

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS



MEJORANDO EL CRECIMIENTO DEL ABULÓN ROJO *Haliotis*
rufescens AL CO-CULTIVARLO CON PEPINO DE MAR *Apostichopus*
parvimensis

TESIS

QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS
PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFÍA COSTERA

PRESENTA

JEREMIE LOUIS NATHAN BAUER

Ensenada, Baja California, México, junio de 2019

Resumen

El stock de abulón en México se encuentra deteriorado y está alcanzando su nivel más bajo en las últimas décadas. De ahí la necesidad de mejorar las alternativas de biotecnología para complementar la pesquería y continuar satisfaciendo las demandas del mercado con un esquema sostenible. La acuicultura es una de las opciones de gran potencial que en la actualidad suministra 95% del abulón consumido a nivel mundial. Una forma de mejorar los cultivos de abulón es la acuicultura multitrófica integrada (AMTI). En este trabajo de investigación, desarrollamos un sistema experimental de acuicultura multitrófica con un herbívoro (abulón rojo, *Haliotis rufescens*) y un detritívoro (pepino de mar, *Apostichopus parvimensis*). Este trabajo se diseñó para: 1) Identificar si hay una diferencia en el crecimiento total de abulón en la longitud de la concha con diferentes densidades de pepinos de mar; 2) ¿Cuál es la tasa óptima de pepino de mar y abulón para aumentar la productividad del sistema y 3) ¿Cuál es la dinámica de crecimiento del abulón en este sistema? Los resultados indican que los juveniles de abulón tienen un crecimiento acelerado de 16%, cuando se cultivan en presencia de una densidad media de pepino de mar. Este trabajo muestra el valor potencial del co-cultivo para entender la sinergia que surge de la producción de dos o más especies en el mismo sistema acuícola. Este ejemplo de innovación puede ser relevante para los futuros planes de manejo sostenibles de estas y otras especies de importancia comercial.

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS
POSGRADO EN OCEANOGRAFIA COSTERA

MEJORANDO EL CRECIMIENTO DEL ABULÓN ROJO *Haliotis rufescens* AL CO-CULTIVARLO CON PEPINO DE MAR *Apostichopus parvimensis*

TESIS

QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA
OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

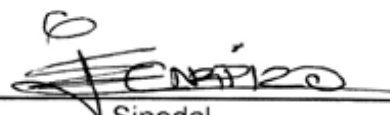
Presenta


JEREMIE LOUIS NATHAN BAUER

Aprobada por:


Rodrigo Beas Luna
Director de tesis


Julio Lopez Salazar
Co-Director


Sinodal


Charles Koch
Sinodal

Sinodal

Dedicatoria

“Cuán inadecuado es llamar Tierra a este planeta cuando es claramente océano”. Arthur C. Clarke

A mis padres, **Sylvie** y **Stephane** por apoyarme incondicionalmente y acompañarme en cada etapa y decisión importante de mi vida.

A mis hermanitos, **Leo** por acompañarme en este sueño de ser Biólogo Marino y a **Elie** por compartir conmigo el placer de vivir la vida.

Al cambio generacional que está viviendo la academia en México con todos los beneficios y desarreglos que esto conlleva.

Agradecimientos

A la Comisión Nacional de Ciencia y Tecnología (**CONACyT**) por la beca otorgada para la realización de los estudios de maestría en Ciencias en Oceanografía Costera.

A la **UABC** y **Facultad de Ciencias Marinas** por el apoyo en este Postgrado.

A los miembros de mi comité de tesis: **Rodrigo, Julio, Eugenio** y **Charlie** por su confianza, dedicación, horas de sueño que les debo y cervezas invitadas para aguantar el postgrado.

A **Noe** por prestarme los abulones para mi investigación.

A **MExCAL** por los buenos momentos, incontables buceos, aventuras, risas, fiestas y críticas que hemos vivido y también por las que nos faltan.

A **Dani** por aguantarnos, ayudarnos y regañarnos.

A **Angélica** y **Lorena** por su inmensurable ayuda desde mi llegada a la Facultad.

Al **Pistian** por las anécdotas compartidas.

A **los buenos profesores** que durante la vida me transmitieron parte de su conocimiento y a **los malos profesores** por enseñarme lo que no quiero ser.

Tabla de contenido

Resumen.....	II
Introducción	1
<i>Pesquería de abulón en México</i>	1
<i>Acuicultura de abulón</i>	3
<i>Acuicultura de abulón en México</i>	4
Antecedentes.....	7
Justificación	11
Objetivo General	12
Objetivos específicos	12
Materiales y Métodos	13
Resultados	21
Discusión	32
Conclusiones	34
Literatura citada	35

Índice de tablas

Tabla I. Tipos y sistemas de cultivos, promedios de longitudes de concha y pesos finales, Crecimiento y supervivencia en experimentos de policultura con abulón.....	10
Tabla II. Peso individual de <i>A. parvimensis</i> incorporados en los tanques de abulón.	16
Tabla III. Crecimiento total (mm), promedio del incremento diario en longitud de concha (IDLC, μm) y la tasa específica de crecimiento promedio (TEC, $\% \text{d}^{-1}$) de los abulones rojos en los tres tratamientos durante los 120 días de experimento.	24
Tabla IV. Crecimiento total (g), incremento diario en peso corporal (g) promedio y tasa específica de crecimiento ($\% \text{d}^{-1}$) promedio de <i>A. parvimensis</i> en los dos tratamientos durante los 120 días de experimentación.	28

Índice de figuras

Figura 1. Serie de tiempo 1940-2000 de las capturas totales (toneladas) de abulón en México. Modificada de: Morales-Bojórquez <i>et al.</i> (2008).....	2
Figura 2. Producción mundial de abulón en toneladas métricas, en color negro la producción de pesquerías y en color gris la producción acuícola. Modificado de Gordon y Cook (2013)	3
Figura 3. Esfuerzos globales de acuicultura multitrófica con pepino de mar. Modificada de: Zamora <i>et al.</i> (2016).	6
Figura 4. Diseño del acuario de 40 litros con 120 abulones rojos y dos refugios de PVC dentro de una malla de plástico.	14
Figura 5. Diseño experimental de los mesocosmos.	15
Figura 6. Abulones rojos <i>H. rufescens</i> sobre la cuadrícula plastificada para analizar la longitud de concha.	18
Figura 7. Longitud de concha promedio de <i>H. rufescens</i> (mm) en los tres tratamientos durante los cuatro meses de experimentación.	22
Figura 8. Crecimiento total (mm) de los abulones rojos en los diferentes tratamientos durante los 120 días de experimento.	23
Figura 9. Incremento diario en longitud de concha (IDLC, mm) de <i>H. rufescens</i> en los tres tratamientos durante los cuatro meses de experimentación.	25
Figura 10. Tasa específica de crecimiento (TEC, % d ⁻¹) de <i>H. rufescens</i> en los tres tratamientos durante los cuatro meses de experimentación.	26
Figura 11. Peso corporal de <i>A. parvimensis</i> (g) en los dos tratamientos durante los cuatro meses de experimentación.	27
Figura 12. Incremento diario en peso corporal (IDPC, g) de <i>A. parvimensis</i> en los dos tratamientos durante los cuatro meses de experimentación.	29
Figura 13. Promedio mensual de temperatura (°C) del sistema durante los cuatro meses de experimento.	31

Introducción

El abulón es un organismo de gran importancia comercial y globalmente sus pesquerías son un clásico ejemplo de sobrepesca (Munguía-vega *et al.*, 2015). Los desembarcos mundiales de abulón han disminuido gradualmente de 20,000 toneladas métricas (tm) en 1970 a 6,500 tm en 2015 (Cook, 2016). La sobreexplotación, captura ilegal, enfermedades y degradación de hábitat contribuyeron a este declive. La mayoría de las pesquerías han colapsado y no logran su recuperación en décadas, un ejemplo de ello es la de USA, cerrada desde 1996 (Rogers-Bennet *et al.*, 2004). Es de suma importancia realizar un buen manejo de las pocas pesquerías existentes alrededor del mundo para poder seguir aprovechando de forma sostenible este organismo de gran valor.

Pesquería de abulón en México

La pesquería de abulón en México no es la excepción. En la costa Pacífico de la Península de Baja California las poblaciones de abulón han sufrido ciclos de colapso atribuidos a sobrepesca y eventos climáticos, ENSO (Morales-Bojórquez *et al.*, 2008) e hipoxia (Micheli *et al.*, 2012). Sin embargo, el abulón sigue sosteniendo una economía importante en la zona (Guzmán del Prío *et al.*, 2013). La mayor proporción del aprovechamiento del abulón en el Pacífico Norte Mexicano (PNM) ha sido por sociedades cooperativas de pescadores (McCay *et al.*, 2014), las cuales poseen cuotas y permisos para la explotación de estos recursos. Estas concesiones son otorgadas por decenas de años por el Instituto Nacional de Pesca (INAPESCA; Ponce-Díaz *et al.*, 1998; Guzmán del Prío *et al.*, 2013).

La pesquería inició formalmente en 1946 con un desembarque de 3400 toneladas (Morales-Bojórquez *et al.*, 2008). Las capturas incrementaron hasta 1952 con el máximo desembarque registrado para esta pesquería de 6000 toneladas en tan solo un año. De 1956 a 1973 la pesquería sufrió un periodo de máxima explotación aparentemente estable con un promedio de 3000 toneladas anuales. Sin embargo, a partir de 1975 el colapso es evidente, con un decremento serio en los desembarques, obteniendo para el año 2000 tan solo 200 toneladas (Fig. 1) (Guzmán del Prío, 1989; Morales-Bojórquez *et al.*, 2008).



Figura 1. Serie de tiempo 1940-2000 de las capturas totales (toneladas) de abulón en México. Modificada de: Morales-Bojórquez *et al.* (2008)

Actualmente, la producción pesquera de abulón en México fluctúa las 300 toneladas (Cook, 2018). Estos niveles de producción tan bajos en la historia de explotación de este recurso, exigen alternativas de producción complementarios al aprovechamiento pesquero. La

acuicultura es una actividad de gran potencial, para continuar aprovechando estos organismos de gran valor con un esquema sostenible. Necesitamos realizar experimentos innovadores para desarrollar tecnología acuícola aplicable para la región.

Acuicultura de abulón

La producción mundial de abulón ha cambiado drásticamente de la pesca al cultivo (FAO, 2016). En la actualidad, 95% del abulón consumido globalmente proviene de la acuicultura y su producción ha incrementado 659% en los últimos 10 años, de 24 400 toneladas en 2006 a 160 687 toneladas en 2016/2017 (Gordon y Cook, 2013; FAO, 2017; Cook, 2018).

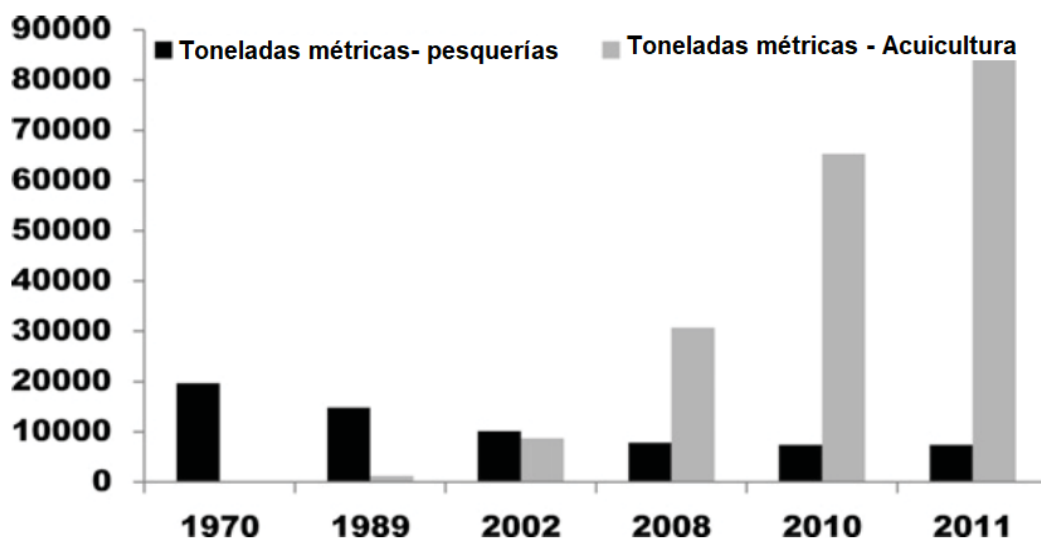


Figura 2. Producción mundial de abulón en toneladas métricas, en color negro la producción de pesquerías y en color gris la producción acuícola. Modificado de Gordon y Cook (2013)

China es sin duda el mayor productor con 139 697 toneladas y en segundo lugar Corea con 16 042 toneladas (Cook, 2018). Con ello, los países asiáticos son responsables del 95% de la producción mundial de abulón. Esta información demuestra el poder de mercado de los países asiáticos siendo los mayores productores a nivel global, pero a su vez, los mayores consumidores.

Acuicultura de abulón en México

En la actualidad, México produce alrededor de 48 toneladas de abulón cultivado (Cook, 2018), en su mayoría abulón rojo *Haliotis rufescens* y en menor cantidad abulón azul *H. fulgens*. La acuicultura de abulón en México se encuentra en desarrollo debido a que las poblaciones naturales aun sostienen una pesquería relativamente redituable. Aunado a esto, existe poca inversión privada para desarrollar esta actividad. Por ejemplo, solamente dos granjas están cultivando abulón en la región de Ensenada, Baja California (Díaz *et al.*, 2000). Sin embargo, las cooperativas pesqueras están conscientes del deterioro de las poblaciones naturales y están conscientes que tienen que explorar su cultivo como actividad complementaria a la pesca. Con todo esto se puede inferir que impulsar mayor esfuerzo acuícola puede llegar a reducir la incertidumbre sobre el futuro de este recurso en la región. Por lo tanto, es importante invertir energía y recursos al estudio y desarrollo de innovación en acuicultura para esta y otras especies.

Una opción con gran potencial para innovar los cultivos de abulón es la acuicultura multitrófica integrada (AMTI). Fundamentada en cultivar múltiples especies con nivel trófico complementario, en proximidad uno de otro para lograr que los nutrientes se reciclen dentro del sistema (Sadeghi-Nassaj *et al.*, 2018). La AMTI ha sido propuesta por académicos

y sector industrial como una actividad acuícola con potencial de alcanzar la meta de crecimiento económico acompañado de sostenibilidad ambiental (Chopin *et al.*, 2001). Esto se logra con la inclusión de especies capaces de aprovechar el exceso de nutrientes dentro del sistema, pero que también tengan un valor comercial.

Para los cultivos de abulón un organismo compatible puede ser el pepino de mar (Kang *et al.*, 2003). Con sus hábitos detritívoros, el pepino de mar transforma los desechos del abulón en biomasa de valor comercial y a la vez mejora la calidad de agua del cultivo (Yingst, 1976; Gao *et al.*, 2019). Lo anterior hace del pepino de mar un organismo clave para la AMTI (Yuan *et al.*, 2015; Zamora *et al.*, 2016).

La integración de pepino de mar con otras especies está registrada en China desde 1980, donde *Apostichopus japonicus* era añadido a cultivos de mejillones filtradores *Chlamys farreri* (Zhang *et al.*, 1990). Actualmente, esta práctica es usada en cultivos de peces (Yu *et al.*, 2014), mejillones (Slater y Carton, 2009), abulones (Kang *et al.*, 2003; Gao *et al.*, 2018), camarones (Shun *et al.*, 2016), ostras (Paltzat *et al.*, 2008) y otros invertebrados (Fig. 3). Por lo tanto, cultivar abulones junto con pepinos de mar es una estrategia con grandes beneficios potenciales.

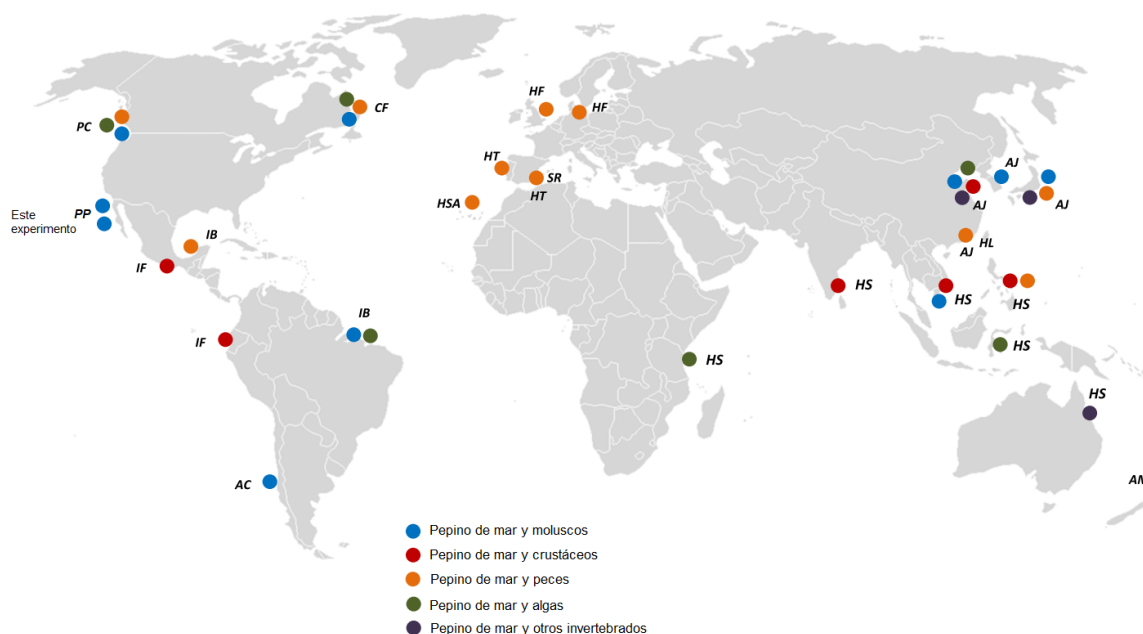


Figura 3. Esfuerzos globales de acuicultura multitrófica con pepino de mar. AC, *Athyonidium chilensis*; AJ, *Apostichopus japonicus*; AM, *Australostichopus mollis*; CF, *Cucumaria frondosa*; HF, *Holothuria forskali*; HL, *Holothuria leucospilota*; HSA, *Holothuria sanctori*; HS, *Holothuria scabra*; HT, *Holothuria tubulosa*; IB, *Isostichopus badionatus*; IF, *Isostichopus fuscus*; PC, *Parastichopus californicus*; PP, *Apostichopus parvimensis*; SR, *Stichopus regalis*. Modificada de: Zamora *et al.* (2016)

La acuicultura de la especie templada de pepino de mar *Apostichopus parvimensis* todavía no se realiza en México, ni se cuenta con información necesaria para desarrollarla. Solamente existen pocos estudios como el de Vela-Gallo *et al.* (*In prep*) el cual describe el desarrollo embrionario de esta especie y analiza su potencial para acuicultura. Considerando lo anterior, el cultivo de este pepino de mar es un área de oportunidad que se tiene que explorar ya que es de gran importancia desarrollar tecnologías que permitan su aprovechamiento acuícola.

El pepino de mar *A. parvimensis* comparte área de distribución natural con los abulones en arrecifes templados en México, haciendo muy atractivo su co-cultivo. Estas dos especies comparten preferencias termales y esto es un factor clave para incluirlas en AMTI (Ren, 2017). La preferencia termal del abulón rojo *H. rufescens* es de 18.8 ± 2.1 °C y su temperatura óptima de crecimiento es 18.4 °C (Díaz *et al.*, 2000). Para *A. parvimensis* la temperatura óptima de crecimiento es de 18°C (Vela-Gallo *et al.*, *in prep*). Por sus preferencias térmicas y porque sus niveles tróficos son complementarios, el abulón rojo *H. rufescens* y el pepino de mar *A. parvimensis* son excelentes candidatos para un co-cultivo.

Antecedentes

En este apartado se realiza un recopilado de la información disponible sobre co-cultivos de abulón y pepino de mar. La mayor parte de estos trabajos son con las especies de abulón y pepino de mar de Asia. Se comparan los crecimientos totales, los incrementos diarios y las tasas específicas tanto para abulón como para pepino de mar.

Abulón y pepino de mar

Kang *et al.* (2003) desarrollaron un sistema de co-cultivo con juveniles de abulón *Haliotis discus hannai* (13.32 ± 2.4 mm) y pepino de mar *Apostichopus japonicus* (5.0 ± 1.2 g) en sistemas estáticos por 90 días. El experimento constó de tres condiciones diferentes, (1) abulón + pepino de mar + sedimento. (2) Abulón + pepino de mar, pero sin sedimento y (3) solamente abulón (control). Los niveles de amonio nitrogenado fueron menores en los grupos co-cultivados que en el control. Los abulones en co-cultivo tuvieron significativamente

mayor crecimiento que el control (longitud de concha, ANOVA, $p < 0.05$) y una mejor tasa de supervivencia. Este experimento muestra el beneficio significativo de cultivar este tipo de organismos juntos.

Qi *et al.* (2013) integran pepino de mar (*A. japonicus*) a un maricultivo de abulón (*H. discus hannai* Ino). Analizando la supervivencia y crecimiento para las proporciones de tres abulones por pepino (100% supervivencia, 35 μm por día para el abulón y 0.065 ± 0.006 g por día para *A. japonicus*) y 6:1 (mismo resultado que en el grupo 3:1), manifestando la diversificación del cultivo sin necesidad de inversión adicional.

Kim *et al.* (2014) comparan dos métodos de cultivo multitrófico por siete meses en tanques de abulón *H. discus hannai* y pepino de mar *A. japonicus*, una basada en racas y otra en tubos de PVC, demostrando que el sistema de racas es más efectivo, con una tasa específica de crecimiento de 0.40% en abulones. Concluyen que el pepino de mar puede sobrevivir en los biodepósitos del abulón y ser cultivados en el mismo espacio en contacto directo.

Gao *et al.* (2018) describen el presupuesto de nitrógeno (N) y fósforo (P) en un policultivo de abulón *H. discuss hannai* y pepino de mar *A. japonicus* en un sistema de recirculación. Comparan durante 90 días diferentes densidades del policultivo, abulones a 400 individuos m^{-2} en monocultivo (control) y abulones a 400 ind m^{-2} con pepino de mar a 10 ind m^{-2} (AS1) y 20 ind m^{-2} (AS2). Los autores concluyen que incorporar pepino de mar al cultivo de abulones en densidad de 10 ind m^{-2} alivia la carga orgánica del sistema y mejora la tasa de utilización N/P. Estos beneficios ecológicos optimizan la producción económica del sistema.

Bauer *et al.* (2019) comparan durante tres meses el crecimiento de abulón azul *H. fulgens* con presencia de dos diferentes densidades de pepino de mar *A. parvimensis*, una densidad media (MD, 2:1 g abulón: pepino de mar) y una densidad alta (HD, 1:1 g A:P). Los autores obtienen un crecimiento acelerado de 29% en los juveniles de abulón azul en presencia de la MD de pepino de mar en comparación con el control sin la presencia de *A. parvimensis* y 16% más que en el tratamiento de HD comparado con el control.

Tabla I. Tipos y sistemas de cultivos, promedios de longitudes de concha y pesos finales, Crecimiento y supervivencia en experimentos de policultura con abulón. Ab= abulón, P= pepino de mar, TEC= tasa específica de crecimiento, ID= Incremento diario, S=sedimento, ID= incremento diario, * los valores pertenecen al organismo resaltado en negritas.

Ab + Pep	Coordenadas y área de estudio	Tipo de cultivo	Sistema y tiempo	Organismos	Talla inicial	Talla final	TEC (% d ⁻¹)	ID (μm d ⁻¹) (g d ⁻¹)	Observaciones
Kang <i>et al.</i> 2003	Lat: 34.61717 6 Lon: 127.7216 95 Dolsan, Jeollanam-do, Corea del Sur	Laboratorio Tanques estáticos	Control Ab Tanque Ab + P Tanque Ab+P+S por 90 días	<i>Haliotis discus hannai</i> <i>Apostichopus japonicus</i>	Ab= 13.32 ± 2.40 mm Pep= 5. 0 ± 1.2 g	Ab= 16.19 ± 0.43mm Ab + Pep= 19.30 ± 0.27 mm Pep + Ab= 15.21 ± 1.66 g Ab + Pep + S= 19.71 ± 0.38 mm Pep + Ab + S= 18.35 ± 0.63 g	0.22 0.41 1.23 0.43 1.44	31 μm 66 μm 1.13g 71 μm 1.48 g	Reducción en niveles de nitrógeno inorgánico en el co-cultivo.
Qi <i>et al.</i> 2013	Lat: 37.01- 37.09 Lon: 122.24- 122.35 Sanggou bay, China	Maricultura	dentro de cajas suspendidas en líneas por un año	<i>Haliotis discus hannai</i> <i>Apostichopus japonicus</i>	Ab= 75.98 ± 2.22 mm 62.43 ± 2.18 g Pep= 25.3 ± 2.68 g	Ab:Pep=3:1=88.08 ± 5.10 mm; 103.00±10.16 g Ab:Pep=6:1=88.22 ± 4.32 mm; 101.26±8.64 g Pep:Ab=1:3=47.88 ± 6.22 g Pep:Ab=1:6=48.07 ± 4.38 g	0.12 ± 0.008 0.16 ± 0.009 0.12 ± 0. 013 0.16 ± 0.012 0.18±0.009 0.18±0.013	33 μm 34 μm 0.61 g 0.62 g	Incremento en el lucro de aproximadament e 35.4% con el co-cultivo.
Kim <i>et al.</i> 2014	Lat: 34.62635 Lon: 127.7152 Gamak Bay, Corea del Sur	Laboratorio Tanques de 36 t con flujo continuo	Cajas con Tubos (CT) y Cajas con Racas (CR) Siete meses	<i>Haliotis discus hannai</i> <i>Apostichopus japonicus</i>	Ab= 28.80 ± 1.53 mm 2.43 ± 0.45 g Pep (CR)= 3.37 ± 1.31 g (CT)= 3.61 ± 1.33 g	Ab (CR)= 34.66 ± 2.20 mm 4.74 ± 0.82 g Ab (CT)= 35.69 ± 2.78 mm 5.18 ± 1.09 g Pep (CR)= 7.50 ± 1.16 g Pep (CT)= 1.40 ± 0.89 g	0.33 ± 0.19 0.37 ± 0.34 0.40 ± 0.15 -0.47 ± 0.17	27 μm 32 μm 0.19 g -0.11 g	Juveniles de pepino de mar aprovechan biodepósitos de abulón y su co- cultivo es posible.
Bauer <i>et al.</i> , 2019	Lat: 27.85565 8 Lon: 115.171 899 Isla Natividad B.C.S. México	Laboratorio Tanques de 1200 litros con sistema abierto de flujo continuo	4500 abulones por tanque MD: 2:1 g AB: P HD: 1:1 g AB: P Control: 0 Pep 90 días	<i>Haliotis fulgens</i> <i>Apostichopus parvimensis</i>	Tanque MD: Ab= 10.31 ± 1.56 mm Pep= 258.85 ± 34.11 g Tanque HD: Ab= 10.35 ± 1.57 mm Pep= 240 ± 21.22 g Tanque Control: Ab= 11.33 ± 1.73	Tanque MD: Ab= 18.54 ± 2.36 mm Pep= 253.43 ± 46.34 g Tanque HD: Ab= 17.09 ± 2.3 mm Pep= 214.38 ± 50.69 g Tanque Control: Ab= 17.18 ± 2.51 mm	0.67 0.18 0.57 0.02 0.47	93 μm 0.48 g 77 μm 0.05 g 66 μm	Juveniles de abulón azul crecieron 29% más en presencia de la densidad media de <i>A. parvimensis</i> .
Este estudio	Lat: 31.807560 Lon: 116.795643 Ensenada, B.C. México	Laboratorio Mesocosmos de 20 litros con sistema abierto de flujo continuo	120 abulones por mesocosmos MD: 2:1 g AB: P HD: 4:1 g AB: P Control: 0 P 120 días	<i>Haliotis rufescens</i> <i>Apostichopus parvimensis</i>	Tanque MD: Ab= 26.35 ± 0.28 mm Pep= g Tanque LD: Ab= 27.32 ± 0.49 mm Pep= g Tanque Control: Ab= 26.56 ± 0.28 mm	Tanque MD: Ab= 32.75 ± 0.33 mm Pep= g Tanque LD: Ab= 32.61 ± 0.41 mm Pep= g Tanque Control: Ab= 31.92 ± 0.71 mm	0.18 ± 0.03 -0.15 ± 0.32 0.15 ± 0.04 -0.05 ± 0.45 0.15 ± 0.09	53 μm -0.25 g 44 μm -0.05 g 45 μm	Juveniles de abulón rojo crecieron 16% más en presencia de la densidad media de <i>A. parvimensis</i> .

El objetivo principal de este trabajo es estudiar los beneficios de un sistema experimental de acuicultura multitrófica con un herbívoro (abulón rojo, *Haliotis rufescens*) y un detritívoro (pepino de mar, *Apostichopus parvimensis*). Específicamente este experimento los diseñé para: 1) Identificar si hay una diferencia en el crecimiento total de abulón en la longitud de la concha con diferentes densidades de pepinos de mar; 2) Documentar ¿Cuál es la dinámica de crecimiento del abulón? Y 3) ¿Cuál es su relación con la temperatura? Finalmente, comprobar si 4) ¿los pepinos de mar pueden sobrevivir y crecer en los biodepositos de abulón rojo? Con este ejercicio, el objetivo general es comprender mejor cómo se pueden potencializar el crecimiento y la supervivencia de organismos de diferentes especies en sistemas de co cultivo para que su producción sea más efectiva. Para probar el beneficio de co-cultivar estas dos especies se consideró la supervivencia y crecimiento.

Justificación

El stock natural de abulón en la costa Pacífico de la Península de Baja California se encuentra en estatus de deterioro. Por ello, la necesidad de proponer estrategias biotecnológicas que permitan tener otras alternativas a la pesca para seguir satisfaciendo las demandas de mercado con un esquema sustentable y sostenible.

La acuicultura de abulón produce una gran cantidad de desechos, los cuales se depositan en el fondo de los tanques, pudiendo afectar el crecimiento del cultivo. Tanto Kang *et al.* (2003) como Qi *et al.* (2013) muestran que una forma de reducir esta auto-contaminación es introduciendo organismos detritívoros, como pepinos de mar, ya que mejoran las condiciones

del cultivo al asimilar la materia orgánica producida por el abulón. Además, se pueden agregar pepinos de mar con una mínima inversión adicional a los tanques de abulón y con esto, mejorar las condiciones del cultivo, logrando una mejor cosecha.

Objetivo General

Determinar los beneficios del co-cultivo de abulón rojo (*Haliotis rufescens*) y pepino de mar (*Apostichopus parvimensis*) midiendo el crecimiento, supervivencia con diferentes densidades de pepino de mar.

Objetivos particulares

- A. Calcular el crecimiento total en longitud de concha y supervivencia de los abulones en presencia o ausencia de pepinos de mar.
- B. Estimar el incremento diario en longitud de concha y la tasa específica de crecimiento de los abulones.
- C. Evaluar el peso corporal y supervivencia de *A. parvimensis* en dos densidades, una media y una baja.
- D. Registrar la temperatura en el sistema durante el experimento y correlacionarla al crecimiento de los organismos.

Materiales y Métodos

Para estudiar el efecto de la presencia de dos diferentes densidades de pepino de mar *A. parvimensis* en acuicultura multitrófica con abulón, se desarrolló un experimento de mesocosmos durante 120 días. Este consistió en medir el crecimiento de 1080 abulones rojos, *Haliotis rufescens*, juveniles divididos al azar en nueve acuarios con tres densidades de pepino de mar, una media, una baja y un control sin presencia de pepino de mar. Además, se instalaron sensores HOBOS para registrar la temperatura cada media hora durante todo el experimento.

Diseño experimental de los mesocosmos

El experimento inició el 3 de agosto y finalizó el 4 de diciembre de 2018. Los abulones se colocaron en acuarios de vidrio de 40 litros con dimensiones de 25 cm de alto x 50 cm de largo x 30 cm de ancho (Fig. 4). El sistema contaba con un flujo abierto ($0.5 \pm 0.2 \text{ l min}^{-1}$) y aireación continua. Los organismos se aclimatizaron durante una semana sin brindarles alimento, a una temperatura de $21 \pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ y un fotoperiodo de 20 h oscuridad / 4 h luz. Los tanques tenían dos refugios de PVC dentro de una canasta de plástico de 0.5 mm de luz de malla sujeta a 10 cm del fondo, aislando los pepinos de mar en la parte inferior de los acuarios. A lo largo de todo el experimento, los abulones se alimentaron con la macroalga *Macrocystis pyrifera ad libitum* cada tres días. Antes de ponerla en los acuarios, *M. pyrifera* se sometía a un baño de agua dulce para evitar proliferación de copépodos. Los pepinos de

mar dentro de los tratamientos no fueron alimentados. La limpieza de los tanques se llevó a cabo semanalmente.

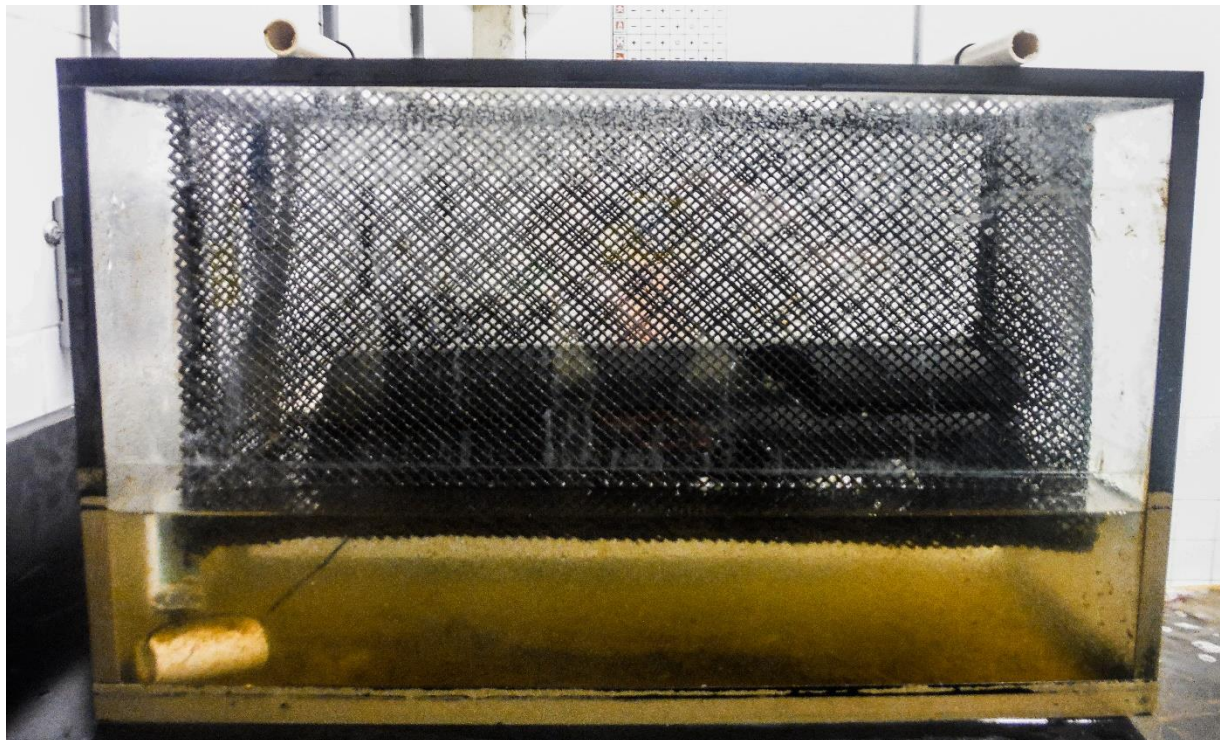


Figura 4. Diseño del acuario de 40 litros con 120 abulones rojos y dos refugios de PVC dentro de una malla de plástico. Los pepinos de mar podían alimentarse por fuera de la malla, pero no acceder dentro de ella.

Tratamientos

Todos los acuarios contaban con 120 abulones rojos (2.5 ± 5 cm). Los tratamientos constaron en tres diferentes densidades de pepino de mar, una densidad baja (LD, 4:1 g A:P), una densidad media (MD, 2:1 g A:P) y otro tratamiento control sin pepino de mar. Cada

tratamiento fue triplicado (Fig. 5). Finalmente, se utilizó temperatura ambiente para este experimento, pero homogénea en todos los diferentes tratamientos.

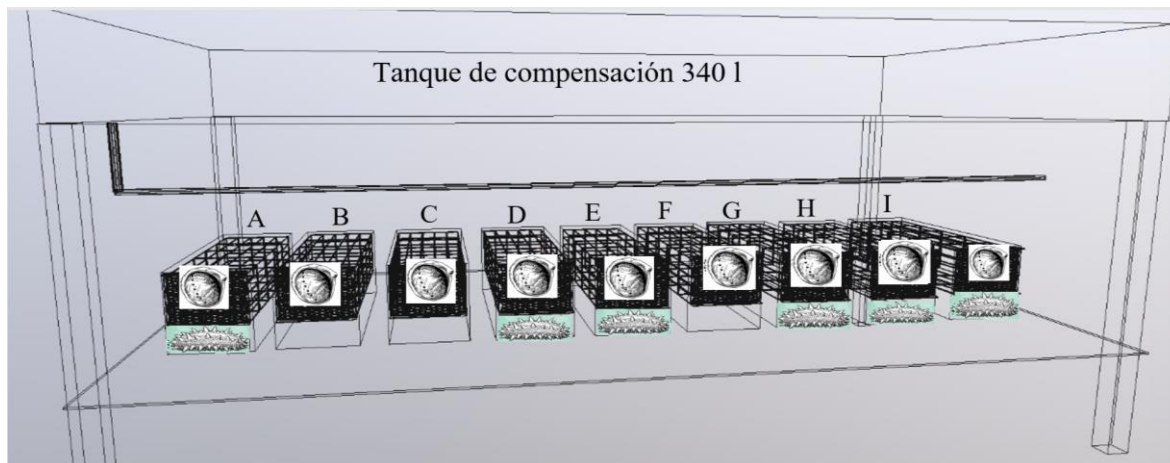


Figura 5. Diseño experimental de los mesocosmos. Cada tanque contiene 120 abulones rojos (2.5 ± 5 cm). Una densidad baja de pepino de mar (LD, 4:1 g A:P) en tanques: A, H, I; densidad media de pepino de mar (MD, 2:1 g A:P) tanques: D, E, G; Control sin presencia de pepino de mar: B, C, F.

Monitoreo de Temperatura

Para medir la temperatura dentro de los diferentes tratamientos del experimento, se instalaron termo-sensores HOBO “U22-Water Temp Pro V2” en un acuario de cada uno de los tratamientos (acuarios: A, D, F) y se registró la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) cada media hora durante la duración del experimento.

*Origen de los organismos de Abulón rojo, *H. rufescens**

Los abulones rojos (*H. rufescens*) de 2.5 ± 0.5 cm de longitud de concha fueron proporcionados por la granja comercial “Abulones Cultivados” de Eréndira, B.C., México. Estos abulones fueron transportados a las instalaciones del Instituto de Investigaciones Oceanológicas (IIO) de la universidad Autónoma de Baja California (UABC) en Ensenada.

Recolección de A. parvimensis

Los 25 organismos de pepino de mar *A. parvimensis* que se utilizaron en este experimento se recolectaron el 22 de julio de en Isla Todo Santos, BC, México (31.807560, -116.795643) a 12 m de profundidad. Los organismos fueron colocados individualmente en bolsas de plástico y en hieleras con agua de mar para su traslado a las instalaciones de la UABC, teniendo el mayor cuidado para evitar la evisceración.

Incorporación de A. parvimensis

Los pepinos de mar fueron pesados individualmente (tabla II) e introducidos al azar en el fondo de los acuarios. En los tanques de densidad baja (LD), “A”, “H” e “I” se añadió un pepino de mar equivalente a 176 ± 2.36 g. En los tanques de densidad media (MD), “D”, “E” y “G” se colocaron dos organismos (350 ± 11.56 g). Los tanques “B”, “C” y “F” actuaron como control, sin la presencia de pepinos de mar (Fig. X).

Tabla II. Peso individual de *A. parvimensis* incorporados en los tanques de abulón.

<i>A. parvimensis</i> ID	Tanque	Tratamiento	Peso (g)
Pp-1	A	LD	170
Pp-2	H	LD	176

Pp-3	I	LD	180.7
Pp-4	D	MD	186.3
Pp-5	D	MD	176.6
Pp-6	E	MD	168.8
Pp-7	E	MD	178.6
Pp-8	G	MD	162.6
Pp-9	G	MD	177.7

Crecimiento de H. rufescens

¿Existe diferencia en crecimiento total de abulón en la longitud de la concha con diferentes densidades de pepinos de mar?

Para contestar esta pregunta, se estimó la talla de los 120 abulones en cada uno de los tratamientos una vez al mes durante todo el periodo que duró el experimento. Para calcular la longitud de concha (LC, mm), se utilizó una cuadrícula plastificada de 15 x 10 cm en donde se colocaron los abulones para tomarles fotos con una cámara digital marca Fujifilm modelo FinePix XP60 montada en un tripié (Fig. 6). Se analizaron las fotos utilizando el software Image J Versión 1.47 (<https://imagej.nih.gov/ij/>) con una calibración horizontal, determinando la LC con una precisión de ± 0.14 mm.



Figura 6. Abulones rojos *H. rufescens* sobre la cuadrícula plastificada para analizar la longitud de concha.

Para determinar si existen diferencias estadísticas en crecimiento total de longitud de concha de *H. rufescens* se utilizó una ANOVA factorial, con el crecimiento (mm) como variable dependiente y los tratamientos como variable categórica, seguido de una prueba de HSD de Tukey ($\alpha=0.05$). *A priori*, se aplicó una prueba de normalidad de Kolmogorov-Sminorf ($p<0.05$) y de heterogeneidad de varianzas de Cochran. Los datos se transformaron a logaritmo base 10 para cumplir con los supuestos y se analizaron usando STATISTICA 8 “StatSoft Inc., Tulsa, OK, USA”.

¿Cuál es la dinámica de crecimiento del abulón?

Para documentar la dinámica del crecimiento de los abulones en este experimento se calculó el incremento diario en longitud de concha (IDLC, mm d⁻¹) y la tasa específica de crecimiento (TEC, % d⁻¹), con base en Hopkins (1991).

Las siguientes variables fueron calculadas:

$$\text{Supervivencia (\%)} = n/N \times 100$$

$$\text{Incremento total de longitud de concha de } H. \text{ rufescens (mm)} = L_t - L_0$$

$$\text{Incremento total del peso corporal de } A. \text{ parvimensis (g)} = W_t - W_0$$

El incremento diario (ID) y las tasas específicas de crecimiento (TEC) fueron estimadas de acuerdo con lo descrito por Hopkins (1992):

$$\text{Incremento diario en la longitud de la concha en } H. \text{ rufescens (IDLC, mm d}^{-1}\text{)} = (L_t - L_0) / t$$

$$\text{Tasa específica de crecimiento de la longitud de la concha en } H. \text{ rufescens (TEC}_{lc}\text{, \% d}^{-1}\text{)} = \\ (\ln(L_t) - \ln(L_0)) / t \times 100$$

Donde n es el número de abulones o pepinos de mar en cada caja de cultivo al final del experimento, N el número de abulones o pepinos de mar al inicio del experimento (individuo), W₀ el promedio inicial del PC de los pepinos de mar, W_t el promedio final del PC de los pepinos de mar (g), L₀ el promedio inicial de LC de los abulones, L_t el promedio final de LC de los abulones, ln el logaritmo natural y t la duración del experimento (días).

Se realizó un ANOVA factorial con el IDLC y TEC como variables dependientes y los tratamientos y tiempo como variables categóricas. *A posteriori* se efectuó una prueba de HSD de Tukey ($\alpha=0.05$).

Crecimiento de A. parvimensis

¿Pueden los pepinos de mar sobrevivir y crecer en los biodepositos de abulón rojo?

Para contestar esta pregunta, se examinó mensualmente el crecimiento considerando el peso corporal (g) de *A. parvimensis*. Los datos fueron obtenidos con una balanza digital AND EK-1200i con una precisión de ± 0.1 g. El exceso de agua fue absorbido con una esponja entre mediciones de acuerdo con lo sugerido por Zhou *et al.* (2006). La manipulación cuidadosa no ocasiona un estrés significativo en los pepinos de mar (Shannon y Mustafa, 2015).

Temperatura

¿Existe relación entre el crecimiento y la temperatura?

Para la evaluación de las interacciones de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) con el IDLC de los abulones e IDPC de los pepinos de mar se realizaron regresiones múltiples ($p < 0.05$) (Yang *et al.*, 2006).

Cálculos para crecimiento de A. parvimensis

Incremento diario de peso corporal en *A. parvimensis* (IDPC, g d^{-1}) = $(W_t - W_0) / t$

La tasa específica de crecimiento del peso corporal de *A. parvimensis* (TEC_{pc}, $\% \text{ d}^{-1}$) = $(\ln(W_t) - \ln(W_0)) / t \times 100$

Donde W_0 es el promedio inicial del peso corporal (PC) de los pepinos de mar, W_t el promedio final del PC de los pepinos de mar (g), L_0 el promedio inicial de LC de los

abulones, L_t el promedio final de LC de los abulones, \ln el logaritmo natural y t la duración del experimento (días).

Resultados

Crecimiento abulón rojo, $H. rufescens$

¿Existe diferencia en crecimiento total del abulón en presencia de diferentes densidades de pepino de mar?

El crecimiento de *H. rufescens* en el tratamiento de densidad media (MD) de pepino de mar fue significativamente mayor que el tratamiento de densidad baja (LD) y el control sin presencia de pepino de mar (Fig. 7; talla concha (mm), ANOVA factorial: $F_{16, 9548} = 2.251$, $p = 0.003$). La prueba post-hoc de Tukey ($\alpha = 0.05$) arrojó que en el tercer mes de experimento el tratamiento MD fue diferente al control. En el tiempo inicial el tratamiento LD estaba 1 mm en promedio por arriba del tratamiento control y MD. A partir del tercer mes, el tratamiento MD alcanzó al LD y el último mes lo rebasó.

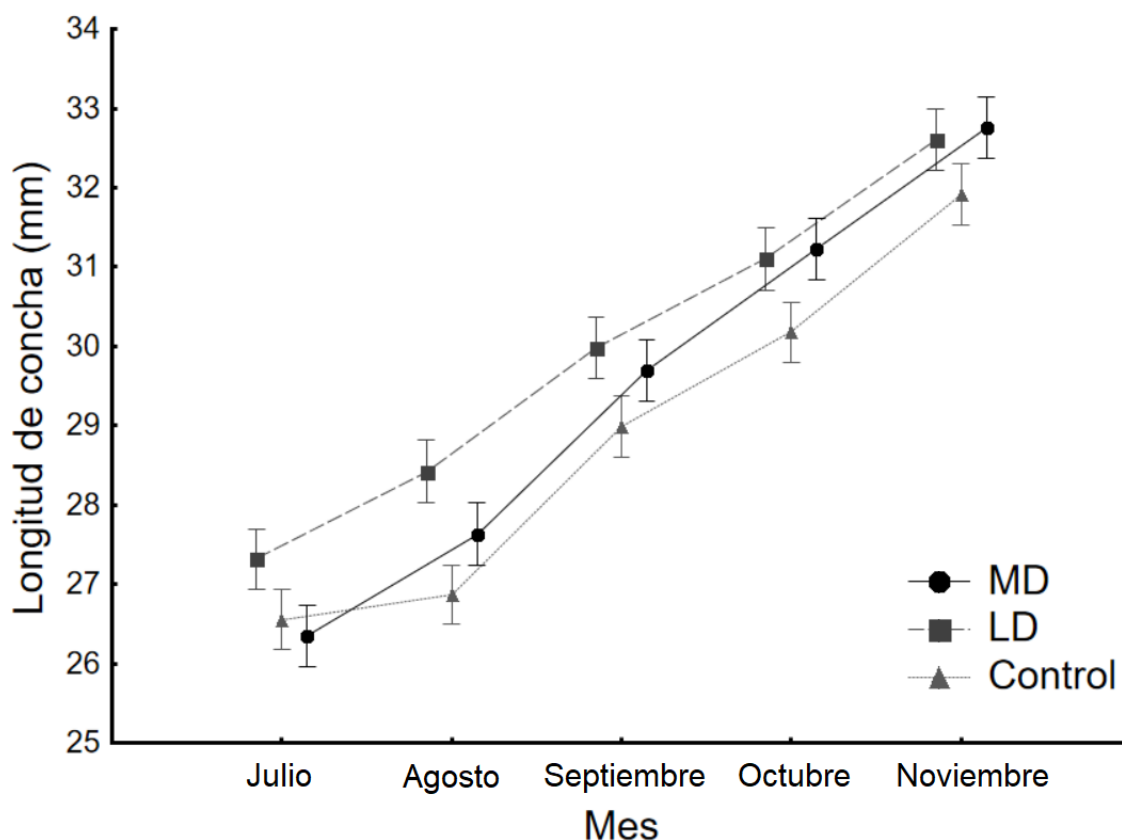


Figura 7. Longitud de concha promedio de *H. rufescens* (mm) en los tres tratamientos durante los cuatro meses de experimentación. MD= densidad media de pepino de mar; LD= densidad baja de pepino de mar; Control sin la presencia de pepino de mar. Barras verticales denotan intervalos de confianza al 0.95.

Durante el experimento los abulones del tratamiento MD crecieron 16% más que el control y el tratamiento con densidad baja (LD) de pepino de mar. Los abulones del tratamiento MD obtuvieron el mayor crecimiento total de 6.41 ± 0.3 mm. Para los abulones del tratamiento LD el crecimiento total fue de 5.3 ± 0.4 mm y los abulones del tratamiento control sin presencia de pepino de mar tuvieron un crecimiento total de 5.37 ± 0.27 mm (Fig.8).

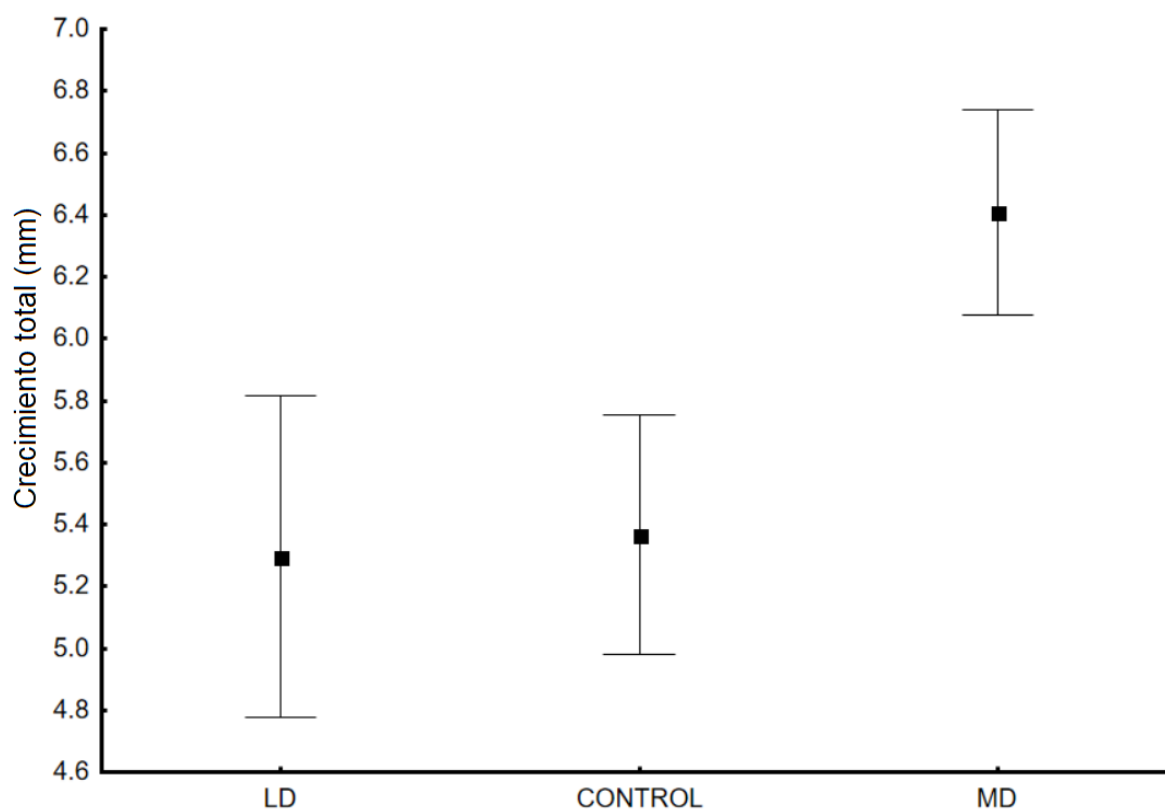


Figura 8. Crecimiento total (mm) de los abulones rojos en los diferentes tratamientos durante los 120 días de experimento. LD= densidad baja de pepino de mar; MD= densidad media de pepino de mar; Control= sin presencia de pepino de mar. Las barras verticales denotan intervalos de confianza al 0.95.

Durante el todo experimento el tratamiento MD presentó un incremento diario en longitud de concha (IDLC) promedio de $53 \mu\text{m}$ y una tasa específica de crecimiento (TEC) promedio de $0.18 \% \text{ d}^{-1}$. Para los abulones del tratamiento LD un IDLC promedio de $44 \mu\text{m}$ y una TEC de $0.15 \% \text{ d}^{-1}$. Los abulones del tratamiento control sin presencia de pepino de mar tuvieron un IDLC de $45 \mu\text{m}$ y una TEC de $0.15 \% \text{ d}^{-1}$ (Fig. 8; Tabla III). Sin embargo, estos valores no fueron constantes en los meses de experimento.

Tabla III. Crecimiento total (mm), promedio del incremento diario en longitud de concha (IDLC, μm) y la tasa específica de crecimiento promedio (TEC, $\% \text{d}^{-1}$) de los abulones rojos en los tres tratamientos durante los 120 días de experimento.

Tratamientos	Crecimiento total (mm)	IDLC (μm)	TEC ($\% \text{d}^{-1}$)	Supervivencia (%)
MD	6.41 \pm 0.3	53 \pm 0.01	0.18 \pm 0.04	88.33
LD	5.3 \pm 0.4	44 \pm 0.01	0.15 \pm 0.03	88.05
Control	5.37 \pm 0.27	45 \pm 0.03	0.15 \pm 0.09	86.77

Incremento diario en longitud de concha, H. rufescens

¿El crecimiento del abulón es constante en el tiempo?

El incremento diario en longitud de concha (IDLC) de *H. rufescens* no fue constante en el tiempo. El tratamiento MD obtuvo el mayor IDLC, en el primer y tercer mes. El control presentó el mayor IDLC en el segundo y cuarto mes, sin embargo, no hubo diferencias estadísticas entre los tratamientos (Fig. 9; ANOVA factorial $F_{6, 24}=1.6611$, $p= 0.174$).

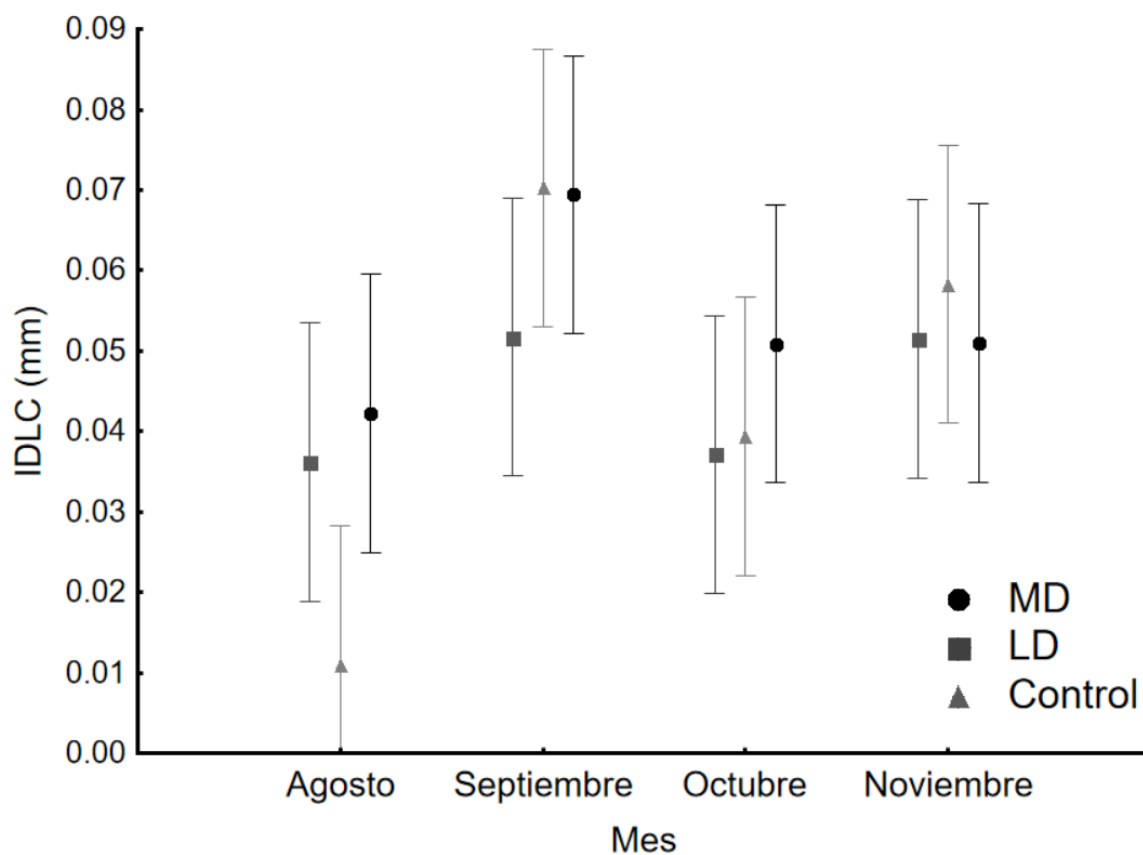


Figura 9. Incremento diario en longitud de concha (IDLC, mm) de *H. rufescens* en los tres tratamientos durante los cuatro meses de experimentación. MD= densidad media de pepino de mar; LD= densidad baja de pepino de mar; Control= sin presencia de pepino de mar. Las barras verticales denotan intervalos de confianza al 0.95.

Tasa específica de crecimiento de H. rufescens

La tasa específica de crecimiento (TEC) de *H. rufescens* no fue constante en el tiempo. En el primer y tercer mes el tratamiento MD tuvo la mayor TEC. En el segundo y cuarto mes el control obtuvo la mayor TEC. Se presentaron diferencias estadísticas entre los tratamientos

por tiempo (Fig. 10; ANOVA factorial $F_{6, 24} = 2.8046$, $p = 0.033$). La prueba post hoc de Tukey indica una diferencia en el primer mes entre el tratamiento MD y el control.

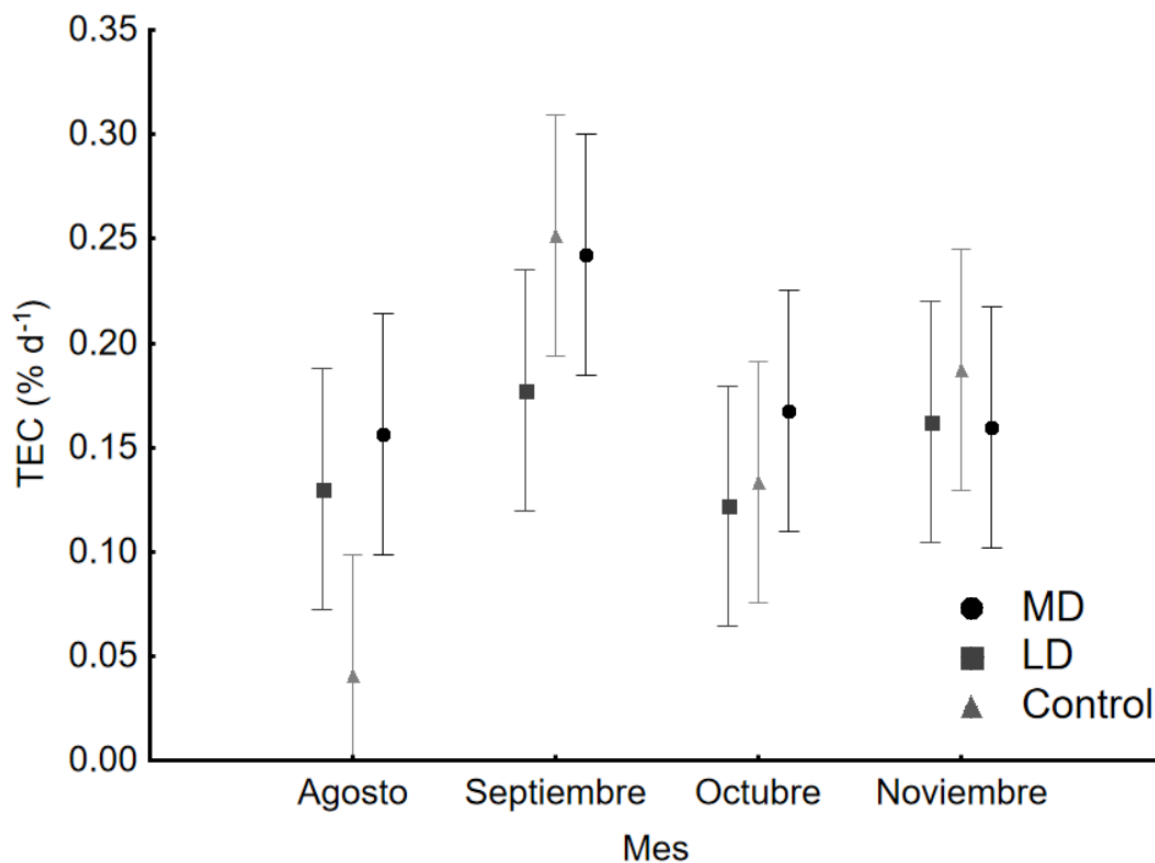


Figura 10. Tasa específica de crecimiento (TEC, $\% d^{-1}$) de *H. rufescens* en los tres tratamientos durante los cuatro meses de experimentación. MD= densidad media de pepino de mar; LD= densidad baja de pepino de mar; Control= sin presencia de pepino de mar. Las barras verticales denotan intervalos de confianza al 0.95.

Crecimiento de A. parvimensis

¿Pueden los pepinos de mar sobrevivir y crecer en los biodepósitos de abulón rojo?

Los pepinos de mar *A. parvimensis* tuvieron un decremento en el peso corporal promedio. Durante el primer mes se observó una disminución en ambos tratamientos. En el segundo mes ambos tratamientos tuvieron un incremento. A partir del tercer mes el tratamiento MD presentó una tendencia negativa mientras que el tratamiento LD una tendencia positiva, sin embargo, no hubo diferencias estadísticas entre el crecimiento de los dos tratamientos (Fig. 11; ANOVA dos vías $F_{4, 35} = 0.39794$, $p = 0.809$).

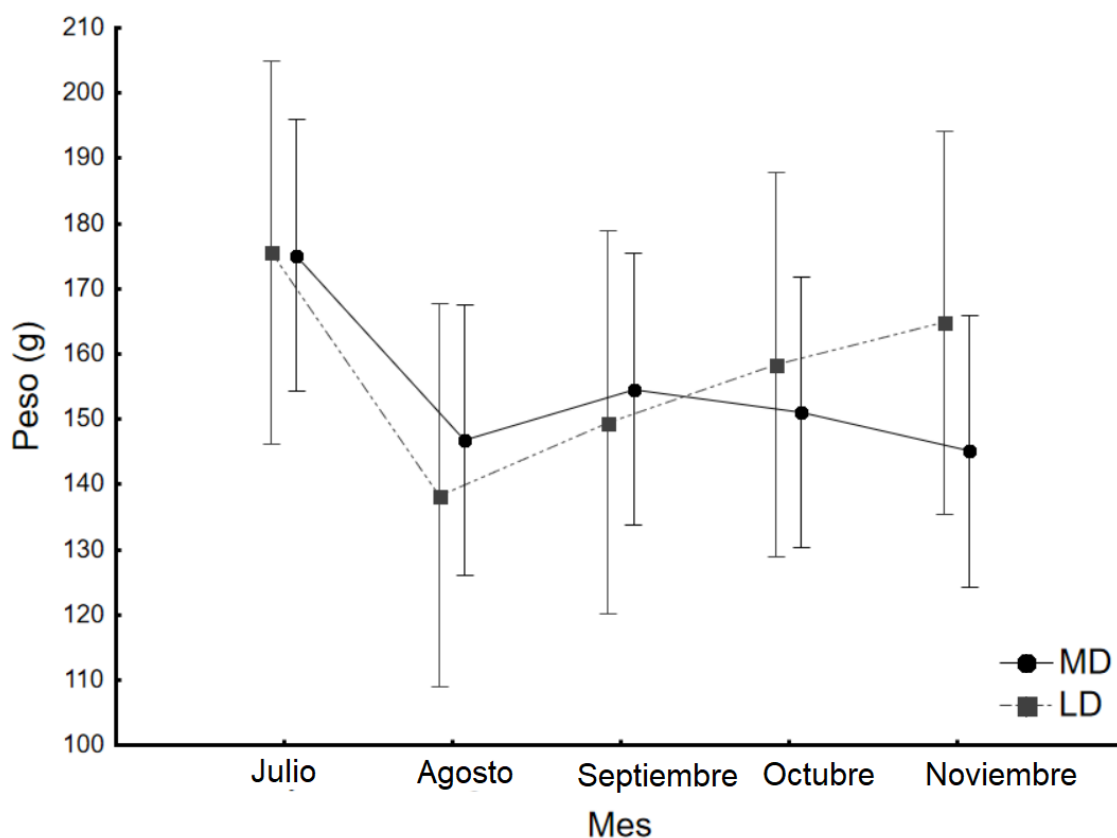


Figura 11. Peso corporal de *A. parvimensis* (g) en los dos tratamientos durante los cuatro

meses de experimentación. Julio= tiempo inicial; MD= densidad media; LD= densidad baja. Barras verticales denotan intervalos de confianza al 0.95.

Durante el experimento los pepinos de mar del tratamiento MD tuvieron un decremento del peso total de -30.03 ± 21.23 g, un incremento en peso corporal (IDPC, g) promedio negativo de -0.25 ± 0.5 y una tasa específica de crecimiento (TEC, % d^{-1}) promedio de -0.16 ± 0.32 . Para el tratamiento LD el crecimiento total en peso corporal fue negativo de -10.77 ± 7.61 g, el IDPC promedio de -0.09 ± 0.77 y la TEC -0.05 ± 0.5 (Tabla IV).

Tabla IV. Crecimiento total (g), incremento diario en peso corporal (g) promedio y tasa específica de crecimiento (% d^{-1}) promedio de *A. parvimensis* en los dos tratamientos durante los 120 días de experimentación.

Tratamiento	Crecimiento total (g)	IDPC (g)	TEC (% d^{-1})	Supervivencia (%)
MD	-30.03 ± 21.23	-0.25 ± 0.5	-0.16 ± 0.32	100
LD	-10.77 ± 7.61	-0.09 ± 0.77	-0.05 ± 0.5	100

Incremento diario en peso corporal de A. parvimensis

El incremento diario en peso corporal (IDPC) de *A. parvimensis* no fue constante durante el experimento. En el primer mes los dos tratamientos presentaron un IDPC negativo. Durante el segundo mes se registró un IDPC positivo para ambos tratamientos. En los meses tres y

cuatro el IDPC fue positivo para el tratamiento LD y negativo para el tratamiento MD (Fig. 12). No se presentaron diferencias estadísticas entre los IDPC de los tratamientos (ANOVA factorial $F_{3, 16} = 0.459$, $p = 0.71$).

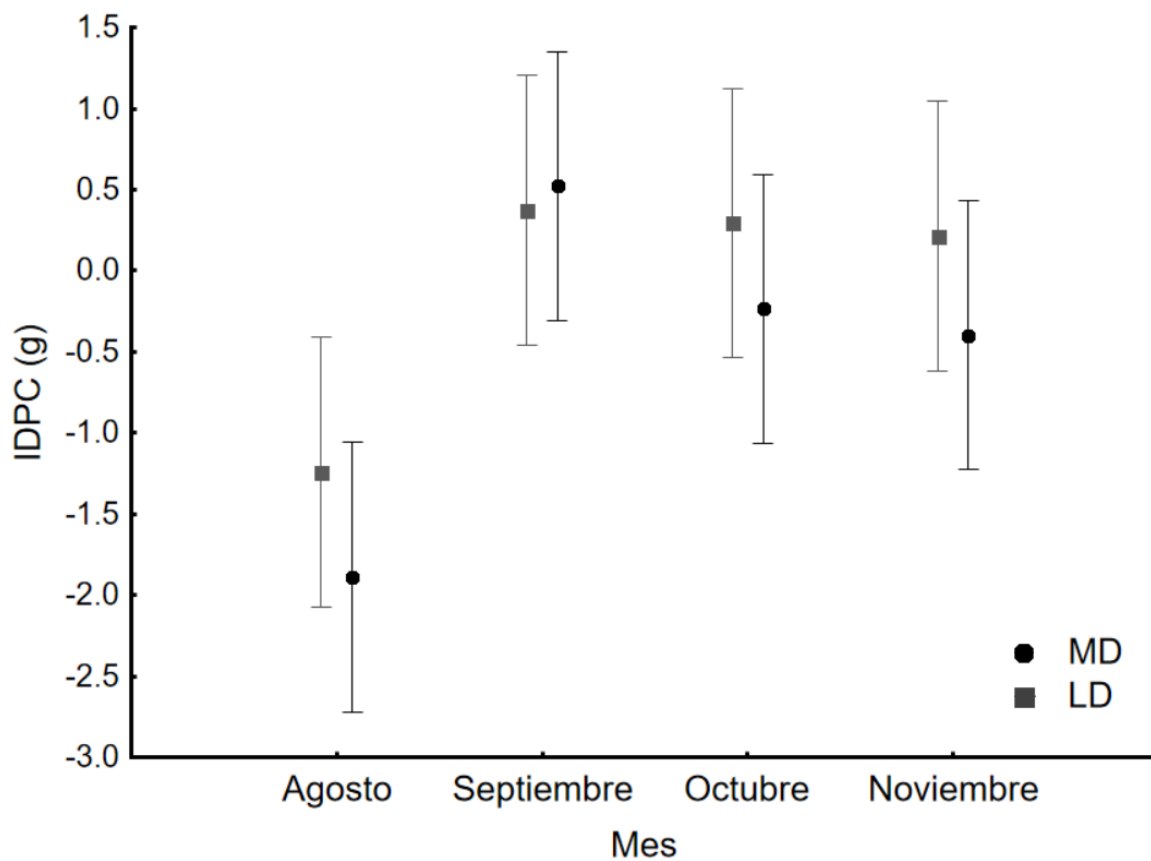


Figura 12. Incremento diario en peso corporal (IDPC, g) de *A. parvimensis* en los dos tratamientos durante los cuatro meses de experimentación. MD= densidad media de pepino de mar; LD= densidad baja de pepino de mar. Las barras verticales denotan intervalos de confianza al 0.95.

Supervivencia

La supervivencia de los abulones en el tratamiento MD fue de 88.33%, en el tratamiento LD de 88.05% y en el control 86.77%. La supervivencia de los pepinos de mar fue de 100% en ambos tratamientos.

Temperatura

No hubo diferencias estadísticas entre la temperatura de los diferentes tratamientos (ANOVA de una vía $F_{3, 19} = 0.295$, $p = 0.828$). Durante el primer mes de experimento la temperatura promedio del sistema fue de 21.4 ± 0.97 °C y conforme el experimento fue avanzando la temperatura fue en decremento hasta alcanzar 18.3 ± 0.52 °C (Fig. 14). La temperatura máxima registrada en este trabajo fue de 25.1 °C y la mínima fue 15.6 °C.

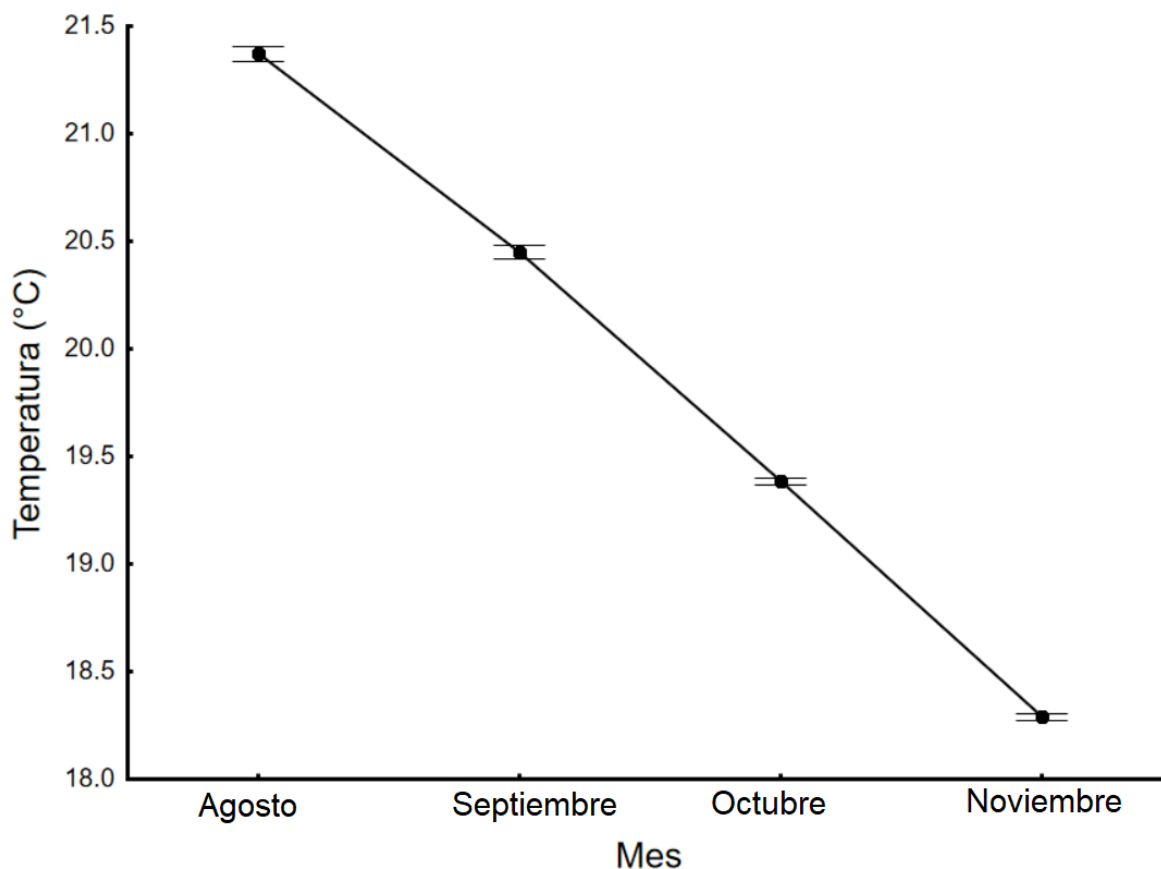


Figura 13. Promedio mensual de temperatura (°C) del sistema durante los cuatro meses de experimento (N= 14969). Las barras verticales denotan confianza al 95%.

Las regresiones múltiples nos indican una interacción de la temperatura con el incremento diario en la longitud de la concha (IDLC) de *H. rufescens* durante los meses de experimento ($F=13.116$, $p<0.05$). Sin embargo, no fue el caso para el incremento diario en peso corporal (IDPC) de *A. parvimensis* ($F=2.95$, $p>0.05$).

Discusión

Crecimiento del abulón, Haliotis rufescens

Juveniles de abulón rojo, *H. rufescens*, en co-cultivo con pepino de mar, *A. parvimensis*, crecieron mejor que sin la presencia de pepino de mar. En promedio, los abulones tuvieron un incremento de 16% en longitud de concha cuando se cultivaron en presencia de la densidad media (MD) de pepino de mar en comparación con el control sin presencia de pepino de mar. Este resultado se puede comparar con lo obtenido en estudios anteriores con diferentes especies de abulón y pepino de mar (Tabla I). Por ejemplo, Bauer *et al.* (2019) reportan un incremento de 29% en la longitud de concha en juveniles de abulón azul, *H. fulgens*, en co-cultivo con una densidad media de pepino de mar, *A. parvimensis*, comparado al control sin la presencia del holotúrido. Sin embargo, Las comparaciones de las tasas de crecimiento en este trabajo con las de estudios previos deben de ser interpretadas con precaución, debido a la variedad de medidas de peso aplicadas, diferencias en los estadios del desarrollo y los métodos de cultivo.

Los abulones del tratamiento MD presentaron un incremento diario promedio en longitud de concha (IDLC) de 46 μm , el tratamiento LD de 41 μm y el control 36 μm . Esta información concuerda con Huchette *et al.* (2003) quienes obtienen un IDLC de 43 μm para abulón rojo de 34 mm de longitud de concha. Trabajos anteriores reportan crecimientos desde 40 μm (Gonzalez-Aviles y Shepherd, 1996) hasta 74 μm (Searcy-Bernal y Salas, 1990). Sin embargo, tenemos que tomar en cuenta que el IDLC del abulón rojo está muy relacionado a

la temperatura y densidad del sistema (McCornick, 1992). Los IDLC obtenidos en este trabajo se encuentran en el rango de estudios anteriores, no obstante, los primeros dos meses de experimento fueron durante verano y el sistema alcanzo altas temperaturas (25°C), reflejándose en el IDLC.

El reflejo de la temperatura del sistema en el crecimiento de los juveniles de abulón es debido a que, la temperatura preferencial de *H. rufescens* es de 18 °C de 10 a 40 mm de longitud de concha (Leighton, 1974; Diaz *et al.*, 2000). Sin embargo, a partir de 25 °C *H. rufescens* empieza a presentar síntomas de desprendimiento y su temperatura crítica máxima es 27.5 °C (Díaz *et al.*, 2000). En este estudio el sistema alcanzó 25 °C, acercándose a los limites estresantes para *H. rufescens* durante agosto (el primer mes de experimento). En el último mes, el tratamiento MD presentó menor IDLC que el control y el tratamiento LD, esto puede estar relacionado con la capacidad de carga del sistema. Sin embargo, no se encontró un patrón entre la dinámica del crecimiento y la temperatura durante el experimento. Tenemos que realizar más experimentos para encontrar la densidad óptima de pepino de mar para potenciar el cultivo de abulón en cada estadio de crecimiento, sin perder de vista el escalamiento a nivel comercial.

Este experimento concuerda con información obtenida en experimentos como el de Bosch *et al.*, (2018), quienes reportan que las altas temperaturas provocan estrés fisiológico en juveniles de abulón rojo, aunque, logran aclimatarse rápidamente. Los autores también mencionan que el rendimiento biológico general puede verse afectado por altas temperaturas en ciclos de marea y temporal, lo que puede estar relacionado a lo observado en este trabajo.

Cabe mencionar que, se optó por trabajar con la temperatura ambiente para que los resultados puedan aplicarse en el cultivo de abulón rojo de la zona.

Pepino de mar, *Apostichopus parvimensis*

Durante el experimento, no se presentaron diferencias estadísticas en el crecimiento de *A. parvimensis* entre los tratamientos de densidad media (MD) y densidad baja (LD). Además, ambos tratamientos tuvieron un decremento en el peso corporal promedio (Fig. 11), lo que puede estar relacionado a las altas temperaturas (Ren, 2017). La temperatura preferencial de *A. parvimensis* es de 18°C (Vela-Gallo *et al.*, *in prep*) y durante los primeros meses de experimento el sistema alcanzo temperaturas de hasta 25°C, provocando estrés en los pepinos de mar y ocasionando el decremento del peso corporal.

Asimismo, durante la época de calor los holotúridos de la familia Stichopodidae, la cual incluye a *A. parvimensis*, presentan la diapausa o estivación (Yingst, 1982; Fankboner y Cameron, 1985; Yang *et al.*, 2006). Durante la diapausa el pepino de mar exhibe un estado de letargo fisiológico con una pérdida de aproximadamente el 25% del peso de la pared corporal. Al mismo tiempo, *A. parvimensis* presenta su estadio de reposo reproductivo (Espinoza-Montes, 2000), en donde los organismos dejan de alimentarse y reabsorben sus gónadas, perdiendo peso corporal. Lo anterior puede estar relacionado al decremento del peso corporal de *A. parvimensis* observado en el experimento.

Conclusiones

Juveniles de abulón rojo crecieron 16% mas en presencia de la densidad media de pepino de mar. El sistema alcanzó 25 °C durante el primer mes de experimento, reflejándose en la tasa

de crecimiento de los abulones y pepinos de mar. El co-cultivo de abulón rojo y pepino de mar parece ser viable.

Literatura citada

- Bauer, J., Vázquez-Vera, L., Espinoza-Montes, E., Lorda, J., Beas-Luna, R., Vela-Gallo, C. y Reyes-Bonilla, H. (2019). Multitrophic aquaculture of green abalone *Haliotis fulgens* and warty sea cucumber *Apostichopus parvimensis*, enhances production. *In press*, Journal of Shellfish Research, August 2019. 21 pp.
- Boch, C. A., Micheli, F., AlNajjar, M., Monismith, S. G., Beers, J. M., Bonilla, J. C., Espinoza-Montes J., Vázquez-Vera, L. y Woodson, C. B. (2018). Local oceanographic variability influences the performance of juvenile abalone under climate change. *Nature, Scientific Reports*, 8(1).
- Cameron, J., y Fankboner, P. (1986). Reproductive biology of the commercial sea cucumber *Parastichopus californicus* (Stimpson) (Echinodermata: Holothuroidea). Reproductive periodicity and. *Canadian Journal of Zoology*, 100. 168-175 pp.
- Chopin, T., Buschmann, A. H., Halling, C., Troell, M., Kautsky, N., Neori, A., y Neefus, C. (2001). Integrating seaweeds into marine aquaculture systems: A key toward sustainability. *Journal of Phycology*, 37(6), 975–986.
- Cook, P. A. (2016). Recent Trends in Worldwide Abalone Production. *Journal of Shellfish Research* 35(3), 581-583, (1 October 2016).
- Cook, P. A. (2018). Worldwide abalone production statistics. *Journal of Shellfish Research. in press*, August 2019.
- Díaz, F., del Río-Portilla, M. A., Sierra, E., Aguilar, M., & Re-Araujo, A. D. (2000).

- Preferred temperature and critical thermal maxima of red abalone *Haliotis rufescens*. *Journal of Thermal Biology*, 25(3), 257–261.
- FAO (2016). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2016 (SOFIA)*. Rome.
- Gao, X., Zhang, M., Li, X., Wu, F., & Liu, Y. (2019). Nitrogen and phosphorus budget of a *Haliotis discus hannai* and *Apostichopus japonicus* polyculture system. *Aquaculture Research*, 1–15.
- García-Esquivel, Z., Montes-Magallón, S., y González-Gómez, M. a. (2007). Effect of temperature and photoperiod on the growth, feed consumption, and biochemical content of juvenile green abalone, *Haliotis fulgens*, fed on a balanced diet. *Aquaculture*, 262(1), 129–141.
- Gonzalez-Aviles, J. G., y Shepherd, S. a. (1996). Growth and survival of the blue abalone *Haliotis fulgens* in barrels at Cedros Island, Baja California, with a review of abalone barrel culture. *Aquaculture*, 140(8), 169–176.
- Gordon, H. R., y Cook, P. A. (2013). World Abalone Supply , Markets , and Pricing : 2011 Update. *Journal of Shellfish Research*, 32(1), 5–7.
- Guzmán-del Prío, S., Carrillo-laguna, J., Belmar-pérez, J., Muciño-Díaz, M., y Sierra-rodríguez, P. (2013). Time Series of Juvenile and Adult Green Abalone (*Haliotis fulgens*) In Bahía Tortugas , Mexico : Its Potential Application as a Forecast of Future Stock Abundance. *National Shellfisheries Association*, 32(1), 217–221.
- Hopkins, K. (1992). Reporting Fish Growth: A Review of the Basics. *Journal of the World Aquaculture Society*, 23(3), 173–179.

- Huchette, S. M. H., Koh, C. S., & Day, R. W. (2003). Growth of juvenile blacklip abalone (*Haliotis rubra*) in aquaculture tanks: Effects of density and ammonia. *Aquaculture*, 219, 457–470.
- Kang, K. H., Kwon, J. Y., y Kim, Y. M. (2003). A beneficial coculture: Charm abalone *Haliotis discus hannai* and sea cucumber *Stichopus japonicus*. *Aquaculture*, 216, 87–93.
- Kim, T., Yoon, H. S., Shin, S., Oh, M. H., Kwon, I., Lee, J., y Jeong, K. S. (2014). Physical and biological evaluation of co-culture cage systems for grow-out of juvenile abalone, *Haliotis discus hannai*, with juvenile sea cucumber, *Apostichopus japonicus* (Selenka), with CFD analysis and indoor seawater tanks. *Aquaculture*, 1–15.
- Leighton DL (1974) The influence of temperature on larval and juvenile growth in three species of southern California abalones. *Fish Bull* 72: 1137–1145
- McCay, B. J., Micheli, F., Ponce-Díaz, G., Murray, G., Shester, G., Ramirez-Sanchez, S., y Weisman, W. (2014). Cooperatives, concessions, and co-management on the Pacific coast of Mexico. *Marine Policy*, 44, 49–59.
- McCormick, T.B., Arguirre, A., Mill, T.S. y Herbison, K.T. (1992). Growth and survival of red (*Haliotis rufescens*), green (*Haliotis fulgens*) and pink (*Haliotis corrugata*) abalone in land-based and ocean-based cultivation systems. *Fish. Res. Pap., Dep. Fish. (S. Aust.)* 24, 49–60.
- Micheli, F., Saenz-Arroyo, A., Greenley, A., Vazquez, L., Espinoza Montes, J. A.,

- Rossetto, M., y De Leo, G. a. (2012). Evidence that marine reserves enhance resilience to climatic impacts. *PLoS ONE*, 7(7), 8.
- Morales-Bojórquez, E., Muciño-Díaz, M. O., y Vélez-Barajas, J. A. (2008). Analysis of the Decline of the Abalone Fishery (*Haliotis fulgens* and *H. corrugata*) along the Westcentral Coast of the Baja California Peninsula, Mexico. *Journal of Shellfish Research*, 27(4), 865–870.
- Munguía-vega, A., Sáenz-arroyo, A., Greenley, A. P., Espinoza-montes, J. A., Palumbi, S. R., y Rossetto, M. (2015). Marine reserves help preserve genetic diversity after impacts derived from climate variability : Lessons from the pink abalone in Baja California. *Global Ecology and Conservation*, 4, 264–276.
- Paltzat, D. L., Pearce, C. M., Barnes, P. a., y McKinley, R. S. (2008). Growth and production of California sea cucumbers (*Parastichopus californicus* Stimpson) co-cultured with suspended Pacific oysters (*Crassostrea gigas* Thunberg). *Aquaculture*, 275, 124–137.
- Ponce-Díaz, G., Vega-Velazquez, a, Ramade-Villanueva, M., Leon-Carballo, G., y Franco-Santiago, R. (1998). Socioeconomic characteristics of the abalone fishery along the west coast of the Baja California Peninsula, Mexico. *Journal of Shellfish Research*.
- Qi, Z., Wang, J., Mao, Y., Liu, H., y Fang, J. (2013). Feasibility of Offshore Co-culture of Abalone, *Haliotis discus hannai* Ino, and Sea Cucumber, *Apostichopus japonicus*, in a Temperate Zone. *Journal of the World Aquaculture Society*, 44(4),

565–573.

- Ren, J. S., Stenton-dozey, J., y Zhang, J. (2017). Parameterisation and application of dynamic energy budget model to sea cucumber *Apostichopus japonicus*. *Aquaculture Environment Interactions* (9), 1–8.
- Rogers-Bennett, L., Allen, B. L., Davis, G. E., y Page, P. (2004). Measuring abalone (*Haliotis* Spp.) recruitment in California to examine recruitment overfishing and recovery criteria. *Journal of Shellfish Research*, 23(4), 1201–1207.
- Sadeghi-Nassaj, S. M., Batanero, G. L., Mazuecos, I. P., Alonso, C., y Reche, I. (2018). Sea cucumbers reduce nitrogen, bacteria and transparent exopolymer particles in *Anemonia sulcata* aquaculture tanks. *Aquaculture Research*, 1-13.
- Searcy-Bernal y Salas-Garza, A.E., 1990. Investigaciones sobre el cultivo de abulón en la Universidad Autonoma de Baja California, Mexico. Serie Cientifica, UABCS, Mexico, 1 (No. Esp. 1 AMAC): 44-50
- Shannon, R., & Mustafa, A. (2015). A Comparison of Stress Susceptibility of Sea Urchins and Sea Cucumbers in Aquaculture Conditions. *Bioengineering and Bioscience*, 3(6), 100–107.
- Shun, Z., Yichao, R. E. N., y Pearce, C. M. (2016). Ecological effects of co-culturing the sea cucumber *Apostichopus japonicus* with the Chinese white shrimp *Fenneropenaeus chinensis* in an earthen pond. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 30871931, 10 pp.
- Slater, M. J., y Carton, A. G. (2009). Effect of sea cucumber (*Australostichopus mollis*)

- grazing on coastal sediments impacted by mussel farm deposition. *Marine Pollution Bulletin*, 58(8), 1123–1129.
- Yang, H., Zhou, Y., Zhang, T., Yuan, X., Li, X., Liu, Y., y Zhang, F. (2006). Metabolic characteristics of sea cucumber *Apostichopus japonicus* (Selenka) during aestivation. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 330(2), 505–510.
- Yingst, J. Y. (1976). The utilization of organic matter in shallow marine sediments by an epibenthic deposit-feeding holothurian. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 23, 55–69.
- Yingst, J. Y. (1982). Factors influencing rates of sediment ingestion by *Parastichopus parvimensis* (Clark), an epibenthic deposit-feeding holothurian. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 14(2), 119–134.
- Yu, Z., Zhou, Y., Yang, H., y Hu, C. (2014). Bottom culture of the sea cucumber *Apostichopus japonicus* Selenka (Echinodermata: Holothuroidea) in a fish farm, southern China. *Aquaculture Research*, 45, 1434–1441.
- Yuan, X., Zhou, Y., y Mao, Y. (2015). *Apostichopus japonicus*: A Key Species in Integrated Polyculture Systems. *The Sea Cucumber *Apostichopus japonicus** (Vol. 39). Elsevier Inc.
- Zamora, L. N., Yuan, X., Carton, A. G., y Slater, M. J. (2016). Role of deposit-feeding sea cucumbers in integrated multitrophic aquaculture : progress , problems , potential and future challenges. *Reviews in Aquaculture*, 1–18.

Zhou, Y., Yang, H., Liu, S., Yuan, X., Mao, Y., Liu, Y., y Zhang, F. (2006). Feeding and growth on bivalve biodeposits by the deposit feeder *Stichopus japonicus* Selenka (Echinodermata: Holothuroidea) co-cultured in lantern nets. *Aquaculture*, 256(1–4), 510–520.