

Preengorda del Ostión Americano (*Crassostrea virginica*) en lagunas costeras tropicales en Yucatán, México: modelación de regresión no lineal y relaciones con variables ambientales

Magda E Domínguez-Machín¹, Alfredo Hernández-Llamas^{2*}, Álvaro Hernández-Flores¹, Miguel A Vela-Magaña¹

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historial del artículo:

Recibido 30 de octubre de 2023

Aceptado 15 de julio de 2024

Publicado 15 de agosto de 2024

READ IN ENGLISH:

<https://doi.org/10.7773/cm.v2024.3447>

AUTOR DE CORRESPONDENCIA

* E-mail: ahlhamas04@cibnor.mx

¹ Escuela de Recursos Naturales, Universidad Marista de Mérida, 97300 Mérida, Yucatán, México.

² Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), 23096 La Paz, Baja California Sur, México.

RESUMEN. Se usaron modelos de regresión no lineal para analizar la producción en preengorda de *Crassostrea virginica* en 2 lagunas costeras de Yucatán, México: Celestún (CL) y Río Lagartos (RL). Adicionalmente, se establecieron relaciones entre la producción y las variables ambientales. Las semillas (2.40 ± 0.2 mm) se cultivaron en suspensión de mayo a septiembre 2021 en canastas Nestier durante 122-126 días, hasta que los ostiones alcanzaron 30.00 mm. No hubo diferencias significativas en la altura final (CL: 30.80 ± 0.42 mm; RL: 31.80 ± 0.65 mm; $P = 0.18$) ni en la tasa de crecimiento (CL: 0.23 ± 0.02 mm·d⁻¹; RL: 0.23 ± 0.01 mm·d⁻¹; $P = 0.98$) entre sitios. La supervivencia fue 71.40% en CL y 99.40% en RL. Las curvas de regresión no lineal resultaron estadísticamente satisfactorias para analizar el crecimiento y la supervivencia. La salinidad (CL: 15.23 ppt; RL: 35.02 ppt), la temperatura (CL: 29.64 °C; RL: 31.02 °C), el oxígeno disuelto (CL: 4.50 mg·L⁻¹; RL: 5.04 mg·L⁻¹), el pH (CL: 8.10; RL: 8.34), la clorofila *a* (Cl *a*) (CL: 3.23 mg·m⁻³; RL: 6.85 mg·m⁻³) y los sólidos disueltos totales (CL: 16,101 mg·L⁻¹; RL: 34,838 mg·L⁻¹) fueron superiores en RL ($P < 0.05$). Exceptuando la Cl *a*, las variables fueron más estables en RL ($P < 0.05$). En RL, el crecimiento se relacionó positivamente con la salinidad y el pH. En CL, el crecimiento disminuyó al bajar la salinidad, y la mortalidad disminuyó cuando la salinidad, el oxígeno disuelto y el total de sólidos disueltos se incrementaron y el pH disminuyó. La salinidad fue determinante para la diferencia en producción entre las lagunas. En RL, el crecimiento y la supervivencia fueron aceptables aun con temperaturas y salinidades relativamente elevadas, posiblemente debido a las condiciones estables de cultivo.

Palabras clave: *Crassostrea virginica*, variables ambientales, preengorda, modelos de regresión no lineal, cultivo de ostión.

INTRODUCCIÓN

El Ostión Americano (*Crassostrea virginica*) ha demostrado ser adecuado para su cultivo, principalmente en las aguas costeras de Canadá y los Estados Unidos de América (EE.UU.) (Poirier et al. 2020, Bodenstern et al. 2023). Se han realizado varios estudios sobre el cultivo de *C. virginica*, abordando cuestiones como equipos de cultivo alternativos (Mallet et al. 2013, Thomas et al. 2019, Grizzle et al. 2020) y los efectos de la desecación y las prácticas de volteo (Bodenstern et al. 2021).

En México, el cultivo de *C. virginica* inició en 2010 después de que un laboratorio (Centro Ostrícola Tecnológico de Tabasco) comenzara a operar en el estado de Tabasco con una capacidad de producción de 40 millones (M) de

semillas al mes (com. pers., Tordecillas-Guillén JL 2023). Actualmente, operan 27 granjas en el estado de Tabasco y 12 granjas en el estado de Tamaulipas (CONAPESCA 2022). A pesar de la proximidad del laboratorio a otros estados, como Yucatán, no hay reportes disponibles de acuicultura comercial de ostión en otros estados. Además, los antecedentes sobre el cultivo de *C. virginica* en Yucatán son escasos. Rihani et al. (1988) reportaron los resultados de los primeros ensayos experimentales del cultivo de *C. virginica* utilizando juveniles silvestres de Tabasco. Cabrera-Rodríguez et al. (1997) investigaron la viabilidad del cultivo del ostión en la laguna de Río Lagartos. Vera y Aldana (2000) evaluaron el cultivo de ostión en los canales de suministro de agua de una granja camaronesa.

Acceso abierto

En línea ISSN: 2395-9053

Verificado con Similarity Check impulsado por iThenticate

<https://doi.org/10.7773/cm.v2024.3447>



Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), que permite compartir y adaptar el trabajo, siempre y cuando se dé el crédito apropiado a los autores originales y la fuente, proporcione un enlace a la licencia Creative Commons e indique si se realizaron cambios. Las figuras, tablas y otros elementos del artículo están incluidos en la licencia CC BY 4.0 del artículo, a menos que se indique lo contrario. Debe solicitar permiso al titular de los derechos de autor para utilizar material no cubierto por esta licencia. El título de la revista está protegido por derechos de autor propiedad de la Universidad Autónoma de Baja California, y el título y el logotipo de la revista no están sujetos a esta licencia.

Estudios recientes se han enfocado en la influencia de las variables ambientales sobre el crecimiento y la supervivencia de *C. virginica*. La Peyre et al. (2013) evaluaron el reclutamiento, el crecimiento y la mortalidad a lo largo de un gradiente de salinidad en una zona estuarina en Louisiana, EE.UU. Rybovich et al. (2016) examinaron los efectos de baja salinidad y alta temperatura sobre el crecimiento y la supervivencia. McFarland et al. (2022) evaluaron los límites osmóticos del ostión a temperaturas moderadas y elevadas durante diferentes etapas de su vida. Pocos estudios se han centrado en *C. virginica* durante la etapa de preengorda. Entre estos, Bishop y Hooper (2005) compararon las tasas de crecimiento y de mortalidad de *C. virginica* durante la etapa de preengorda. Poirier et al. (2020) probaron la eficacia de un sistema de cubos rebotantes (bouncing-bucket) para mejorar la resistencia y el grosor de la concha del ostión.

El presente estudio evaluó la viabilidad biotécnica de la producción de *C. virginica* en un sistema en suspensión durante la fase de preengorda en 2 lagunas tropicales en Yucatán, México. Adicionalmente, se analizaron las relaciones entre los parámetros de crecimiento y supervivencia con las condiciones ambientales de las lagunas. Hasta donde tenemos conocimiento, este es el primer estudio que aborda este tema.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitios de estudio

Se utilizaron 2 lagunas costeras tropicales en el estado de Yucatán, México, como hábitas de preengorda: la laguna de Celestún (CL), ubicada en la costa noroeste de la Península de Yucatán, México (20°52'11" N, 90°22'55" W) (Hardage et al. 2022), y Río Lagartos, localizada en la costa norte de la Península de Yucatán (21°36'21" N, 88°09'04" W) (Vega-Cendejas et al. 2004) (Fig. 1).

La laguna de Celestún es un estuario kárstico y poco profundo que contiene piedra caliza y la entrada de agua dulce a través de la descarga de agua subterránea en la laguna varía según el régimen de lluvias (Morelos-Villegas et al. 2018). Río Lagartos es la laguna costera más grande de Yucatán y presenta condiciones hipersalinas (>40 ppt) durante la mayor parte del año (Vega-Cendejas et al. 2004). La región tiene un régimen climático bien definido con 3 estaciones: seca (marzo a mayo), lluviosa (junio a octubre) y ventosa (noviembre a febrero); durante la estación ventosa se presentan vientos fuertes y temperaturas por debajo de los 22 °C (Morelos-Villegas et al. 2018).

Descripción de la preengorda

La fase de preengorda duró 122 días en CL (20 de mayo de 2021-19 de septiembre de 2021) y 126 días en RL (21 de mayo de 2021-24 de septiembre de 2021), durante los cuales los ostiones alcanzaron una altura media de la concha (distancia entre la bisagra y el borde opuesto) de al menos 30 mm. Las semillas de

C. virginica con una altura promedio de 2.4 ± 0.2 mm se obtuvieron del laboratorio comercial Centro Ostrícola Tecnológico de Tabasco. El cultivo se realizó en bandejas tipo Nestier (DM Plast, Jalisco, México). Los ostiones se colocaron en bolsas de malla plástica (55×35 cm, tamaño de malla de 0.8 mm); se colocaron 5,000 individuos por bolsa. Las bolsas se metieron en las bandejas Nestier para formar módulos (3 bandejas apiladas verticalmente por módulo) que se unieron a palangres de 30 m. Las poblaciones iniciales de ostiones fueron de 100,000 (CL) y 50,000 (RL) individuos.

Una vez que alcanzaron una altura de concha >10 mm, los ostiones fueron transferidos a una bolsa plástica más grande (55×55 cm, tamaño de malla de 1.35 mm). Cuando los ostiones obtuvieron una altura de concha > 20 mm, se retiraron de las bolsas y se colocaron directamente en las bandejas, utilizando el 50% de la superficie del fondo hasta el final de los ensayos. Este protocolo aumentó los módulos a un máximo de 42 en CL y 18 en RL. Cada semana se eliminaron los organismos incrustantes de las bolsas y las bandejas frotando un cepillo de mano de cerdas duras.

Recolección de datos y procesamiento

Se seleccionaron muestras de 30 ostiones de manera aleatoria cada 7-14 días para medir la altura de la concha utilizando un calibrador de esfera (505-730 D15TX, Mitutoyo, Kanagawa, Japón) (precisión: 0.02 mm). Los ostiones muertos (identificados como conchas vacías u ostiones abiertos) fueron contados y retirados de las bolsas o bandejas cada semana. La temperatura (°C), la salinidad (ppt), el oxígeno disuelto ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), el pH y los totales sólidos disueltos ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) fueron registrados utilizando un multiparámetro portátil (Pro-Plus, Yellow Spring Instruments, Yellow Springs, EE.UU.). Los datos de la clorofila se obtuvieron de la plataforma Giovanni de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA 2022).

Las tasas diarias de crecimiento y mortalidad se calcularon para los periodos transcurridos entre muestreos sucesivos como las diferencias en altura y supervivencia (%) divididas por el número de días entre los muestreos. Los valores de las variables ambientales correspondientes a las fechas de muestreo sucesivas se promediaron para representar las condiciones predominantes.

Análisis del crecimiento y la supervivencia

Se utilizaron las ecuaciones (1) y (2) para analizar el crecimiento de los ostiones en función del tiempo (t). La ecuación 1 fue la curva propuesta por Estrada-Pérez et al. (2018):

$$h_t = H_i + Bt + C \sin(2\pi t/L + S) \quad , \quad (1)$$

donde h_t es la altura promedio, H_i es la altura inicial promedio, b es la tasa de crecimiento, C es la amplitud de la variación de la altura (desviación) alrededor de la tendencia lineal de crecimiento, L es la longitud del periodo entre las desviaciones

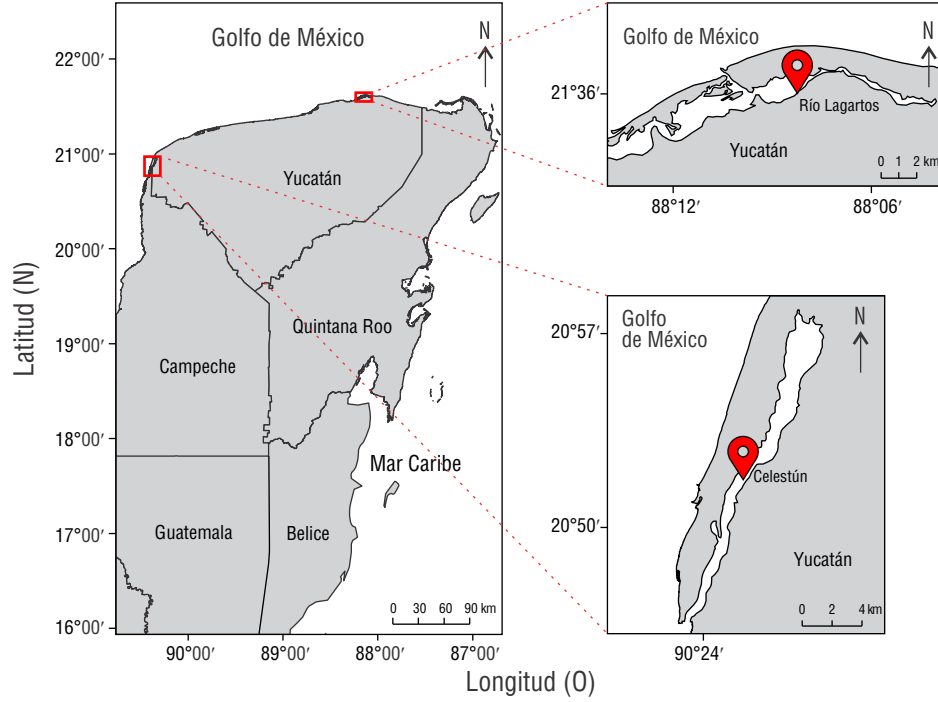


Figura 1. Sitios de estudio en el estado de Yucatán, México. Los ostiones se cultivaron en las lagunas costeras tropicales de Celestún (CL) y Río Lagartos (RL). Los sitios de cultivo están indicados con marcadores rojos (📍).

mínimas o máximas y S es un parámetro de ajuste del tiempo. La ecuación (2) fue propuesta por Serna-Gallo et al. (2014):

$$h_t = H_0 + (H_f - H_0) \left[\frac{1 - k^t}{1 - k^c} \right] \quad , \quad (2)$$

donde h_t es la altura promedio, H_0 es la altura inicial promedio, H_f es la altura promedio final de la etapa de preengorda, k es un parámetro que representa la velocidad a la que la altura cambia de su valor inicial a su valor final, t son las unidades de tiempo transcurrido y c son las unidades de tiempo transcurrido hasta el final del cultivo.

La supervivencia de los ostiones en CL fue analizada como función del tiempo (t), usando el siguiente modelo:

$$S_t = S_i \exp(-A + Bt) \quad , \quad (3)$$

donde S_t es el porcentaje de sobrevivientes al tiempo t , S_i es la supervivencia inicial de la población (i.e., 100%), A es la tasa de mortalidad instantánea inicial y B es la tasa a la que aumenta la tasa de mortalidad instantánea. La mortalidad de los ostiones en RL fue insignificante; por tanto, no fue necesario realizar un análisis estadístico.

VARIABLES AMBIENTALES Y SU RELACIÓN CON LAS TASAS DE CRECIMIENTO Y MORTALIDAD

Se compararon los valores medios de las variables ambientales para evaluar las diferencias en las condiciones ambientales de cultivo entre las lagunas. La estabilidad relativa de las

condiciones ambientales dentro y entre las lagunas se analizó comparando el coeficiente de variación (i.e., relación entre la desviación estándar y la media de la variable). Posteriormente, se realizaron análisis de regresión lineal para evaluar las posibles relaciones entre las variables ambientales y las tasas de crecimiento y mortalidad.

Se estableció una relación entre los coeficientes de variación de la altura de los ostiones (CV_h) y la salinidad (CV_s) en CL:

$$CV_h = CV_0 \exp(-G \cdot CV_s) \quad , \quad (4)$$

donde CV_0 es el coeficiente de variación de la tasa de crecimiento cuando el coeficiente de variación de la salinidad es cero, y G es la tasa instantánea a la que cambia CV_h en función de CV_s .

ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

Las ecuaciones (1), (2), (3) y (4) se estimaron utilizando métodos de ajuste de regresión no lineal. Las ecuaciones (1) y (2) se ajustaron a los datos de altura recolectados en ambas lagunas; el mejor ajuste se determinó utilizando el Criterio de Información de Akaike (AIC). Se utilizaron las pruebas de D'Agostino-Pearson y Shapiro-Wilk para evaluar la normalidad de los residuales de la regresión. También se probaron la falta de ajuste del modelo y la asimetría de los parámetros. La asimetría de los parámetros se midió utilizando el índice de Hougaard (índice h) y se comparó con los valores de

índice recomendados por Ratkowsky (1983). Por lo tanto, los valores absolutos del índice h se clasificaron de la siguiente manera: ideal (<0.10) (casi lineal), adecuado ($0.10-0.25$), notablemente asimétrico ($0.25-1.00$) y considerablemente asimétrico (>1).

Las alturas finales medias de los ostiones de las lagunas se compararon mediante un análisis de varianza (ANDEVA) de una vía, considerando que la diferencia en la duración del cultivo entre los sitios era insignificante (i.e., 3.2%). Se utilizó un ANDEVA de medidas repetidas para comparar los valores de la tasa de crecimiento y las variables ambientales de las lagunas. La normalidad de los datos se evaluó con la prueba de Shapiro-Wilk antes de realizar los análisis. Se utilizó una prueba no paramétrica de Mann-Whitney cuando los datos no estaban distribuidos normalmente. Los coeficientes de variación de las variables ambientales se compararon utilizando el método propuesto por Forkman (2009). *Statistica* v. 6.1 (StatSoft, Inc., Tulsa, EE. UU.), *GraphPad Prism* v. 9.0 (GraphPad Software, San Diego, EE.UU.) y *MedCalc Statistical Software* v. 20.218 (MedCalc Software Ltd., Ostend, Bélgica) se utilizaron para realizar los análisis estadísticos. La significancia se evaluó a $\alpha = 0.05$.

RESULTADOS

La altura final de los ostiones no difirió significativamente entre los sitios (CL: 30.80 ± 0.42 mm; RL: 31.80 ± 0.65 ; $P = 0.18$). La tasa de crecimiento diario tampoco difirió significativamente entre sitios (CL: 0.23 ± 0.02 mm·d⁻¹ [6.98 mm·mes⁻¹]; RL: 0.23 ± 0.01 mm·d⁻¹ [6.99 mm·mes⁻¹]; $P = 0.98$).

Según el AIC, el modelo de Estrada-Pérez et al. (2018) mostró un mejor ajuste al crecimiento observado en los ostiones en CL, mientras que la ecuación de Serna-Gallo et al. (2014) resultó en un mejor ajuste para los datos de RL (Tabla 1). Es importante señalar que el modelo de Estrada-Pérez et al. (2018) mostró un comportamiento errático al ajustar los datos de crecimiento para RL, resultando en valores poco realistas de 130 días para el parámetro L (la duración del periodo entre desviaciones mínimas o máximas de altura), lo cual es más largo que el periodo de preengorda. El comportamiento errático también fue evidente por los valores negativos de la tasa de crecimiento (parámetro B).

La variación en la tasa de crecimiento observada en CL (Fig. 2, Tabla 2) a lo largo de la fase de preengorda fue adecuadamente descrita por el modelo de Estrada-Pérez et al. (2018). El modelo de crecimiento propuesto por Serna-Gallo (2014) describió adecuadamente el crecimiento de los ostiones en RL (Fig. 2, Tabla 2). La supervivencia final de los ostiones fue del 71.45% en CL. En RL, la mortalidad fue insignificante y la supervivencia alcanzó el 99.40%. El modelo de supervivencia (Ec. 3) describió adecuadamente la mortalidad observada en CL (Fig. 3, Tabla 3).

Los valores de las variables ambientales registradas en las lagunas durante la fase de preengorda se muestran en las Figuras 4 y 5. Excepto por el oxígeno disuelto promedio, que no fue significativamente diferente entre los sitios, los valores de las variables ambientales fueron significativamente más altos en RL (Material Suplementario Tabla S1). Los coeficientes de variación entre las variables ambientales muestran que CL fue más inestable en términos de salinidad y sólidos disueltos totales, mientras que la Cl a fue más inestable en RL (Material Suplementario Tabla S1). Cuando se compararon dentro de cada laguna, la salinidad (CL) y Cl a (RL) fueron significativamente más inestables que el resto de las variables, mientras que la temperatura fue la variable más estable en ambas lagunas (Material Suplementario Tabla S2).

No se detectaron relaciones significativas entre la tasa de crecimiento y las variables ambientales en CL. Sin embargo, se identificaron 4 periodos en los que la altura de los ostiones aumentó o se estabilizó, correspondiendo a periodos en los que la salinidad fue relativamente estable (periodos I y III) o decreciente (periodos II y IV), respectivamente (Fig. 6). Los coeficientes de variación durante los periodos se utilizaron para estimar la variabilidad relativa de la altura y la salinidad. Los valores bajos de CV indicaron alta estabilidad, mientras que los valores altos correspondieron a periodos en los que las variables eran inestables (i.e., cuando la altura aumentó o la salinidad disminuyó). Se determinó una relación significativa e inversa entre los valores de CV de ambas variables ajustando la Ec. (4) (Fig. 7). Los resultados del análisis de regresión fueron: $CV_0 = 2.16 \pm 0.61$, $P = 0.07$ y el índice $h = 1.23$; $G = 7.46 \pm 1.47$, $P = 0.04$ y el índice $h = -1.61$ (regresión: $P = 0.01$; normalidad: $P = 0.75$; falta de ajuste: $P > 0.99$). Por lo tanto, el crecimiento de los ostiones se ralentizó a medida que disminuía la salinidad.

Los resultados de los análisis de regresión lineal mostraron que en CL la tasa de mortalidad de los ostiones estaba inversamente relacionada con la salinidad, el oxígeno disuelto y los sólidos disueltos totales y positivamente relacionada con el pH. En contraste, la tasa de crecimiento de los ostiones estaba positivamente relacionada con la salinidad y el pH en

Tabla 1. Rendimiento del ajuste de las ecuaciones (1) y (2) a los datos de crecimiento de los ostiones por sitio de estudio. Los valores más bajos del criterio de información de Akaike (AIC) indican un mejor rendimiento.

Sitio de cultivo	Modelo	CIA
Celestún	Serna Gallo et al. (2014)	-18.47
	Estrada-Pérez et al. (2018)	-22.7
Rio Lagartos	Serna Gallo et al. (2014)	-39.95
	Estrada-Pérez et al. (2018)	-39.15

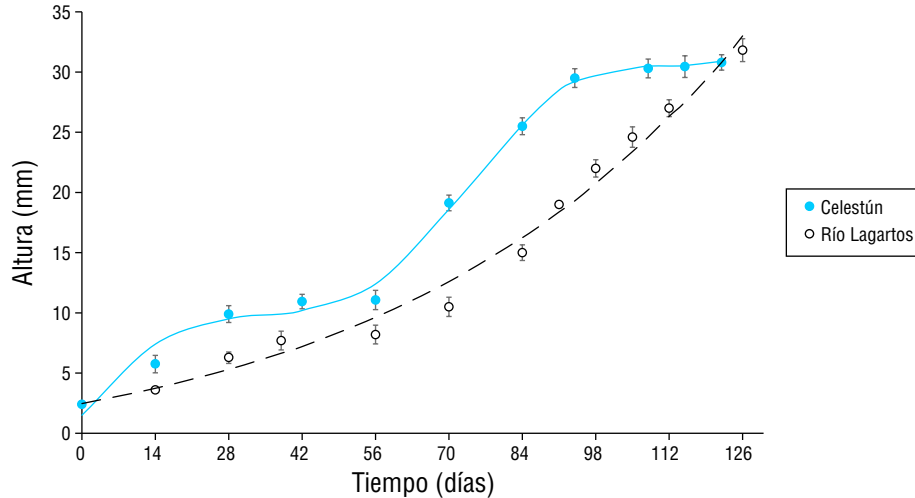


Figura 2. Modelos de crecimiento ajustados usando la Ec. (1) y la Ec. (2) a los datos de altura media de *Crassostrea virginica* cultivada en suspensión durante la etapa de preengorda en las lagunas costeras de Celestún (CL) y Río Lagartos (RL), respectivamente. Las barras verticales indican el error estándar (altura).

Tabla 2. Resultados del análisis de regresión utilizando las Ec. (1) y (2) para el crecimiento en altura y la supervivencia de *Crassostrea virginica* cultivadas en un sistema en suspensión durante la fase de preengorda en las lagunas de Celestún y Río Lagartos, México. SE = error estándar.

Ecuaciones y parámetros	Estimación ± SE	P	Asimetría (índice-h)
Ec. (1)			
H_i	0.48 ± 0.69	0.51	$-8.68E^{-04}$
B	0.27 ± 0.01	$1.30E^{-07}$	0.02
C	3.20 ± 0.51	$7.98E^{-04}$	0.01
L	76.93 ± 3.52	$5.99E^{-07}$	0.19
S	0.32 ± 0.27	0.28	0.08
Ec. (2)			
H_0	2.62 ± 0.79	0.01	-0.06
H_f	34.21 ± 1.69	$1.40E^{-10}$	0.03
k	1.02 ± 0.002	$1.00E^{-10}$	0.06
Ecuación	Regresión (P)	Normalidad (P)	Falta de ajuste(P)
Ec. (1)	$1.80E^{-08}$	0.30	0.91
Ec. (2)	$2.55E^{-11}$	0.26	0.18

RL (Tabla 4). Los valores de las pendientes en las ecuaciones indicaron un cambio en las tasas de crecimiento y mortalidad por unidad de cambio en la variable ambiental correspondiente. Por ejemplo, un aumento (o disminución) de 1 ppt en la salinidad correspondió con un aumento (o disminución) en la tasa de mortalidad diaria en CL de 0.051%.

DISCUSIÓN

Las lagunas costeras analizadas en el presente estudio mostraron diferencias sustanciales en las condiciones ambientales que son relevantes para la producción en preengorda de *C. virginica*. Se observaron diferencias notables en la magnitud, estabilidad relativa y dinámica de las variables ambientales entre las lagunas. La salinidad inestable provocó un patrón de crecimiento oscilante de los ostiones en CL. Al mismo tiempo, la mayor estabilidad general favoreció un crecimiento más constante en RL (Fig. 2). La altura de los ostiones fue mayor en CL durante la mayor parte de la fase de cultivo, aunque al final de la fase de preengorda, la altura media fue similar en ambas lagunas. A pesar de la diferencia en los patrones de crecimiento, las tasas de crecimiento diario y las alturas finales no difirieron significativamente. En contraste, se observó una diferencia sustancial en la supervivencia de los ostiones; las condiciones predominantes en CL fueron más desfavorables que en RL.

Los principales factores que determinaron las condiciones de preengorda de los ostiones fueron los regímenes de intercambio de agua entre las lagunas, el mar y las fuentes de agua subterránea. Celestún es un estuario poco profundo con aportes de agua dulce provenientes de aguas subterráneas y lluvias (Stalker et al. 2014), mientras que RL es un estuario largo e hipersalino (>35 ppt) con mínimos aportes de agua dulce (Vega-Cendejas et al. 2004).

Las referencias publicadas sobre las tasas de crecimiento de *C. virginica* durante la etapa de preengorda son escasas. Bishop y Hooper (2005) utilizaron *upwellers* para estudiar su crecimiento durante la preengorda, lo que permitió estimar una tasa de crecimiento de $6.80 \text{ mm} \cdot \text{mes}^{-1}$. También se ha reportado una tasa de crecimiento de $6.60 \text{ mm} \cdot \text{mes}^{-1}$ en la fase de preengorda utilizando jaulas tipo “australiano” (com. pers. Tordecillas-Guillén JL 2023). Estas estimaciones de la tasa de

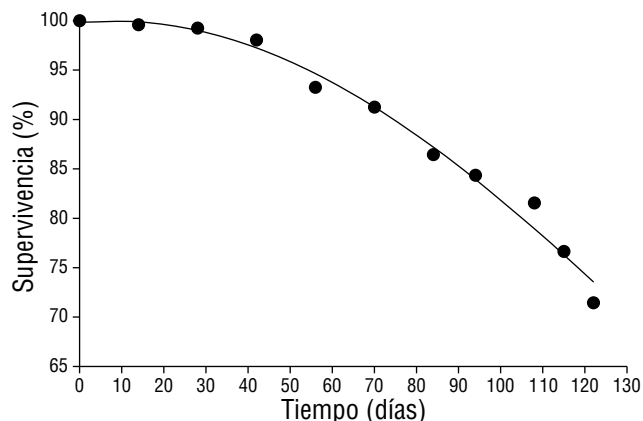


Figura 3. Curva de supervivencia, Ec. (3), ajustada a los datos de porcentaje de supervivencia durante la etapa de preengorda de *Crassostrea virginica* cultivada en un sistema suspendido en la laguna costera de Celestún (CL). No se dispone de estimaciones del error estándar porque los valores de supervivencia corresponden a conteos únicos.

crecimiento son similares a las obtenidas en este estudio ($6.96 \text{ mm} \cdot \text{mes}^{-1}$ y $7.00 \text{ mm} \cdot \text{mes}^{-1}$).

La temperatura óptima del agua para *C. virginica* varía entre 20°C y 32°C (Lowe et al. 2017). En general, los valores de temperatura observados en este estudio fueron adecuados en ambas lagunas, con el valor medio en RL (31.02°C) acercándose al límite máximo tolerable. La información sobre los niveles de salinidad tolerables y óptimos para *C. virginica* es abundante, particularmente en relación con sus poblaciones silvestres. Los límites tolerables oscilan entre 10 ppt y 30 ppt, mientras que los valores entre 15-23 ppt se suelen considerar óptimos (Shumway 1996). En el presente estudio, se observaron niveles de salinidad de 15.23 ppt en CL, acercándose al límite mínimo aceptable. Por el contrario, se observaron salinidades superiores a las consideradas adecuadas en RL (35.02 ppt).

Se recomienda un nivel de oxígeno disuelto superior a $3.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ para *C. virginica* (Baker y Mann 1992, Coxe et al. 2023). Se observaron niveles aceptables de oxígeno disuelto en el presente estudio, excepto en CL, donde se registró una concentración inaceptablemente baja ($2.95 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Fig. 4) al final del ensayo, aunque esta situación se mantuvo por un corto periodo y no condujo a condiciones hipóxicas (i.e., $<2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Coxe et al. 2023). Los valores de pH registrados en el presente estudio (8.10 y 8.30) estuvieron dentro de los límites considerados adecuados para embriones, larvas y semillas de *C. virginica* (i.e., 6.80-8.80 (Calabrese y Davis 1966, Beniash et al. 2010)). Según Snyder et al. (2017), la concentración ideal de clorofila para el cultivo de *C. virginica* es de $3\text{-}10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. De acuerdo con esta clasificación, los valores medios de la concentración de Cl *a* en el presente estudio fueron ideales ($3.23 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ en CL y $6.85 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ en RL). No se encontraron valores recomendados de sólidos disueltos totales para *C. virginica* en la revisión de literatura.

Tabla 3. Resultados del análisis de regresión utilizando la Ec. (3) para la supervivencia de *Crassostrea virginica* cultivadas en un sistema en suspensión durante la fase de preengorda en la laguna de Celestún, México. SE = error estándar.

Parámetros	Estimación \pm SE	<i>P</i>	Asimetría (índice-h)
S_i	99.71 ± 0.01	5.9753E^{-18}	0.71E^{-2}
<i>A</i>	$4.47\text{E}^{-04} \pm 0.40$	0.40	0.81E^{-2}
<i>B</i>	$2.42\text{E}^{-05} \pm 2.48\text{E}^{-04}$	2.48E^{-04}	-0.65E^{-2}
Regresión, $P = 2.00\text{E}^{-15}$; Normalidad, $P = 0.35$; Falta de ajuste $P = 0.52$.			

Los límites de tolerancia a la salinidad de *C. virginica* pueden variar según la magnitud y la duración de las exposiciones a condiciones extremas (McFarland et al. 2013) o cambios bruscos en la salinidad (McFarland et al. 2022). En respuesta a cambios extremos en la salinidad, los ostiones cierran sus valvas y se sellan dentro de la concha para evitar el estrés osmótico (Rybovich et al. 2016); en consecuencia, los ostiones dejan de alimentarse y las tasas de crecimiento disminuyen (Lavaud et al. 2017). En CL, la salinidad cambió abruptamente de 24 ppt a 11 ppt entre el día 28 y el día 56 y de 19 ppt a 5.40 ppt entre el día 98 y el día 122 (Fig. 6). Durante esos periodos, la tasa de crecimiento de los ostiones disminuyó de $0.35 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ a $0.01 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ y de $0.33 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ a $0.03 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$. Como ha sido reportado por otros autores, las disminuciones en el crecimiento observadas en este estudio fueron muy probablemente debidas a una filtración limitada por el cierre de la concha. Esta situación resultó en un patrón en el que la tasa de crecimiento disminuyó durante intervalos relacionados con cambios bruscos en la salinidad. Posteriormente, cuando la salinidad se estabilizó, la tasa de crecimiento aumentó nuevamente. Por lo tanto, las disminuciones y aumentos en la tasa de crecimiento observados en CL pueden atribuirse a periodos sucesivos de estrés y ausencia de estrés asociados con periodos de salinidad inestable y estable, respectivamente.

Varios estudios han indicado que las bajas salinidades afectan negativamente la supervivencia de diversas especies de ostiones. Según Maeda-Martinez et al. (2023), las fluctuaciones ambientales, particularmente la salinidad en el rango de 32 ppt a 13.6 ppt y las altas temperaturas ($>34^\circ\text{C}$), causaron mortalidades en granjas de *Crassostrea corteziensis*. Las bajas salinidades perjudican la tasa de supervivencia de *C. virginica* en cualquier etapa de su vida (La Peyre et al. 2013, Leonhardt et al. 2017). Los efectos sinérgicos de la salinidad y la temperatura son probablemente los más importantes para *C. virginica* (Heilmayer et al. 2008). Se ha demostrado que las bajas salinidades (<15 ppt) y las altas temperaturas del agua ($>30^\circ\text{C}$) aumentan significativamente la mortalidad de los ostiones (McFarland et al. 2022). En concordancia con esos estudios, la mortalidad

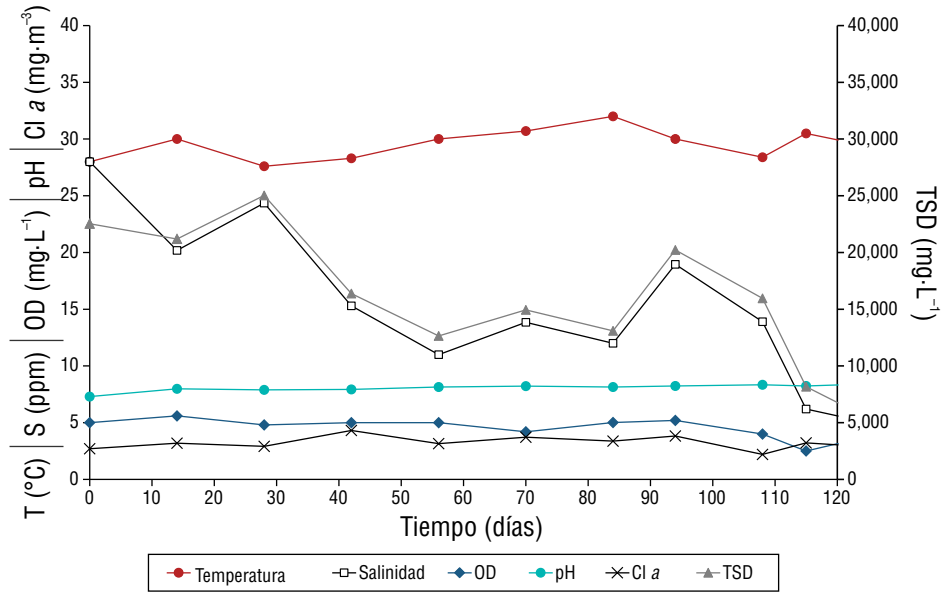


Figura 4. Temperatura (T), salinidad (S), oxígeno disuelto (OD), pH, concentración de clorofila *a* (Cl *a*) y total de sólidos disueltos (TSD), durante la etapa de preengorda de *Crassostrea virginica* cultivada en un sistema suspendido en la laguna costera de Celestún (CL).

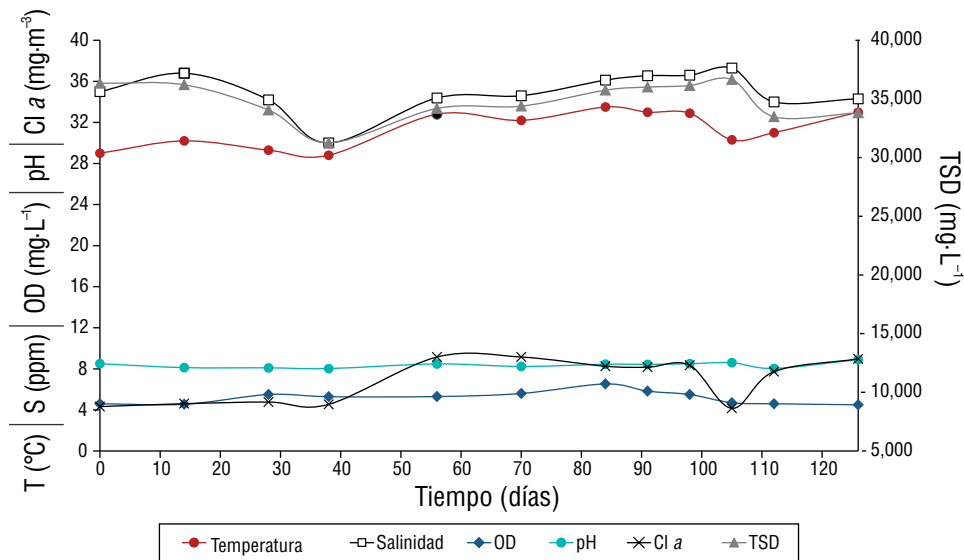


Figura 5. Temperatura (T), salinidad (S), oxígeno disuelto (OD), pH, concentración de clorofila *a* (Cl *a*) y total de sólidos disueltos (TSD), durante la etapa de preengorda de *Crassostrea virginica* cultivada en un sistema suspendido en la laguna costera de Río Lagartos (RL).

en este estudio aumentó en CL después de ~42 días (Fig. 3) cuando la salinidad cayó a 15 ppt y la temperatura estaba cerca de los 30 °C (Fig. 4).

La fase de preengorda en CL se llevó a cabo durante la temporada de lluvias, un periodo dinámico con entradas masivas de agua dulce debido a la precipitación y al agua subterránea que ingresa a la laguna. Según Herrera-Silveira y Ramírez-Ramírez (1998), CL se caracteriza por una baja salinidad (2.10-3.70 ppt) y bajas concentraciones de oxígeno

disuelto (<1 mg·L⁻¹) durante ese periodo, lo que puede explicar las relaciones negativas entre la tasa de mortalidad de los ostiones con la salinidad y el oxígeno disuelto en la laguna. El papel del pH en la mortalidad de los ostiones no está claro, y la relación significativa obtenida para CL puede ser resultado de las correlaciones entre el pH y otras variables ambientales.

Se ha publicado evidencia directa de la capacidad de *C. virginica* para filtrar, ingerir y asimilar bacterias marinas

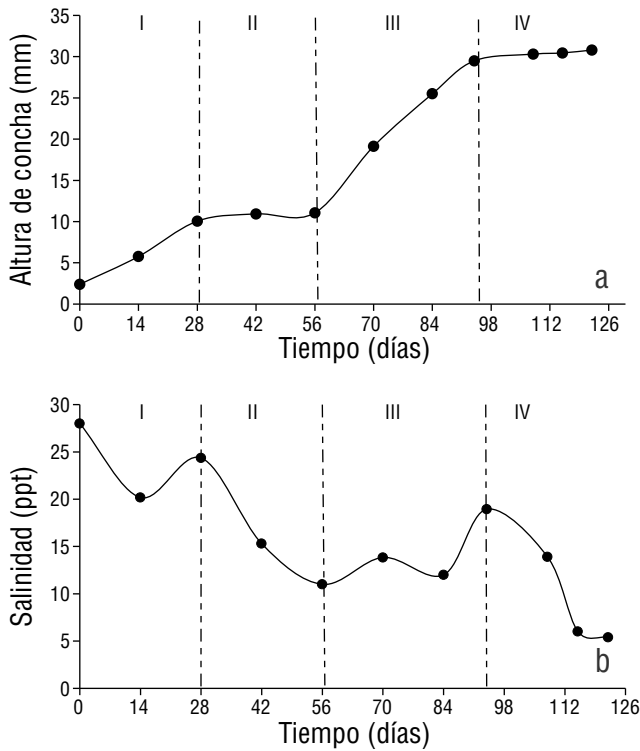


Figura 6. Periodos (indicados con números romanos) en los que el crecimiento de los ostiones aumentó (I y III) o se estabilizó (II y IV), asociados con valores de salinidad estables o inestables (decrecientes), durante la etapa de preengorda de *Crassostrea virginica* en un sistema suspendido en la laguna costera de Celestún (CL).

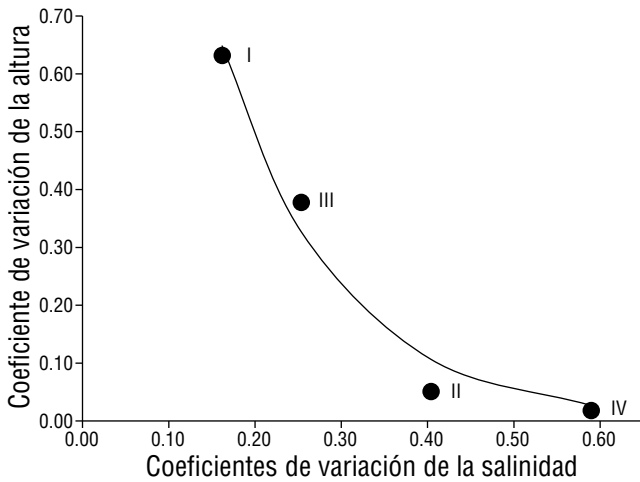


Figura 7. Relación entre los coeficientes de variación de la altura de los ostiones y la salinidad durante la etapa de preengorda de *Crassostrea virginica* cultivada en un sistema suspendido en la laguna costera de Celestún (CL). Los números romanos indican los periodos en los que el crecimiento de los ostiones aumentó (I y III) o se estabilizó (II y IV), asociados con valores de salinidad estables o inestables (decrecientes), respectivamente.

Tabla 4. Ecuaciones de regresión lineal que relacionan la tasa de mortalidad (TM) y la tasa de crecimiento (TC) con variables ambientales. Las abreviaturas son: S = salinidad; OD = oxígeno disuelto; TSD = total de sólidos disueltos.

Sitio de cultivo	Ecuación	P
Celestún	$TM = -0.051 S + 1.107$	0.001
	$TM = -0.386 OD + 1.11$	$3.75E^{-05}$
	$TM = 1.043 pH - 8.11$	0.034
	$TM = -6.08 TSD + 1.31$	$7.97E^{-04}$
Río Lagartos	$TC = 0.065 S - 1.99$	0.045
	$TC = 0.75 pH - 5.95$	0.032

(Crosby et al. 1990). Los detritos y las bacterias son fuentes de alimento para *C. virginica*, aunque también se requieren fitoplancton, nanozooplancton, partículas no celulósicas y materia orgánica disuelta (Landon y Newell 1990). En la presente investigación, la concentración de Cl a fue significativamente mayor en RL que en CL. Sin embargo, las tasas de crecimiento y la mortalidad de los ostiones no mostraron una relación directa con la concentración de Cl a en ninguno de los sitios. Además, no se detectaron diferencias significativas en la altura final de los ostiones y las tasas de crecimiento diarias entre las lagunas al final de la fase de preengorda. Por lo tanto, es probable que la diferencia en la disponibilidad de alimento asociada con Cl a en ambos sitios se compensara con la disponibilidad de otras fuentes de alimento.

Piyathilaka et al. (2012) encontraron una relación positiva entre la tasa de crecimiento de *Crassostrea madrasensis* y los sólidos disueltos totales. Los autores argumentaron que los sólidos disueltos eran indicativos de la abundancia de alimento, ya que los ostiones se alimentan de fitoplancton, detritos del sedimento, bacterias y fitoplancton y zooplancton muertos. No encontramos evidencia de que los sólidos disueltos influyan en el crecimiento de los ostiones. Sin embargo, se observó un posible efecto positivo en la supervivencia en CL, donde un aumento de los sólidos disueltos se asoció con una mejor supervivencia. No obstante, este resultado debe tomarse con cautela, ya que puede existir una correlación positiva entre la salinidad y los sólidos disueltos totales (Boyd 2020, Adjovu et al. 2023). Por lo tanto, los sólidos disueltos totales pueden parecer afectar la supervivencia simplemente porque están correlacionados con la salinidad, siendo esta última la causa real que influye en la supervivencia. En resumen, la baja salinidad, el bajo oxígeno disuelto y posiblemente la baja disponibilidad de alimento en CL podrían aumentar la mortalidad de los ostiones, particularmente al final de la etapa de preengorda.

En RL, las tasas de crecimiento más rápidas estuvieron asociadas con valores altos de temperatura y pH. Los aumentos

de temperatura dentro de los límites aceptables promueven el crecimiento de los ostiones (Lowe et al. 2017), y la acidificación del agua de mar parece afectar a los organismos marinos calcificadores (Clements et al. 2021). Beniash et al. (2010) demostraron que los valores de pH \sim 7.50 inhibieron el crecimiento de la concha y del cuerpo blando de *C. virginica*, en comparación con los organismos de control que crecieron bajo condiciones de pH de \sim 8.20. Por lo tanto, los resultados de crecimiento inferiores obtenidos en RL a pH bajo pueden deberse a un efecto adverso sobre la calcificación debido a las condiciones más ácidas de la laguna.

Según Rybovich et al. (2016), *C. virginica* puede sobrevivir periodos prolongados de baja salinidad (<5 ppt) a bajas temperaturas (<15 °C) pero no a temperaturas elevadas (>25 °C). Por otro lado, Lowe et al. (2017) reportaron los efectos perjudiciales de la alta temperatura (>30 °C) y la baja salinidad (<5 ppt). Sin embargo, los autores también señalaron que la combinación de alta temperatura del agua (>30 °C) y alta salinidad (>15 ppt) resultó en una mortalidad de ostiones aún mayor. En contraste con esos resultados, la salinidad y la temperatura en RL fueron altas (31.02 °C y 35.02 ppt), pero la mortalidad de los ostiones fue insignificante (inferior al 1.0%), y la supervivencia fue mayor que en CL, donde la salinidad fue generalmente más baja. Por lo tanto, incluso cuando las condiciones no son las comúnmente reportadas como adecuadas para la producción de *C. virginica*, la alta estabilidad ambiental (principalmente en la salinidad, como se ve en RL) puede compensar las condiciones de cultivo subóptimas.

Estudios recientes han demostrado que la tolerancia a la hipoxia y la salinidad de *C. virginica* varía entre las poblaciones del Golfo de México. Por ejemplo, Coxe et al. (2023) mostraron que distintas poblaciones podrían estar mejor adaptadas para tolerar periodos de hipoxia durante el verano. Marshall et al. (2021) probaron la tolerancia a la salinidad de progenies de ostiones a partir de reproductores silvestres recolectados de diferentes salinidades medias (7.40-35.50 ppt). Descubrieron que las progenies eran más capaces de tolerar los niveles de salinidad del estuario donde se recolectaron los reproductores correspondientes.

Las semillas utilizadas para este estudio se produjeron a partir de un *stock* de reproductores provenientes de un estuario con una salinidad media de 18 ppt. Posteriormente, las semillas se aclimataron a una salinidad de 24 ppt en el laboratorio. La potencialmente alta plasticidad del *stock* de reproductores puede haber contribuido al buen rendimiento observado a altas salinidades y temperaturas en este estudio, particularmente en RL, aunque se requieren más estudios para evaluar esta posibilidad.

El enfoque de modelación utilizado en el presente estudio nos ayudó a analizar y comprender la dinámica de la producción de ostiones en la fase de preengorda y sus relaciones con las variables ambientales de lagunas notablemente diferentes. Los modelos de regresión no lineal de crecimiento y supervivencia, las ecuaciones (1), (2) y (3), demostraron ser estadísticamente adecuados para describir la altura de la

concha y la supervivencia de los ostiones cultivados en ambas lagunas. Cabe destacar que el modelo utilizado para describir la supervivencia de los ostiones en CL asumió que la tasa de mortalidad aumentaba con el tiempo, teniendo en cuenta así el deterioro de las condiciones ambientales en la laguna a medida que avanzaba la fase de preengorda.

CONCLUSIONES

El presente estudio ha demostrado que la producción en preengorda de *C. virginica* es técnicamente factible en las lagunas costeras tropicales de CL y RL en México. Los resultados indican que, incluso cuando las condiciones ambientales no son óptimas, cultivar ostiones en condiciones relativamente estables (RL) puede ser preferible a cultivarlas en condiciones más inestables (CL). Las investigaciones futuras deberían centrarse en la tolerancia de *C. virginica* a las condiciones estresantes asociadas con las características genéticas y fisiológicas de las poblaciones de ostiones en el sur del Golfo de México y el Mar Caribe. También debería investigarse la viabilidad económica de la producción en preengorda en CL y RL.

Traducido al español por los autores.

DECLARACIONES FINALES

Material Suplementario

El material complementario de este trabajo puede ser descargado de: <https://www.cienciasmarinas.com.mx/index.php/cmarias/article/view/3447/420421097>

Agradecimientos

Los autores están agradecidos con las personas involucradas en el trabajo de campo, especialmente los pescadores y sus esposas en Río Lagartos y Celestún. Todos los autores también agradecen la ayuda del Dr. Babatunde Musa por revisar el manuscrito y de Diana Del Campo por la cartografía. Diana Fischer proporcionó servicios profesionales de edición en inglés.

Financiamiento

Este estudio fue financiado por la Secretaría de Pesca y Acuicultura Sustentables de Yucatán. Se recibió apoyo financiero parcial de la Universidad Marista de Mérida, México. Magda E Domínguez-Machín (CVU 207908) recibió una beca doctoral del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT).

Conflicto de interés

Los autores declaran que no tienen ningún conflicto de interés.

Contribuciones de los autores

Conceptualización: AHLL (principal); Curación de datos: MEDM (principal); Análisis formal: AHLL (principal), MEDM (de apoyo); Adquisición de financiación: MAVM (principal); Investigación: MEDM(principal); Metodología: AHLL (principal), MEDM (de apoyo); Administración de proyectos: MAVM (principal); Recursos: MAVM (principal); *Software*: AHLL (principal), MEDM (soporte); Supervisión: AHF; Validación: AHLL (principal), MEDM (de soporte); Visualización: MEDM (principal); Redacción: borrador original: AHL (principal), MEDM (principal) Redacción: revisión y edición: AHL (principal), MEDM (principal), AHF (de apoyo), MAVM (de apoyo).

Disponibilidad de los datos

Los datos de este estudio no están disponibles.

Uso de herramientas de inteligencia artificial

Los autores no emplearon ninguna herramienta de inteligencia artificial en este trabajo.

REFERENCIAS

- Adjovu E, Stephen H, James D, Ahmad S. 2023. Measurement of total dissolved solids and total suspended solids in water systems: A Review of the Issues, Conventional, and Remote Sensing Techniques. *Remote Sens.* 15(14):3534. <https://doi.org/10.3390/rs15143534>
- Baker SM, Mann R. 1992. Effects of hypoxia and anoxia on larval settlement, juvenile growth, and juvenile survival of the oyster *Crassostrea virginica*. *Biol Bull.* 182(2):265-269. <https://doi.org/10.2307/1542120>
- Beniash E, Ivanina A, Lieb NS, Kurochkin I, Sokolova IM. 2010. Elevated level of carbon dioxide affects metabolism and shell formation in oysters *Crassostrea virginica*. *Mar Ecol Prog Ser.* 419:95-108. <https://doi.org/10.3354/meps08841>
- Bishop MJ, Hooper P. 2005. Flow, stocking density and treatment against *Polydora* spp.: Influences on nursery growth and mortality of the oysters *Crassostrea virginica* and *C. ariakensis*. *Aquaculture.* 246(1-4):251-261. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2005.01.021>
- Bodenstein S, Walton WC, Steury TD. 2021. Effect of farming practices on growth and mortality rates in triploid and diploid eastern oysters *Crassostrea virginica*. *Aquacult Environ Interact.* 13:33-40. <https://doi.org/10.3354/aei00387>
- Bodenstein S, Callam BR, Walton WC, Rikard SF, Tiersch TR, La Peyre JF. 2023. Survival and growth of triploid eastern oysters, *Crassostrea virginica*, produced from wild diploids collected from low-salinity areas. *Aquaculture.* 564:739032. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.739032>
- Boyd CE. 2020. Dissolved Solids. In: Boyd CE (ed.), *Water Quality: An Introduction*. Cham (Switzerland): Springer. p. 83-118. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23335-8_5
- Cabrera-Rodríguez P, Aldana D, Brulé T, Amador E. 1997. Culture of the American oyster, *Crassostrea virginica* (Gmelin 1971) in Rio Lagartos, Yucatán, México. *Aquac Res.* 28(8):611-619. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2109.1997.00902.x>
- Calabrese AF, Davis H. 1966. The pH tolerance of embryos and larvae of *Mercenaria mercenaria* and *Crassostrea virginica*. *Bio Bull.* 131(3):427-436. <https://doi.org/10.2307/1539982>
- Clements JC, Carver CE, Mallet MA, Comeau LA, Mallet AL. 2021. CO₂-induced low pH in an eastern oyster (*Crassostrea virginica*) hatchery positively affects reproductive development and larval survival but negatively affects larval shape and size, with no intergenerational linkages. *ICES J Mar Sci.* 78(1):349-359. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsaa089>
- [CONAPESCA] Comisión Nacional de Pesca y Acuicultura. 2022. Títulos acuícolas otorgados: CONAPESCA; [accessed 2022 Oct 27]. https://acuasesor.conapesca.gob.mx/transparencia_permisos.php
- Coxe N, Casas SM, Marshall DA, La Peyre MK, Kelly MW, La Peyre JF. 2023. Differential hypoxia tolerance of eastern oysters from the northern Gulf of Mexico at elevated temperature. *J Exp Mar Bio Ecol.* 559:151840. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2022.151840>
- Crosby M, Newell R, Langdon C. 1990. Bacterial mediation in the utilization of carbon and nitrogen from detrital complexes by *Crassostrea virginica*. *Limnol Oceanogr.* 35(3):625-639. <https://doi.org/10.4319/LO.1990.35.3.0625>
- Estrada-Pérez N, Hernández-Llamas A, Ruiz-Velazco M. 2018. Stochastic modelling of aquaponic production of tilapia (*Oreochromis niloticus*) with lettuce (*Lactuca sativa*) and cucumber (*Cucumis sativus*). *Aquac Res.* 49(12):3723-3734. <https://doi.org/10.1111/are.13840>
- Forkman J. 2009. Estimator and tests for common coefficients of variation in normal distributions. *Commun Stat-Theory Methods.* 38(2):233-251. <https://dx.doi.org/10.1080/03610920802187448>
- Grizzle R, Ward K, Burdick D, Payne A, Berlinsky D. 2020. Eastern Oyster *Crassostrea virginica* growth and mortality in New Hampshire (USA) using off-bottom farm gear. *N Am J Aquac.* 82(2):132-142. <https://doi.org/10.1002/naaq.10135>
- Hardage K, Street J, Herrera-Silveira JA. 2022. Late Holocene environmental change in Celestún Lagoon, Yucatán, Mexico. *J Paleolimnol.* 67:131-162. <https://doi.org/10.1007/s10933-021-00227-4>
- Heilmayer O, Digialleonardo J, Qian L, Roesijadi G. 2008. Stress tolerance of a subtropical *Crassostrea virginica* population to the combined effects of temperature and salinity. *Estuar Coast Shelf Sci.* 79(1):179-185. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2008.03.022>
- Herrera-Silveira JA, Ramírez-Ramírez J. 1998. Salinity and nutrients in the coastal lagoons of Yucatan, Mexico. *SIL Proc.* 1922-2010. 26(3):1473-1478. <https://doi.org/10.1080/03680770.1995.11900971>
- La Peyre MK, Eberlin BS, Soniat TM, La Peyre JF. 2013. Differences in extreme low salinity timing and duration differentially affect eastern oyster (*Crassostrea virginica*) size class growth and mortality in Breton Sound, LA. *Estuar Coast Shelf Sci.* 135:146-157. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.10.001>
- Langdon C, Newell R. 1990. Utilization of detritus and bacteria as food source by two bivalve suspension-feeders, the oyster *Crassostrea virginica* and the mussel *Geukensia demissa*. *Mar Ecol Prog Ser.* 58:299-310. <https://doi.org/10.3354/meps058299>

- Lavaud R, La Peyre MK, Casas SM, Bacher C, La Peyre JF. 2017. Integrating the effects of salinity on the physiology of the eastern oyster, *Crassostrea virginica*, in the northern Gulf of Mexico through a Dynamic Energy Budget model. *Ecol Model.* 363:221-233.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.09.003>
- Leonhardt JM, Casas S, Supan JE, La Peyre JF. 2017. Stock assessment for eastern oyster seed production and field grow-out in Louisiana. *Aquaculture.* 466:9-19.
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.09.034>
- Lowe MR, Sehlinger T, Soniat TM, La Peyre MK. 2017. Interactive effects of water temperature and salinity on growth and mortality of eastern oysters, *Crassostrea virginica*: a meta-analysis using 40 years of monitoring data. *J Shellfish Res.* 36(3):683-697.
<https://doi.org/10.2983/035.036.0318>
- Maeda-Martínez AN, García-Murillo AG, Espinosa-Chaurand D, Garza-Torres R, García-Morales R. 2023. Growth, survival, and morphometric relationships of *Crassostrea corteziensis* cultivated during the nursery stage in oyster bags at different tidal levels, in Boca de Camichín, Nayarit, Mexico = Crecimiento, supervivencia y relaciones morfométricas de *Crassostrea corteziensis* cultivado en costales ostrícolas durante la etapa de preengorda, a diferentes niveles de marea en Boca de Camichín, Nayarit, México. *Cienc Mar.* 49:3388.
<https://doi.org/10.7773/cm.y2023.3388>
- Mallet A, Carver C, Doiron S, Thériault MH. 2013. Growth performance of eastern oysters *Crassostrea virginica* in Atlantic Canada: effect of the culture gear. *Aquaculture.* 396-399:1-7.
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.02.019>
- Marshall DA, Casas SM, Walton WC, Rikard FS, Palmer TA, Breaux N, La Peyre MK, Beseres J, Kelly M, La Peyre JF. 2021. Divergence in salinity tolerance of northern Gulf of Mexico eastern oysters under field and laboratory exposure. *Conserv Physiol.* 9(1):coab065.
<https://doi.org/10.1093/conphys/coab065>
- McFarland K, Donaghy L, Volety A. 2013. Effect of acute salinity changes on hemolymph osmolality and clearance rate of the non-native mussel, *Perna viridis*, and the native oyster, *Crassostrea virginica*, in Southwest Florida. *Aquat Invasions.* 8(3):299-310.
<http://dx.doi.org/10.3391/ai.2013.8.3.06>
- McFarland K, Vignier J, Standen E, Volety AK. 2022. Synergistic effects of salinity and temperature on the eastern oyster *Crassostrea virginica* throughout the lifespan. *Mar Ecol Prog Ser.* 700:111-124.
<https://doi.org/10.3354/meps14178>
- Morelos-Villegas AD, Condal A, Ardisson PL. 2018. Spatial heterogeneity and seasonal structure of physical factors and benthic species in a tropical coastal lagoon, Celestun, Yucatan Peninsula. *Reg Stud Mar Sci.* 22:136-146.
<https://doi.org/10.1016/j.rsma.2018.06.008>
- [NASA] National Aeronautics and Space Administration. 2022. Giovanni platform: NASA; [accessed 2024 April 25]. <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni>
- Piyathilaka M, Hettiarachchi M, Wanninayake W. 2012. Growth and health status of cultured edible oyster, *Crassostrea madrasensis* (Preston) in the Panadura estuary, Sri Lanka. *J Natn Sci Found Sri Lanka.* 40(3):201-210.
<http://dx.doi.org/10.4038/jnsfr.v40i3.4694>
- Poirier LA, Clements JC, Sonier R, Lanteigne L, Nadeau A, Comeau LA. 2020. Testing the efficacy of bouncing-bucket nursery systems for enhancing shell strength and thickness in on-bottom cultured Eastern oysters (*Crassostrea virginica*). *Aquacult Eng.* 90:102101.
<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2020.102101>
- Ratkowsky DA. 1983. *Non-linear Regression Modeling: A Unified Practical Approach.* New York: Marcel Dekker. 276 p.
- Rihani VA, Torres R, Peraza J, Mendoza I, Domínguez F. 1989. *Información Básica de la Actividad Pesquera en Yucatán, 1988.* First edition. México: Gobierno del Estado de Yucatán. 59 p.
- Rybovich M, La Peyre MK, Hall SG, La Peyre JF. 2016. Increased temperatures combined with lowered salinities differentially impact oyster size class growth and mortality. *J Shellfish Res.* 35(1):101-113.
<https://doi.org/10.2983/035.035.0112>
- Serna-Gallo I, Ruiz-Velazco MJM, Acosta-Salmón H, Peña-Messina E, Torres-Zepeda G, Saucedo PE. 2014. Growth and reproduction patterns of the winged pearl oyster, *Pteria sterna*, cultivated in tropical environments of Mexico: Implications for pearl farming = Patrones de crecimiento y reproducción de la concha nácar, *Pteria sterna*, cultivada en un ambiente tropical de México: Implicaciones para el cultivo de perlas. *Cienc Mar.* 40(2):75-88.
<https://doi.org/10.7773/cm.v40i2.2393>
- Shumway SE. 1996. Natural environmental factors. In: Kennedy VS, Newell RIE, Eble AF (eds.), *The Eastern Oyster, Crassostrea virginica.* College Park (USA): Maryland Sea Grant College. p. 467-513.
- Snyder J, Boss E, Weatherbee R, Thomas AC, Brady D, Newell C. 2017. Oyster aquaculture site selection using Landsat 8-derived sea surface temperature, turbidity, and chlorophyll *a*. *Front Mar Sci.* 4:190.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00190>
- Stalker JC, Price RM, Rivera-Monroy VH, Herrera-Silveira J, Morales-Ojeda S, Benítez JA, Parra-Parra D. 2014. Hydrologic dynamics of a subtropical estuary using geochemical tracers, Celestún, Yucatan, Mexico. *Est Coast.* 37:1376-1387.
<https://doi.org/10.1007/s12237-014-9778-5>
- Thomas L, Allen SK, Plough LV. 2019. The effect of aquaculture gear on the growth and shape of the oyster *Crassostrea virginica* during a “finishing period” in Chesapeake Bay, USA. *Aquaculture.* 508:1-9.
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.03.061>
- Vega-Cendejas MaE, Hernández M. 2004. Fish community structure and dynamics in a coastal hypersaline lagoon: Rio Lagartos, Yucatán, Mexico. *Estuar Coast Shelf Sci.* 60(2):285-299.
<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2004.01.005>
- Vera DA, Aldana DA. 2000. Crecimiento y sobre vivencia de semillas del ostión: *Crassostrea virginica* en una granja camaronícola en Yucatán, México. *Rev Biol Trop.* 48:1-17.