian cuatro modas: la primera corresponde al evento en

que la enfermedad afectó a ambos ciclos de producción, presentándose pérdidas económicas y por lo tanto una relación beneficio-costos menor que la unidad; la segunda corresponde al evento en que la granja operó normalmente en los dos ciclos de producción, calculándose un promedio de este indicador económico de 1.31; la tercera corresponde al caso en que la enfermedad afectó solamente al ciclo de invierno, con un valor en la relación beneficio-costos en promedio de 1.042 y por último; la cuarta corresponde al evento en que la enfermedad afectó solamente al verano, con un promedio en la relación beneficio-costos de 1.15.

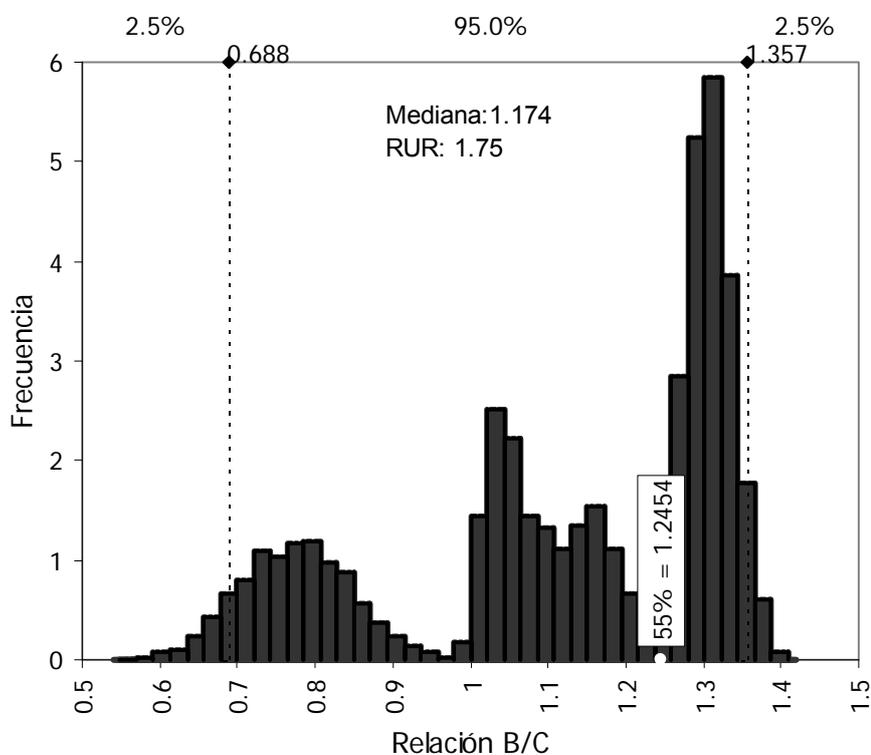


Figura 26. Distribución de frecuencias de la utilidad después de impuestos, de acuerdo a los distintos factores de riesgo analizados. Se indican los intervalos de 95% de confianza de la utilidad y el nivel de utilidad correspondiente al 55% de probabilidad acumulada, a partir de la cual la enfermedad no afecta la producción.

3.9. Análisis de sensibilidad de la relación beneficio-costo

Los resultados del análisis de sensibilidad en la relación beneficio-costo muestran que, cuando la granja operó normalmente, y para las peores condiciones de manejo, este indicador fue más sensible a variaciones de los parámetros de crecimiento (k para el ciclo de invierno y w_f para el ciclo de verano), el oxígeno disuelto (para ambos ciclos) y la salinidad (para el ciclo de invierno).

En el caso en que la enfermedad se presentó en el verano, la relación beneficio-costo fue más sensible a variaciones del oxígeno disuelto, seguido por la temperatura, la salinidad y el tiempo en que ocurrió la mortalidad por la enfermedad. No fue posible realizar el análisis de sensibilidad para el ciclo de invierno, porque el camarón no alcanzó la talla comercial y, por lo tanto, no se registraron ingresos.

Para las condiciones bajo el mejor manejo, cuando la enfermedad estuvo ausente, el oxígeno disminuyó en importancia para el ciclo de verano y la variabilidad en la producción tiende a explicarse mejor por variaciones en los valores de la pendiente del modelo que predice el FCA (a_F), el peso final, el precio del camarón y la tasa instantánea de mortalidad (z). Para el ciclo de invierno, el peso final, la pendiente del modelo de FCA, el oxígeno disuelto y el precio del camarón fueron los más importantes para la sensibilidad de la utilidad.

En el caso cuando la enfermedad estuvo presente en el verano, el incremento del factor de conversión alimenticia (i_F), subsecuente a la mortalidad por la enfermedad, resultó el más importante, seguido por la temperatura, el oxígeno disuelto, la salinidad y el peso final. En este caso los parámetros de mortalidad tuvieron importancia intermedia.

En general, las variaciones en los parámetros de la aireación tuvieron escasa importancia sobre la relación beneficio-costo cuando la enfermedad estuvo ausente o presente, independientemente del nivel de manejo.

Tabla 17. Resultados del análisis de sensibilidad de la relación beneficio-costo para un estanque bajo las condiciones más desfavorables (nivel de manejo 1) y las más favorables (nivel de manejo 5), tanto para operaciones normales como con presencia de la enfermedad de la mancha blanca.

Nivel de manejo 1					
Invierno		Verano		Verano (MB)	
Parámetro	CR	Parámetro	CR	Parámetro	CR
w _f	0.707	k	-0.586	OD	0.485
OD	0.437	OD	0.541	T	0.408
S	-0.135	w _f	0.304	S	-0.393
Z	-0.040	S	-0.112	t _w	0.348
Pc	0.026	Pc	0.103	z ₁	-0.284
a _F	-0.024	a _F	-0.062	Pc	0.279
T	0.022	z	-0.060	i _F	-0.231
b _F	-0.014	T	0.055	w _f	0.221
k	0.00	b _F	-0.031	m	-0.130
				z ₂	-0.056
				a _A	-0.047

Nivel de manejo 5					
Invierno		Verano		Verano (MB)	
Parámetro	CR	Parámetro	CR	Parámetro	CR
w _f	0.709	a _F	-0.790	i _F	-0.551
a _F	-0.424	w _f	0.528	T	0.482
OD	0.328	Pc	0.389	OD	0.428
Pc	0.234	z	-0.305	S	-0.404
b _F	-0.233	b _F	-0.277	w _f	0.221
z	-0.191	Pa	-0.182	z ₂	-0.193
T	0.176	T	0.051	m	-0.184
Pa	-0.091	A _f	-0.022	z ₁	-0.181
S	-0.057	S	-0.020	Pc	0.173
A _f	-0.021	d	0.009	t _w	0.136
d	0.00	OD	0.004	Pa	-0.062
b	0.00	b	0.002	a _A	-0.047
				b _A	-0.017

Con respecto a la sensibilidad que tuvo la relación beneficio-costo a las variables de manejo, se encontró que cuando la granja operó normalmente durante el ciclo de invierno, la variable más sensible fue el tamaño del estanque, seguido por

el inicio de aireación y la densidad de siembra, (Fig. 27a). En el ciclo de verano, la variable que más contribuyó a la variación de la relación beneficio-costos fue el tamaño del estanque, seguido por la densidad de siembra, la duración del cultivo, y el inicio de aireación (Figura 27b). Por otro lado, se encontró que cuando la enfermedad estuvo presente, para las siembras en verano, la variable de manejo que más contribuyó a la variación en la rentabilidad fue la densidad de siembra, seguida por el inicio de aireación y la duración del cultivo (Figura 27c).

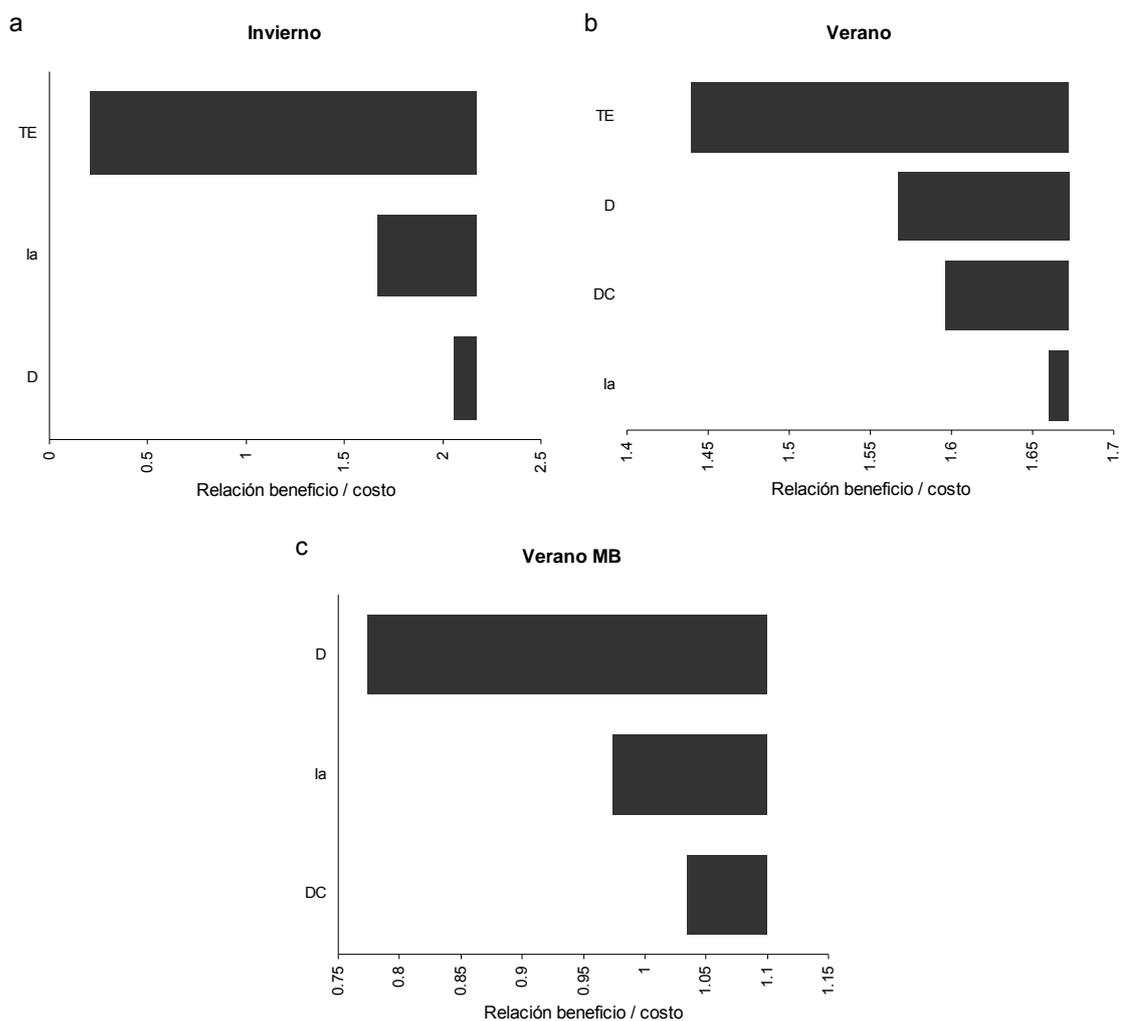


Figura 27. Sensibilidad de la relación beneficio-costos a las variables de manejo para los ciclos de invierno (a) y verano (b) cuando la granja operó normalmente; y verano (c) cuando estuvo presente la enfermedad. TE es el tamaño del estanque, D la densidad del cultivo, la el inicio de aireación y DC la duración del cultivo (nótese que cada gráfica tiene sus propias escalas).

3.10. Producción en el punto de equilibrio (PPE) bajo el esquema de mejor manejo para un granja de 50 ha

Se presentan los eventos que corresponden al caso en que la granja opera normalmente (Fig. 28), cuando la enfermedad afectó al ciclo de invierno (Fig. 29) y cuando afectó al ciclo de verano (Fig. 30). Para el caso en que la enfermedad no estuvo presente, se requiere producir 8,712 kg ha⁻¹ para que, con 95 % de confiabilidad, no se presenten pérdidas.

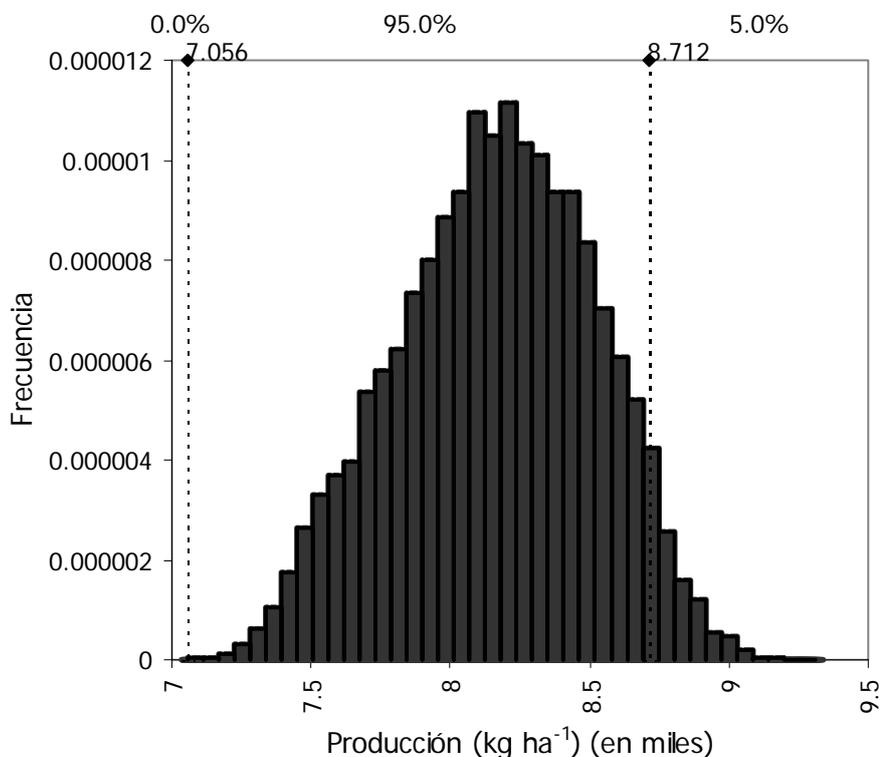


Figura 28. Producción en el punto de equilibrio cuando se opera una granja en condiciones normales.

Para el caso en que la enfermedad se presentó en el invierno, se deben producir 8,243 kg ha⁻¹ para evitar pérdidas (Fig. 29). Cuando la enfermedad se presentó en el verano, al mismo nivel de confianza, se deben producir en promedio, 10,510 kg ha⁻¹ (Fig. 30).

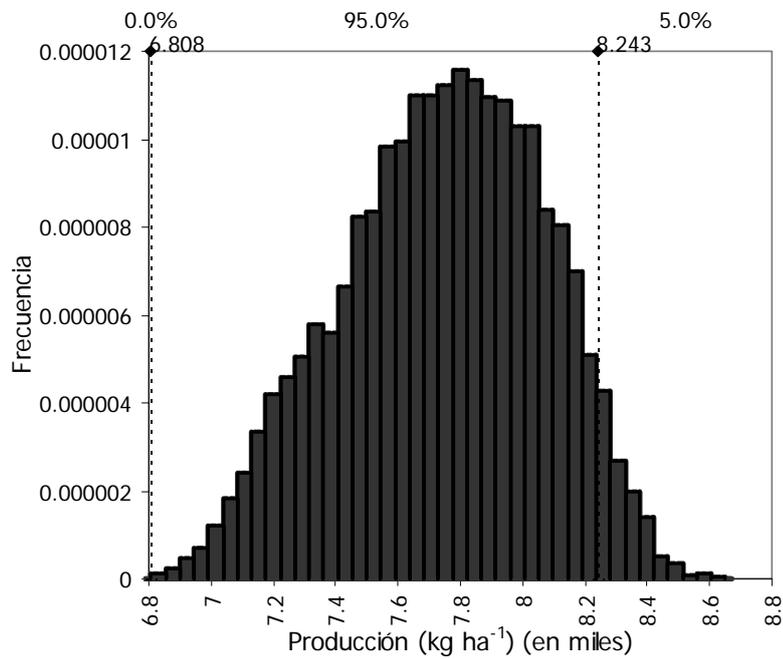


Figura 29. Producción en el punto de equilibrio cuando la enfermedad se presenta en invierno.

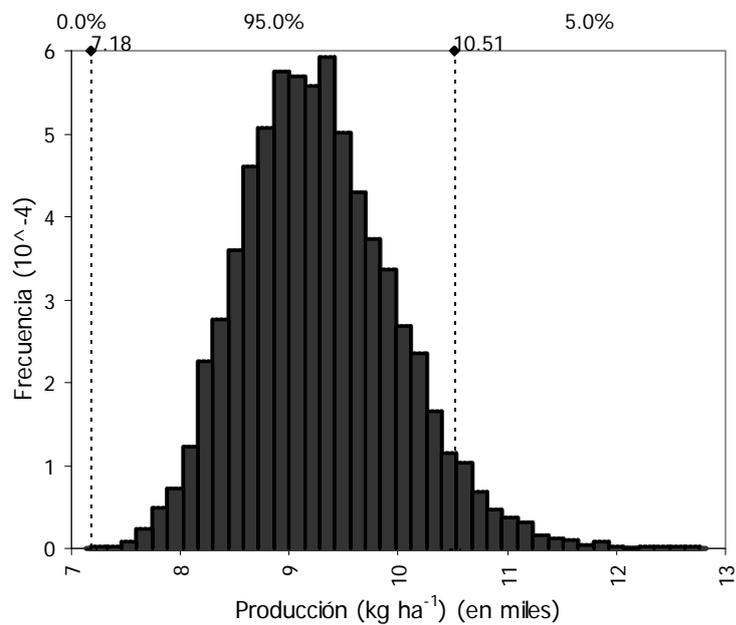


Figura 30. Producción en el punto de equilibrio cuando la enfermedad se presenta en el verano.

En términos del uso de la capacidad instalada, se encontró que, a fin de que la granja opere sin pérdidas con 95% de confianza, deberá utilizarse al menos el 43.07% de su capacidad instalada cuando la granja opera normalmente (Fig.31), 60.38% cuando la enfermedad estuvo presente en el invierno (Fig. 32), y 61.97% cuando estuvo presente en verano (Fig. 33).

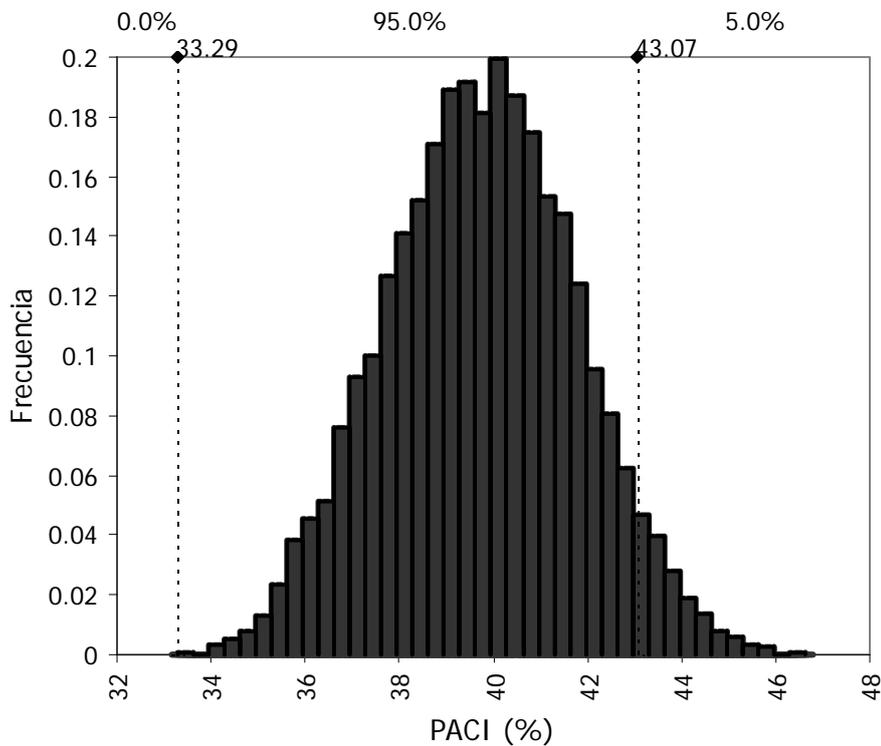


Figura 31. Producción en el equilibrio (PACI) (como % de la capacidad instalada) cuando se opera una granja en condiciones normales.

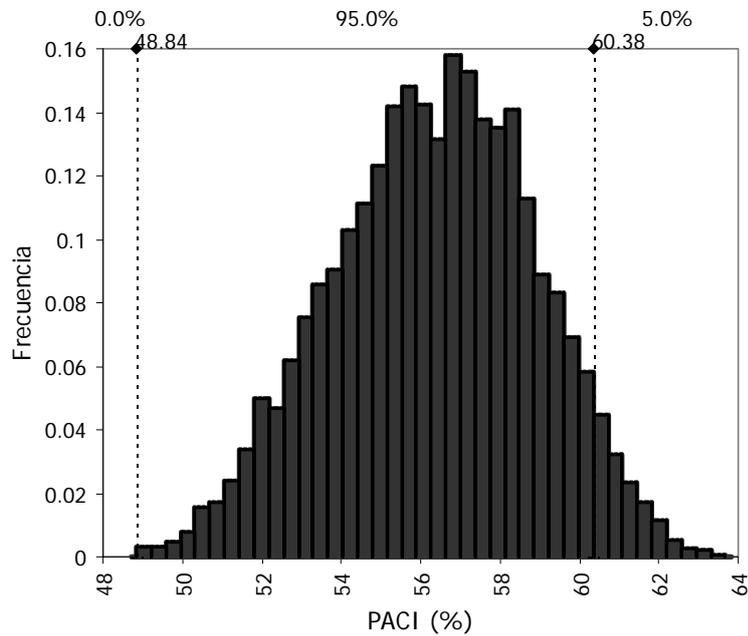


Figura 32. Producción en el equilibrio (PACI) (como % de la capacidad instalada) cuando la enfermedad se presenta en invierno.

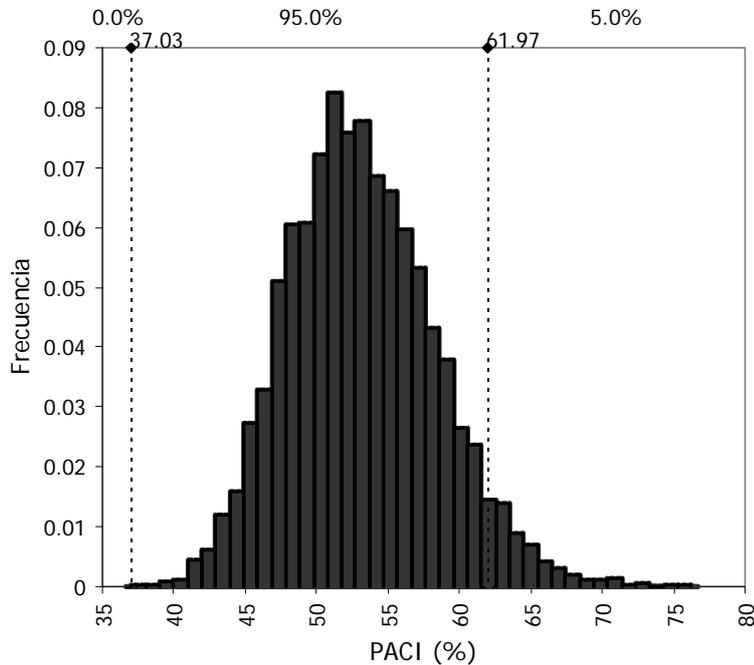


Figura 33. Producción en el equilibrio (PACI) (como % de la capacidad instalada) cuando la enfermedad se presenta en el verano

IV. Discusión

4.1. Modelos de stock

Los modelos de stock propuestos describieron y predijeron de manera adecuada la producción intensiva de camarón *L. vannamei* cuando es afectada, o no, por la enfermedad de la mancha blanca. Dicha capacidad predictiva, a su vez, se fundamentó en los modelos usados para describir el crecimiento y la supervivencia del camarón, así como también en los modelos estadísticos utilizados, derivados del análisis de regresión lineal.

Los modelos de regresión lineal múltiple son considerados predictivos más que herramientas explicativas. No obstante, cabe destacar que las variables independientes utilizadas en los modelos estuvieron en concordancia aceptable con las relaciones observadas utilizando análisis de correlación entre los parámetros del modelo de stock y las variables ambientales y de manejo; particularmente para los casos en que se presentó la enfermedad de la mancha blanca. Asimismo, esas relaciones fueron, en general, consistentes con estudios reportados por otros autores sobre granjas intensivas de camarón y factores de riesgo asociados con la enfermedad de la mancha blanca, indicando consistencia y confianza en la capacidad predictiva de los modelos.

Cuando las granjas operaron normalmente, los resultados mostraron que existen diferencias en los rendimientos de biomasa asociados a los esquemas de manejo utilizados para la producción intensiva de *L. vannamei*. El uso de estanques pequeños, particularmente durante los ciclos de invierno, es importante porque permite a los granjeros obtener mayores pesos finales del camarón. Esa situación ayuda a compensar la baja producción que normalmente ocurre en los ciclos de invierno, comparado con los ciclos de verano.

Kongkeo (1997), Islam *et al.* (2005) y Milstein *et al.* (2005), han enfatizado el uso de estanques pequeños para mejorar las prácticas de manejo e incrementar el crecimiento, supervivencia, rendimientos de la producción y beneficios económicos de *P. monodon*. Se ha hecho el mismo tipo de recomendación para *L. vannamei*

(Hernández-Llamas & Villarreal-Colmenares, 1999; Magallón, 2006). En el presente estudio también se encontró que, en general, con estanques pequeños se obtuvieron mayores pesos finales y mayor producción de biomasa. La alta sensibilidad de la producción al peso final del camarón indicó la importancia de obtener camarones de mayor tamaño usando estanques pequeños para los ciclos de invierno. En los casos en que se presentó la enfermedad, se encontraron mayores tasas de supervivencia y retrasos en la aparición de la enfermedad cuando se utilizaron estanques pequeños, lo que sugiere que condiciones menos estresantes y buenas prácticas de manejo aminoraron la amenaza de la enfermedad. Al respecto, y en concordancia con el presente estudio, Magallón (2006) encontró que las tasas de supervivencia en granjas semi-intensivas fueron menores en estanques grandes (8 ha o más) en comparación con la supervivencia observada en estanques pequeños.

Por otro lado, bajo operaciones normales y condiciones de cultivo más favorables, el uso de altas densidades de siembra, aún teniendo un efecto negativo sobre el peso, parece ser la forma más conveniente para incrementar los rendimientos, particularmente en los ciclos de producción de verano. Diversos estudios han reportado un efecto negativo de la densidad de siembra sobre el crecimiento del camarón (Wyban *et al.*, 1987; Moss & Moss, 2004; Araneda *et al.*, 2008). Los resultados para los casos en que las granjas operaron normalmente mostraron, en coherencia con los estudios mencionados anteriormente, que las altas densidades de siembra afectaron el crecimiento en peso del camarón sin que, aparentemente, disminuyera la producción.

En contraste con lo ocurrido bajo operaciones normales, en los casos en que ocurrió la enfermedad no se determinó una relación de la densidad de siembra con los parámetros de crecimiento. Al respecto, Sandifer *et al.* (1991) analizó la talla final de *L. vannamei* para densidades de siembra entre 20 y 200 postlarvas m^{-2} y no encontró una tendencia que le permitiera observar que el camarón disminuyera su talla por el efecto de las altas densidades. En un análisis de 23 granjas semiintensivas e intensivas de camarón, realizado por Hopkins & Villalón (1992), se encontró que las relaciones entre el peso final del camarón y la densidad de siembra es apenas discernible. Aparentemente, la calidad de la postlarvas parece tener más

influencia que la propia densidad de siembra sobre el peso final de camarón (Sandifer *et al.*, 1991).

Tampoco se encontró evidencia, para el caso de operaciones normales, de que exista una relación entre la densidad de siembra y la tasa instantánea de mortalidad; ni entre la densidad y la mortalidad causada por la enfermedad, o el tiempo en que ésta se presenta, cuando el cultivo estuvo afectado por la misma. Ello, a pesar de que se ha considerado que altas densidades de cultivo constituyen un factor de riesgo de epidemias, pues el número de contactos entre los camarones es más elevado (Kautsky *et al.*, 2000). Sin embargo, en coherencia con lo encontrado en este estudio, Corsin *et al.* (2001) no encontraron ninguna asociación entre la densidad de siembra en *P. monodon* y la infección por el virus de la mancha blanca.

Por otra parte, es común que en los cultivos intensivos la aireación se utilice para tener mejores condiciones de la calidad del agua en los estanques, y con ello mejorar la producción de los organismos cultivados (Martínez-Córdoba *et al.*, 1997). El oxígeno disuelto es considerado el principal factor que afecta la producción intensiva y está directamente relacionado con la tasa de aireación (Hopkins *et al.*, 1991) y, como quedó demostrado en este estudio, con el inicio de aireación.

McGraw *et al.* (2001), trabajaron con *L. vannamei* y *L. stylirostris*, y demostraron que el incremento del nivel mínimo tolerable de oxígeno disuelto, por medio de la aireación, produjo altas tasas de supervivencia, y mayores rendimientos en la producción e ingresos netos, aunque los autores no encontraron diferencias significativas en el peso final del camarón. En el presente estudio, para operaciones normales, se encontró un efecto positivo de los niveles de oxígeno disuelto sobre el peso final del camarón. Cuando la enfermedad estuvo presente, se encontró un efecto positivo sobre la supervivencia.

Para condiciones de operación normales, se encontró que el inicio de aireación tuvo menor importancia en el control de la producción de camarón, comparado con otras variables de manejo como el tamaño del estanque, la duración del cultivo y la densidad de siembra. Este resultado contrasta con lo observado para los casos que estuvieron afectados por la enfermedad, en los que el inicio de aireación tuvo una función importante. La menor relevancia del inicio de aireación en

los casos que operaron normalmente es atribuible a una mejor condición sanitaria del camarón, que lo hizo menos sensible a bajos niveles de oxígeno disuelto y a una pobre calidad del agua derivada de inicios de aeración tardíos.

Al respecto, se ha encontrado que los bajos niveles de oxígeno disuelto reducen la respuesta inmune en *L. stylirostris* y *P. monodon* e incrementan la susceptibilidad a enfermedades infecciosas (Le Moullac *et al.*, 1998). En esta investigación se encontró que el oxígeno disuelto y la aireación fueron los factores que más influyeron en la dinámica de la producción intensiva de *L. vannamei* cuando fue afectada por la enfermedad de la mancha blanca.

Las concentraciones altas de oxígeno disuelto llevaron a obtener las mejores producciones, ya que redujeron la mortalidad causada por la enfermedad y retrasaron su aparición. Pudiera suponerse que los altos niveles de oxígeno disuelto y de aireación fueran una estrategia de manejo de los granjeros, en respuesta a las altas biomásas de camarón en estanques que estuvieron afectados ligeramente por la enfermedad. No obstante, este no fue el caso porque, (1) los granjeros instalan los equipos de aireación en función de la biomasa proyectada, pero utilizan los aireadores principalmente para prevenir caídas del oxígeno disuelto cuando la concentración de éste es menor que 4 mg l⁻¹ y (2), lo que es más importante, cuando la aireación produjo mayores niveles de oxígeno disuelto antes de que se presentara la mortalidad por la enfermedad, se observó que dicha mortalidad fue menor.

También se encontró que el retraso en los inicios de la aireación llevó a incrementar la mortalidad causada por la enfermedad. Además, cuando los inicios se retrasaron, estuvieron fuertemente relacionados con un intervalo corto entre el inicio de aireación y cuando ocurrió la mortalidad.

A partir de un trabajo con *P. monodon*, se ha sugerido que existe una asociación entre el olor del ácido sulfhídrico del fondo del estanque y la presencia de la enfermedad de la mancha blanca (Corsin *et al.*, 2001). La aireación artificial permite incrementar el oxígeno disuelto en el estanque, la circulación del agua y remoción del fondo, lo que crea erosión y áreas de sedimentación (Boyd, 1998). El inicio temprano de la aireación puede contribuir a la prevención de la acumulación de materia orgánica en los fondos de los estanques. En contraste, los inicios de

aireación tardíos pueden causar la remoción de materia orgánica acumulada y, por lo tanto, pueden presentarse efectos perjudiciales sobre el camarón.

Rameshthangam & Ramasamy (2006) y Mohankumar & Ramasamy (2006) trabajaron respectivamente con *Penaeus monodon* y *Fenneropenaeus indicus*, y encontraron que el camarón infectado con el virus de la mancha blanca mostró estrés oxidativo, según lo indicó el incremento de la peroxidación lipídica en los tejidos (incluidos los tejidos de las branquias) y la actividad deprimida de las enzimas antioxidantes. De acuerdo con esos autores, la peroxidación lipídica ocurre como consecuencia de pro-oxidantes liberados cuando los radicales ferrosos (Fe^{2+}) son transformados a radicales férricos (Fe^{3+}). Por otra parte, cuando se remueven los sedimentos de los estanques, los radicales ferrosos se incrementan en la columna de agua (Boyd, 1990). Es muy probable, por lo tanto, que los sedimentos en suspensión del fondo del estanque producto de la aireación, incrementen la oxidación de esos radicales, transformándolos en óxido férrico y como consecuencia, provoquen estrés oxidativo en el camarón. La disminución de la actividad respiratoria del camarón infectado puede llevarlo, de esa manera, a una mayor vulnerabilidad cuando el nivel del oxígeno disuelto en el agua es bajo.

Se ha estudiado preliminarmente la influencia de la variación intradiaria del oxígeno disuelto y la temperatura sobre el inicio de la enfermedad de la mancha blanca en granjas semi-intensivas en México (CONACYT, 2007). De acuerdo con ese reporte, en periodos cortos de días nublados, los valores de oxígeno disuelto y de temperatura son similares durante la noche y la madrugada, mientras que la fotosíntesis, la temperatura y los niveles de oxígeno disuelto generalmente disminuyen. Cuando la concentración de oxígeno disuelto es baja ($< 3 \text{ mg l}^{-1}$) el camarón infectado es más vulnerable a la enfermedad, la cual se propaga a los camarones sanos mediante la ingesta de cadáveres infectados (Soto & Lotz, 2001).

Peinado-Guevara & López-Meyer (2006) reportaron una situación similar para granjas semiintensivas de *L. vannamei* en México. De acuerdo con esos autores, las lluvias producen cambios abruptos en la temperatura del agua, la salinidad y el oxígeno disuelto, lo cual causa estrés, una baja respuesta inmune, y una mayor

susceptibilidad para epidemias de la enfermedad de la mancha blanca en las poblaciones de camarón.

No se han reportado en la literatura relaciones entre las variaciones intradiarias del oxígeno disuelto y los brotes de enfermedades en granjas intensivas, en donde el manejo de la aireación previene reducciones severas del oxígeno disuelto. En el presente estudio, no se observó que los brotes de la enfermedad estuvieran precedidos consistentemente por patrones específicos de variación intradiaria en las variables de la calidad del agua.

Con respecto a la duración del cultivo, es esperable que los rendimientos de la biomasa aumenten conforme dicha duración se alarga. En este estudio se calculó que los mejores rendimientos de la biomasa ocurrieron en los periodos de cultivo más largos, aunque se destaca que no se obtuvo evidencia de que esta variable de manejo tuviera un efecto sobre la supervivencia del camarón, tanto para los casos en que la granja operó normalmente como para aquéllos en que los cultivos estuvieran afectados por la enfermedad.

Generalmente se reconoce que el crecimiento de camarón se favorece con las altas temperaturas y bajas salinidades durante los ciclos de verano, comparado con los ciclos de invierno. En este estudio, se encontró que las bajas salinidades provocaron mayores pesos finales. Sin embargo, a diferencia de lo que ocurrió con los casos en que la enfermedad afectó a los cultivos, no se encontró una relación del peso final con la temperatura cuando las granjas operaron normalmente. Probablemente este resultado es consecuencia de que la varianza del peso final estuvo mejor explicada por las demás variables ambientales y de manejo, haciendo a la temperatura una variable independiente redundante. No obstante, tanto para operaciones normales como aquéllas afectadas por la enfermedad, se encontró un efecto positivo de las altas temperaturas sobre la supervivencia del camarón. Esto es consistente con lo encontrado por Ponce-Palafox *et al.* (1997) y Hennig & Andreatta (1998) quienes, en estudios con *L. vannamei* y *Penaeus paulensis*, encontraron una influencia positiva sobre la supervivencia del camarón de la temperatura al pasar de 20 C a 28°C.

Algunos estudios han abordado el efecto de la temperatura sobre la enfermedad de la mancha blanca. Al respecto, Vidal *et al.* (2001) y Rahman *et al.* (2006) reportaron que las temperaturas altas (32-33 °C) permiten mitigar el progreso de la enfermedad. Así también, se ha demostrado que dicho virus es más prevalente en poblaciones de *L. vannamei* durante el invierno (Rodríguez *et al.*, 2003). Guan *et al.* (2003) reportaron, para *Marsupenaeus japonicus*, concentraciones bajas del virus de la mancha blanca a 33 °C, en comparación con concentraciones observadas a temperaturas de 23 y 28 °C.

En esta investigación, las altas temperaturas estuvieron asociadas a reducciones de la mortalidad causada por la enfermedad y beneficiaron al crecimiento del camarón. En el invierno, dicha mortalidad fue mayor que en el verano, debido a las bajas temperaturas que prevalecieron en esa estación, lo que concuerda con los resultados reportados en la literatura. No obstante, cuando se compara el verano, el efecto de la temperatura aparentemente fue opuesto a lo que pudiera esperarse en relación con la tasa de mortalidad y el tiempo en que ocurrió la mortalidad causada por la enfermedad. La temperatura promedio del agua en 2005 fue ligeramente más elevada que en 2004, pero en 2005 existieron condiciones más adversas, producto de las bajas tasas de aireación y bajos niveles de oxígeno disuelto en el agua, lo que generó que se presentara más pronto la enfermedad y se presentaran mayores tasas de mortalidad.

Hernández-Llamas & Villarreal-Colmenares (1999) han recomendado salinidades entre 15 y 30 ppm para *L. vannamei* en condiciones de cultivo. En esta investigación, cuando los valores de la salinidad fueron menores beneficiaron el crecimiento, tanto en operaciones normales como con presencia de la enfermedad, lo que apoya la explicación de que prevalecieron mejores condiciones generales en estanques con bajos niveles de salinidad.

Con respecto al efecto que tiene la salinidad sobre epidemias de la enfermedad de la mancha blanca, Liu *et al.* (2006) reportaron que reducciones en la salinidad de 22 a 14 ppm en una hora, incrementa la carga del virus de la mancha blanca en *Fennerepenaeus chinensis*. En esta investigación se encontró que, cuando los valores de la salinidad fueron menores, la mortalidad causada por la enfermedad

fue baja. No obstante, cabe destacar que en el estudio de Liu *et al.* (2006) la reducción de la salinidad actuó como un factor estresante, mientras que en la presente investigación las diferencias en los niveles de salinidad no constituyeron un factor estresante, en tanto que correspondieron a valores promedio de estanques individuales con poblaciones independientes de camarón, indicando un efecto general ejercido por la salinidad durante el periodo completo de cultivo.

4.2 Modelos de factor de conversión alimenticia

No ha habido reportes científicos acerca del factor de conversión alimenticia en cultivos comerciales intensivos de camarón afectados por la enfermedad de la mancha blanca. En el presente estudio, se encontró que el incremento del factor de conversión alimenticia aumentó con las bajas temperaturas. Lo anterior es atribuible al hecho de que el valor del factor de conversión alimenticia se incrementa cuando la población de camarón disminuye, ya que la población de camarón disminuyó drásticamente por la mortalidad asociada a la presencia de la enfermedad cuando las temperaturas fueron bajas.

Cuando la granja operó normalmente, se encontró que el factor de conversión alimenticia se incrementó cuando los valores de la concentración del oxígeno disuelto en el agua fueron altos. Al respecto, Rosas *et al.* 1998 mencionan que el camarón consume menos alimento en periodos de hipoxia. Seidman & Lawrence (1985) también notaron una reducción general de la actividad y cantidad ingerida de alimento en juveniles de *P. monodon* y *L. vannamei* con bajos niveles de oxígeno. En el presente estudio, las relaciones encontradas entre el FCA y el oxígeno disuelto, confirman lo descrito por esos autores.

4.2. Variabilidad de la producción y análisis de riesgo económico

Los resultados obtenidos indican que las máximas producciones de biomasa y los mayores beneficios económicos se obtienen utilizando la máxima densidad de siembra (60 PL m⁻² para invierno y verano cuando la enfermedad estuvo presente, y

60 y 90 PL⁻² para el verano y el invierno, respectivamente, cuando la enfermedad estuvo ausente), estanques pequeños (2 ha), inicios de aireación a la primera semana, y las máximas duraciones del periodo de cultivo. Cuando se analizaron los rendimientos económicos en el mejor escenario antes de impuestos, se encontró que se presentan pérdidas cuando la enfermedad afecta a los cultivos en los dos ciclos de producción, mientras que se tienen beneficios económicos anuales cuando la enfermedad afecta a cualquier ciclo de producción (invierno o verano), o bien, cuando la granja opera normalmente.

También se determinó que, una vez descontados los impuestos, solamente se pueden tener beneficios económicos cuando la enfermedad no afecta a ningún ciclo de producción o cuando afecta solamente al ciclo de verano. Sánchez-Zazueta & Martínez-Cordero (2009) trabajando con datos del 2005, no reportan pérdidas en cultivos semi-intensivos en los escenarios presentados en su investigación cuando incluyen, en la variabilidad de los resultados económicos, el efecto de enfermedades. Es posible que las diferencias entre los resultados obtenidos por esos autores y los que se presentan en este trabajo se deban al tipo de tecnología utilizada, a las enfermedades analizadas, a las duraciones de los ciclos de producción, a las fechas de siembra y cosechas y a las variaciones del precio de venta y de costos usados para el análisis en esa época ya que, de entonces a la fecha, se ha encontrado una tendencia a la alza de los costos del alimento (García-Partida, com. Pers.) y una tendencia a la baja del precio de venta del camarón (CONAPESCA, 2008).

La determinación de la producción en el punto de equilibrio (PPE) mostró que, en las mejores condiciones de manejo, se debe producir más en los casos en que la enfermedad afectó al invierno o al verano (60.38 % y 61.97 % de la capacidad instalada de la granja, respectivamente), mientras que la producción necesaria para no tener pérdidas en operaciones normales se obtuvo en promedio en el orden de 4,300 kg ha⁻¹ (43.07 % de la capacidad de la granja). Hernández- Llamas *et al.* (2004) reportan para el cultivo intensivo de *L. stylirostris*, sin afectación por enfermedades, que se debe trabajar por lo menos al 53% de la capacidad instalada de una granja para que no se registren pérdidas económicas. Las diferencias encontradas entre las tecnologías de las dos especies, puede deberse a que *L.*

vannamei presenta mayores ventajas de adaptabilidad a los medios de cultivo y mayor resistencia a las enfermedades que *L. stylirostris*, lo que hace que actualmente *L. vannamei* sea preferida por los acuicultores.

Los resultados también muestran que, tanto la variabilidad de la producción como el riesgo económico, son mayores cuando se presenta la enfermedad que cuando está ausente, independientemente del esquema de manejo o del ciclo de producción que se realice. Asimismo, es clara la importancia del manejo adecuado del cultivo, tanto para incrementar el rendimiento económico como para la disminución del riesgo, independientemente de que la enfermedad haya estado presente o ausente. Estos resultados señalan la conveniencia de un manejo adecuado, considerando que no existe una razón a priori para suponer que un manejo que permita incrementar la producción y los beneficios económicos, simultáneamente reduzca el riesgo. El presente estudio demuestra, sin embargo, que es posible esperar ese doble beneficio.

Las mejores condiciones para la producción y el rendimiento económico del cultivo se obtienen cuando la aireación se inicia en la primera semana, manteniendo altos niveles de oxígeno disuelto, lo que, según se pudo determinar en esta investigación, produce mayores pesos finales en operaciones normales, y menor afectación en los parámetros de mortalidad causada por la enfermedad.

No obstante que Valderrama & Engle (2002) y Sánchez Zazueta & Martínez-Cordero (2009) encontraron que el riesgo económico disminuye con densidades de siembra bajas e intermedias en los cultivos semi-intensivos, en el presente estudio los mejores rendimientos de la biomasa y las mayores utilidades se obtuvieron usando las máximas densidades de siembra y las máximas duraciones de cultivo, sin que se observara un aumento en el riesgo. Una excepción respecto a la duración del cultivo, fue el ciclo invernal en el que estuvo presente la enfermedad, en el que se obtuvieron la máxima producción y la menor pérdida en la quinta semana, antes de que ocurriera la mortalidad por la enfermedad y momento en el cual se llevó a cabo la cosecha. Con este manejo de la duración del cultivo se disminuyó el riesgo.

Las diferencias en el manejo del oxígeno disuelto y de la capacidad de carga de biomasa (de la densidad de cultivo) de camarón entre las tecnologías semi-

intensiva e intensiva, podrían explicar el que el riesgo disminuya cuando se usen densidades bajas e intermedias en granjas semi-intensivas. En los cultivos semi-intensivos, los niveles de oxígeno disuelto son controlados mediante recambios de agua por medio de rebombeo, lo que dificulta el manejo de las cargas de biomasa; mientras que en los cultivos intensivos el oxígeno disuelto es controlado por medio de la aireación mecánica, facilitando el uso de altas densidades y cargas de biomasa.

Cuando la enfermedad se presentó en cualquier estación, se obtuvieron pérdidas económicas y una relación beneficio-costo inferior a uno. No obstante lo anterior, cabe destacar que, conforme se mejoró el manejo, las pérdidas económicas se fueron reduciendo. Hernández-Llamas *et al.* (2004) encontraron que combinaciones de densidades máximas de 65 y 67 camarones m^{-2} y duraciones de cultivo máximas de 24 y 26 semanas para los ciclos de invierno y verano, respectivamente, maximizan indicadores económicos del cultivo intensivo de *L. stylirostris*. El análisis bioeconómico de este estudio indicó concordancia con esos autores, aunque para esta investigación, las máximas duraciones de cultivo fueron de 20 semanas.

Es claro, por lo tanto, que las densidades de cultivo máximas conducen a maximizar los rendimientos de la producción, a pesar de que, según se puede observar en la Tabla 3, para operaciones normales, la densidad afectó negativamente al peso final que puede alcanzar el camarón. Evidentemente, el efecto benéfico de usar la máxima densidad de siembra para incrementar la biomasa total producida, es suficiente para compensar el efecto negativo derivado de la disminución del peso final promedio del camarón. Podría esperarse que la disminución de las tallas del camarón, producto de las altas densidades utilizadas, tuviera un efecto negativo sobre los rendimientos económicos, debido al menor precio de venta. Sin embargo, tal disminución del peso final no afectó suficientemente el desempeño económico, ya que la máxima utilidad y el máximo valor de la relación beneficio-costo se obtuvieron con la mayor densidad de siembra.

En un estudio para granjas semi-intensivas de camarón en Honduras, Valderrama & Engle (2002), encontraron que existe mayor riesgo económico en

granjas de menor tamaño que en las de mayor tamaño. El análisis realizado en este trabajo también mostró, en concordancia con esos autores, que el riesgo económico es mayor para una granja pequeña que para una granja grande. Esto puede explicarse por el teorema del límite central de la estadística (Vose, 2001) que establece que, independientemente del tipo de distribución que presente una población, la desviación estándar de la distribución del promedio (en este caso, de la utilidad / ha o de la relación beneficio-costos) de las muestras (estanques) obtenidas de dicha población, tiende a disminuir conforme el tamaño de la muestra se incrementa. En otras palabras, la variabilidad extrema en la producción o en las variables económicas que puede ocurrir cuando se opera una granja de un solo estanque, en una granja constituida por varios estanques se ve compensada (en términos del valor promedio), por la variabilidad extrema, y en sentido opuesto, que pueden presentar otros estanques.

4.3. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad en la producción mostró que, en general, el oxígeno disuelto en el agua es un factor importante, particularmente cuando el manejo del cultivo es deficiente. Lo mismo ocurre para el análisis de sensibilidad de la utilidad y de la relación beneficio-costos, a excepción del verano, cuando la enfermedad afectó al cultivo, en donde el incremento del factor de conversión alimenticia (i_F) provocado por la enfermedad, explicó mejor la variabilidad de la utilidad.

Según se explicó, el oxígeno disuelto influye de manera importante, tanto en los parámetros de mortalidad cuando el cultivo se ve afectado por la enfermedad, como en los parámetros de crecimiento en condiciones de operación normales. En otras palabras, el manejo deficiente de la aireación (inicios de aireación tardíos) produce bajos niveles de oxígeno, y el tiempo de inicio de la aireación constituye, en esas condiciones, el principal control del riesgo. Cuando el manejo del cultivo es eficiente, el oxígeno constituye también el principal factor de riesgo en la producción para los ciclos de verano que no se ven afectados por la enfermedad, pero en el

resto de los casos claramente tiende a disminuir en importancia, adquiriendo mayor relevancia el peso final del camarón y su tasa de mortalidad.

La variabilidad del oxígeno disuelto está constituida por dos componentes: uno de ellos se explica de manera determinista cuando se relaciona, mediante regresión lineal simple, el oxígeno disuelto con el inicio de la aireación; el otro componente corresponde a la variabilidad estocástica que no es posible explicar cuando se ajusta el modelo de regresión. El inicio de la aireación tuvo menor importancia relativa en la determinación de la variabilidad de la producción de camarón, comparado con otras variables de manejo (Fig. 15). En contraste, los valores estocásticos del oxígeno disuelto fueron más importantes. Esos resultados sugieren la necesidad de realizar estudios para mejorar el manejo de la aireación, con la finalidad de reducir la variabilidad del oxígeno disuelto entre los estanques, y con ello, incrementar la confianza en la predicción de la producción.

El análisis de sensibilidad de los indicadores económicos, al igual que el de la producción mostró, en general, que el peso final del camarón adquirió mayor importancia bajo operaciones normales. Sin embargo, cuando se analiza la sensibilidad de la relación beneficio-costos durante el ciclo de verano, el factor de conversión alimenticia adquiere mayor relevancia, seguido por el peso final del camarón; parámetros que estuvieron afectados por el oxígeno disuelto. González-Becerril (2002) y Hernández-Llamas *et al.* (2004) determinaron la importancia del peso final y la tasa instantánea de mortalidad, mediante un análisis de sensibilidad, en el desempeño económico de *L. stylirostris* bajo condiciones de cultivo intensivo y sin afectación por enfermedades. En dicho trabajo, el factor de conversión alimenticia tuvo una importancia intermedia, aunque cabe destacar que en esa investigación el oxígeno disuelto no se consideró para el análisis.

En cuanto a la sensibilidad que tuvieron la variabilidad de los precios de venta del camarón y del alimento balanceado, Hatch *et al.* (1987), Hernández-Llamas *et al.* (2004) y Sánchez-Zazueta & Martínez-Cordero (2009) encontraron que las variaciones del precio de venta del camarón tuvieron un mayor efecto sobre el rendimiento económico que las variaciones del precio del alimento. En este trabajo,

se encontraron resultados consistentes con los encontrados por esos autores, independientemente de que la enfermedad estuviera presente o ausente.

El análisis de sensibilidad de los indicadores económicos a las variaciones de las variables de manejo indicó que el tamaño del estanque fue importante para el manejo del cultivo. Esos resultados demuestran la importancia que tienen las buenas prácticas de manejo cuando se utilizan estanques pequeños, los cuales, han sido recomendados por Kongkeo (1997), Hernández-Llamas & Villarreal-Colmenares (1999), Islam *et al.* (2005) y Milstein *et al.* (2005). El uso de estanques de menores dimensiones permite mayor control de las variables de manejo como la aireación, las raciones de alimento y control de enfermedades que pudieran ser críticas para el desarrollo del camarón en condiciones de cultivo. También, en estanques pequeños se facilita manejar altas densidades de cultivo, variable que, según se demostró, resulta conveniente incrementarla hasta los límites máximos permisibles por la tecnología intensiva.

V. Conclusiones

Los resultados obtenidos en el presente trabajo permiten concluir que resultó posible evaluar el riesgo del cultivo intensivo de camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*) para las condiciones prevalecientes en el estado de Nayarit. Asimismo, resultó factible llevar a cabo un análisis de riesgo para condiciones de operación normales y bajo condiciones de afectación por la enfermedad de la mancha blanca, analizar y proponer diferentes esquemas de manejo del cultivo a fin de disminuir el riesgo e incrementar la producción y los beneficios económicos. También fue posible realizar un análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo bioeconómico para establecer su importancia relativa, y emitir recomendaciones para el manejo del cultivo.

Se logró establecer la trascendencia que tienen las variables ambientales y de manejo en la producción intensiva de camarón blanco, cuando los cultivos se ven afectados, o no, por la enfermedad de la mancha blanca. También se demostró la importancia de iniciar la aireación desde la primera semana de cultivo para disminuir el riesgo asociado a la enfermedad, así como la utilización de estanques de menores dimensiones para el mejor control del cultivo en general.

VI. Literatura Citada

- Adams, C.M., W.L. Griffin, P. Nichols & R.W. Bricks. 1980. Application of a bio-economic-engineering model for shrimp mariculture systems. *Southern J. Agricult. Econ.*, 12: 135-141.
- Allen, P.G., L.W. Botsford, A.M. Schuur & W.E. Johnston. 1984. *Bioeconomics of Aquaculture*. Elsevier, Amsterdam. 351p.
- Araneda, M., E.P. Pérez & E. Gasca-Leyva. 2008. White shrimp *Penaeus vannamei* culture in freshwater at three densities: Condition state based on length and weight. *Aquaculture* 283: 13-18.
- Boyd C.E. 1990. *Water Quality in Ponds for Aquaculture*. Alabama Agricultural Experiment Station, Auburn University, Alabama.
- Boyd, C.E. 1998. Pond water aeration systems. *Aquacult. Eng.* 18: 9-40.
- Brock J.A. & R. Bullis. 2001. Disease prevention and control for gametes and embryos of fish and marine shrimp. *Aquaculture* 197: 137–159.
- Cacho, O.J. 1997. Systems modelling and bioeconomic modelling in aquaculture. *Aquacult. Econ. & Manage.* 1: 45-64.
- Chen, J.M. & J.C. Chen. 2000. Study on the free amino acids levels in the hemolymph, gill, hepatopancreas and muscle of *Penaeus monodon* exposed to elevated ambient ammonia. *Aquatic Toxicol.* 50: 27-37.
- Cheng, W. & J.C. Chen. 2002. The virulence of *Enterococcus* to freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii* and its immune resistance under ammonia stress. *Fish Shellfish Immun.* 12: 97–109.
- Chow, S.C. & J.P. Liu. 2004. *Design and Analysis of Clinical Trials: Concepts and Methodologies*, 2nd Ed. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey. 752 p
- Clark, C.W. 1974. *Mathematical Bioeconomics. The Optimal Management of Renewable Resources*. John Wiley & Sonso, New York. 313p.
- CONACyT, 2007. Correlación de condiciones biológico-ambientales con la presencia de epidemias de mancha blanca en cultivos de camarón: variables ambientales. Informe Proyecto CONACYT. Programa Integral de Sanidad Acuícola. Fase I. México.

- CONAPESCA, 2008. Anuario estadístico 2008. Comisión Nacional de Pesca y Acuicultura. <http://www.conapesca.sagarpa.gob.mx>.
- Corsin, F., J.F. Turnbull, N.V. Hao, C.V. Mohan, T.T. Phi, L.H. Phuoc, N.T.N. Tinh, & K.L. Morgan. 2001. Risk factors associated with white spot syndrome virus infection in a Vietnamese rice-shrimpfarming system. *Dis. Aquat. Organ.* 47: 1–12.
- FAO, 2007. El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2006. Departamento de Pesca y acuicultura, Rome. 176p.
- FIRA, 2009. Situación Actual y Perspectivas del Camarón en México. 122 p.
- Galavíz-Silva L., Z.J. Molina-Garza, J.M. Alcocer-González, J.L. Rosales-Encinas & C. Ibarra-Gámez. 2004. White spot síndrome virus genetic variants detected in México by a new multiplex PCR method. *Aquaculture* 242: 53-68.
- Garret, K.A., 1997. Use of statistical tests of equivalence (bioequivalence tests) in plant pathology. *Pyhtopatholgy* 87: 372-374.
- González-Becerril A. 2002. Modelación bioeconómica de un sistema de producción intensiva *Litopenaeus stylirostris* en Ecuinapa Sinaloa México. Tesis doctoral. Universidad de Colima, México. 111p.
- Griffin, W.L., J.S. Hanson, R.W. Brick & M.A. Johns. 1981. Bioeconomic modeling with stochastic elements in shrimp culture. *J. World Mar. Soc.* 12: 94-103.
- Guan, Y., Z. Yu & C. Li. 2003. The effects of temperature on white spot syndrome infection in *Marsupenaeus japonicus*. *J. Invertebr. Pathol.* 83: 257–260.
- Hatch, U., S. Sindelar, D. Rouse & H. Perez. 1987. Demonstrating the use of risk programming for aquacultural farm management: the case of penaeid shrimp in Panama. *J. World Aquacult. Soc.* 18: 260-269
- Hauck, W.W. & S. Anderson. 1986. A proposal for interpreting and reporting negative studies. *Stat. Med.* 5: 203-209.
- Hennig, O.L. & E.R. Andreatta. 1998. Effect of temperature in an intensive nursery system for *Penaeus paulensis* (Pérez-Farfante, 1967). *Aquaculture* 164: 167-172.
- Hernández-Llamas, A. & F.J. Magallón-Barajas. 1991. Análisis bioeconómico del cultivo del camarón azul (*Penaeus stylirostris*) con fertilizantes orgánicos y alimentación balanceada. *Investigaciones Marinas CICIMAR* 6(2): 267-281.

- Hernández-Llamas, A., A. González-Becerril, S. Hernández-Vázquez & S. Escutia-Zúñiga. 2004. Bioeconomic analysis of intensive production of the blue shrimp *Litopenaeus stylirostris*. *Aquacult. Res.* 35: 103-111.
- Hernández-Llamas, A. & D.A. Ratkowsky. 2004. Growth of fishes, crustaceans and molluscs: estimation of the Von Bertalanffy, Logistic, Gompertz and Richards curves and a new growth model. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 282: 237-244.
- Hernández-Llamas, A. & H. Villarreal-Colmenares, 1999. A software reference to shrimp *Litopenaeus* farming practices. *Aquacult. Econ. Manag.* 3: 267-280.
- Hochman, E., P.S. Leung, L.W. Rowland & J.A. Wyban. 1990. Optimal scheduling in shrimp mariculture: A stochastic growing inventory problem. *Amer. J. Agricult. Econ.* 72: 382-393.
- Hopkins, J.S. & J. Villalon. 1992. Synopsis of industrial panel input on shrimp pond management. In: Wyban, J. (Ed), *Proceedings of the Special Session on Shrimp Farming*. World Aquaculture Society, Baton Rouge, LA:138-143.
- Hopkins, J.S., A.D. Stokes, C.L. Browdy & P.A. Sandifer. 1991. The relationship between feeding rate, paddlewheel aeration rate and expected dawn dissolved oxygen intensive shrimp pond. *Aquacult. Eng.* 10: 281-290.
- Islam, M.S., A. Milstein, M.A. Wahab, A.H.M. Kamal & S. Dewan. 2005. Production and economic return of shrimp aquaculture in coastal ponds of different sizes and with different management regimes. *Aquacult. Int.* 13: 489-500.
- Jiang, D., J. Rocha, D. Ciobanu, A. Mileham, & H. Van der Steen. 2004. Quantitative, molecular genetic selection for shrimp disease resistance. *Global Aquaculture Advocate* 55p.
- Karp, L., A. Sadeh & W.L. Griffin. 1986. Cycles in agricultural production: The case of aquaculture. *Amer. J. Agricult. Econ.* 68: 553-561,
- Kautsky, N., P. Ronnback, M. Tedengren & M. Troell. 2000. Ecosystem perspectives on management of disease in shrimp pond farming. *Aquaculture* 191: 145-161.
- Keys, S.J., P.J. Crocos & O.J. Cacho. 2004. Commercial grow-out performance and cost-benefit analysis for farm production of the brown tiger shrimp *Penaeus esculentus*. *Aquacult. Econ. Manage.* 8 (5-6): 295-308.

- Kongkeo, H. 1997. Comparison of intensive shrimp farming systems in Indonesia, Philippines, Taiwan and Thailand. *Aquacult. Res.* 28: 789-796.
- Le Moullac , G., C. Soyeux, D. Saulnier, D. Asquer, J.C. Avarre & P. Levy. 1998. Effect of hypoxic stress on the immune response and the resistance to vibriosis of the shrimp *Penaeus stylirostris*. *Fish Shellfish Immun.* 8: 621-629.
- Leung P. & O.F. El-Gayar. 1997. The role of modeling in the managing and planning of sustainable aquaculture. In: *Sustainable Aquaculture* (ed. by J. Bardach), pp 149-175. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Leung, P.S., L.T. Tran & A.W. Fast. 2000. A logistic regression of risk factors for disease occurrence on Asian shrimp farms. *Dis. Aquat. Org.* 41: 65-76.
- Liu, B., Z. Yu, X. Song, Y. Guan, X. Jian & J. He. 2006. The effect of acute salinity change on white spot syndrome (WSS) out breaks in *Fenneropenaeus chinensis*. *Aquaculture* 253: 163–170.
- Magallón, F. J. 2006. Desarrollo y aplicación de una metodología, para evaluar la variabilidad de la capacidad de carga de la acuicultura de camarón, en la región del Golfo de California. Tesis doctoral. Universidad de La Habana, Cuba. 207p.
- Magallón, F.J., R. Servín, G. Portillo, J. García & B. López. 2006a. Daily variation in short-term static toxicity of unionized ammonia in *Litopenaeus vannamei* (Boone) postlarvae *Aquacult. Res.* 37: 1406-1412.
- Magallón, F.J., R. Servín, G. Portillo & B. López. 2006b. *Litopenaeus vannamei* (Boone) post-larval survival related to age, temperature, pH and ammonium concentration. *Aquacult. Res.* 37: 492-499.
- Martínez-Cordova, L.R., H. Villarreal-Colmenares, M.A. Porchas-Cornejo, J. Naranjo-Paramo & A. Aragón-Noriega. 1997. Effect of aeration rate on growth, survival and yield of white shrimp *Penaeus vannamei* in low water exchange ponds. *Aquacult. Eng.* 16: 85-90.
- Martínez, J.A. & J.C. Seijo. 2001. Economics of risk and uncertainty of alternative water exchange and aeration rates in semi-intensive shrimp culture systems. *Aquacult. Econ. Manage.* 5 (3-4): 129-146.

- McGraw, W., D.R. Teichert-Coddington, D.B. Rouse & C.E. Boyd. 2001. Higher minimum dissolved oxygen concentrations increase penaeid shrimp yields in earthen ponds. *Aquaculture* 199: 311–321.
- Milstein, A., M.S. Islam, M.A. Wahab, A.H.M. Kamal & S. Dewan. 2005. Characterization of water quality in shrimp ponds of different sizes and with different management regimes using multivariate statistical analysis. *Aquacult. Int.* 13: 501-518.
- Mohankumar, K. & P. Ramasamy. 2006. White spot syndrome virus infection decreases the activity of antioxidant enzymes in *Fenneropenaeus indicus*. *Virus Res.* 115: 69-75.
- Moss, K.R.K. & S. Moss. 2004. Effects of artificial substrate and stocking density on the nursery production of Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*. *J. World Aquacult. Soc.* 35: 536-542.
- Mun, J. 2006. *Modelling Risk: Applying Monte Carlo Simulation, Real Options Analysis, Forecasting and Optimization Techniques*. John Wiley & Sons, New Jersey. 623 p.
- Naylor, T.H. 1982. *Experimentos de simulación en computadoras con modelos de sistemas económicos*. Limusa, México. 510p.
- Nazmul A.S.M., Y.B.P. Amararatne & M.J. Phillips. 2007. Economic returns of disease-affected extensive shrimp farming in southwest Bangladesh. *Aquacult. Int.* 15: 363-370.
- Overton, W.S. 1977. A strategy of model construction. In: Halland, Ch. A.S. & J.W. Day (Eds). *Ecosystem modelling in theory and practice: An introduction with case histories*. John Wiley & Sons, New York. 49-74.
- Pardy, R., W.L. Griffin M.A. Johns & A.L. Lawrence. 1983. A preliminary economic analysis of stocking strategies for penaeid shrimp culture. *J. World Mar. Soc.* 14: 49-63.
- Parkin, M. 2006. *Microeconomía*. 7a Ed. Pearson, México 584p.
- Peinado-Guevara, L.I. & M. López-Meyer. 2006. Detailed monitoring of white spot syndrome virus (WSSV) in shrimp commercial ponds in Sinaloa, Mexico by nested PCR. *Aquaculture* 251: 33-45.

- Pérez, F., F.A.M. Volckaert & J. Calderón. 2005. Pathogenicity of whitw spot síndrome virus on postlarvae and juveniles of *Penaeus* (*Litopenaeus*) *vannamei*. *Aquaculture* 250: 586-591
- Ponce-Palafox, J., C.A. Martínez-Palacios & L.G. Ross. 1997. The effect of salinity and temperature on the growth and survival rates of juvenile white shrimp *Penaeus vannamei* Boone 1931. *Aquaculture* 157: 107-115.
- Poole, R.W. 1974. An introduction to Quantitative Ecology. McGraw-Hill, New York. 532 p.
- Rahman, M.M., C.M. Escobedo-Bonilla, M. Corteel, J.J. Dantas-Lima, M. Wille, S. V. Alday, M.B. Pensaert, P. Sorgeloos & H.J. Nauwynck. 2006. Effect of high water temperature (33 °C) on the clinical and virological outcome of experimental infections with white spot syndrome virus (WSSV) in specific pathogen-free (SPF) *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture* 261: 842–849.
- Rameshthangam, P. & P. Ramasamy. 2006. Antioxidant and membrane bound enzymes activity in WSSV-infected *Penaeus monodon* Fabricius. *Aquaculture* 254: 32-39.
- Rencher, A.A. 2002. Method of Multivariate Analysis, 2nd Edn. John Wiley & Sons, New York. 738 p.
- Rodríguez, J., B. Bayot, Y. Amano, F. Panchana, I. de Blas, V. Alday, & J. Calderón. 2003. White spot syndrome virus infection in cultured *Penaeus vannamei* (Boone) in Ecuador with emphasis on histopathology and ultrastructure. *J. Fish Diseases* 26: 439–450.
- Rosas, C., E. Martínez, G. Gaxiola, R. Brito, E. Díaz-Iglesia & L.A. Soto. 1998. Effect of dissolved oxygen on the energy balance and survival of *Penaeus setiferus* juveniles. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 174: 67-75,
- Sadeh, A., W. Griffin, M. Johns & A. Lawrence. 1983. A preliminary analysis of policulture in shrimp ponds. In: Proceedings of the 1st International conference on warm water aquaculture crustacean: 50-67.
- Sadeh, A., C.R. Pardy, W. Griffin & A.L. Lawrence. 1986. Uncertainty consideration resulting from temperature variation on growth of *penaeus stylirostris* in ponds. *Texas J. Sci.* 38 (2): 159-172.

- Sánchez-Zazueta, E. & F.J. Martínez-Cordero. 2009. Economic risk assessment of a semi-intensive shrimp farm in Sinaloa, Mexico. *Aquacult. Econ. Manage.* 13: 312-327.
- Sandifer, P.A., A.D. Stokes, J.S. Hopkins & R.A. Smiley. 1991. Further intensification of pond shrimp culture in South Carolina. In: Sandifer, P.A. (Ed), *Shrimp Culture in North America and the Caribbean*, World Aquaculture Society, Baton Rouge, LA: 84-95.
- Seidman E.R. & A.L. Lawrence. 1985. Growth, feed digestibility, and proximate body composition of juvenile *Penaeus vannamei* and *Penaeus monodon* grown at different dissolved oxygen levels. *J. World Aquacult. Soc.* 16: 333-346.
- Seijo, J.C. 2004. Risk of exceeding bioeconomic limit reference points in shrimp aquaculture systems. *Aquacult. Econ. Manage.* 8 (3-4): 201-212.
- Soto, M.A. & J.M. Lotz. 2001. Epidemiological parameters of white spot syndrome virus infections in *Litopenaeus vannamei* and *L. setiferus*. *J. Invertebr. Patol.* 78: 9-15.
- Tian, X., P.S. Leung & D.J. Lee. 2000. Size economies and optimal scheduling in shrimp production: results from a computer simulation model. *Aquacult. Eng.* 22: 289-307.
- Valderrama, D. & C.R. Engle. 2002. Economic optimization of shrimp farming in Honduras. *J. World Aquacult. Soc.* 33(4): 398-409.
- Van Gigch J.P. 1987. *Applied general system theory*. Harper and Row Publishers, NJ, 547p.
- Vidal, O.M., C.B. Granja & F. Aranguren. 2001. A profound effect of hyperthermia on survival of *Litopenaeus vannamei* juveniles infected with white spot syndrome virus. *J. World Aquacult. Soc.* 32: 364-372.
- Vose D. 2001. *Risk Analysis. A Quantitative Guide*. 2nd Ed., John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, West Sussex. 752 p.
- Wyban, J.A. C.S. Lee, V.T. Sato, J.N. Sweeney & W.K. Richards. 1987. Effect of stocking density on shrimp growth rates in manure-fertilized ponds. *Aquaculture* 61: 23-32.

- Yu, Z. & Y. Guan. 2003. Effect of salinity on the immune responses and outbreak of white spot syndrome in the shrimp *Marsupenaeus japonicus*. *Ophelia* 57: 99–106.
- Yu, R. & P.S. Leung. 2005. Optimal harvesting strategies for a multi-cycle and multi-pond shrimp operation: a practical network model. *Math. Comp. Sim.* 68: 339-354.
- Yu, R., Leung, P. & P. Bienfang. 2006. Optimal production schedule in commercial shrimp culture. *Aquaculture* 254, 426–441.
- Zar, J.H. 2010. *Biostatistical Analysis*, 5th Ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey. 960p.

ANEXO 1

Propuesta de modificación del modelo de crecimiento de
Hernández-Llamas y Ratkowsky (2004)

La ecuación (2) se presenta en esta investigación como una modificación al modelo de crecimiento en peso propuesto por Hernández-Llamas & Ratkowsky (2004) cuya expresión matemática es:

$$w_t = w_i + (w_f - w_i) \left(\frac{1 - k^{m-1}}{1 - k^{n-1}} \right)^3 \quad (1a)$$

donde w_f , w_i y k son parámetros descritos anteriormente, n es el número de datos y m es una estandarización del tiempo, para experimentos o muestreos en los que los intervalos de tiempo son diferentes, de acuerdo con:

$$m = 1 + (n - 1) \left(\frac{t - t_i}{t_f - t_i} \right) \quad (2a)$$

donde t es el tiempo, y t_f y t_i son el tiempo final y el tiempo inicial, respectivamente.

Aquí se propuso una simplificación al modelo de Hernández-Llamas & Ratkowsky (2004), para los casos en que los intervalos de tiempo sean iguales, el tiempo inicial sea igual a cero y se tenga un solo dato de crecimiento para cada tiempo, como frecuentemente sucede con especies acuícolas.

En dichos casos se tiene que $t_i=0$ y $t_f = n-1$. Sustituyendo t_i por cero y $n-1$ por t_f , la ecuación 2a queda:

$$m = 1 + (t_f) \left(\frac{t}{t_f} \right) \quad (3a)$$

donde eliminando t_f , y despejando t , queda:

$$t = m - 1$$

Sustituyendo esta igualdad y $n-1$ por t_f , la ecuación 1a queda:

$$w_t = w_i + (w_f - w_i) \left(\frac{1 - k^t}{1 - k^{t_f}} \right)^3 \quad (4a)$$

Además, para el caso de los acuicultivos, el tiempo final t_f corresponde a la duración del cultivo (c), por lo que una simplificación adicional consiste en sustituir t_f en la expresión anterior e incorporar la duración del cultivo, quedando:

$$w_t = w_i + (w_f - w_i) \left(\frac{1 - k^t}{1 - k^c} \right)^3$$

ANEXO 2

Distribución de frecuencias estacionales de la
producción

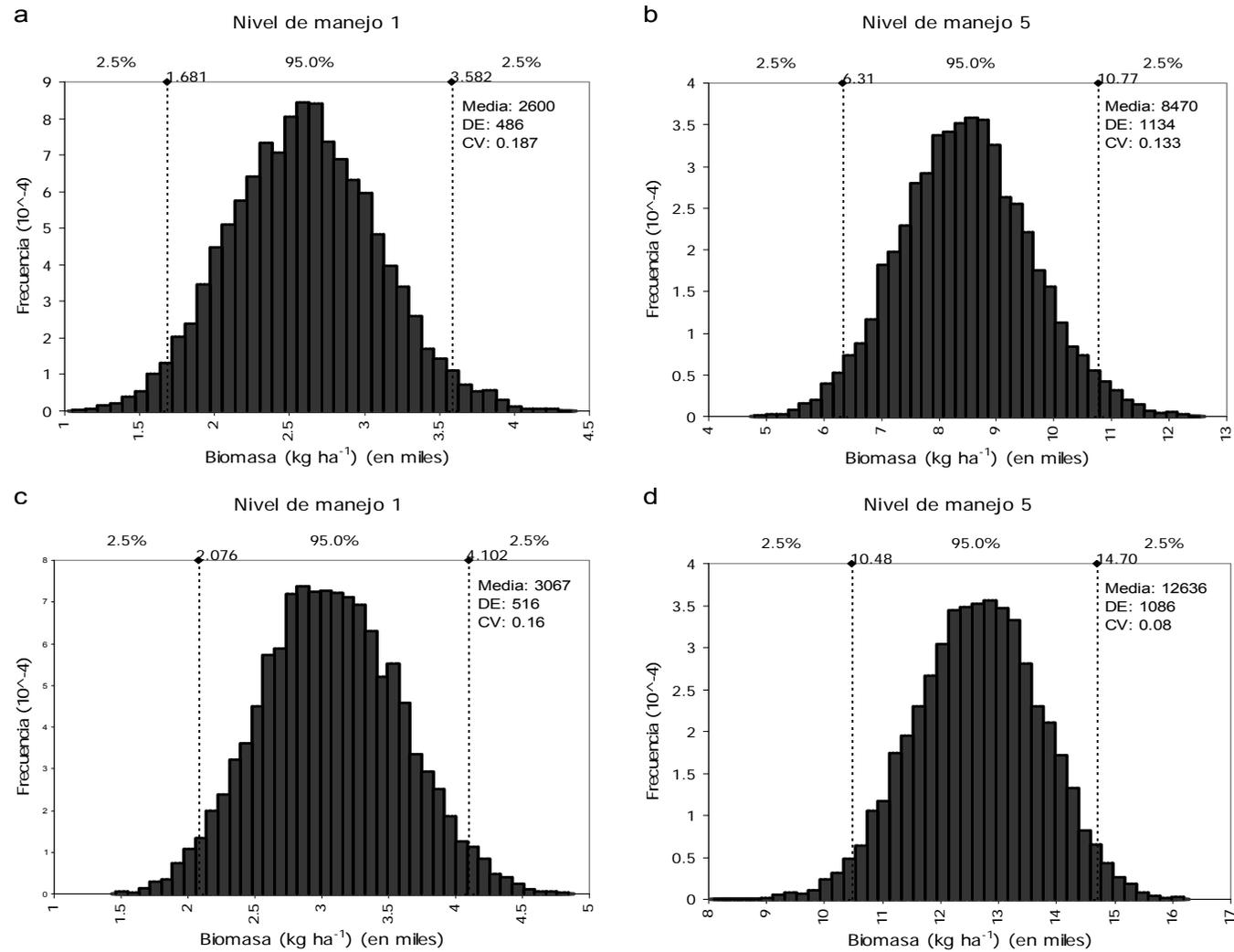


Figura 1. Distribuciones de frecuencia de la biomasa para el ciclo de invierno (a y b) y verano (c y d) cuando la granja operó normalmente, bajo condiciones de manejo menos favorables (a y c) y más favorables (b y d).

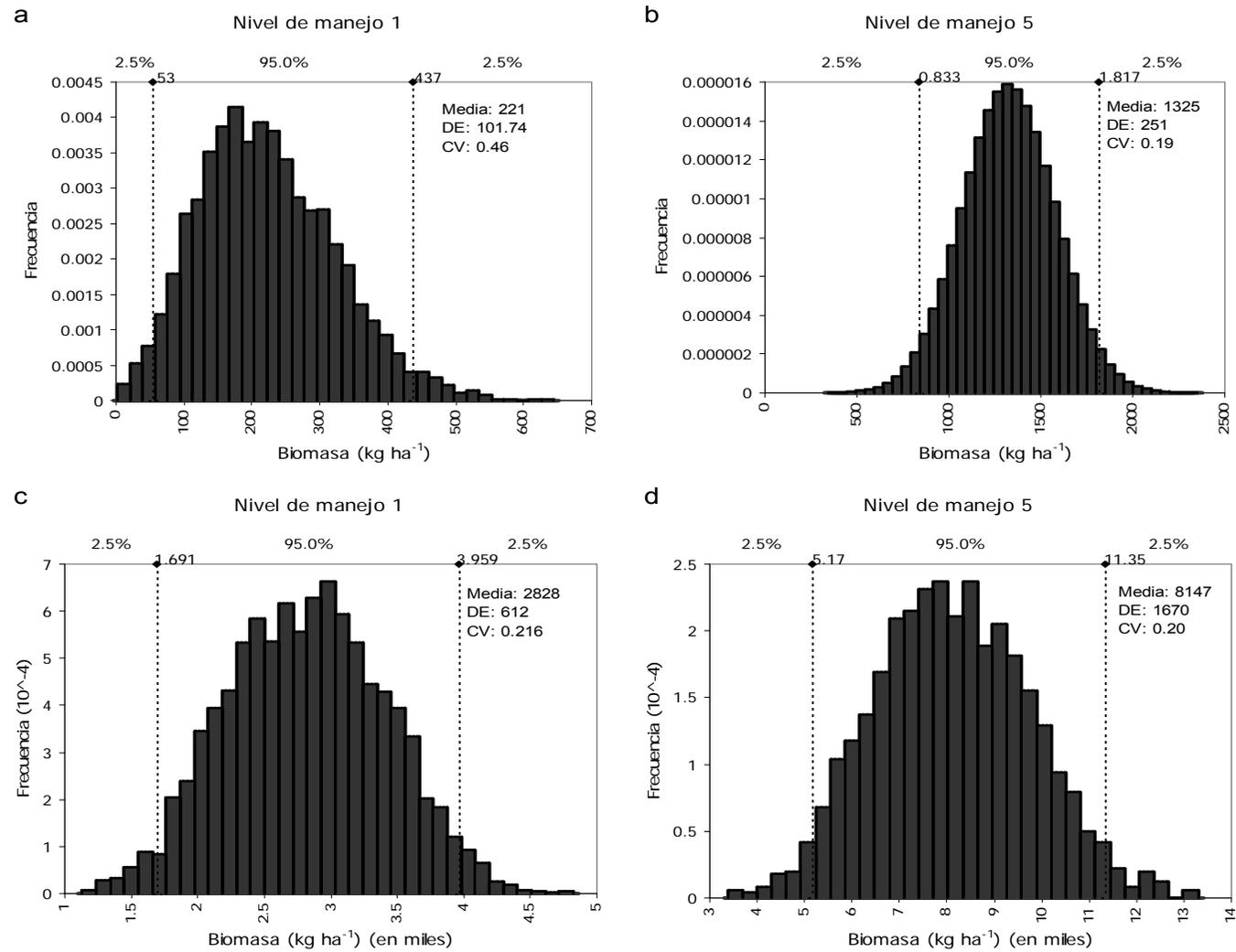


Figura 2. Distribuciones de frecuencia de la biomasa para el ciclo de invierno (a y b) y verano (c y d) cuando es afectada por la enfermedad, bajo condiciones de manejo menos favorables (a y c) y más favorables (b y d).

ANEXO 3

Distribución de frecuencias estacionales de la
utilidad

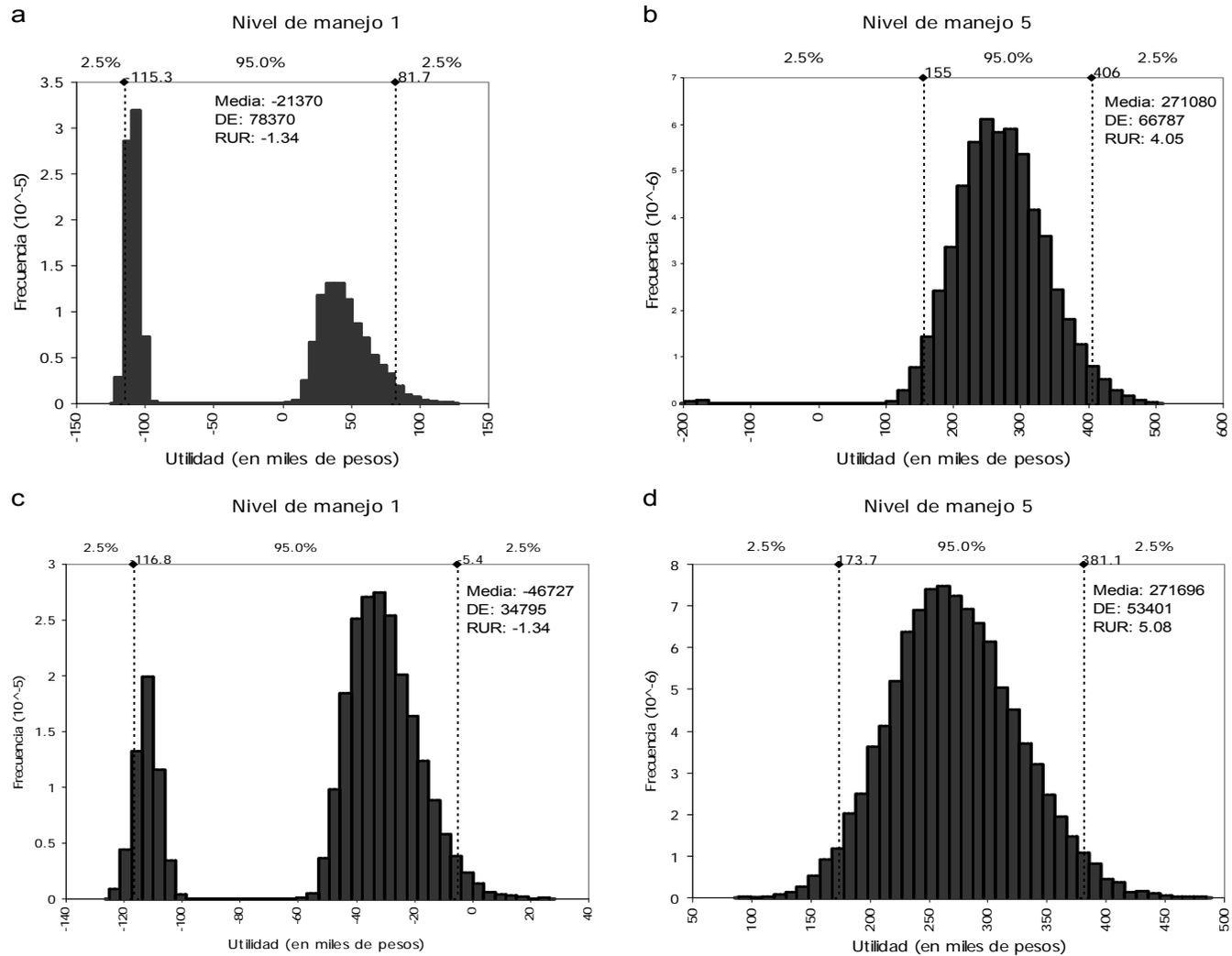


Figura 1. Distribuciones de frecuencia de pérdidas y utilidades para el ciclo de invierno (a y b) y verano (c y d) cuando la granja operó normalmente, bajo condiciones de manejo menos favorables (a y c) y más favorables (b y d).

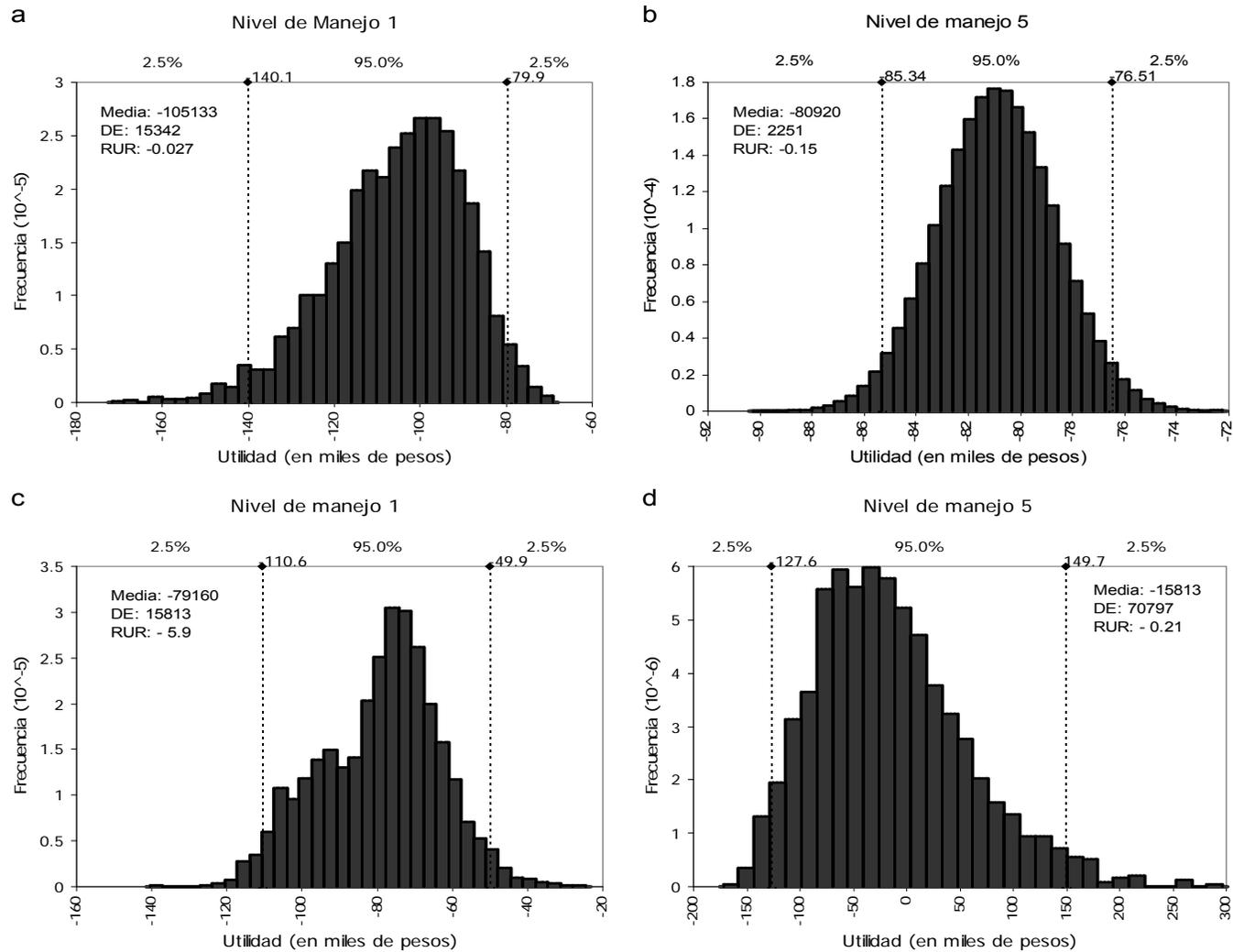


Figura 2. Distribuciones de frecuencia de pérdidas y utilidades para el ciclo de invierno (a y b) y verano (c y d) cuando es afectada por la enfermedad, bajo condiciones de manejo menos favorables (a y c) y más favorables (b y d).

ANEXO 4

Distribución de frecuencias estacionales de la
relación beneficio-costos.

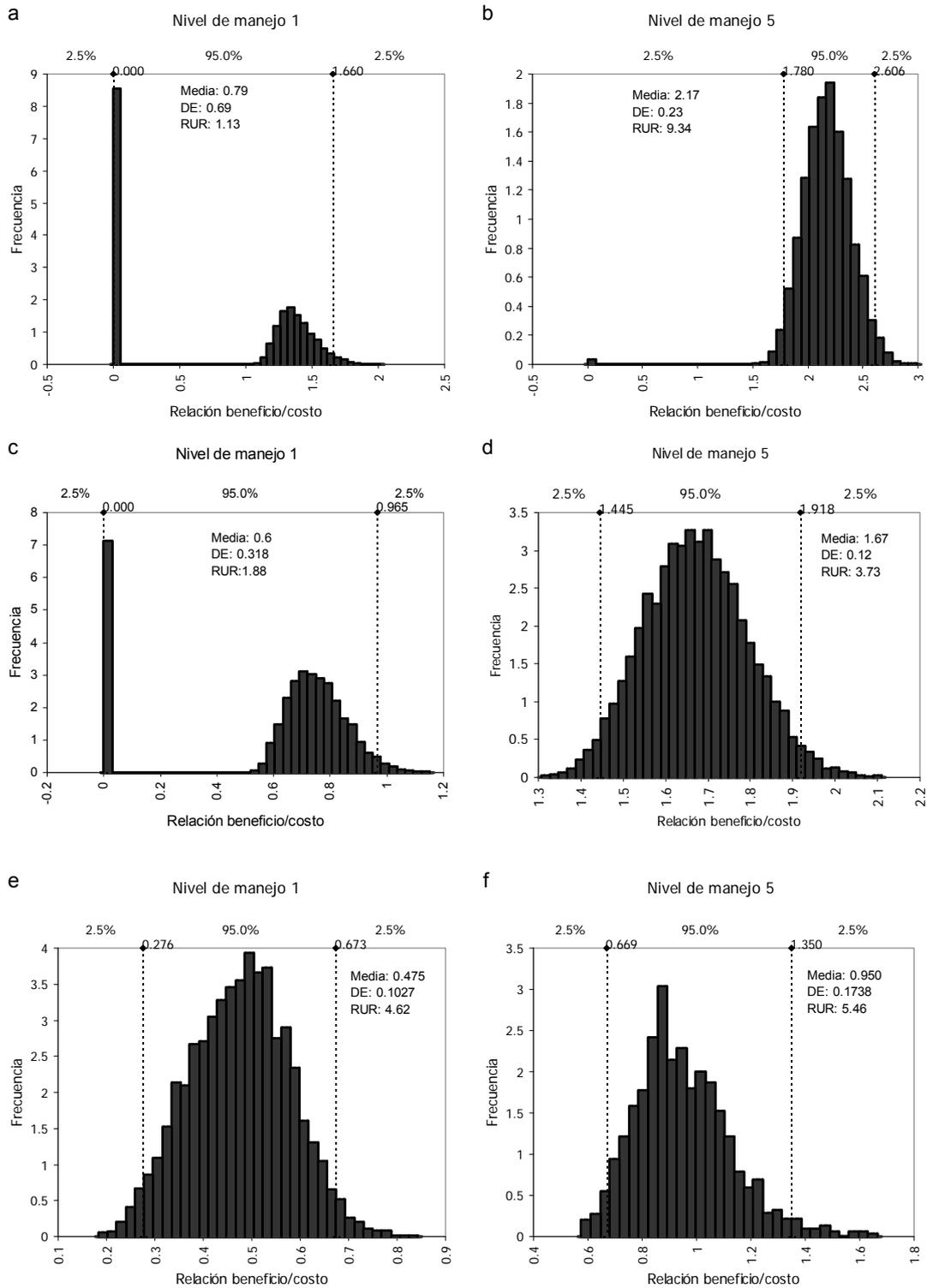


Figura 1. Distribuciones de frecuencia de la relación beneficio-costo para el ciclo de invierno (a y b) y verano (c y d) cuando la granja operó normalmente, y para el verano (e y f) cuando se vio afectada por la enfermedad. Se presentan condiciones de manejo menos favorables (a, c y e) y más favorables (b, d y f).

ANEXO 5

Distribución de frecuencias de la producción anual

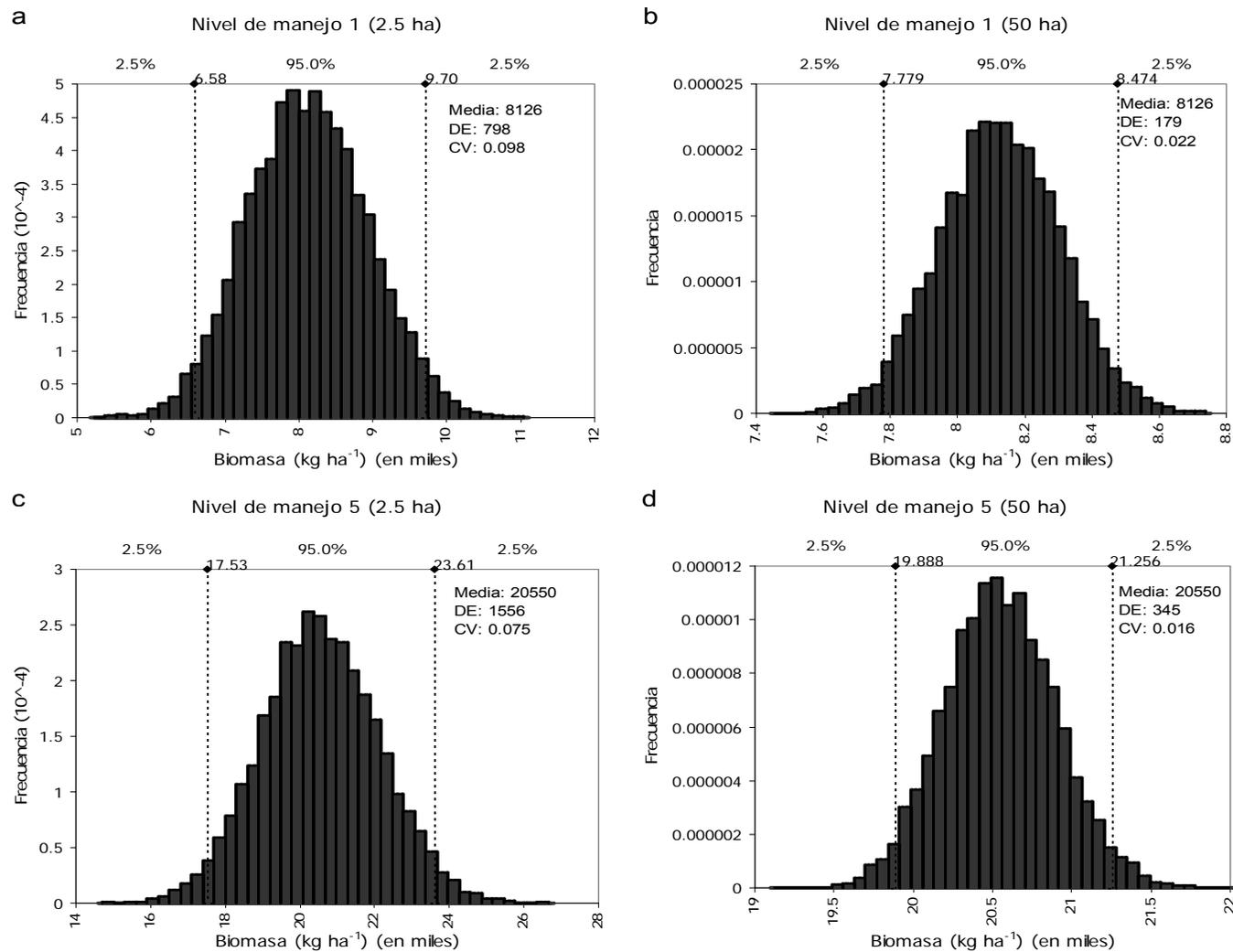


Figura 1. Distribuciones de frecuencia de la producción anual para una granja de 2.5 ha (a y c) y 50 ha (b y d) cuando la granja operó normalmente. Se presentan las peores (a y b) y mejores condiciones (c y d) de manejo.

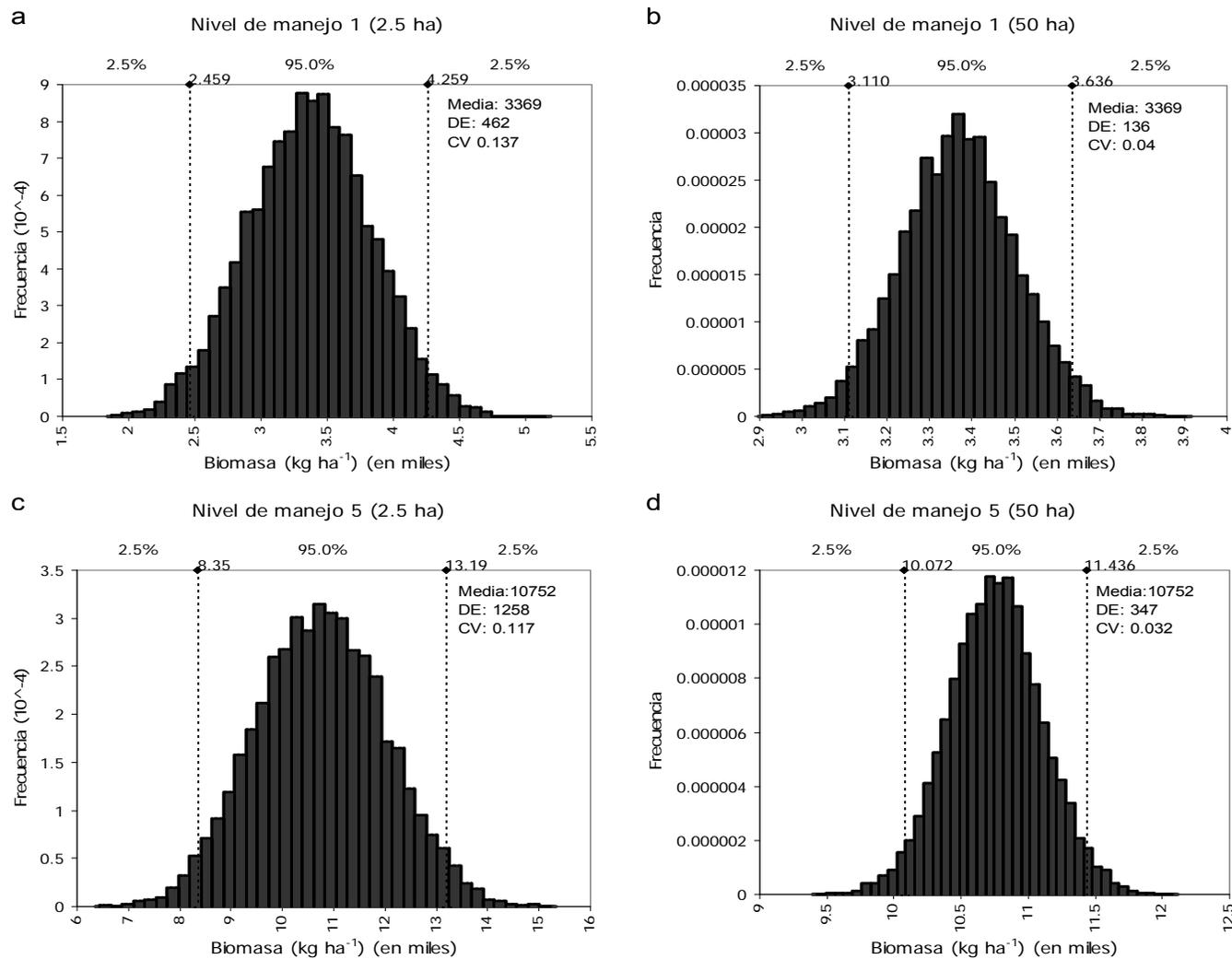


Figura 2. Distribuciones de frecuencia de la producción anual para una granja de 2.5 ha (a y c) y 50 ha (b y d) cuando la granja se vio afectada por la enfermedad en ambas estaciones. Se presentan las peores (a y b) y mejores condiciones (c y d) de manejo.

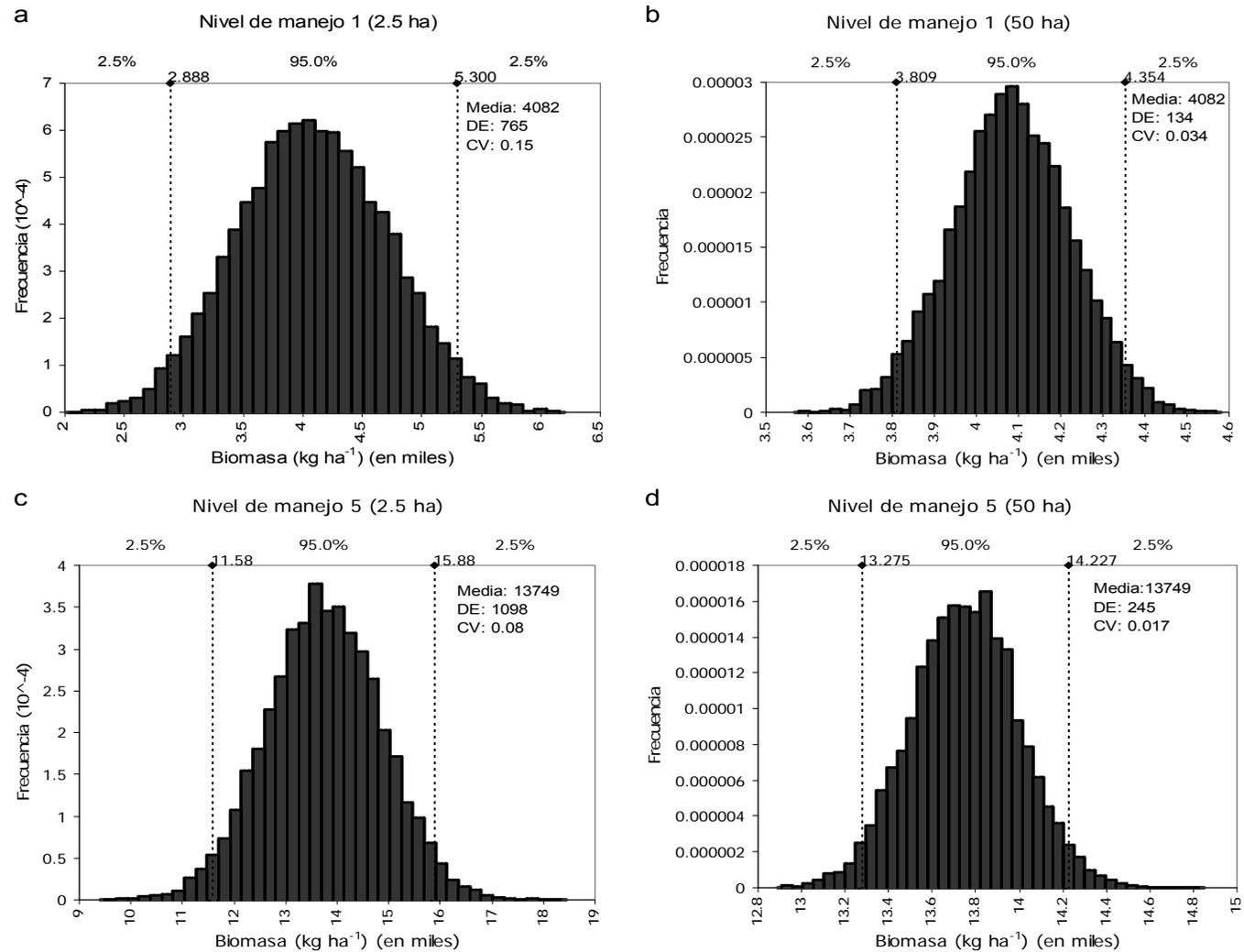


Figura 3. Distribuciones de frecuencia de la producción anual para una granja de 2.5 ha (a y c) y 50 ha (b y d) cuando la granja se vio afectada por la enfermedad en el ciclo de invierno. Se presentan las peores (a y b) y mejores condiciones (c y d) de manejo.

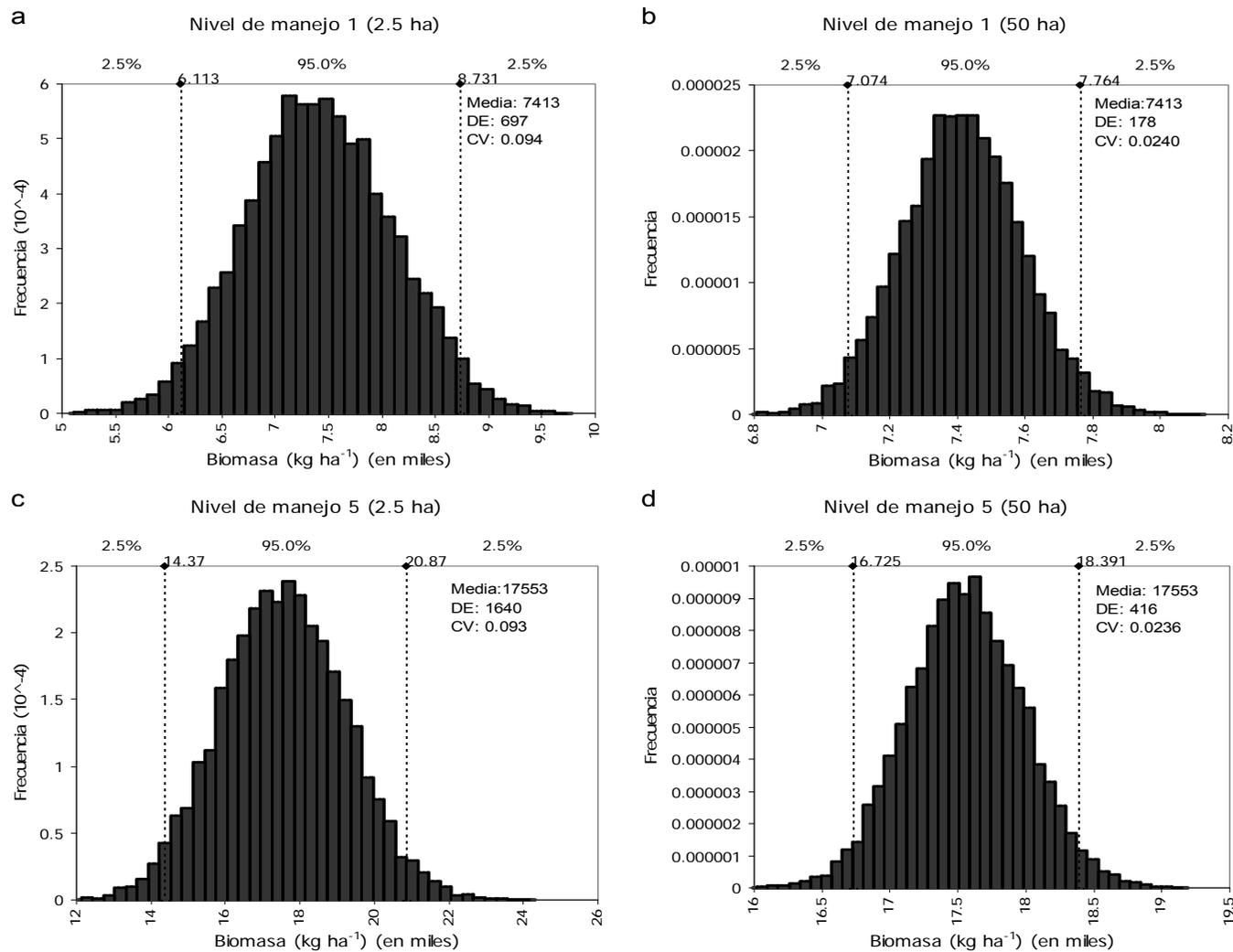


Figura 4. Distribuciones de frecuencia de la producción anual para una granja de 2.5 ha (a y c) y 50 ha (b y d) cuando la granja se vio afectada por la enfermedad en el ciclo de verano. Se presentan las peores (a y b) y mejores condiciones (c y d) de manejo.

ANEXO 6

Distribución de frecuencias de la utilidad anual

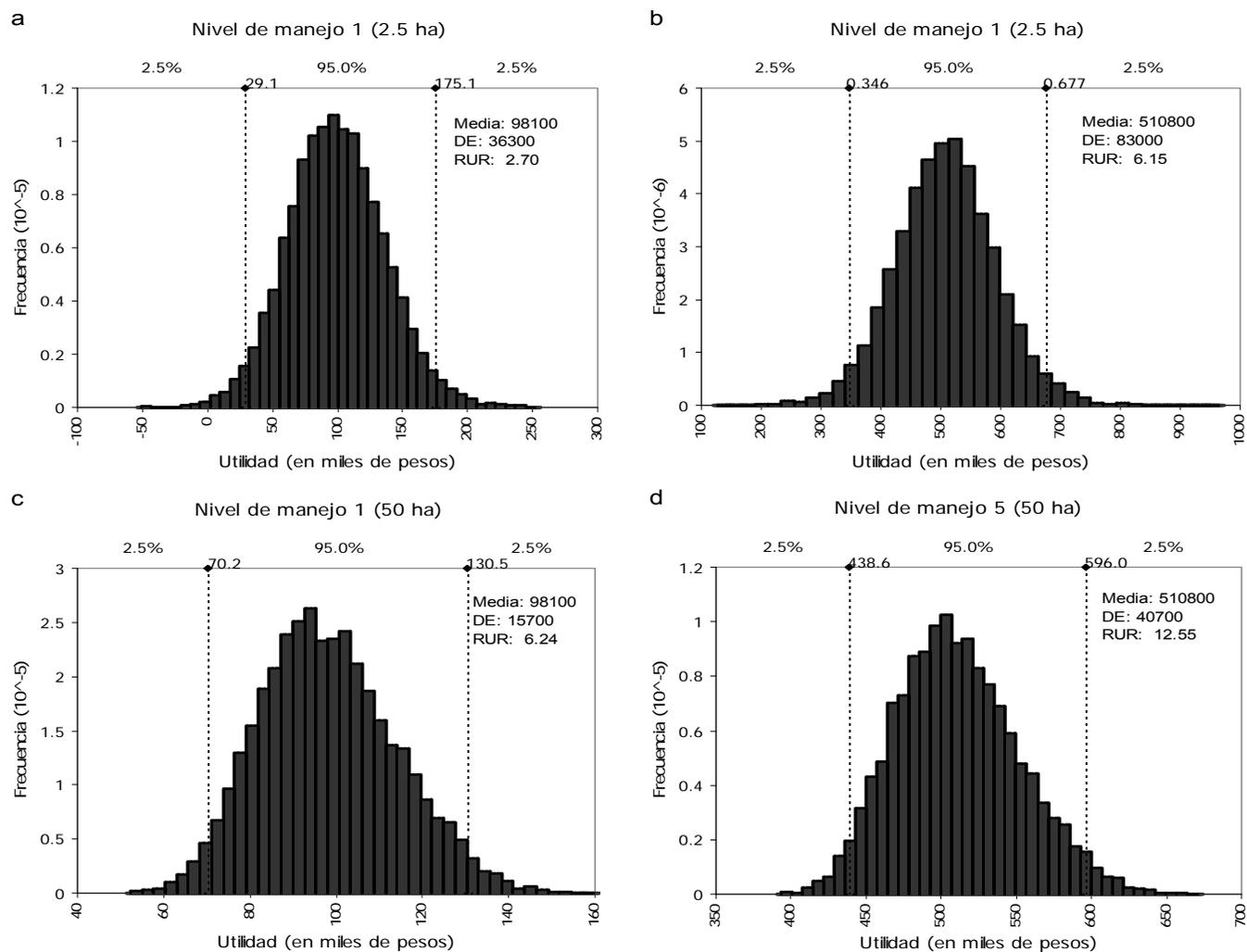


Figura 1. Distribuciones de frecuencia de la utilidad anual para una granja de 2.5 ha (a y b) y 50 ha (c y d) cuando la granja operó normalmente. Se presentan las peores (a y c) y mejores condiciones (b y d) de manejo.

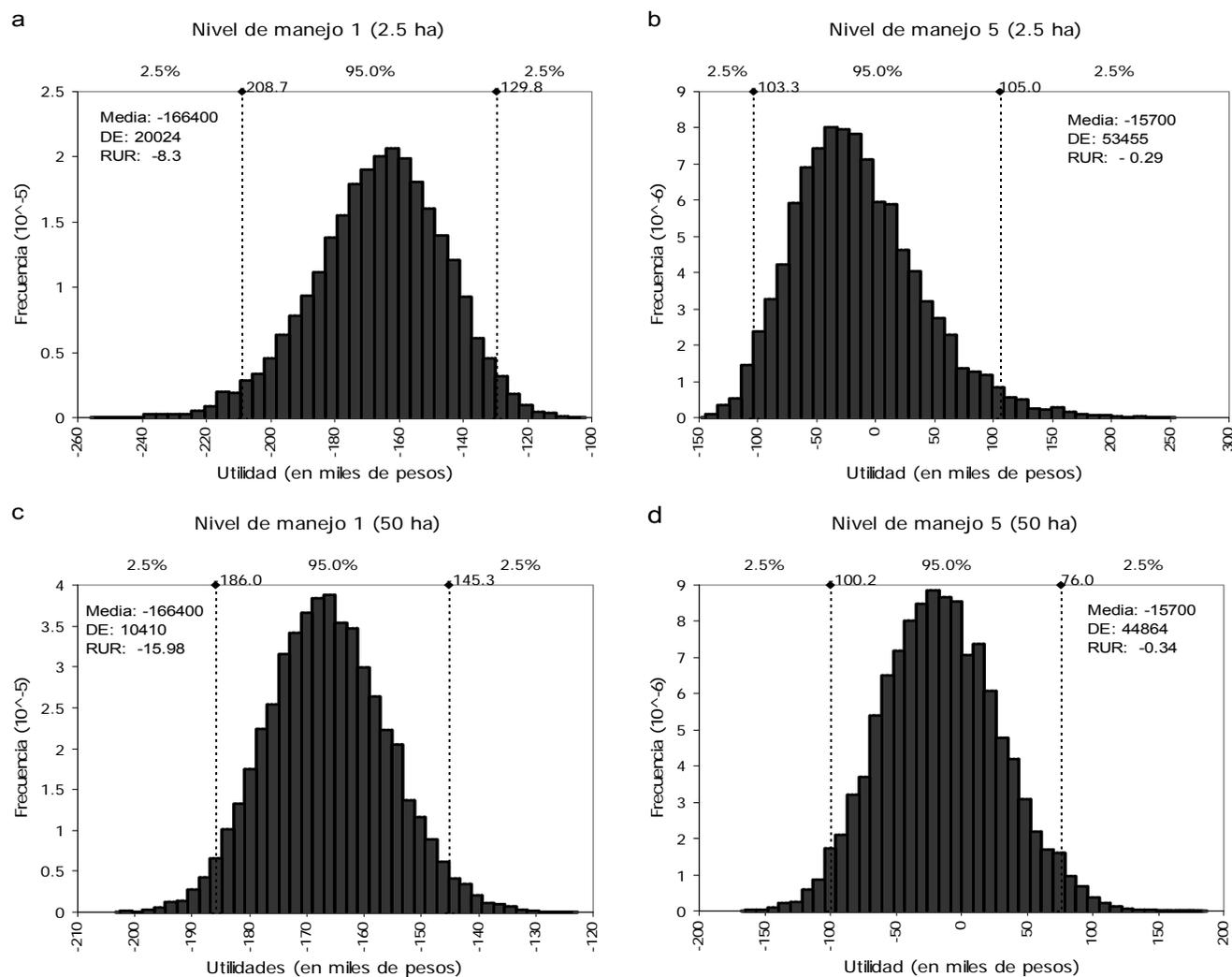


Figura 2. Distribuciones de frecuencia de la utilidad anual para una granja de 2.5 ha (a y b) y 50 ha (c y d) cuando la granja se vio afectada por la enfermedad en ambas estaciones. Se presentan las peores (a y c) y mejores condiciones (b y d) de manejo.

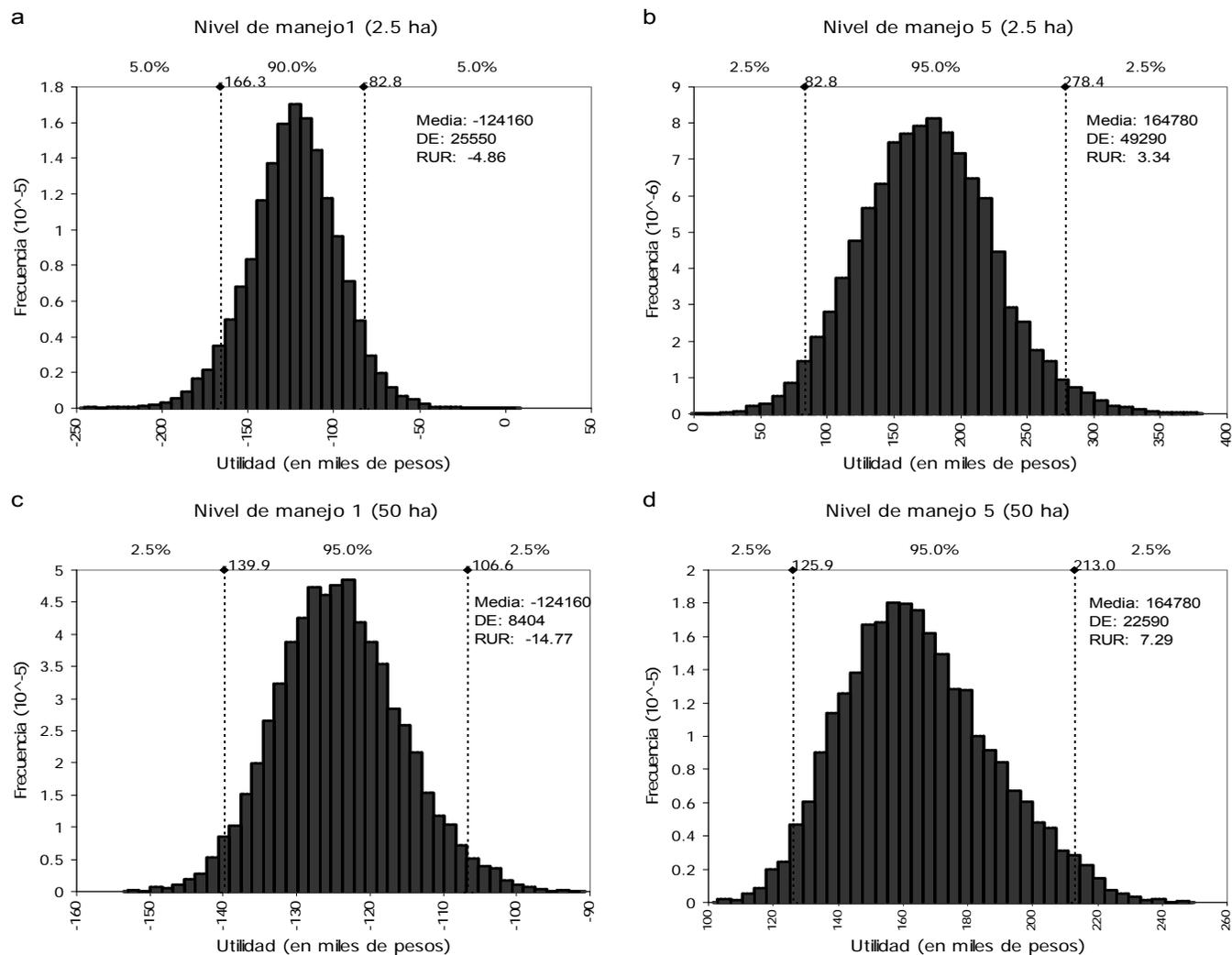


Figura 3. Distribuciones de frecuencia de la utilidad anual para una granja de 2.5 ha (a y b) y 50 ha (c y d) cuando la granja se vio afectada por la enfermedad en el ciclo de invierno. Se presentan las peores (a y c) y mejores condiciones (b y d) de manejo.

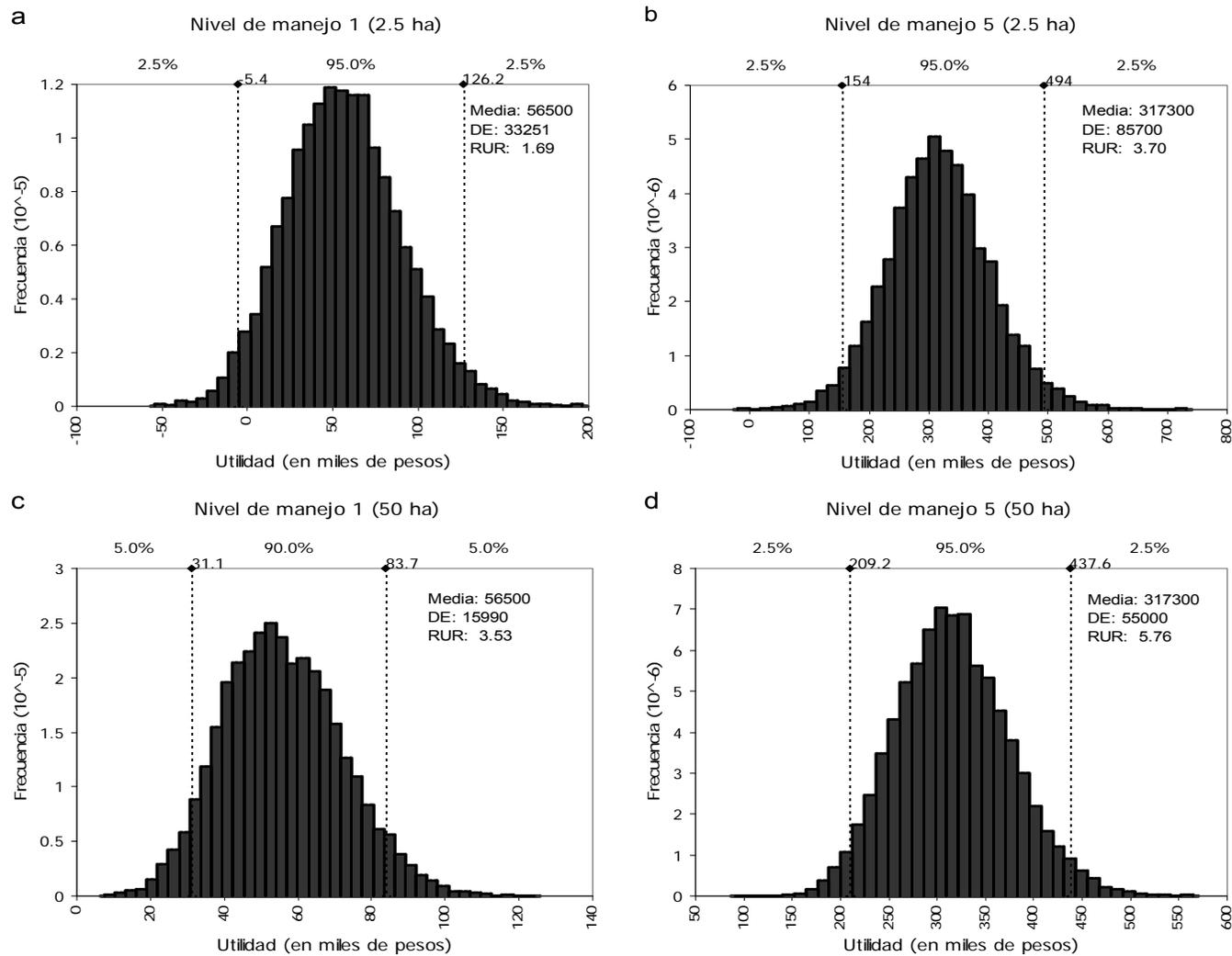


Figura 4. Distribuciones de frecuencia de la utilidad anual para una granja de 2.5 ha (a y b) y 50 ha (c y d) cuando la granja se vio afectada por la enfermedad en el ciclo de verano. Se presentan las peores (a y c) y mejores condiciones (b y d) de manejo.

ANEXO 7

Distribución de probabilidades de la relación
beneficio-costos anual

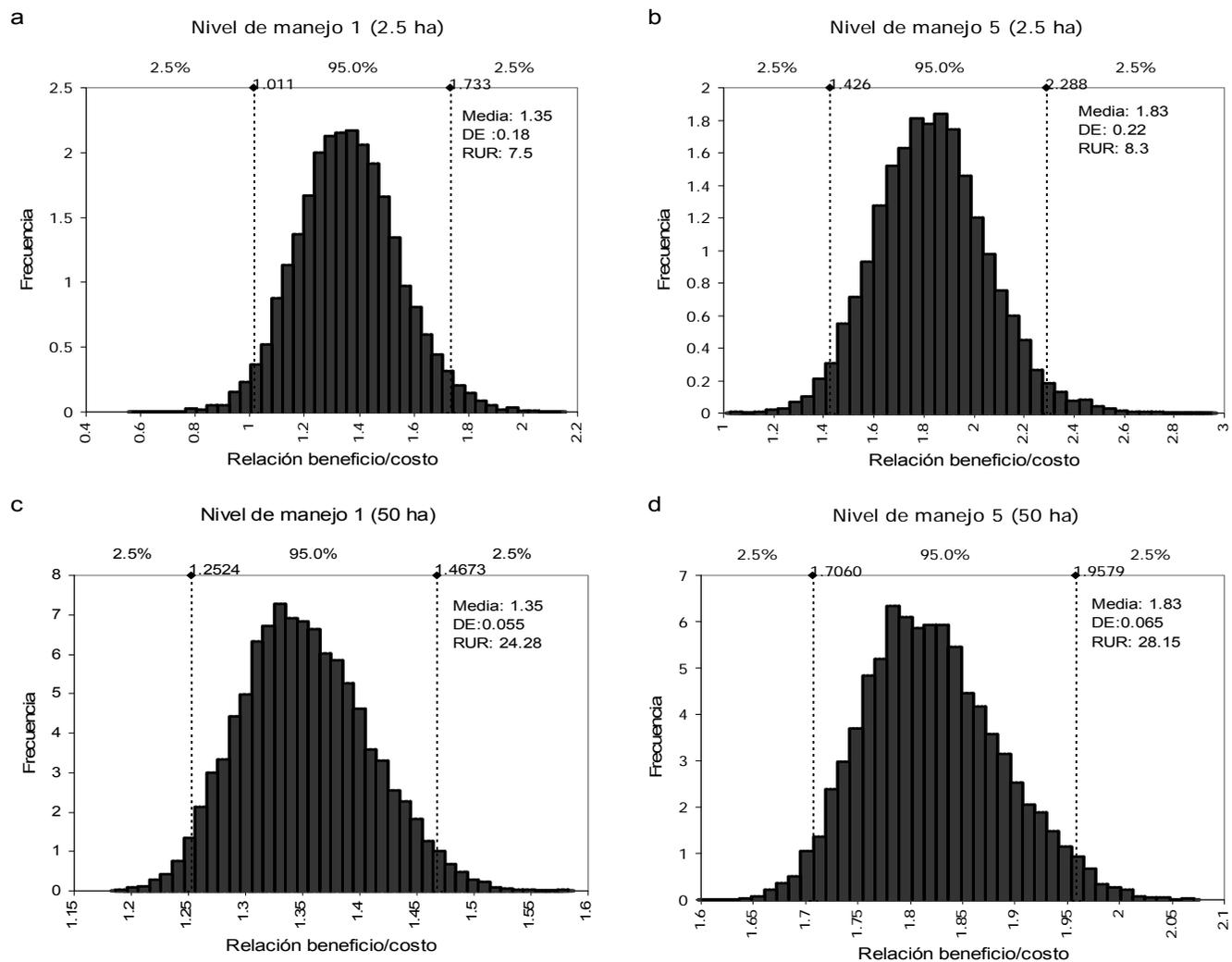


Figura 1. Distribuciones de frecuencia de la relación beneficio-costo anual para una granja de 2.5 ha (a y b) y 50 ha (c y d) cuando la granja operó normalmente. Se presentan las peores (a y c) y mejores condiciones (b y d) de manejo.

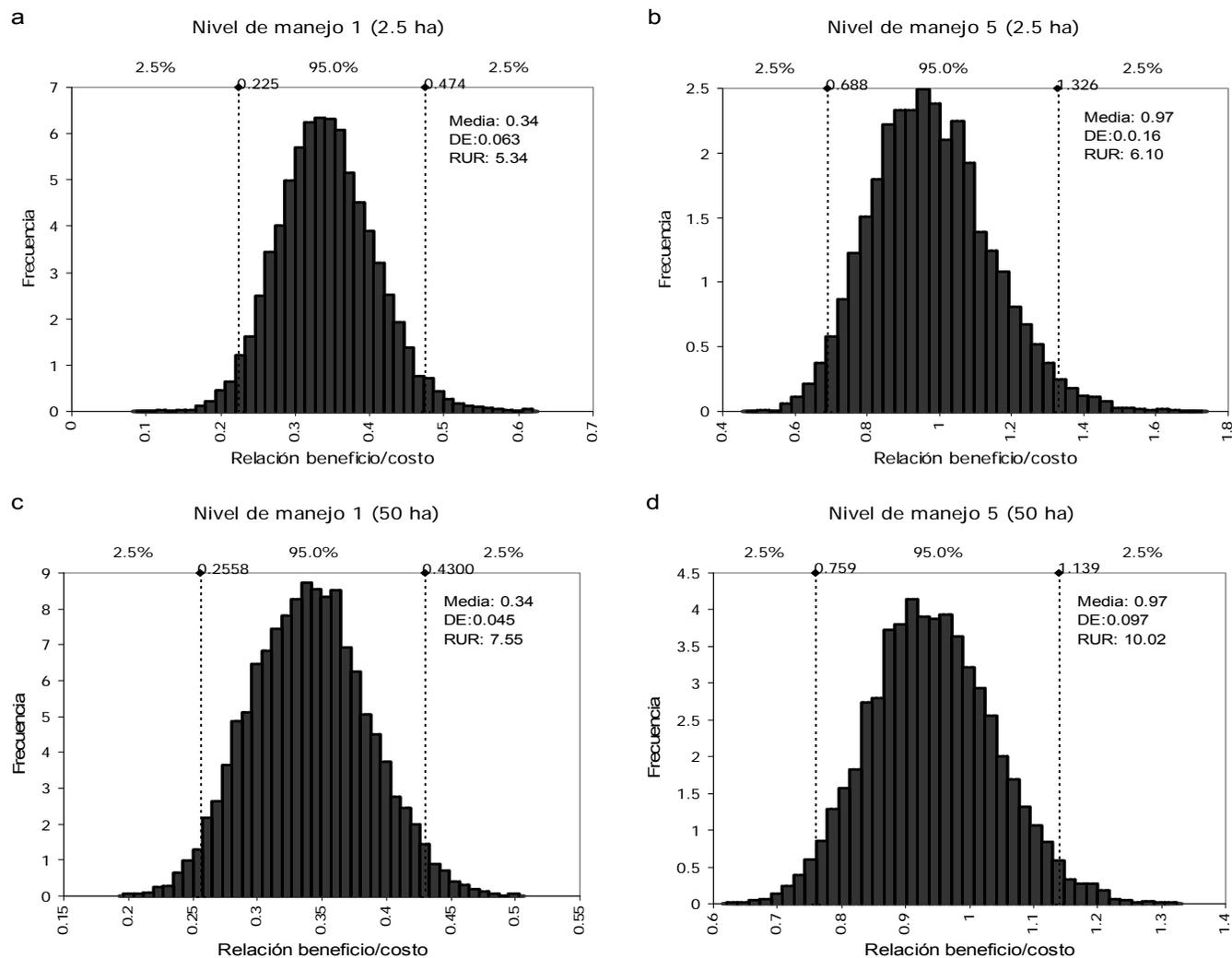


Figura 2. Distribuciones de frecuencia de la relación beneficio-costeo anual para una granja de 2.5 ha (a y b) y 50 ha (c y d) cuando la enfermedad afectó a ambos ciclos de producción. Se presentan las peores (a y c) y mejores condiciones (b y d) de manejo.

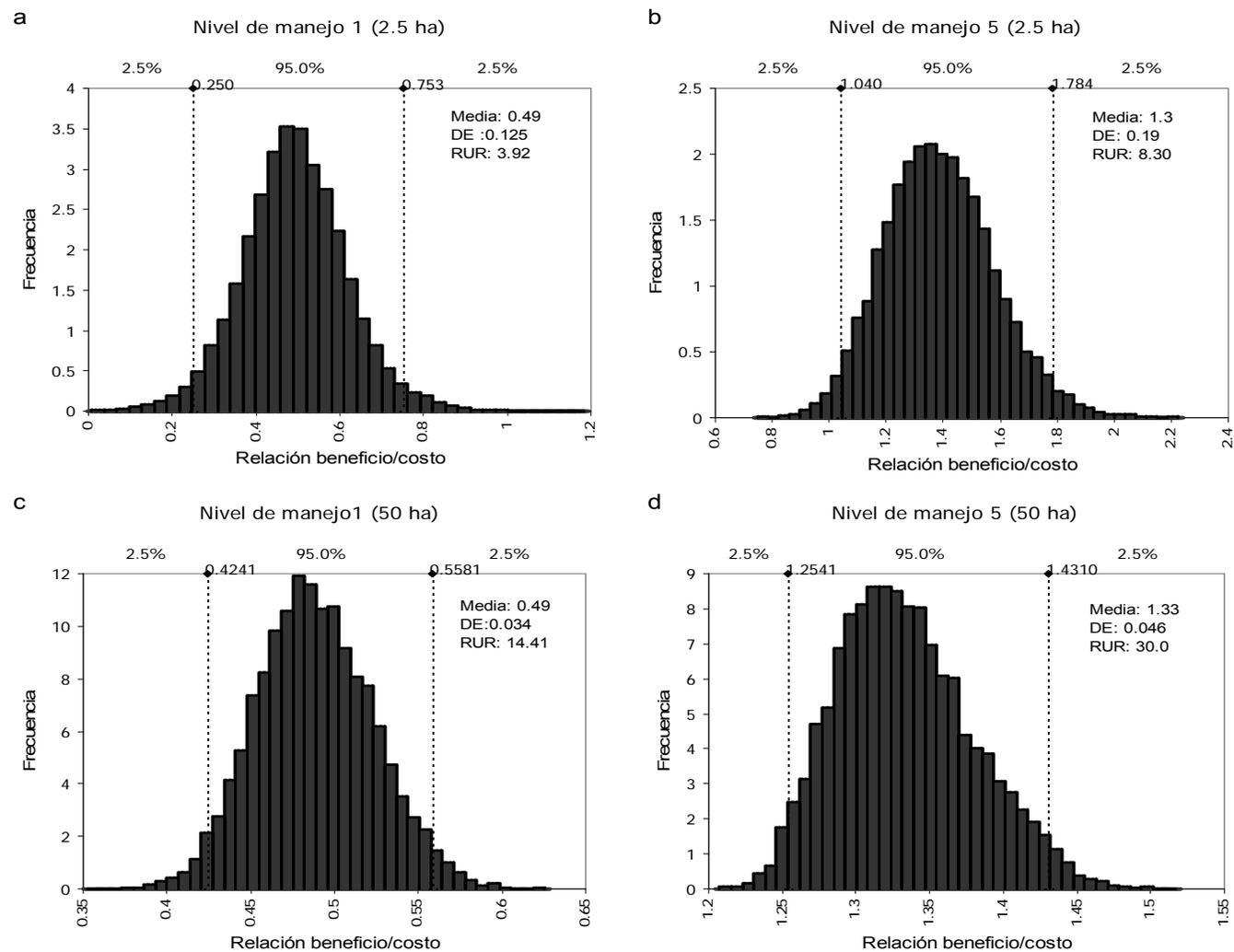


Figura 3. Distribuciones de frecuencia de la relación beneficio-costo anual para una granja de 2.5 ha (a y b) y 50 ha (c y d) cuando la enfermedad afectó al ciclo de producción de invierno. Se presentan las peores (a y c) y mejores condiciones (b y d) de manejo.

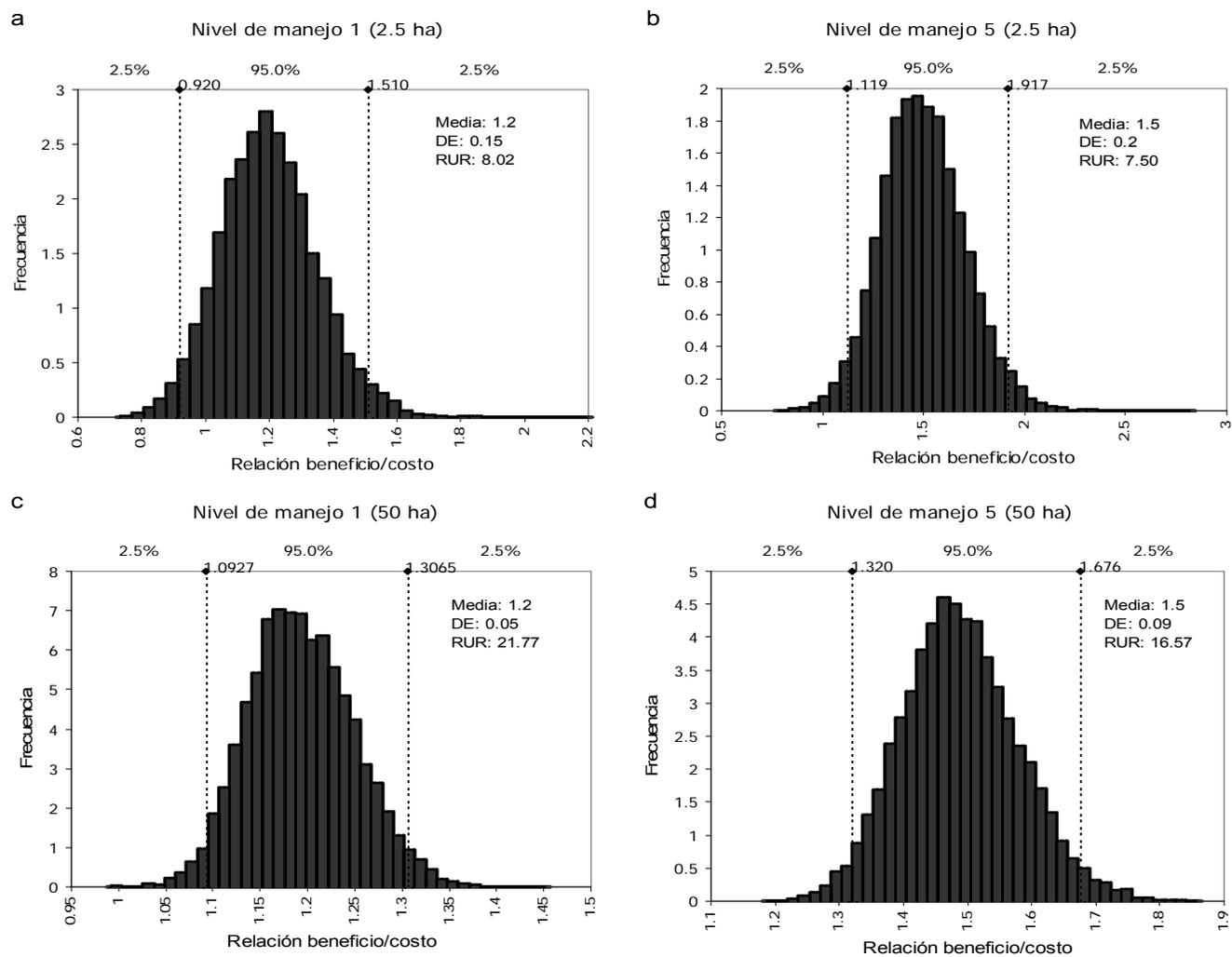


Figura 4 Distribuciones de frecuencia de la relación beneficio-costo anual para una granja de 2.5 ha (a y b) y 50 ha (c y d) cuando la enfermedad afectó al ciclo de producción de verano. Se presentan las peores (a y c) y mejores condiciones (b y d) de manejo de acuerdo.

ANEXO 8

Publicaciones derivadas de la tesis doctoral



Dynamics of intensive production of shrimp *Litopenaeus vannamei* affected by white spot disease

Javier M.J. Ruiz-Velazco^{a,b}, Alfredo Hernández-Llamas^{c,*}, Víctor M. Gomez-Muñoz^d, Francisco J. Magallon^c

^a Departamento de Desarrollo de Tecnologías, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas del IPN, Av. Instituto Politécnico Nacional s/n, Col. Playa Palo de Santa Rita, La Paz, B.C.S. 23096, Mexico

^b Dirección de Fortalecimiento de la Investigación, Universidad Autónoma de Nayarit, Cd. de La Cultura Amado Nervo s/n Tepic, Nayarit 63255, Mexico

^c Programa de Acuicultura, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), Mar Bermejo 195, Col. Playa Palo de Sta. Rita, La Paz, B.C.S. 23096, Mexico

^d Departamento de Pesquerías y Biología Marina, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas del IPN, Av. Instituto Politécnico Nacional s/n, Col. Playa Palo de Santa Rita, La Paz, B.C.S. 23096, Mexico

ARTICLE INFO

Article history:

Received 10 May 2009

Received in revised form 22 December 2009

Accepted 22 December 2009

Keywords:

Production dynamics

Litopenaeus vannamei

White spot disease (WSSV)

ABSTRACT

A dynamic stock model was used to predict biomass of shrimp *Litopenaeus vannamei* when affected by white spot disease. A database prepared from records of intensive commercial farms in Mexico was used for estimating model parameters for summer and winter production cycles. Parameters were analyzed in relation to stocking density, pond size, and mean values of water quality variables measured during the cycles. Significant results from correlation analysis indicated that final weight of shrimp was positively correlated with mean pond water temperature and dissolved oxygen, but inversely correlated with salinity. When temperature and oxygen increased or salinity decreased, mortality from the disease diminished. Early mortality occurred when water temperature increased, oxygen decreased, or large ponds were used. Stocking density did not affect production parameters. Simple linear regression showed that differences in management of aeration affected oxygen levels. Oxygen concentration and aeration were important factors determining the magnitude of mortality from disease and the time when it occurred. Diminished mortality occurred later in the culture period with higher aeration or early start of aeration. Multiple regression analysis was used to predict model parameters as a function of water quality and management variables. Simple regression analysis and an equivalence test indicated that biomass at harvest was adequately predicted by the stock model and multiple regression coefficients. Predicting shrimp production indicated that raising aeration from 9000 to 14000 horsepower per hour per hectare (Hp h ha^{-1}) increased biomass at harvest from 6610 to 8750 kg ha^{-1} (32%). On the other hand, starting aeration at the beginning of the culture cycle resulted in 8360 kg ha^{-1} , while starting after 5 weeks yielded 6840 kg ha^{-1} representing a reduction of 18%. Management of aeration in small ponds is recommended as an approach to reducing mortality from white spot disease.

© 2010 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Shrimp farming is the most important aquaculture activity in Mexico. According to CONAPESCA (2007), production during 2007 reached 112 000 tons, representing 60% of the total aquaculture production.

The white spot syndrome virus (WSSV) is the most lethal pathogen of cultured shrimp (Rahman et al., 2006). This has led to investigations from different perspectives. Changes in water quality and their dependence on climatic factors have been studied as stressors increasing shrimp susceptibility to the disease in *Litopenaeus vannamei* (Peinado-Guevara and López-Meyer, 2006).

The effect of salinity on the immune response and outbreaks of white spot disease in *Marsupenaeus japonicus* were studied by Yu and Guan (2003). Liu et al. (2006) studied the effect of acute change in salinity on the white spot syndrome in *Fenneropenaeus chinensis*. Vidal et al. (2001) and Rahman et al. (2006) studied the effects of hyperthermia on the incidence of WSSV in juvenile *L. vannamei*. Other researchers investigated the relationship between immune response and low dissolved oxygen (Le Moullac et al., 1998) and alkalosis and ammonia toxicity (Kautsky et al., 2000; Chen and Chen, 2000; Cheng and Chen, 2002; Magallon et al., 2006a,b).

An epidemiological study used logistic regression analysis to analyze the presence or absence of shrimp diseases as a categorical dependent variable (Leung et al., 2000). Corsin et al. (2001) used this type of regression to study risk factors associated with infection of *Penaeus monodon* by WSSV in a Vietnamese rice-shrimp farming system. Yet, the analysis of the impact of white spot disease from a

* Corresponding author. Tel.: +52 612 1238416; fax: +52 612 125362.
E-mail address: ahllamas04@cibnor.mx (A. Hernández-Llamas).

dynamic perspective has not been addressed. In this investigation, the dynamics of intensive production of *L. vannamei* is studied by quantitatively analyzing the relationships between growth and mortality parameters and water quality and management variables.

For this investigation, databases from farms in the State of Nayarit were used. State of Nayarit is the fourth larger producer in Mexico after Sonora, Sinaloa, and Baja California Sur (CONAPESCA, 2007). Serious impact and mortality from the WSSV have occurred in Nayarit since 1999 and production losses, as high as 40%, has been estimated (Martínez-Ramírez at Comité Estatal de Sanidad Acuicola del estado de Nayarit, 2007, pers. comm.).

2. Materials and methods

2.1. Data survey

Two of the three intensive farms in Nayarit were selected for their more complete databases and correct diagnosis of the white spot disease. The study units were ponds ranging from 0.8 to 8 ha that were in use during the study period and where the disease was diagnosed: 19 during summer 2004, 18 during summer 2005, and 12 during winter 2006. For each pond (case), the following variables were analyzed: shrimp growth, survival, final biomass yield, initial stocking density, pond size, aeration rates, water temperature, salinity, and dissolved oxygen.

Aeration rates were recorded daily, and dissolved oxygen and temperature were measured twice daily (06:00 and 18:00 h) using oxymeters (Model 55, YSI, Yellow Springs, OH). Salinity was measured weekly using refractometers (Aquafauna Bio-Marine, Hawthorne, CA). Weight of shrimp was estimated on a weekly basis using 0.01 g and 0.1 g precision balances (Ohaus Corp., Pine Brook, NJ). Survival was estimated by evaluating shrimp populations using 1.5 m radius cast nets which, depending on the size of shrimp, were made of 3.2 or 25.4 mm square mesh knotted monofilament line.

Monitoring for the white spot disease was on a monthly basis using a PCR diagnostic kit (IQ2000, Farming IntelliGene Tech Corp., Taiwan). When symptoms of the disease were observed, additional PCR tests were performed, and the results were confirmed from samples processed by a certified laboratory using the same diagnostic kit and a similar kit (DiagXotics, Wilton, CT). After the diagnosis was confirmed, monitoring was conducted weekly. Mortality caused by the disease was calculated as the difference between shrimp population before and after the disease occurred.

2.2. Stock model

A stock model was used to predict shrimp biomass per hectare at time t (b_t):

$$b_t = w_t n_t, \quad (1)$$

where w_t is the weight of shrimp and n_t is the number of surviving shrimp.

Growth of shrimp was modeled with the growth curve developed by Hernandez-Llamas and Ratkowsky (2004) and modified to incorporate the length of the cultivation period (c):

$$w_t = w_i + (w_f - w_i) \left[\frac{(1 - k^t)}{(1 - k^c)} \right]^3, \quad (2)$$

where w_i is the initial weight, w_f is the final weight, and k relates to the rate at which w_t changes from its initial value to its final value.

Survival was modeled by:

$$n_t = n_0 e^{-Z_1 t}, \text{ if } t \leq t_w \text{ or } n_t = (n_0 e^{-Z_1 t_w} - m) e^{-Z_2 (t - t_w)}, \text{ if } t > t_w \quad (3)$$

where n_t is the number of survivors (%), n_0 is the initial population, Z_1 is the instantaneous mortality rate previous to the time when die-off from disease occurred (t_w), m is mortality from disease (%) (hereafter, mortality), and Z_2 is the instantaneous mortality rate after t_w . Nonlinear regression algorithms available in Statistica 6.0 (StatSoft, Tulsa, OK) were used to fit the growth and survival equations; significance was set at $P < 0.05$ for regression ANOVA.

2.3. Correlation and linear regression analyses

A matrix was prepared to analyze correlations between parameters of the stock model and water quality and management variables. The mean values of water quality variables measured during the cultivation periods were analyzed. The relationship between m and mean dissolved oxygen (hereafter, oxygen) was analyzed, using simple linear regression. The relationship was established using either, mean oxygen for the complete cultivation period or the portion of the cultivation period previous to t_w . The same kind of relationship was established between t_w and oxygen. To determine whether aeration management in summer 2004 differed from summer 2005, the t -test was used to define differences in mean water temperature, oxygen, and total aeration and the time when aeration started. The product of horsepower by hours of aeration per hectare (Hp h ha^{-1}) was used to measure total aeration (hereafter, aeration).

After significant differences in management were found between the two summer seasons, the following relationships were defined: oxygen-aeration, oxygen-starting time of aeration, m -aeration, t_w -aeration, m -starting time of aeration, and lag in t_w after aeration started-starting time of aeration. For the last relationship, 88% of the ponds was used, where die-offs occurred after aeration started. This percentage of ponds was significantly higher than 50% ($P < 0.001$), which would be the situation if die-offs occurred randomly before or after aeration started. Correlation analysis, simple linear regression, and t -tests were performed using STATISTICA 6.0. Significance was set at $P < 0.05$.

Multiple linear regression analyses were carried out to predict values of growth and mortality parameters as a function of water quality and management variables. Accordingly:

$$Q_t = a_0 + a_1 T + a_2 S + a_3 O + a_4 D + a_5 PS, \quad (4)$$

where Q is either w_f , k , Z_1 , t_w , m , or Z_2 , from the stock model, T is pond water temperature, S is salinity, O is oxygen, D is initial stocking density, and PS is pond size.

The values of water quality variables measured for all the cases were analyzed, and the 'backward' stepwise regression procedure in Stata 10 (StataCorp, 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).

The predictive capability of the stock model, using the coefficients estimated from the multiple regression analyses, was tested by the following procedure. Biomass at harvest was calculated for each case and compared with the corresponding observed yield in the database. A linear regression analysis between observed and predicted biomass was then performed, setting the intercept at zero (Poole, 1974; Franco et al., 2006), and a t -test was applied to determine whether the regression slope differed significantly from 1 (Zar, 1999). After obtaining a result that was not significant, an equivalence test was conducted to protect against falsely accepting the corresponding null hypothesis (Type-II statistical error; Zar, 1999) (Hauck and Anderson, 1986). For this, the two one-sided procedures from Chow and Liu (2004) were used, setting significance at $P < 0.05$ and tolerance error at 5% (Garret, 1997). The linear combination of regression coefficients in the Stata 10 software was used to perform the equivalence test.

3. Results

In terms of regression ANOVA, significant results were obtained when growth and survival curves were fitted to the data sets corresponding to all the cases. The growth model showed flexibility to describe the different types of curves observed in the database (Fig. 1a). Survival curves indicated that mortality from disease occurred once and abruptly, covering 1 to 2 weeks, during the cultivation period. The survival model adequately described this mortality when it occurred early, midway, or late in the grow-out cycle (Fig. 1b).

Significant results from correlation analysis showed that, depending on the season, final weight of shrimp was positively correlated with high pond water temperature and oxygen, but inversely correlated with salinity (Table 1).

Higher values of the instantaneous mortality rates (Z_1 and Z_2) occurred when temperatures increased during the summer or when large ponds were used, but decreased when oxygen levels were high (Table 1). Mortality from WSSV infection was lower when temperature and oxygen increased, or when salinity declined. Early mortality was observed when water temperature increased or when large

Table 1

Correlation matrix of parameters of the stock model and water quality and management variables. Correlation coefficients that were not significant are omitted.

Parameter	Temperature		Salinity	Dissolved oxygen		Pond size
	Summer	Winter	Summer	Summer	Winter	Summer
w_f		0.53	-0.51		0.73	
Z_1	0.34			-0.73		0.34
t_w	-0.35			0.73		-0.37
M		-0.65	0.36	-0.54	-0.49	
Z_2	0.43		0.26	-0.61		0.50

ponds were used. There were no significant correlations for parameters k or for any of the production parameters and culture density.

Simple linear regression showed that the time of mortality and percentage mortality were directly and inversely related to oxygen, respectively (Table 2). Similar results were observed when mean oxygen values previous to the occurrence of mortality were used in the analysis (Table 2). This was direct evidence of the importance of high oxygen levels for reducing the impact of WSSV infection.

Water temperature and salinity did not differ significantly during the 2004 and 2005 summers, although significant differences existed in initial stocking density, aeration intensity, the time when aeration started, and oxygen levels (Table 3). During 2004, aeration was more intensive and started within the first three weeks of cultivation. In 2005, some ponds did not use aeration until the 14th week, which resulted in lower mean values of aeration and later starting time of aeration. Differences in aeration management resulted in higher oxygen levels in 2004 and lower levels in 2005 (Table 3). Simple linear regression showed that oxygen was directly related to total aeration, while inverse relationships were observed for each summer between oxygen and the time when aeration started (Table 4).

Simple linear regression indicated that the time of mortality and percentage mortality were positively and negatively related to aeration, respectively (Table 5). On the other hand, a direct relationship occurred between mortality and starting time of aeration (Table 5). Also, the lag between start of aeration and the time when mortality occurred was inversely related to starting time of aeration (Table 5). These results indicate that early aeration and higher total aeration diminish mortality from WSSV.

Results from multiple regression analyzes were, in general, consistent with correlation analysis (Table 6). Higher final weight of

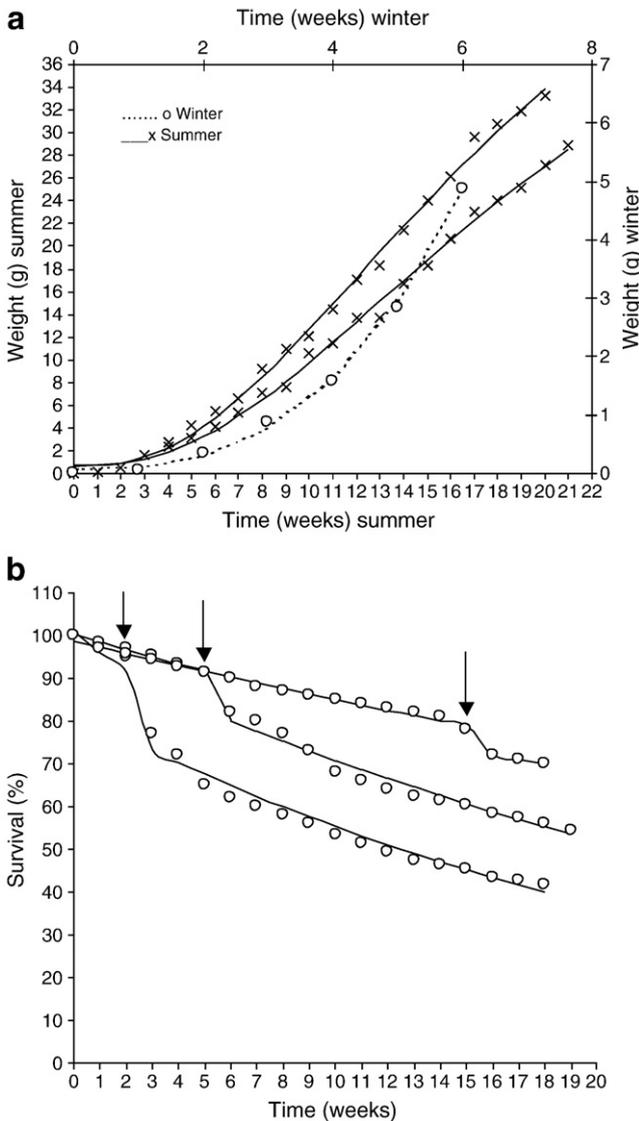


Fig. 1. Sample fitted growth (a) and survival (b) curves to data corresponding to summer and winter production cycles using the stock model. The arrows indicate the time of mortality from disease.

Table 2

Relationships of the time when mortality from disease occurred (t_w) and percentage mortality (m) with mean dissolved oxygen (O).

Equation	P	Season
$t_w = 4.44 O - 26.3$	0.0001	Summer
$t_w = 3.50 O_w^a - 17.8$	0.0001	Winter
$m = -4.00 O + 46.6$	0.0001	Summer
$m = -2.67 O_w + 34.9$	0.008	Summer
$m = -6.88 O + 126.8$	0.043	Winter

^a O_w = mean oxygen values previous to mortality from disease.

Table 3

Mean (\pm standard error) of water quality variables, stocking density, and aeration for the warm/rainy seasons of 2004 and 2005 (letters in the same row with a different letter indicate significant differences).

	2004	2005
Temperature ($^{\circ}C$)	31.5 \pm 0.07a	31.7 \pm 0.10a
Salinity	25.9 \pm 0.26a	25.6 \pm 0.78a
Stocking density (postlarvae m^{-2})	50.7 \pm 1.5a	55.4 \pm 2.3b
Start of aeration (week)	1.4 \pm 0.2a	5.2 \pm 1.1b
Total aeration ($Hp\ h\ ha^{-1}$)	11811.1 \pm 192.0a	10163.1 \pm 587.2b
Dissolved oxygen ($mg\ l^{-1}$)	9.3 \pm 0.09a	7.5 \pm 0.18b
Dissolved oxygen (O_w) ^a ($mg\ l^{-1}$)	9.2 \pm 0.11a	7.2 \pm 0.23b

^a O_w = mean oxygen values previous to mortality from disease (t_w).

Table 4
Relationships between dissolved oxygen (O) and aeration (A) and starting time of aeration (S).

Equation	P	Season (year)
$O = 0.0002 A + 6.15$	0.02	Summer
$O = -0.232 S + 9.62$	0.039	Summer (2004)
$O = -0.099 S + 8.05$	0.009	Summer (2005)

Table 5
Relationships of the time of mortality from disease (t_w), percentage mortality (m), and lag between the start of aeration and when mortality occurred (L) with total aeration (A) and starting time of aeration (S).

Equation	P	Season (year)
$t_w = 0.0012 A + 2.84$	0.005	Summer (2004)
$t_w = 0.0005 A - 0.3352$	0.043	Summer (2005)
$t_w = 0.0013 A + 4.58$	0.052	Winter (2006)
$m = -0.0011 A + 24.66$	0.039	Summer
$m = 0.9949 S + 10.72$	0.042	Summer (2005)
$L = -3.0952 S + 16.90$	0.02	Summer
$L = -0.72 S + 4.22$	0.0001	Winter

shrimp was predicted for increased water temperature and lower salinity. Decreases in the instantaneous mortality rates and mortality from WSSV were associated with increases in temperature and oxygen. Low mortality was also predicted for low salinity. Delays in mortality were predicted when temperature and oxygen were high. Consistent with correlation analysis, no significant results were obtained involving parameter k or cultivation density. Pond size, in contrast, was not considered necessary as a predictor.

A significant relationship was obtained between biomass yields in the database and the yields predicted by the stock model, using the regression coefficients listed in Table 6 (Fig. 2). The regression

Table 6
Regression coefficients used to predict parameter values of the stock model as a function of water quality variables and density.

Parameter	Temperature	Salinity	Dissolved oxygen	Density	Intercept
w_f	2.8044	-0.7941			-41.5986
Z_1	-0.0027		-0.0109	-0.0006	0.2382
t_w	1.8603		3.7632		-79.5836
M	-8.5830	0.9929	-4.4808		296.5821
Z_2			-0.0085		0.1014

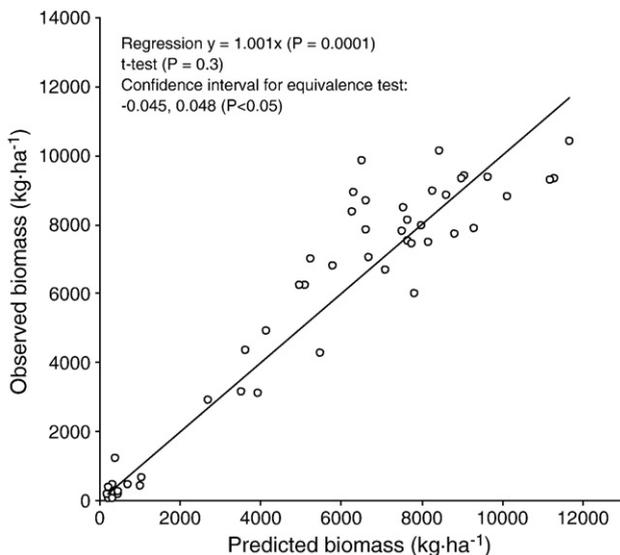


Fig. 2. Relationship between observed and predicted biomass yields using the stock model and the regression coefficients in Table 6.

coefficient did not differ significantly from 1 and significant equivalence between the coefficient and 1 was determined. Residual analysis did not indicate directional deviations from the fitted straight line and an adequate predictive capability of the model was achieved.

The dynamics of production predicted with the stock model showed that, for summer, reductions in disease mortalities and delays in the occurrence of mortalities were associated with increasing levels of aeration (Fig. 3a). Increases from 9000 to 14 000 Hp h ha⁻¹ corresponded to an increase in biomass at harvest from 6610 to 8750 kg ha⁻¹, representing an additional 32% in shrimp production. Similar results were obtained when production was predicted as a function of the starting time of aeration (Fig. 3b). When compared with yields obtained when aeration was initiated at the start of the grow-out cycle, delayed aeration, starting as late as 5 weeks, corresponded to a reduction of yields from 8360 to 6840 kg ha⁻¹ and represented a loss of 18% in shrimp biomass. During winter, using 700 Hp h ha⁻¹, rather than 300 Hp h ha⁻¹, resulted in a 990% increase in biomass (Fig. 4a), while starting aeration at 5 weeks rather than 3 weeks after the start of the grow-out, reduced biomass by 92% (Fig. 4b).

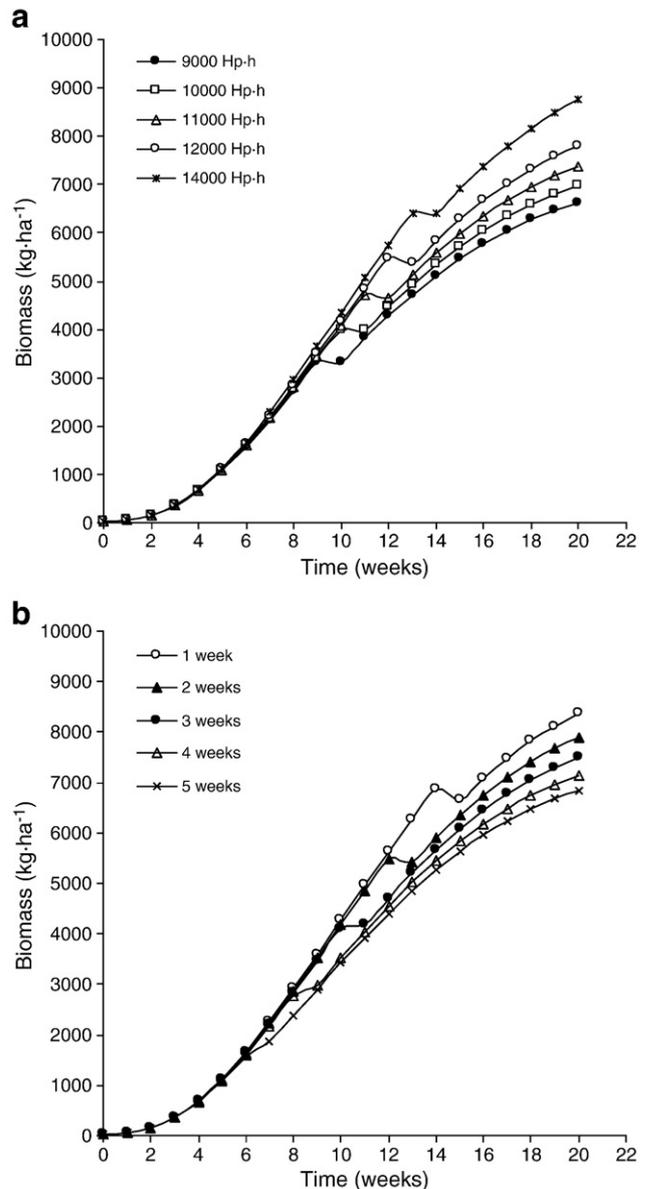


Fig. 3. Predicted dynamics of shrimp production as a function of total aeration (a) and start of aeration (b) during summer.

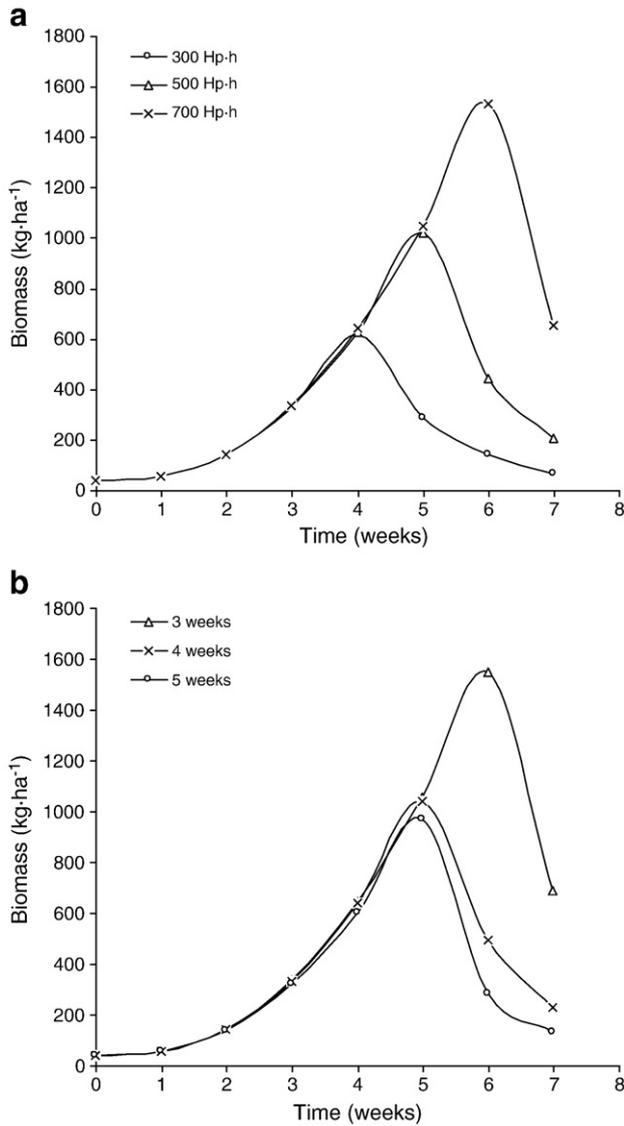


Fig. 4. Predicted dynamics of shrimp production as a function of total aeration (a) and start of aeration (b) during winter.

4. Discussion

The proposed stock model adequately described and predicted the dynamics of intensive production of *L. vannamei* when infected by the WSSV. This was a consequence of the adequacy of the growth and survival models used, as well as the statistical models derived from using multiple regression analysis. These regression models are considered predictive rather than explanatory tools, yet the predictors used for the models were in acceptable agreement with the relationships observed using correlation analysis between parameters of the stock model and water quality and management variables. In turn, these correlations were in general agreement with reports by other authors regarding intensive shrimp farming and risk factors associated with the white spot disease, indicating consistency and reliability in the predictability of the model.

The results of this study are representative of the conditions in Nayarit. Our approach could also be used on shrimp farms located in other regions affected by white spot disease; however, the model should be adjusted to the specific conditions in those regions.

A beneficial effect of high temperatures (32–33 °C) that mitigates progression of white spot disease in infected juvenile *L. vannamei* was reported (Vidal et al., 2001, Rahman et al., 2006). WSSV was more

prevalent in Ecuadorian populations of *L. vannamei* during the winter (Rodríguez et al., 2003). For *Marsupenaeus japonicus*, Guan et al. (2003) found significantly lower concentrations of WSSV at 33 °C, compared to concentrations at 23 and 28 °C. We found, that for winter season, results between temperature and prevalence of the WSSV were similar to most reports in the literature. However, in summer, the effect of temperature was apparently opposite to what could be expected in terms of mortality rates and the time of mortality caused by the disease. We attribute this to the mean temperature in 2005 being slightly higher than in 2004, although adverse conditions prevailed in 2005 from lower aeration and dissolved oxygen (Table 3).

There is very little understanding of the effect of salinity on outbreaks of white spot disease. Liu et al. (2006) reported that acute reductions in salinity, from 22 to 14 ppt in 1 h, increased the WSSV load in *Fenneropenaeus chinensis*. We found lower average salinity was related to lower mortality. In the study of Liu et al. (2006), the precipitous reduction in salinity acted as a stressor, a different set of conditions than in our investigation, where levels of salinity were average values of individual ponds with independent shrimp populations, which explains the overall effect of salinity during the grow-out period. Salinities lower than marine water (15–30 ppt) were recommended for cultivating *L. vannamei* (Hernandez-Llamas and Villarreal-Colmenares, 1999). The results from the present study showed that lower salinity promoted shrimp growth, supporting the explanation that better general cultivating conditions prevailed in ponds with lower salinity levels.

High stocking density is considered a risk factor for outbreaks of shrimp disease because it increases the number of contacts (Kautsky et al., 2000); however, no association between stocking density of *P. monodon* and WSSV infection was observed by Corsin et al. (2001). They attribute this to problems with sampling shrimp populations that are not uniformly distributed in ponds. Neither did we find evidence to support a relationship between stocking density and mortality or the time of the die-offs.

No relationship was found between shrimp growth and stocking density. Sandifer (1991) analyzed final size of *L. vannamei* for stocking densities ranging from 20 to 200 postlarvae m⁻² and did not find a tendency of shrimp size to decline as stocking density increased. In a survey of 23 extensive semi-intensive farms and intensive farms, Hopkins and Villalon (1992) found that the relationship between final shrimp size and stocking density was barely discernible. The quality of postlarvae appears to be more influential than stocking density on the final size of shrimp (Sandifer, 1991). Successful intensive production of *L. vannamei* requires skilled farming practices. These practices may be another factor explaining the absence of an effect related to stocking density.

Low oxygen levels in ponds were found to reduce immune defense in *L. stylirostris* and *P. monodon* and increase susceptibility to infectious diseases (Le Moullac et al., 1998). We found that oxygen and aeration were major factors in the dynamics of intensive production of *L. vannamei*. High concentrations of oxygen led to larger harvested shrimp and increased biomass by reducing mortality from WSSV. From our database, high oxygen and aeration may be seen as a management strategy of farmers in response to high shrimp biomass in ponds slightly affected by the disease. However, this was not the case because (1) farmers use projected biomass to install aeration equipment, but they use the aerators mainly to prevent oxygen from dropping below 4 mg l⁻¹ and (2), more importantly, when aeration led to a high oxygen level before the die-off from the disease, survival was higher.

We found that delayed aeration led to increased die-off. Late starts were also strongly related to a shorter time interval between the start of aeration and occurrence of mortality. Yet, it is unclear whether this resulted from lower oxygen levels associated with the late start of aeration, if starting time had any effect on its own, or if both mechanisms were acting together. Some evidence suggests an

association between acid-smelling pond bottom and presence of the white spot disease in *P. monodon* (Corsin et al., 2001). Artificial aeration results in increased pond oxygen, water circulation, and pond bottom removal, creating eroded and sedimentation areas (Boyd, 1998). Early start of aeration may contribute to the prevention of accumulating organic matter in the bottoms of shrimp ponds. Late start of aeration may cause removal of accumulated organic matter, with a harmful effect on shrimp.

Rameshthangam and Ramasamy (2006) and Mohankumar and Ramasamy (2006) working respectively with *Penaeus monodon* and *Fenneropenaeus indicus* found that shrimp infected with WSSV showed oxidative stress, as indicated by increased lipid peroxidation in tissues (including the gills), and depressed activity of antioxidant enzymes. According to these authors, lipid peroxidation occurs as a consequence of pro-oxidants liberated when ferrous radicals (Fe^{2+}) are transformed to ferric radicals (Fe^{3+}). It is known that removing pond sediment increases ferrous radicals in the water column (Boyd, 1990). It is likely that suspension of pond bottom sediments by aeration increases oxidation of these radicals to ferric oxide and subsequently leads to oxidative stress in shrimp. Depressed respiratory activity in infected shrimp will lead to greater vulnerability when dissolved oxygen is low. Still, further research could confirm whether stirring of bottom sediments increases oxidative stress and reduces respiratory capacity in *L. vannamei*.

The influence of intraday variation in oxygen and temperature on the onset of the white spot disease was studied in semi-intensive farming of *L. vannamei* in Mexico (CONACYT, 2007). Short periods of cloudy days result in oxygen levels and temperature during evening and early morning that tend to be similar, while photosynthesis, temperature, and oxygen generally diminish. When oxygen is below 3 mg l^{-1} , infected shrimp are more vulnerable to die-off. The disease in infected shrimp spreads to healthy shrimp when they ingest infected cadavers. This is the most important mode of transmission of white spot disease in *L. vannamei* (Soto and Lotz, 2001). A similar situation has been reported by Peinado-Guevara and López-Meyer (2006) for semi-intensive farming of *L. vannamei*. According to these authors, rainfall produced abrupt changes in pond water temperature, salinity, and oxygen, which caused stress, a lower immune response, and greater susceptibility to outbreaks of the white spot disease in shrimp populations.

There are no reports of a relationship between intraday variations in oxygen and disease outbreaks at intensively managed farms, where aeration prevents severe reduction in oxygen. We did not observe that disease outbreaks were consistently preceded by specific patterns of intraday variation in water quality variables. Mean values of the variables measured for the cultivation period were preferred because they adequately explained the variability observed for parameters describing the mortality caused by the disease.

Milstein et al. (2005) stress that small production units lead to better management, which is supported by Hernandez-Llamas and Villarreal-Colmenares (1999), and Magallon (2006) who showed that survival rates were lower in large (8 ha or larger) semi-intensive ponds. In our study, we found higher survival rates and delayed die-offs when shrimp were cultivated in small ponds, suggesting that less stressful conditions and good management practices ameliorate the threat from WSSV.

Investigators have studied the relationships between outbreaks of white spot disease, water quality, and management variables. In our investigation, these variables were analyzed simultaneously and quantitative relationships were established to predict the dynamics of production of *L. vannamei* when infected by the disease. Aeration is commonly used to improve water quality in ponds and enhance production of farmed aquatic organisms (Martinez-Cordova et al., 1997). We concluded that an early start of aeration and maintaining high levels of dissolved oxygen in small ponds diminish the negative impact of the disease under intensive production of *L. vannamei*.

Acknowledgements

The authors express their gratitude to shrimp farmers in Nayarit for their cooperation. Ira Fogel at CIBNOR provided helpful assistance in editing. Javier Marcial J. Ruiz-Velazco was a recipient of a doctoral fellowship from CONACYT.

References

- Boyd C.E., 1990. Water Quality in Ponds for Aquaculture. Alabama Agricultural Experiment Station, Auburn University, Auburn, Alabama.
- Boyd, C.E., 1998. Pond water aeration systems. *Aquacult. Eng.* 18, 9–40.
- Chen, J.M., Chen, J.C., 2000. Study on the free amino acids levels in the hemolymph, gill, hepatopancreas and muscle of *Penaeus monodon* exposed to elevated ambient ammonia. *Aquatic Toxicol.* 50, 27–37.
- Cheng, W., Chen, J.C., 2002. The virulence of *Enterococcus* to freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii* and its immune resistance under ammonia stress. *Fish Shellfish Immun.* 12, 97–109.
- Chow, S.C., Liu, J.P., 2004. Design and analysis of clinical trials. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey.
- CONACYT, 2007. Correlación de condiciones biológico-ambientales con la presencia de epidemias de mancha blanca en cultivos de camarón: variables ambientales. Informe Proyecto CONACYT. Programa Integral de Sanidad Acuicola. Fase I. Mexico.
- CONAPESCA, 2007. Anuario estadístico 2007. Comisión Nacional de Pesca y Acuicultura. <http://www.conapescasagarpa.gob.mx>.
- Corsin, F., Turnbull, J.F., Hao, N.V., Mohan, C.V., Phi, T.T., Phuoc, L.H., Tinh, N.T.N., Morgan, K.L., 2001. Risk factors associated with white spot syndrome virus infection in a Vietnamese rice-shrimp farming system. *Dis. Aquat. Organ.* 47, 1–12.
- Franco, A.R., Ferreira, J.G., Nobre, A.M., 2006. Development of a growth model for penaeid shrimp. *Aquaculture* 259, 268–277.
- Garret, K.A., 1997. Use of statistical tests of equivalence (bioequivalence tests) in plant pathology. *Phytopathology* 87, 372–374.
- Guan, Y., Yu, Z., Li, C., 2003. The effects of temperature on white spot syndrome infection in *Marsupenaeus japonicus*. *J. Invertebr. Pathol.* 83, 257–260.
- Hauk, W.W., Anderson, S., 1986. A proposal for interpreting and reporting negative studies. *Stat. Med.* 5, 203–209.
- Hernandez-Llamas, A., Villarreal-Colmenares, H., 1999. A software reference to shrimp *Litopenaeus* farming practices. *Aquacult. Econ. Manag.* 3, 267–280.
- Hernandez-Llamas, A., Ratkowsky, D.A., 2004. Growth of fishes, crustaceans and molluscs: estimation of the Von Bertalanffy, Logistic, Gompertz and Richards curves and a new growth model. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 282, 237–244.
- Hopkins, J.S., Villalon, J., 1992. Synopsis of industrial panel input on shrimp pond management. In: Wyban, J. (Ed.), Proceedings of the Special Session on Shrimp Farming. World Aquaculture Society, Baton Rouge, Los Angeles, pp. 138–143.
- Kautsky, N., Ronnback, P., Tedengren, M., Troell, M., 2000. Ecosystem perspectives on management of disease in shrimp pond farming. *Aquaculture* 191, 145–161.
- Le Moullac, G., Soyez, C., Saulnier, D., Asquer, D., Avarre, J.C., Levy, P., 1998. Effect of hypoxic stress on the immune response and the resistance to vibriosis of the shrimp *Penaeus stylirostris*. *Fish Shellfish Immun.* 8, 621–629.
- Leung, P.S., Tran, L.T., Fast, A.W., 2000. A logistic regression of risk factors for disease occurrence on Asian shrimp farms. *Dis. Aquat. Org.* 41, 65–76.
- Liu, B., Yu, Z., Song, X., Guan, Y., Jian, X., He, J., 2006. The effect of acute salinity change on white spot syndrome (WSS) outbreaks in *Fenneropenaeus chinensis*. *Aquaculture* 253, 163–170.
- Magallon, F. J., 2006. Desarrollo y aplicación de una metodología, para evaluar la variabilidad de la capacidad de carga de la acuicultura de camarón, en la región del Golfo de California. Doctoral Thesis. Universidad de La Habana, Havana, Cuba.
- Magallon, F.J., Servín, R., Portillo, G., López, B., 2006a. *Litopenaeus vannamei* (Boone) post-larval survival related to age, temperature, pH and ammonium concentration. *Aquacult. Res.* 37, 492–499.
- Magallon, F.J., Servín, R., Portillo, G., García, J., López, B., 2006b. Daily variation in short-term static toxicity of unionized ammonia in *Litopenaeus vannamei* (Boone) postlarvae. *Aquacult. Res.* 37, 1406–1412.
- Martinez-Cordova, L.R., Villarreal-Colmenares, H., Porchas-Cornejo, M.A., Naranjo-Paramo, J., Aragón-Noriega, A., 1997. Effect of aeration rate on growth, survival and yield of white shrimp *Penaeus vannamei* in low water exchange ponds. *Aquacult. Eng.* 16, 85–90.
- Milstein, A., Islam, M.S., Wahab, M.A., Kamal, A.H.M., Dewan, S., 2005. Characterization of water quality in shrimp ponds of different sizes and with different management regimes using multivariate statistical analysis. *Aquacult. Int.* 13, 501–518.
- Mohankumar, K., Ramasamy, P., 2006. White spot syndrome virus infection decreases the activity of antioxidant enzymes in *Fenneropenaeus indicus*. *Virus Res.* 115, 69–75.
- Peinado-Guevara, L.I., López-Meyer, M., 2006. Detailed monitoring of white spot syndrome virus (WSSV) in shrimp commercial ponds in Sinaloa, Mexico by nested PCR. *Aquaculture* 251, 33–45.
- Poole, R.W., 1974. An introduction to quantitative ecology, first ed. McGraw-Hill, New York.
- Rahman, M.M., Escobedo-Bonilla, C.M., Corteel, M., Dantas-Lima, J.J., Wille, M., Alday, S.V., Pensaert, M.B., Sorgeloos, P., Nauwynck, H.J., 2006. Effect of high water temperature (33 °C) on the clinical and virological outcome of experimental infections with white spot syndrome virus (WSSV) in specific pathogen-free (SPF) *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture* 261, 842–849.

- Rameshthangam, P., Ramasamy, P., 2006. Antioxidant and membrane bound enzymes activity in WSSV-infected *Penaeus monodon* Fabricius. *Aquaculture* 254, 32–39.
- Rencher, A.A., 2002. *Method of multivariate analysis*, Second ed. John Wiley & Sons, New York.
- Rodríguez, J., Bayot, B., Amano, Y., Panchana, F., de Blas, I., Alday, V., Calderón, J., 2003. White spot syndrome virus infection in cultured *Penaeus vannamei* (Boone) in Ecuador with emphasis on histopathology and ultrastructure. *J. Fish Diseases* 26, 439–450.
- Sandifer, P.A., 1991. Further intensification of pond shrimp culture. *Shrimp Culture in South Carolina*. In: *Shrimp Culture in North America and the Caribbean*. Advances in World Aquaculture. 4. The World Aquaculture Society, Baton Rouge, Louisiana, pp. 84–95.
- Soto, M.A., Lotz, J.M., 2001. Epidemiological parameters of white spot syndrome virus infections in *Litopenaeus vannamei* and *L. setiferus*. *J. Invertebr. Patol.* 78, 9–15.
- Vidal, O.M., Granja, C.B., Aranguren, F., 2001. A profound effect of hyperthermia on survival of *Litopenaeus vannamei* juveniles infected with white spot syndrome virus. *J. World Aquacult. Soc.* 32, 364–372.
- Yu, Z., Guan, Y., 2003. Effect of salinity on the immune responses and outbreak of white spot syndrome in the shrimp *Marsupenaeus japonicus*. *Ophelia* 57, 99–106.
- Zar, J.H., 1999. *Biostatistical analysis*, 4th ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.



Javier M. J. Ruiz-Velazco obtained his first university degree in Fisheries Engineering from the Universidad Autónoma de Nayarit, a MSc in aquaculture from the Universidad Autónoma de Nayarit, and currently is a doctoral student in marine sciences at the Instituto Politécnico Nacional. He has been working for the Universidad Autónoma de Nayarit as a professor–researcher since 1990. He has published four papers in peer-reviewed journals.



Victor Manuel Gomez-Muñoz obtained his first university degree in physics and mathematics from the Instituto Politécnico Nacional (IPN), a MSc in mathematics from the IPN, a MSc in fisheries science from IPN, and a DSc in natural resources management from Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. He has been a professor of mathematics in undergraduate and graduate programs of IPN and his primary research at Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas-IPN involves natural resources modeling. He has published 34 papers in peer-reviewed journals.



Francisco Javier Magallón-Barajas obtained his first university degree in biology from the Instituto Politécnico Nacional (IPN), a MSc in fisheries science from IPN, and a DSc in biological sciences from Universidad de La Habana (ULH). He has worked for fisheries and aquaculture agencies in the Mexican government. Since 1985, his primary research at Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste involved shrimp aquaculture, shrimp biology, and ecological efficiency in aquaculture and teaches in the graduate program at CIBNOR. He has published 24 papers in peer-reviewed journals and is a collaborator in the Alianza Estratégica y Red de Innovación en Sanidad e Inocuidad Acuicola (AERI) in Northwestern Mexico.



Alfredo Hernandez-Llamas obtained his first university degree in biology from the Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), a MSc in fisheries science from the Instituto Politécnico Nacional, and a DSc in biology from UNAM. He has worked for consulting firms, fisheries and aquaculture agencies of the Mexican government, and was a professor at Universidad Autónoma de Baja California Sur. Since 1985, his primary research at Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR) covered bioeconomics of aquaculture, expert systems, and aquaculture nutrition and also teaches in the graduate program at CIBNOR. He has published 26 papers in peer-reviewed journals.



Management of stocking density, pond size, starting time of aeration, and duration of cultivation for intensive commercial production of shrimp *Litopenaeus vannamei*

Javier M.J. Ruiz-Velazco^{a,b}, Alfredo Hernández-Llamas^{c,*}, Victor M. Gomez-Muñoz^d

^a Departamento de Desarrollo de Tecnologías, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas del IPN, Av. Instituto Politécnico Nacional s/n, Col. Playa Palo de Santa Rita, La Paz, B.C.S. 23096, Mexico

^b Dirección de Fortalecimiento de la Investigación, Universidad Autónoma de Nayarit, Cd. de La Cultura Amado Nervo s/n Tepic, Nayarit 63255, Mexico

^c Programa de Acuicultura, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), Mar Bermejo 195, Col. Playa Palo de Santa Rita, La Paz, B.C.S. 23096, Mexico

^d Departamento de Pesquerías y Biología Marina, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas del IPN, Av. Instituto Politécnico Nacional s/n, Col. Playa Palo de Santa Rita, La Paz, B.C.S. 23096, Mexico

ARTICLE INFO

Article history:

Received 22 June 2010

Accepted 19 August 2010

Keywords:

Farming management

Shrimp production

Litopenaeus vannamei

ABSTRACT

A dynamic stock model was used for quantification of shrimp production and analysis of alternative management schemes of stocking density, pond size, starting time of aeration, and duration of cultivation for intensive commercial production of the shrimp *Litopenaeus vannamei*. Databases from Mexican farms were used to calibrate the model. Multiple linear regression models were employed to establish relationships between parameters of the stock model and the management variables. Water quality variables (dissolved oxygen, temperature, and salinity) were complementarily analyzed. The final weight of shrimp was directly related to duration of cultivation and dissolved oxygen, and inversely related to stocking density, pond size, and salinity. There were inverse relationships between the growth coefficient and temperature and dissolved oxygen and between mortality rate and temperature. Dissolved oxygen was significantly related to starting time of aeration. Simple linear regression and an equivalence test indicated that biomass at harvest (after 13 weeks in winter, and 20 weeks in summer) was adequately predicted by using the stock model and the multiple regression models. The highest production (winter, 6900 kg ha⁻¹; summer, 12,600 kg ha⁻¹) were predicted using 60 postlarvae m⁻², small ponds (2 ha), and starting aeration at the first week of cultivation; while the lowest yields (winter, 2600 kg ha⁻¹; summer, 6000 kg ha⁻¹) were obtained using 40 postlarvae m⁻², large ponds (8 ha), and delaying the start of aeration until the fifth week of cultivation. The lowest production was 38% (winter) and 48% (summer) of the highest yield. Using small ponds could be particularly important during winter cycles to increase production, while stocking density and starting time of aeration contributed less. In contrast, pond size played a minor role during summer cycles and stocking density was the most sensitive variable.

© 2010 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

In 2004, aquaculture activities were 43% of marine resource production worldwide. Shrimp was the most important product economically, being 17% of the global values of fishing products in international trade (FAO, 2007). According to CONAPESCA (2008), production of cultivated shrimp reached 130,200 tons in 2008, 66.33% of aquaculture production in Mexico.

There are many management factors that have been studied to increase production of cultivated shrimp. The literature on the

subject is very extensive and no attempt is made in this study to review this topic. Only a few investigations have focused on studying management variables acting simultaneously. Stocking density, duration of cultivation, and aeration are commonly investigated under controlled experimental conditions, rather than in commercial production units.

In a previous work (Ruiz-Velazco et al., 2010), using data from commercial farms, we studied the impact of the white spot disease on the dynamics of intensive production of *L. vannamei*, establishing relationships between parameters of a stock model and management and water quality variables. This demonstrated the important role that adequate management of stocking density, pond size and, particularly, starting time of aeration (i.e. the time when it is decided to turn on aerators for the first time, regardless the dissolved oxygen level) play in generally improving cultiva-

* Corresponding author. Tel.: +52 612 123 8416; fax: +52 612 125 3625.

E-mail addresses: marcialj@nayar.uan.mx (J.M.J. Ruiz-Velazco), ahllamas04@cibnor.mx (A. Hernández-Llamas).

tion conditions and mitigating negative impacts of white spot disease.

From the literature review conducted for our present study, with the exception of our previous work, we did not find investigations dealing simultaneously with stocking density, pond size, and starting time of aeration for shrimp farming. The results obtained in that work led us to hypothesize that adequate simultaneous manipulation of those management variables, in addition to the duration of the cultivation period, should contribute to increased shrimp yields under normal operating conditions (that is, when not affected by white spot disease). Compared to other management variables, in this investigation, we were interested in determining the importance of starting time of aeration, a management variable that has not been previously analyzed for normal cultivation conditions of shrimp.

To fulfill our objective, we projected biomass yields of *L. vannamei* for alternative management schemes, using a stock model and functional relationships between its parameters and management and water quality variables. Databases from farms in the State of Nayarit were used for model calibration. Nayarit is the third largest producer in Mexico (CONAPESCA, 2008).

2. Materials and methods

2.1. Data survey

A database was prepared from data from two of the three intensive farms in Nayarit. The study units were 37 ponds (1.6–8 ha) used during winter (22), and summer (15) production cycles. The ponds were selected after confirming that shrimp was not affected by diseases, that there were not major operating problems and that biometrical, water quality and management variables were adequately monitored and registered.

For each pond, the following variables were analyzed: mean individual weight of shrimp (g), number of survivors, biomass yield (kg ha^{-1}), initial stocking density (postlarvae m^{-2}), pond size (ha), starting time of aeration (weeks), duration of cultivation (weeks), dissolved oxygen (mg l^{-1}), water temperature ($^{\circ}\text{C}$), and salinity (ppt).

According to farmers, weight of shrimp was measured weekly (0.01 g and 0.1 g precision balances, Ohaus, Pine Brook, NJ); cumulative survival of shrimp was weekly estimated by sampling with 1.5-m radius cast nets made of 3.2 or 25.4 mm square mesh, knotted monofilament line; DO and T were measured each day at 06:00 h and 18:00 h (oxymeter, Model 55, YSI, Yellow Springs, OH). S was measured weekly (refractometer, Aquafauna Bio-Marine, Hawthorne, CA).

2.2. Stock model

Shrimp biomass (b_t) at time t was calculated using a stock model:

$$b_t = w_t n_t \quad (1)$$

where w_t is mean individual weight of shrimp and n_t is the surviving shrimp population.

A modification of the Hernandez-Llamas and Ratkowsky (2004) model was used to describe growth of shrimp:

$$w_t = w_0 + (w_f - w_0) \left[\frac{(1 - k^t)}{(1 - k^c)} \right]^3, \quad (2)$$

where w_0 is the weight at the beginning of cultivation, w_f is the weight at the conclusion of the cultivation period, k is a parameter representing the rate at which w_t changes from w_0 to w_f , and c is the duration or conclusion of the period of cultivation (weeks).

Survival was modeled using the exponential equation:

$$n_t = n_0 e^{-z \cdot t} \quad (3)$$

where n_0 is the initial population, and z is the instantaneous mortality rate. Nonlinear regression estimation was used to fit the growth and survival curves to data corresponding to each pond.

2.3. Linear regression analyses

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

$$Q = a_0 + a_1 D + a_2 PS + a_3 STA + a_4 DC + a_5 DO + a_6 T + a_7 S \quad (4)$$

where Q represents any of the stock model parameter: w_f , k , or z , depending on initial stocking density (D), pond size (PS), starting time of aeration (STA), duration of cultivation (DC), dissolved oxygen (DO), temperature (T), salinity (S), and a_0 – a_7 are regression coefficients. The multiple regression models were fitted with datasets constituted by estimates of the stock model parameters and the corresponding values of management and water quality variables of all the ponds. The mean values of water quality variables measured during the cultivation period were used for analysis. The range of these mean values, together with the range of the management variables are presented in Table 1. Simple linear regression was used to determine relationships between dissolved oxygen and starting time of aeration.

Parsimony of the multiple regression models was achieved with two steps. Step 1 uses the backward stepwise procedure for selection of predictor variables. This procedure deals with colinearity with methods described by Rencher (2002). Step 2 follows Poole (1974), testing whether the functional relationships of the models were correct and that most of the significant factors affecting the parameters of the stock model were included.

For Step 2, the coefficients estimated from regression analyses were used to calculate the expected biomass at harvest for each pond and this was compared with the corresponding observed yield in the database. After this, a simple linear regression analysis between observed and expected shrimp biomass was performed, setting the intercept at zero. After determining that the regression slope did not differ significantly from 1 (t -test), an equivalence test (Chow and Liu, 2004) was conducted 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 W -test. For testing equivalence, tolerance error was set at 5% (Garret, 1997).

Software procedures available in Stata 10.0 (StataCorp, College Station, TX) and Statistica 6.0 (StatSoft, Tulsa, OK) were used to perform statistical analyses, setting significance at $P < 0.05$.

The stock model, together with the estimates of regression coefficients, was used to predict the dynamics of production for hypothesized alternative management strategies that considered the role of stocking density, pond size, and starting time of aeration. The extreme (minimum and maximum) values of the management variables and the mean values of water quality variables contained in the database were used for prediction.

The contribution of each management variable to the variation in biomass yields was calculated. The percentage of increase in biomass that could be achieved, when using the extreme values of the variable, was calculated for every combination of extreme values of the other management variables. The contribution of the variable was then calculated by determining the minimum, maximum, and mean percentages of increase. The higher the mean

Table 1
Range of management and water quality variables used for multiple regression analysis. The maximum and minimum of the mean values of water quality variables during the cultivation periods are presented.

Variable	Winter		Summer	
	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum
Stocking density (postlarvae m ⁻²)	60	40	60	40
Pond size (ha)	8	1.6	8	1.6
Starting time of aeration (weeks)	5	1	5	1
Duration of cultivation (weeks)	13	10	15	20
Dissolved oxygen (mg l ⁻¹)	10.6	6.78	10.07	6.11
Temperature (°C)	29.8	26.37	32.12	31.13
Salinity (ppt)	35.34	31.05	27.38	17.25

value, the more important was the contribution of the variable for management.

3. Results

By regression ANOVA, significant results were obtained when growth and survival curves were fitted to the datasets correspond-

ing to all the ponds (Fig. 1). The growth and survival models showed flexibility to describe the different types of data trends.

Results from multiple regressions in Table 2 indicate that, with the exception of starting time of aeration, significant relationships existed between the parameters of the stock model and the management and water quality variables. The final weight of shrimp (w_f) was directly related to duration of cultivation and dissolved oxygen, and inversely related to stocking density, pond size, and salinity. There were inverse relationships between the growth coefficient (k) and temperature and dissolved oxygen and between the instantaneous mortality rate (z) and temperature. Dissolved oxygen, in turn, was significantly related to starting time of aeration ($DO = -0.068STA + 10.18$). Early start of aeration produced higher mean values of dissolved oxygen. This relationship was used to predict how w_f and k could be controlled by the starting time of aeration.

A significant relationship was obtained between biomass yields in the database and the yields calculated by the stock model, using the regression coefficients listed in Table 1 and the equations predicting dissolved oxygen as a function of starting time of aeration (Fig. 2). The regression coefficient did not differ significantly from 1 and equivalence between the coefficient and 1 was determined. Residual analysis did not indicate directional deviations from the fitted straight line and no evidence was found that the residual values were not normally distributed. We concluded that: (1) the functional relationships used were correct; (2) most of the sig-

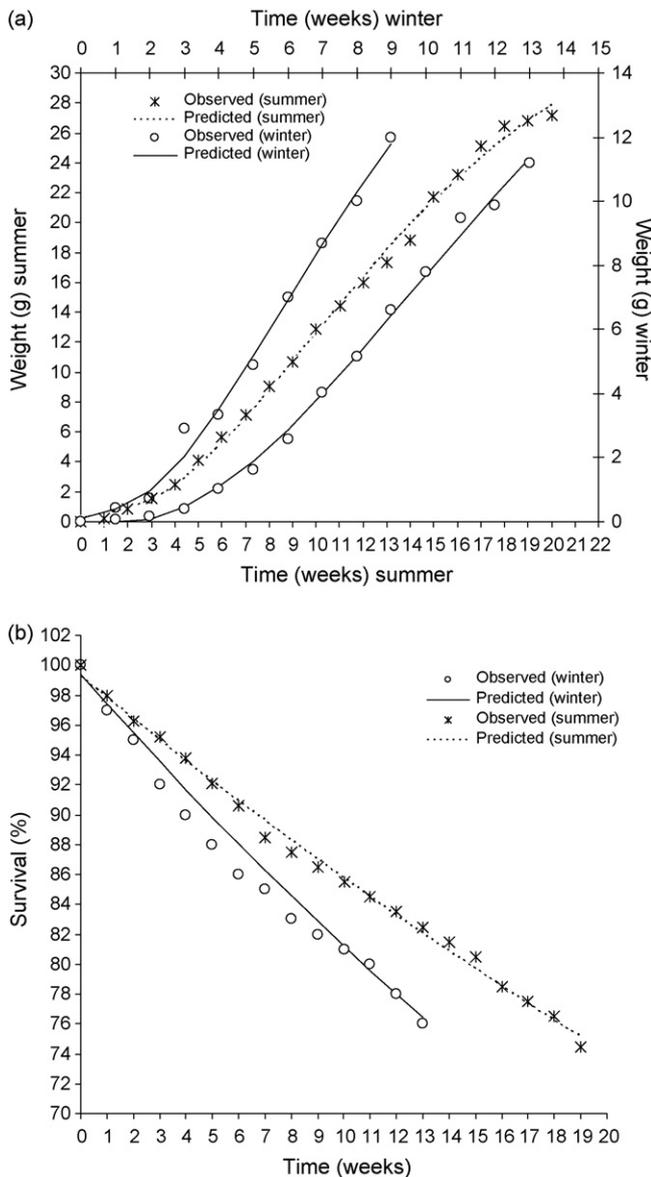


Fig. 1. Example of fitted growth curves (a) two for winter and one for summer, and survival curves (b) one for each season, using the stock model.

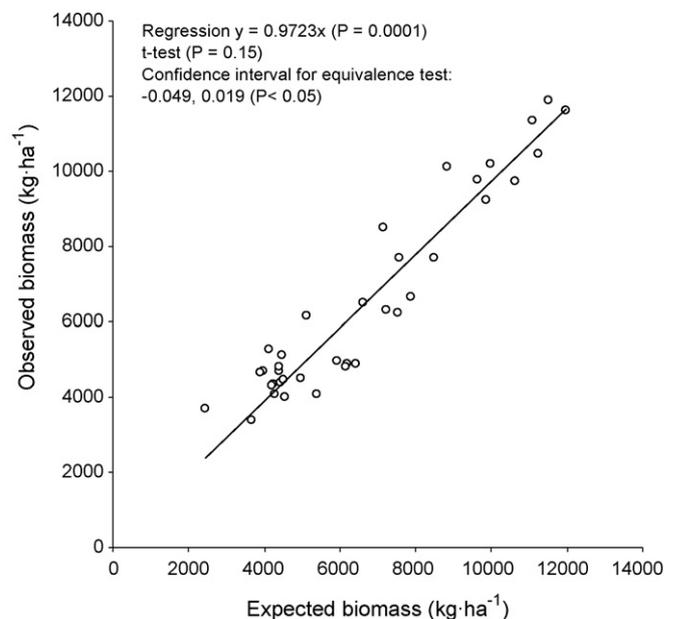


Fig. 2. Relationship between observed and expected yields of biomass, using the stock model and the regression coefficients in Table 2.

Table 2
Regression coefficients used to predict parameter values of the stock model as a function of water quality and management variables.

Parameter	Stocking density	Pond size	Duration of cultivation	Dissolved oxygen	Temperature	Salinity	Intercept
w_f	-0.091	-0.964	1.656	1.144		-0.235	-2.55
k			0.009	-0.012	-0.0063		1.03
z					-0.00096		0.04

nificant factors affecting shrimp biomass were included; and (3) there was no need for predictors other than those considered in Eq. (4).

Using the stock model to predict the dynamics of production showed that the highest yields would be obtained by employing the longest cultivation periods (13 weeks in winter and 20 weeks in summer). These cultivation periods were used to calculate yields. The highest productions (winter, 6900 kg ha⁻¹; summer, 12,600 kg ha⁻¹) were predicted using 60 postlarvae m⁻², small ponds (2 ha), and starting aeration in the first week of cultivation (Fig. 3); while the lowest yields were predicted using

40 postlarvae m⁻², large ponds (8 ha), and delaying the start of aeration until the fifth week of cultivation (winter, 2600 kg ha⁻¹; summer, 6000 kg ha⁻¹). Under these conditions, production is predicted to be 38% in winter and 48% of the highest predicted yields.

The analysis of the contribution of each management variable to changes in biomass yields showed that pond size was particularly important during winter cycles (Table 3), while stocking density and starting time of aeration contributed less. In contrast, pond size played a minor role during summer production cycles, while stocking density was the most sensitive variable.

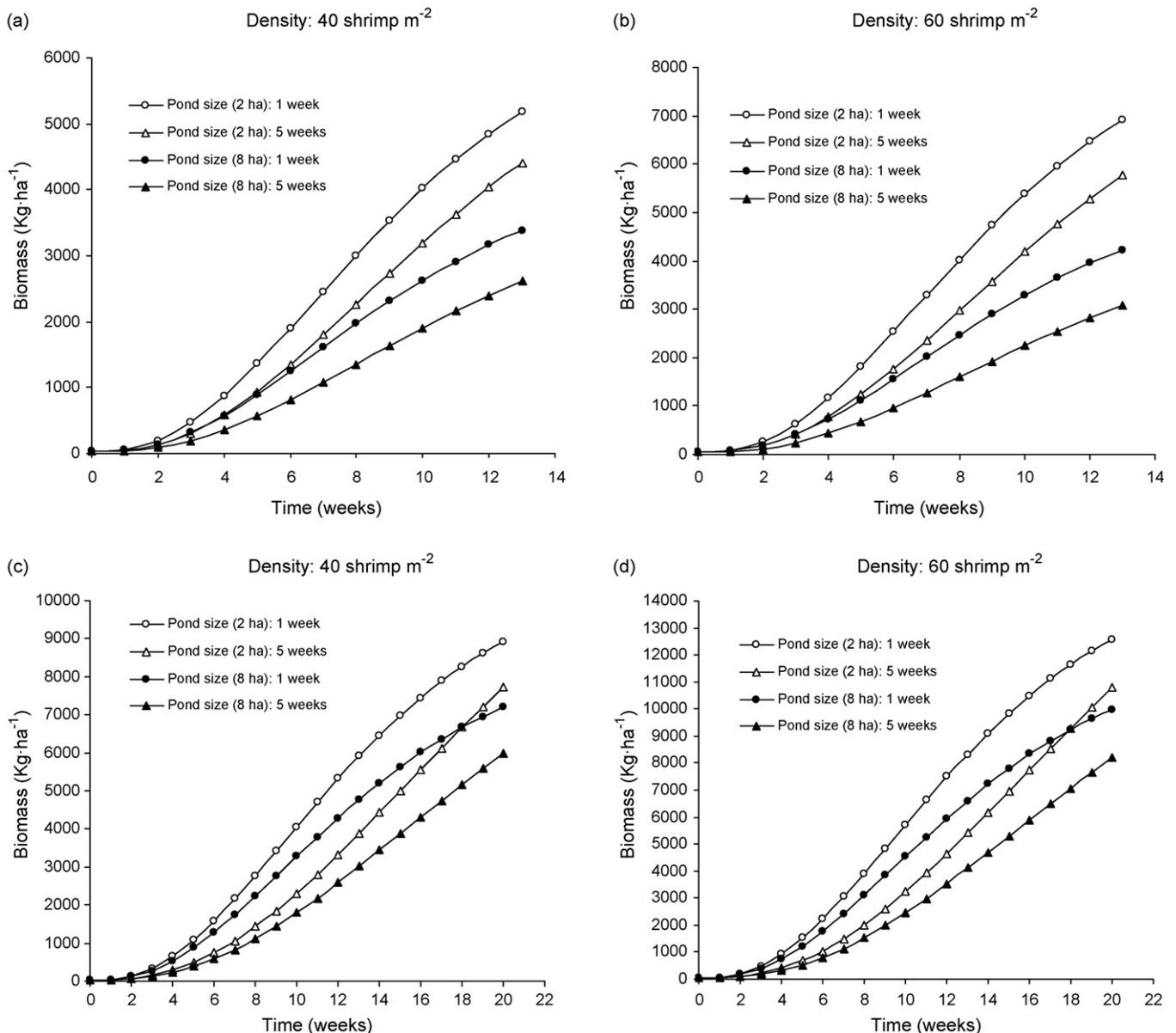


Fig. 3. Predicted dynamics of shrimp production as a function of stocking density, pond size, starting time of aeration, and duration of cultivation period during winter (a and b) and summer (c and d) production cycles.

Table 3

Contribution of the management variables to increases in shrimp biomass. Values for each variable are the minimum, maximum, and mean percentages of biomass increases obtained from the increases calculated for every combination of extreme values (within parentheses) of the remaining management variables. Mean values indicate the contribution of each variable.

	Minimum	Maximum	Mean
Winter			
Stocking density (40–60 postlarvae m ⁻²)	17.8	33.7	26.87
Pond size (2–8 ha)	53.0	87.0	68.0
Starting time of aeration (1–5 weeks)	17.2	37.0	24.1
Summer			
Stocking density (40–60 postlarvae m ⁻²)	36.4	40.8	38.9
Pond size (2–8 ha)	24.0	31.7	27.6
Starting time of aeration (1–5 weeks)	15.4	21.8	18.4

4. Discussion

Our results show that there are important differences in biomass yields associated with management schemes for intensive production of *L. vannamei*. The use of small ponds during winter cycles is important because it allows farmers to obtain larger final weight of shrimp (Table 2). This helps compensate for the lower production that normally occurs during the winter compared with summer. High stocking density, on the other hand, appears to be the more convenient way to increase yields during the more favorable conditions of summer production cycles. Starting time of aeration played a minor role in determining shrimp production in both seasons.

The effect of stocking density on growth, survival, and yields of shrimp has been extensively studied. A negative effect of stocking density on performance of *L. vannamei* is usually reported (Wyban et al., 1987; Moss and Moss, 2004; Araneda et al., 2008). Our results also showed that growth was negatively affected by higher density, which resulted in lower shrimp production.

Kongkeo (1997), Milstein et al. (2005), and Islam et al. (2005) stress that small cultivation ponds allow better management and lead to increased growth, survival, yields, and economic returns of *Penaeus monodon*. Similar findings for *L. vannamei* are reported (Hernandez-Llamas and Villarreal-Colmenares, 1999; Magallon, 2006) and our study also indicates that, in general, greater final weight and biomass production of shrimp are obtained in smaller ponds. High sensitivity of production to final weight explains the importance of obtaining larger shrimp by using small ponds for winter cycles.

Aeration is commonly used to improve water quality in ponds and enhance production of farmed aquatic animals. Dissolved oxygen is a major factor in intensive production and it is directly related to aeration rate (Hopkins et al., 1991). McGraw et al. (2001), working with *L. vannamei* and *Litopenaeus stylirostris*, showed that increasing minimum dissolved oxygen by aeration resulted in higher survival, yield, and net income, although no significant differences occurred in final weight. We found a positive effect of higher dissolved oxygen on final weight and that dissolved oxygen, in turn, was controlled by the starting time of aeration.

In our previous investigation, we showed that early start of aeration delays and mitigates negative effects of white spot disease on cultivated *L. vannamei* (Ruiz-Velazco et al., 2010). Deposition of bottom sediment occurs gradually before aeration is started and, compared with an early start of aeration, a late start provokes more suspension of sediments and lowers mean dissolved oxygen. This leads to depressed respiratory activity and greater vulnerability in infected shrimp when dissolved oxygen is low. We found that, under normal operating conditions and contrary to what was initially hypothesized, starting time of aeration was of minor importance in controlling shrimp production, compared with other management factors. This reversal of expectations is most likely related to the reduced sensitivity of healthy shrimp to

low dissolved oxygen and poor water quality following removal of pond bottom sediments.

It is normally expected that biomass yield should consistently rise as the duration of cultivation increases. We calculated that the maximum biomass occurred when using the longest period of cultivation. Larger shrimp were obtained with longer cultivation, although no evidence was obtained on mortality (estimated as an instantaneous rate) being affected by this management factor.

It is generally recognized that shrimp growth is favored by higher temperature and lower salinity during summer cycles, compared with winter cycles. Our results indicate that higher final weight occurred when salinity declined. However, we did not find final weight of shrimp related to temperature. This is most likely a consequence of variance of final weight being adequately explained by the other water quality and management variables, thus making temperature a redundant predictor. Yet, a positive effect of higher temperatures on survival was detected. This is consistent with the findings of Ponce-Palafox et al. (1997) and Hennig and Andreatta (1998) who, working respectively with *L. vannamei* and for *Penaeus paulensis* found a positive influence of temperature on survival from 20 °C to 30 °C.

The interpretation of relationships between the growth coefficient k and water quality and management variables is not straightforward. When $k < 1$, the sigmoid-shaped growth curve is better defined. When $k > 1$, shrimp are growing exponentially. Sigmoid and exponential curves could be related to different operating conditions and there is no a priori reason to suppose that better or worse cultivating conditions necessarily lead to either type of growth curve. In our study, coefficient k is used merely for descriptive purposes and no attempt was made to interpret its values as a consequence of specific cultivating conditions.

Our modeling approach can be adapted to analyze cultivation conditions in regions other than the one studied in this investigation. Depending on what is hypothesized and anticipated this may require, using multiple regression analysis, the analysis of categorical variables or interaction between predictors. However, this may result in identifying confounding factors (e.g. seasons may obscure the role of temperature), or in an unmanageable number of possible interactions. We were mainly focused on studying the relationships between parameters of the stock model and management and water quality variables, and building parsimonious models. It was not necessary to study predictors other than those stated in Eq. (4) after finding that the functional relationships we used were correct, and that there was no evidence of exclusion of significant factors affecting shrimp biomass.

We concluded that maximization of biomass of *L. vannamei* can be obtained using the highest stocking density, the smallest ponds, the earliest start of aeration, and the longest duration of cultivation. Small ponds and high stocking density are particularly recommended for winter and summer cycles, respectively. Future research should focus on validating the prediction of yields associated with these recommendations and on determining, from an economic view, the optimal values of the management variables.

Acknowledgements

The authors express their gratitude to shrimp farmers in Nayarit for their cooperation. Editorial suggestions were provided by Ira Fogel of CIBNOR. J.M.J.R.V. was a recipient of doctoral fellowships from CONACyT and PROMEP.

References

- Araneda, M., Pérez, E.P., Gasca-Leyva, E., 2008. White shrimp *Penaeus vannamei* culture in freshwater at three densities: condition state based on length and weight. *Aquaculture* 283, 13–18.

- Chow, S.C., Liu, J.P., 2004. Design and Analysis of Clinical Trials: Concepts and Methodologies, 2nd ed. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.
- CONAPESCA, 2008. Anuario estadístico 2008. Comisión Nacional de Pesca y Acuicultura, <http://www.conapesca.sagarpa.gob.mx>.
- FAO, 2007. El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2006. Department of Fishery and Aquaculture, Food and Agriculture Organization, Rome.
- Garret, K.A., 1997. Use of statistical tests of equivalence (bioequivalence tests) in plant pathology. *Phytopathology* 87, 372–374.
- Hauck, W.W., Anderson, S., 1986. A proposal for interpreting and reporting negative studies. *Stat. Med.* 5, 203–209.
- Hennig, O.L., Andreatta, E.R., 1998. Effect of temperature in an intensive nursery system for *Penaeus paulensis* (Pérez-Farfante, 1967). *Aquaculture* 164, 167–172.
- Hernandez-Llamas, A., Ratkowsky, D.A., 2004. Growth of fishes, crustaceans and molluscs: estimation of the Von Bertalanffy, Logistic, Gompertz and Richards curves and a new growth model. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 282, 237–244.
- Hernandez-Llamas, A., Villarreal-Colmenares, H., 1999. A software reference to shrimp *Litopenaeus* farming practices. *Aquacult. Econ. Manage.* 3, 267–280.
- Hopkins, J.S., Stokes, A.D., Browdy, C.L., Sandifer, P.A., 1991. The relationship between feeding rate, paddlewheel aeration rate and expected dawn dissolved oxygen in intensive shrimp pond. *Aquacult. Eng.* 10, 281–290.
- Islam, M.S., Milstein, A., Wahab, M.A., Kamal, A.H.M., Dewan, S., 2005. Production and economic return of shrimp aquaculture in coastal ponds of different sizes and with different management regimes. *Aquacult. Int.* 13, 489–500.
- Kongkeo, H., 1997. Comparison of intensive shrimp farming systems in Indonesia, Philippines, Taiwan and Thailand. *Aquacult. Res.* 28, 789–796.
- McGraw, W., Teichert-Coddington, D.R., Rouse, D.B., Boyd, C.E., 2001. Higher minimum dissolved oxygen concentrations increase penaeid shrimp yields in earthen ponds. *Aquaculture* 199, 311–321.
- Magallon, F.J., 2006. Desarrollo y aplicación de una metodología, para evaluar la variabilidad de la capacidad de carga de la acuicultura de camarón, en la región del Golfo de California. Doctoral Thesis. Universidad de La Habana, Havana, Cuba.
- Milstein, A., Islam, M.S., Wahab, M.A., Kamal, A.H.M., Dewan, S., 2005. Characterization of water quality in shrimp ponds of different sizes and with different management regimes using multivariate statistical analysis. *Aquacult. Int.* 13, 501–518.
- Moss, K.R.K., Moss, S., 2004. Effects of artificial substrate and stocking density on the nursery production of Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*. *J. World Aquacult. Soc.* 35, 536–542.
- Ponce-Palafox, J., Martínez-Palacios, C.A., Ross, L.G., 1997. The effect of salinity and temperature on the growth and survival rates of juvenile white shrimp *Penaeus vannamei*. *Boone* 1931. *Aquaculture* 157, 107–115.
- Poole, R.W., 1974. An Introduction to Quantitative Ecology. McGraw-Hill, New York.
- Rencher, A.A., 2002. Method of Multivariate Analysis, 2nd ed. John Wiley & Sons, New York.
- Ruiz-Velazco, J.M.J., Hernández-Llamas, A., Gomez-Muñoz, V.M., Magallon, F.J., 2010. Dynamics of intensive production of shrimp *Litopenaeus vannamei* affected by white spot disease. *Aquaculture* 300, 113–119.
- Wyban, J.A., Lee, C.S., Sato, V.T., Sweeney, J.N., Richards, W.K., 1987. Effect of stocking density on shrimp growth rates in manure-fertilized ponds. *Aquaculture* 61, 23–32.
- Zar, J.H., 2010. Biostatistical Analysis, 5th ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.