

Evaluación del crecimiento de gametofitos de *Chondracanthus chamussoi* en medio de cultivos enriquecido con fitohormonas

Evaluation of the growth of *Chondracanthus chamussoi* gametophytes in culture medium enriched with phytohormones

Yorka Castillo^{ID 1,3}, Renzo Pepe-Victoriano^{ID 1,2*}, Max Castañeda^{ID 4}, Jordan I. Huanacuni^{ID 1,3,5}, Rafael Crisóstomo-Gamboa^{ID 1,3} y Olger Acosta-Angulo^{ID 1,3}

¹Área de Biología Marina y Acuicultura, Facultad de Recursos Naturales Renovables, Universidad Arturo Prat, Iquique 1010000, Chile

²Núcleo de Investigación Aplicada e Innovación en Ciencias Biológicas, Facultad de Recursos Naturales Renovables, Universidad Arturo Prat, Iquique 1110939, Chile

³Programa de Magíster en Acuicultura Mención Cultivos de Recursos Hidrobiológicos, Mención Acuaponía, Área de Biología Marina y Acuicultura, Facultad de Recursos Naturales Renovables, Universidad Arturo Prat, Iquique 1010000, Chile

⁴Laboratorio de Investigación en Cultivos Marinos (LICMA), Dirección General de Investigación, Desarrollo e Innovación, Universidad Científica del Sur, Lima, Perú

⁵Finfish Aquaculture Sociedad Anónima Cerrada, CP. 23004, Tacna, Perú

*Autor correspondiente: rpepev@unap.cl

Abstract.- The study focused on the life cycle of *Chondracanthus chamussoi*, characterized by its isomorphic triphasic phase and spore propagation. The effect of phytohormones in alternative culture media on the settlement and growth of gametophytes was evaluated. Tetraspores were inoculated on polypropylene ropes and exposed to six treatments with different concentrations of a hormonal solution (gibberellins, auxins, cytokinins). Over 10 weeks, the number of settled spores, disc density, and microthallus size were measured. The results showed increased growth with higher concentrations of phytohormones, the treatment with 100% phytohormones (T1) produced the highest amount of developed discs ($133 \pm 9 \text{ mm}^{-2}$), which confirms its positive effect on the morphogenesis of *C. chamussoi*, while the treatment without phytohormones (T6) showed the lowest amount of developed discs $25 \pm 10 \text{ mm}^{-2}$ suggesting their usefulness in the propagation of this economically important species.

Key words: *Chondracanthus chamussoi*, tetraspores, algae culture, phytohormones

Información del artículo

Recibido: 24/10/2024

Aceptado: 16/01/2025

Editor responsable: Pilar Muñoz Muga

La revisión por pares es responsabilidad del equipo editorial

RBMO-UV y en modalidad doble ciego

Como citar en estilo RBMO

Castillo Y, R Pepe-Victoriano, M Castañeda, JI Huanacuni, R Crisóstomo-Gamboa & O Acosta-Angulo. 2025. Evaluación del crecimiento de gametofitos de *Chondracanthus chamussoi* en medio de cultivos enriquecido con fitohormonas. Revista de Biología Marina y Oceanografía 60(1): 41-50 <<https://doi.org/10.22370/rbmo.2025.60.1.5499>>

INTRODUCCIÓN

Chondracanthus chamussoi, conocida comúnmente en Chile como chicoria de mar y en Perú como cochayuyo, yuyo o mococho, es una macroalga roja perteneciente al orden Gigartinales (Rhodophyta), endémica de la costa del Pacífico sudamericano. Su distribución geográfica se extiende desde Paita ($5,08^{\circ}\text{S}$; $81,06^{\circ}\text{O}$) hasta Tacna ($18,01^{\circ}\text{S}$; $70,25^{\circ}\text{O}$) en Perú (Arbaiza *et al.* 2019), y hasta Ancud ($41,87^{\circ}\text{S}$; $73,81^{\circ}\text{O}$) en Chile (Macchiavello *et al.* 2012).

C. chamussoi forma parte relevante de las comunidades bentónicas costeras y exhibe un ciclo de vida trifásico isomórfico, se propaga a través de esporas (asexual), gametos (sexual) y fragmentación de los talos (asexual). Los tetrasporofitos liberan esporas haploides llamadas tetrasporas, que se asientan en un sustrato fijo para dar lugar a los gametofitos femenino y masculino, son fecundados por reproducción sexual, originando el carposporofito, que se desarrolla dentro de un aparato reproductor de estructura “cistocárpica”, que se encuentra en las píndulas



del gametofito femenino. El carposporofito produce células diploides asexuales “esporas” llamadas carposporas, que se asientan y forman el tetrasporofito, cerrando así el ciclo (Bulboa *et al.* 2020). En el tetrasporofito, al igual que en el gametofito femenino, las estructuras reproductivas se ubican en los márgenes de las proliferaciones, presentan una forma alargada y sobresalen ligeramente. Los tetrasporangios están agrupados en la corteza, formando un soro tetrasporangial de forma esférica que mide entre 135,3 y 198,9 µm de diámetro (Calderón *et al.* 2010).

El proceso de cultivo, reproducción y expansión controlada de *C. chamiessoi* representa un aporte significativo tanto para la acuicultura como para la conservación de los recursos marinos. Esta especie destaca por su alto valor nutricional, siendo excelente fuente de minerales, aminoácidos esenciales y compuestos bioactivos como el betacaroteno, resultando en un superalimento para el consumo humano directo, así como para aplicaciones en la industria farmacéutica, agrícola y alimentaria (Bermejo *et al.* 2020). Además, su relevancia económica está estrechamente vinculada al ser una macroalga que produce ficocoloides, compuestos polisacáridos con múltiples aplicaciones industriales, cuya producción y calidad dependen de factores abióticos claves, como la disponibilidad de nutrientes, salinidad, intensidad lumínica y temperatura del ambiente (Montoya *et al.* 2020). El desarrollo y crecimiento de las algas dependen de un conjunto de procesos metabólicos que requieren la disponibilidad de macronutrientes, como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), así como de micronutrientes esenciales, incluyendo manganeso (Mn), hierro (Fe) y zinc (Zn). Además, estos organismos sintetizan y acumulan compuestos bioquímicos clave, como proteínas, vitaminas, minerales, fibra y péptidos, los cuales desempeñan un papel fundamental en su fisiología, regulación celular y respuesta a condiciones ambientales.

Estos elementos esenciales varían en función de la especie, hábitat, etapa del ciclo de vida y condiciones ambientales, influyendo directamente en su composición bioquímica y, por ende, en su valor nutricional (Gutiérrez *et al.* 2017). Por ejemplo, factores como la salinidad y temperatura pueden alterar los niveles de carbohidratos y proteínas, mientras que una mayor disponibilidad de nutrientes en el medio favorece la acumulación de minerales y compuestos bioactivos como los betacarotenos. Además, la etapa del ciclo de vida puede influir en la concentración relativa de aminoácidos esenciales en los tejidos de *C. chamiessoi*. Durante las fases de crecimiento activo, se ha observado un aumento en la acumulación de estos compuestos, reflejado en una mayor concentración por unidad de biomasa en comparación con otras etapas del desarrollo, como la senescencia o la fase reproductiva. Este incremento se puede atribuir a una mayor demanda metabólica asociada a la síntesis de proteínas estructurales

y enzimáticas necesarias para el crecimiento celular y diferenciación tisular.

El cultivo de gametofitos de *C. chamiessoi* a partir de esporas es una técnica importante para la producción sostenible de semillas y conservación de la especie. Sin embargo, el éxito del cultivo de esporas depende de varios factores ambientales y de la calidad del medio de cultivo. Por lo tanto, es necesario investigar el efecto de diferentes factores ambientales y medios de cultivo en el crecimiento y morfogénesis de *C. chamiessoi*. Diversos autores promueven la técnica de cultivo a partir de fragmentación de plántulas algales (Basaure *et al.* 2021, Oyarzo *et al.* 2021), sin embargo, esta técnica necesita altas cantidades de plántulas frescas para los cultivos (Bulboa *et al.* 2013). Otra forma de cultivo es a través de la propagación de esporas, cuya principal ventaja es la menor biomasa de plántulas reproductivas necesaria para iniciar el ‘caldo’ de esporas de algas del orden Gigartinales (Ávila *et al.* 2011). Los métodos de cultivo a partir de carposporofitos pueden dar lugar a la liberación de tetrasporas, lo que se podría considerar como una alternativa para una producción sostenible de semillas a lo largo del tiempo, ya que el esporocultivo es una alternativa de reproducción y obtención de plántulas sin desgaste poblacional (Hughes 2019). Esta técnica de reproducción vía esporas permitiría una alta producción y concentración de organismos para la inoculación en sustratos artificiales (Castañeda *et al.* 2018). Durante las etapas (asentamiento, germinación y crecimiento) se pueden obtener datos relevantes sobre la capacidad reproductiva que tienen las diversas praderas de *C. chamiessoi*.

Acorde a Vásquez & Alonso-Vega (2001), durante el verano en la costa del Pacífico (región de Coquimbo) existe una mayor producción de esporas, germinación y reclutamiento de nuevas plántulas en fase carpospórica. En Perú, las praderas naturales de esta especie presentan una variación estacional en la capacidad de producción de esporas por estructura reproductiva, observándose las fases tetrasporofítica y carposporofítica durante el invierno y la primavera, respectivamente (Castañeda *et al.* 2018).

También se ha destacado la importancia de controlar diversos factores ambientales que inciden durante el asentamiento de esporas de *C. chamiessoi*, para que la fase que coloniza pueda competir y sea exitosa en el medio ambiente con las interacciones bióticas y las variables fisicoquímicas.

Por otro lado, para optimizar el cultivo de las algas es importante comprender la regulación hormonal del desarrollo y crecimiento (Yokoya *et al.* 2014). Se han identificado hormonas vegetales endógenas, como las citoquininas, en 7 especies de Phaeophyceae, 5 de Chlorophyta y 19 de Rhodophyta. Estas fitohormonas pueden actuar como estimulantes del crecimiento en cultivos agrícolas (Stirk & van Staden 2010). Sin embargo, para comprender su papel regulador en el crecimiento

de las algas hay poca información de las funciones fisiológicas de estas hormonas (Yokoya *et al.* 2014).

La comprensión detallada de la composición nutricional de *C. chamussoi* resulta fundamental para optimizar sus técnicas de cultivo, particularmente en sistemas enriquecidos con fitohormonas. Esta especie posee un perfil bioquímico complejo, caracterizado por altos contenidos de minerales esenciales, aminoácidos, proteínas, carbohidratos, y compuestos bioactivos como betacarotenos y ficocoloides (Vilcanqui *et al.* 2021). La interacción de estos componentes con factores exógenos, como la adición de fitohormonas (auxinas, giberelinas y citoquininas), puede influir positivamente en el crecimiento, desarrollo y rendimiento de la biomasa. Evaluar cómo las fitohormonas afectan la asimilación y acumulación de nutrientes en *C. chamussoi* permitirá ajustar los medios de cultivo para maximizar la productividad y calidad del alga, facilitando así su aprovechamiento comercial y biotecnológico.

Por tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar si la adición de fitohormonas en el medio de cultivo influye en el crecimiento, desarrollo y morfogénesis de *C. chamussoi*, considerando su plasticidad morfológica y adaptabilidad documentada en estudios previos (*e.g.*, Calderón *et al.* 2010, Yang *et al.* 2015) y determinar el efecto de estas fitohormonas en el crecimiento de gametofitos de *C. chamussoi*.

MATERIALES Y MÉTODOS

Durante febrero 2021, se realizaron dos recolecciones semanales de muestras de especímenes tetrasporofíticos de *Chondracanthus chamussoi* mediante buceo autónomo en la Playa Mendieta ($14^{\circ}03'07''S$; $76^{\circ}16'16''O$), ubicada

dentro del área de la Reserva Nacional de Paracas, Perú, a profundidades de 1,5-2,5 m.

TRATAMIENTO DEL MATERIAL BIOLÓGICO ALGAL

Las muestras de *C. chamussoi* fueron cuidadosamente depositadas en contenedores térmicos (cooler-ICE PACK GEL) para garantizar una temperatura constante de $15^{\circ}C$, previniendo el estrés osmótico y deterioro de las plántulas. Posteriormente, fueron trasladadas al Laboratorio de Investigación en Cultivos Marinos (LICMA) de la Universidad Científica del Sur (UCSUR) en San Andrés-Pisco. Una vez en el laboratorio, se procedió a la selección de frondas tetrasporofíticas (Fig. 1) y plántulas no dañadas, seguido de un meticuloso proceso de limpieza con agua de mar filtrada. Las muestras fueron lavadas manualmente con agua dulce para eliminar sedimentos, epífitos y organismos adheridos a la superficie, utilizando paños. Luego se llevó a cabo un proceso de estrés por desecación de 3-4 h al ambiente en bandejas planas para su posterior análisis.

OBTENCIÓN DE TETRASPORAS

Durante el proceso para inducir a la esporulación (desecación natural en sombra por 3 h), se emplearon plántulas de la fase tetrasporofítica (324 g), distribuidas de manera equitativa en 18 matraces de 1 L contenido agua de mar filtrada a $0,5\ \mu m$ (previamente sometida a filtración de arena $20\ \mu m$, luego filtración asistida por vacío $0,5\ \mu m$ y esterilización UV). Posteriormente, tras la liberación de las tetrasporas (Fig. 1), se tomaron muestras de agua de cada tratamiento para el conteo de esporas (*Chondracanthus chamussoi*) en una cámara de Neubauer (MARIENFELD, 23931, con una profundidad de 0,100 mm y una superficie de $0,0025\ mm^2$). Despues de 24 h se realizó el cambio de medio de cultivo.

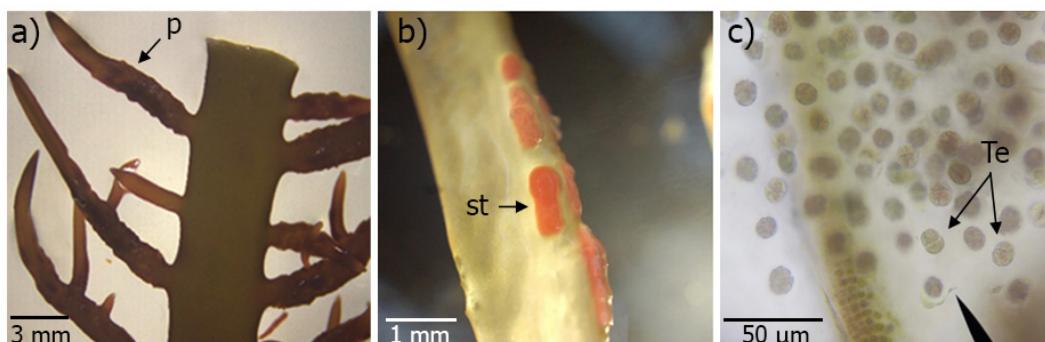


Figura 1. *Chondracanthus chamussoi*. a) Plántula (p) reproductiva tetrasporofítica (10x), b) Soro tetrasporangial (st) maduro (40x), c) Corte transversal de un tetrasporangio (100x). Te: tetrasporas / *Chondracanthus chamussoi*. a) Tetrasporophytic reproductive seedling (p) (10x), b) Mature tetrasporangial sorus (st) (40x), c) Cross section of a tetrasporangium (100x). Te: tetraspores

INCUBACIÓN DE TETRASPORAS EN CONDICIONES CONTROLADAS

Una vez recolectadas las esporas de *C. chamissoi*, se transfirieron a vasos precipitados de 1 L de capacidad, que contenían previamente agua de mar filtrada enriquecida con nutrientes esenciales. A esta solución se le incorporó un tratamiento hormonal compuesto por fitohormonas comerciales (giberelinas, auxinas y citoquininas), diseñadas para promover el crecimiento y desarrollo de las esporas (Tabla 1). La solución enriquecida proporcionó el ambiente adecuado para la germinación y asentamiento de las esporas, favoreciendo su desarrollo en condiciones controladas (Triggr Trihormonal FARMEX-SERIE: 66296-Grupo IF, España). Cada tratamiento de fitohormonas fue utilizado con tres repeticiones para cada concentración (Tabla 2).

En los vasos precipitados se dispusieron bastidores de PVC de 7 x 7 cm en su interior, los cuales fueron rodeados por cuerdas de nylon de 3/16 pulgadas de grosor. Estas cuerdas se sumergieron completamente en el medio de cultivo, proporcionando un sustrato adecuado para el asentamiento de las esporas de *C. chamissoi*. La estructura de PVC sirvió como soporte rígido para las cuerdas de nylon, asegurando su estabilidad y distribución homogénea dentro del vaso precipitado. Posteriormente se colocó aireación continua a los tratamientos, manteniendo ciclo de luz y oscuridad de 16:08 (L:O), controlados por un luxómetro (EZODO LUX DL-204), así como una temperatura constante de $18,0 \pm 1,2^\circ\text{C}$ y un pH de 7,53, medidos con un multiparámetro YSI-PLUS, en un período de 10 semanas.

Se registraron datos relacionados con el número de esporas asentadas por centímetro de cuerda (nEA), diámetro promedio del disco de germinación (dDG) y porcentaje promedio de discos con formación de microtalo (%dM), utilizando un microscopio óptico estereoscópico trinocular Leica®, Serie G122873.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software estadístico Rstudio versión 1.4.1106 (Rstudio, Inc.). Los datos fueron sometidos a pruebas de normalidad mediante la prueba de Shapiro y de homogeneidad de varianza mediante la prueba de Bartlett. Posteriormente, se llevaron a cabo análisis de varianza (ANDEVA) de una vía y pruebas *post-hoc* de Tukey para comparar las medias entre los diferentes tratamientos con fitohormona (T1 a T6). En los casos en que no se cumplieran los supuestos

Tabla 1. Composición química de fitoreguladores de acción hormonal utilizados para estimular el crecimiento y desarrollo en vegetales / Chemical composition of hormone-acting phytoregulators used to stimulate growth and development in vegetables

Compuesto	Fórmula	Concentración*
Citoquininas	C10H9N50	(kinetina) 0,132 g L ⁻¹
Auxinas	C10H9NO2	0,050 g L ⁻¹
Ácido giberélico	C19H22O6	0,050 g L ⁻¹
Elementos minerales		77,400 g L ⁻¹
Materiales inertes		1 L

*Fuente: Triggr Trihormonal Farmex Vínculos Fértils, Perú

Tabla 2. Concentraciones de fitohormonas de acuerdo a 6 tratamientos utilizados para el crecimiento de gametofitos de *C. chamissoi* / Concentrations of phytohormones according to 6 treatments used for the growth of gametophytes of *C. chamissoi*

Tratamientos	Concentración de fitohormona (mL L ⁻¹)
T1 (100%)	1,0
T2 (50%)	0,5
T3 (25%)	0,25
T4 (12,5%)	0,125
T5 (6,25%)	0,0625
T6 (0% control)	0

de normalidad y homogeneidad de varianza, se utilizó la prueba de Kruskall-Wallis para evaluar las diferencias entre tratamientos y la prueba de Dunnett para determinar los grupos homogéneos.

Los gráficos de crecimiento fueron generados utilizando el paquete ggplot2 (R CODER© 2024).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 2 se observa el desembarque total de *C. chamissoi* en Chile y Perú entre los años 2009 y 2023. En el caso de Perú, los valores representan la extracción total de macroalgas, con un predominio de *Chondracanthus chamissoi*, entre otras algas comestibles, mostrando un incremento marcado entre 2019 y 2020, seguido de una estabilidad relativa hasta 2022 y una disminución en 2023. En Chile, los valores representan exclusivamente el desembarque de *C. chamissoi* mostrando una disminución progresiva en la extracción hasta 2021, seguida de un incremento sostenido en 2022 y 2023.

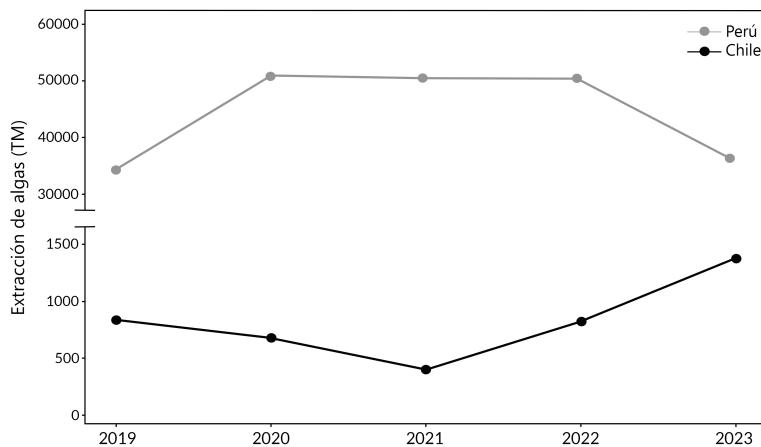


Figura 2. Desembarque total de macroalgas en Chile (exclusivamente *Chondracanthus chamussoi*) y Perú (con predominio de *C. chamussoi*) durante el periodo 2009-2023. Fuente: PRODUCE (Perú) y SUBPESCA/SERNAPESCA (Chile) / Total landings of macroalgae in Chile (exclusively *Chondracanthus chamussoi*) and Peru (with predominance of *C. chamussoi*) during the period 2009–2023. Source: PRODUCE (Peru) and SUBPESCA/SERNAPESCA (Chile)

Se observaron diferencias significativas ($P < 0,05$) en la cantidad de tetrasporas liberadas según la concentración de fitohormonas aplicada (T1 a T6) (Tabla 3). Los resultados evidencian un efecto significativo de las fitohormonas en el crecimiento y desarrollo de los gametofitos de *C. chamussoi*. Estos hallazgos concuerdan con investigaciones previas sobre el papel de las fitohormonas en macroalgas, donde se ha demostrado que auxinas, giberelinas y citoquininas desempeñan funciones clave en la regulación del crecimiento y diferenciación celular (Stirk & van Staden 2010, Yokoya *et al.* 2014).

Resultados de las pruebas estadísticas aplicadas a distintas estructuras biológicas de *Chondracanthus chamussoi* durante el período de estudio. Se indican la semana de muestreo, el valor de P y el tipo de prueba utilizada (Kruskal-Wallis, K-W; análisis de varianza, ANDEVA) / Results of the statistical tests applied to different biological structures of *Chondracanthus chamussoi* during the study period. The sampling week, P value, and the type of test used (Kruskal-Wallis, K-W; analysis of variance, ANOVA) are indicated

Estructura biológica	Semana	Valor P	Prueba
Asentamiento de esporas	1	2,20 ⁻¹⁶	K-W
	4	2,20 ⁻¹⁶	K-W
Densidad de discos	4	2,00 ⁻¹⁶ ***	ANDEVA
	5	5,45 ⁻¹² ***	ANDEVA
Diámetro de talo	4	0,01397	K-W
	6	0,005372	K-W
	7	0,005372	K-W
	8	0,005372	K-W
	9	0,005372	K-W
	10	7,59 ⁻¹⁵ ***	ANDEVA

* $P < 0,05$, ** $P < 0,01$, *** $P < 0,001$

EFFECTO DE LAS FITOHORMONAS EN LA DENSIDAD DE ESPORAS Y FIJACIÓN

La densidad de esporas asentadas en la cuerda al séptimo día después de la siembra (Fig. 3a) varió entre 160 y 419 esporas mm^{-2} , con una disminución progresiva hacia la cuarta semana (Fig. 3b). Este patrón de asentamiento es consistente con estudios previos sobre la fijación de esporas en macroalgas rojas, donde se ha reportado que la presencia de fitohormonas influye en la adhesión y supervivencia de las esporas en el sustrato (Uji & Mizuta 2022). La mayor densidad de fijación se observó en el tratamiento con 100% de fitohormonas (T1), el cual presentó valores más elevados, alcanzando 376 ± 27 esporas mm^{-2} al final de la primera semana y 211 ± 21 esporas mm^{-2} al final de la cuarta semana. Estos resultados sugieren que dichas sustancias favorecen la adhesión de las esporas al sustrato, posiblemente mediante la estimulación de la síntesis de polisacáridos de adhesión en la matriz extracelular (Clement *et al.* 1993, Limoli *et al.* 2015).

Por otro lado, el menor número de esporas adheridas (190 ± 16 y 41 ± 12 esporas mm^{-2}) registrado al final de la primera y cuarta semana en el tratamiento sin fitohormonas (T6), resalta la importancia de estos compuestos en la mejora de la eficiencia de fijación. Se ha descrito que las fitohormonas pueden modular la expresión de genes relacionados con la formación de estructuras de fijación, como rizoides y discos adhesivos, lo que podría explicar la mayor fijación observada en los tratamientos con concentraciones más elevadas de estas sustancias (Yuan *et al.* 2019, Xiao *et al.* 2020).

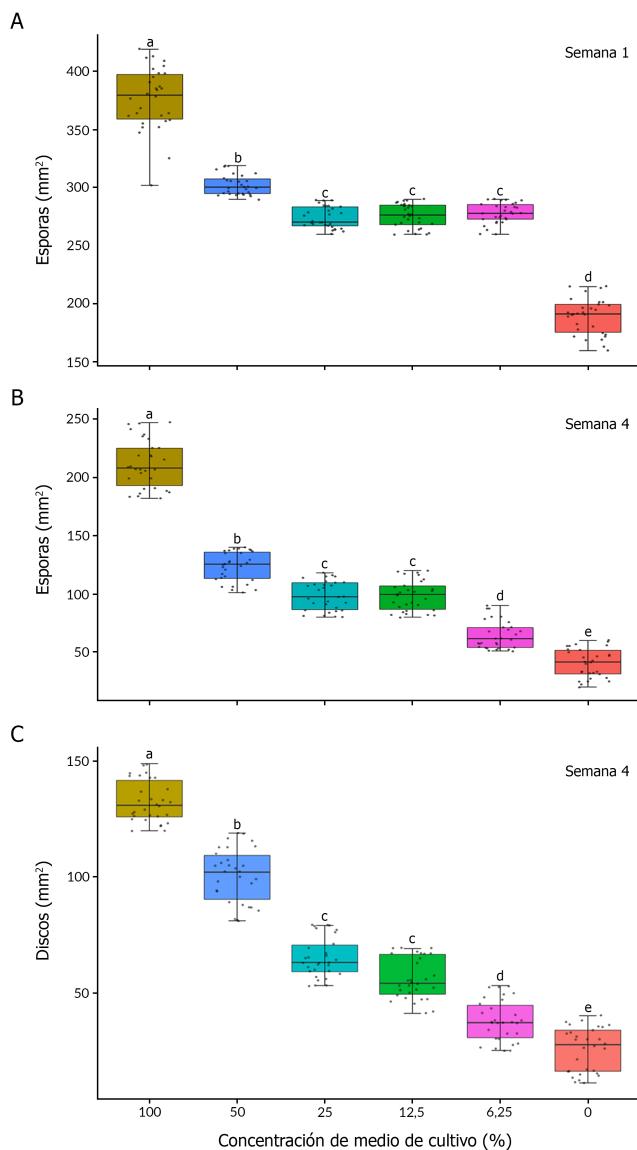


Figura 3. Densidad de esporas y discos de *Chondracanthus chamissoi*. Se muestran los resultados del asentamiento en diferentes concentraciones de medio de cultivo. a) Asentamiento de esporas al final de la semana 1 de cultivo. b) Asentamiento de esporas al final de la semana 4 de cultivo. c) Densidad de discos al final de la semana 4 de cultivo. Valores promedio ± desviación estándar para la densidad de discos en relación a la concentración de medio. Letras diferentes (a > b > c > d > e) indican diferencias significativas ($P < 0,05$; $n = 3$). / Density of spores and discs of *Chondracanthus chamissoi*. Results showing settlement at different concentrations of culture medium. a) Settlement of spores at the end of week 1 of culture. b) Settlement of spores at the end of week 4 of culture. c) Density of discs at the end of week 4 of culture. Average ± standard deviation values for disc density in relation to culture medium concentration. Different letters (a > b > c > d > e) indicate significant differences ($P < 0.05$; $n = 3$)

EFEITO DE LAS FITOHORMONAS EN EL CRECIMIENTO Y MORFOGÉNESIS DE *C. CHAMISSOI*

El incremento en la densidad de discos y tamaño del microtalo en los tratamientos con fitohormonas destaca su importancia en el fortalecimiento de la estructura de los gametofitos. La aplicación de auxinas y citoquininas ha sido reportada como un factor determinante en la diferenciación celular y la elongación de filamentos en algas rojas y pardas (Žižková *et al.* 2017). En este

estudio, el tratamiento con 100% de fitohormonas (T1) produjo la mayor cantidad de discos desarrollados ($133 \pm 9 \text{ mm}^2$) (Fig. 3c), lo que confirma su efecto positivo en la morfogénesis de *C. chamissoi*, mientras que el tratamiento sin fitohormonas (T6) mostró la menor cantidad discos desarrollados ($25 \pm 10 \text{ mm}^2$). Este incremento correlacionado con la concentración de fitohormonas reafirma su efecto estimulante en el desarrollo de *C. chamissoi*.

La diferencia significativa en el crecimiento en diámetro del microtalo, mantenida constante desde la semana 4 hasta la semana 10 post-asentamiento (Fig. 4), indicaría que las fitohormonas favorecen un crecimiento más rápido y sostenido. Específicamente, las giberelinas han sido identificadas como reguladores clave de la división y elongación celular en macroalgas, lo que podría explicar el incremento en el tamaño del microtalo observado en los tratamientos con mayores concentraciones de estas sustancias (Claeys *et al.* 2014).

IMPLICACIONES PARA LA ACUICULTURA SOSTENIBLE

La menor eficiencia observada en el tratamiento sin fitohormonas (T6) resalta la necesidad de incorporar estas sustancias para maximizar el rendimiento del cultivo. La aplicación de fitohormonas en cultivos de *C. chamissoi* podría representar una estrategia viable para aumentar la biomasa producida y mejorar la sostenibilidad

de su explotación comercial. Estudios recientes han demostrado que la incorporación de reguladores del crecimiento en cultivos de macroalgas puede incrementar significativamente la tasa de producción de biomasa sin afectar negativamente la calidad nutricional del alga (Spagnuolo *et al.* 2022, Sun *et al.* 2023).

El uso de fitohormonas no solo contribuye al desarrollo de tecnologías de cultivo más eficientes, sino que también puede desempeñar un papel clave en la conservación de las poblaciones naturales de *C. chamissoi*. La sobreexplotación de praderas naturales para la extracción de esta especie ha generado preocupación en términos de sostenibilidad ecológica. La implementación de técnicas de cultivo optimizadas con fitohormonas podría reducir la presión sobre las poblaciones silvestres y garantizar un suministro continuo de biomasa para su uso en la industria alimentaria y farmacéutica (Park *et al.* 2013).

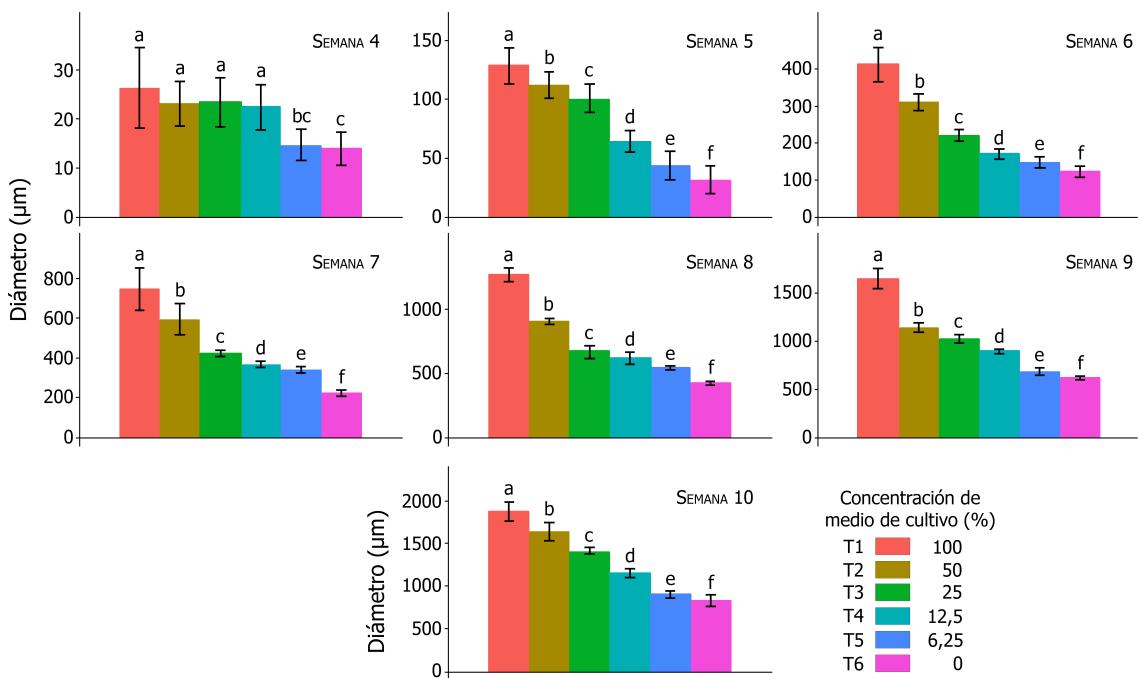


Figura 4. Crecimiento de diámetro del talo de *Chondracanthus chamissoi* desde la semana 4 hasta 10 de post-asentamiento (promedio ± desviación estándar). Letras diferentes indican diferencias significativas (a > b > c > d > e > f, n = 3, P < 0,05) / *Chondracanthus chamissoi* thallus diameter growth from week 4 of post-settlement (mean ± standard deviation). Different letters indicate significant difference (a > b > c > d > e > f, n = 3, P < 0.05)

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS

La adición de fitohormonas en los medios de cultivo de *Chondracanthus chamissoi* ha demostrado un efecto significativo y cuantificable en la adhesión de esporas, densidad de discos germinativos y crecimiento del microtalo, con una respuesta particularmente positiva en tratamientos con altas concentraciones de giberelinas, auxinas y citoquininas (Yokoya *et al.* 2014). Estas fitohormonas han sido previamente identificadas como reguladores clave en el desarrollo de macroalgas, actuando sobre procesos fisiológicos como la división celular, elongación y diferenciación de tejidos (Li *et al.* 2023). Los resultados obtenidos refuerzan estos hallazgos y destacan la importancia de estos reguladores en la optimización del asentamiento y desarrollo inicial de *C. chamissoi*, sugiriendo que su aplicación en cultivos podría mejorar significativamente la eficiencia productiva.

Además, la mejora en los parámetros de crecimiento en este estudio proporciona información clave para el diseño de protocolos de cultivo más eficientes, contribuyendo a la producción sostenible de biomasa con alto valor comercial y biotecnológico. La acuicultura de macroalgas enfrenta desafíos relacionados con la tasa de crecimiento y estabilidad del cultivo en condiciones controladas (Korzen *et al.* 2016, Thomas *et al.* 2019), y el uso de fitohormonas podría representar una solución viable para aumentar la resiliencia y productividad de estos sistemas. La optimización del cultivo de *C. chamissoi* no solo fortalecería su oferta como recurso marino, sino que también serviría como una herramienta biotecnológica para reducir la presión sobre poblaciones naturales, promoviendo prácticas acuícolas sustentables y la conservación de hábitats costeros. Estudios previos han reportado que la aplicación de fitohormonas en otras macroalgas mejora su contenido de compuestos bioactivos, lo que podría representar una oportunidad para incrementar la producción de metabolitos secundarios de interés comercial y farmacológico (Wang *et al.* 2021).

Dado el impacto positivo observado en el desarrollo de *C. chamissoi*, se recomienda la realización de estudios adicionales que permitan identificar concentraciones óptimas y evaluar su aplicabilidad en cultivos de escala industrial.

Investigaciones futuras deberían explorar la interacción de las fitohormonas con otros factores ambientales, como la temperatura, salinidad y disponibilidad de nutrientes, con el fin de desarrollar estrategias integradas para la maximización del rendimiento del cultivo. Asimismo, el análisis de la composición bioquímica del alga en respuesta a la aplicación de fitohormonas podría determinar niveles en su perfil de proteínas, lípidos y carbohidratos, con información base sobre su potencial en la industria alimentaria, nutracéutica y farmacéutica.

Este trabajo contribuye al avance del conocimiento en el cultivo de *C. chamissoi*, destacando la relevancia de las fitohormonas como herramientas biotecnológicas para

mejorar la productividad y sostenibilidad de la acuicultura de macroalgas. La integración de estos hallazgos en estrategias de manejo podría representar un hito en el desarrollo de la maricultura sustentable, favoreciendo tanto la conservación de ecosistemas como la expansión del sector acuícola en mercados emergentes.

DECLARACIONES

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Científica del Sur (UCSUR) por brindar sus instalaciones y desarrollo del presente trabajo y a la Empresa Acuícola Mares del Sur (ACUISUR) por el conocimiento brindado en Acuicultura Marina.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

YCS realizó la conceptualización y el diseño metodológico del estudio. YCS y MC efectuaron los muestreos de campo y los análisis de laboratorio. RCG y OAA llevaron a cabo la investigación y la curación de datos. JIH llevó a cabo los análisis estadísticos y elaboró las figuras. RPV realizó la supervisión académica y técnica del trabajo, redactó el borrador original, y todos los autores contribuyeron a la revisión y edición del manuscrito.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Se solicitan al autor corresponsal.

CONFLICTO DE INTERESES

No existen conflictos de intereses.

APROBACIÓN ÉTICA

No aplica.

USO DE HERRAMIENTA DE IA

Durante la preparación de este trabajo, los autores utilizaron Scopus AI para recuperar literatura científica y Chat GPT 5.0 para corregir la gramática. Tras utilizar esta herramienta, los autores revisaron y editaron el contenido según fue necesario y asumen toda la responsabilidad por el contenido de la publicación.

LITERATURA CITADA

- Arbaiza S, P Gil-Kodaka, N Arakaki & K Alveal. 2019.** First stages of cultivation from *Chondracanthus chamissoi* carpospores from three locations on the Peruvian coast. Revista de Biología Marina y Oceanografía 54(2): 204-213. <<https://doi.org/10.22370/rbmo.2019.54.2.1901>>
- Ávila M, MI Piel, JH Cáceres & K Alveal. 2011.** Cultivation of the red alga *Chondracanthus chamissoi*: Sexual reproduction and seedling production in culture under controlled conditions. Journal of Applied Phycology 23(3): 529-536. <<https://doi.org/10.1007/s10811-010-9628-1>>

- Basauré H, J Macchiavello, C Sepúlveda, F Sáez, D Yañez, L Vega & C Marín.** 2021. Sea bottom culture of *Chondracanthus chamussoi* (Rhodophyta: Gigartinales) by vegetative propagation at Puerto Aldea, Tongoy Bay (Northern Chile). Aquaculture Research 52(5): 2025-2035. <<https://doi.org/10.1111/are.15051>>
- Bermejo R, CL Cara, M Macías, J Sánchez-García & I Hernández.** 2020. Growth rates of *Gracilaria longissima*, *Gracilaria bursa-pastoris* and *Chondracanthus teedei* (Rhodophyta) cultured in ropes: implication for N biomitigation in Cadiz Bay (Southern Spain). Journal of Applied Phycology 32(3): 1879-1891. <<https://doi.org/10.1007/s10811-020-02090-8>>
- Bulboa C, K Véliz, F Sáez, C Sepúlveda, L Vega & J Macchiavello.** 2013. A new method for cultivation of the carragenophyte and edible red seaweed *Chondracanthus chamussoi* based on secondary attachment disc: Development in outdoor tanks. Aquaculture 410/411: 86-94. <<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.06.018>>
- Bulboa C, IP Massad, L Contreras-Porcia, J Zapata, F Castañeda, ME Ramírez & P Gil-Kodaka.** 2020. Concise review of genus *Chondracanthus* (Rhodophyta: Gigartinales). Journal of Applied Phycology 32(2): 773-785. <<https://doi.org/10.1007/s10811-019-01956-w>>
- Calderón M, MH Ramírez & D Bustamante.** 2010. Notas sobre tres especies de Gigartinaceae (Rhodophyta) del litoral peruano. Revista Peruana de Biología 17(1): 115-121.
- Castañeda M, S Arbaiza, F Diaz, Y Castillo, P Baltazar & O Advíncula.** 2018. Evaluación del fotoperíodo en el asentamiento de tetraesporas de *Chondracanthus chamussoi* sobre cuerdas de polipropileno en condiciones semi-controladas de laboratorio. Anales Científicos 79(2): 459-465. <<https://doi.org/10.21704/ac.v79i2.1256>>
- Claeys H, S De Bodt & D Inzé.** 2014. Gibberellins and DELLA: central nodes in growth regulatory networks. Trends in Plant Science 19(4): 231-239.
- Clement JA, SG Martin, R Porter, TM Butt & A Beckett.** 1993. Germination and the role of extracellular matrix in adhesion of urediniospores of *Uromyces viciae-fabae* to synthetic surfaces. Mycological Research 97(5): 585-593.
- Gutiérrez R, R Núñez, L Quintana, O Valdés, K González, M Rodríguez, Y Hernández & E Ortiz.** 2017. Optimization of the extraction process of phenolic compounds from the brown algae *Sargassum fluitans* Børgesen (Børgesen). Biotecnología Aplicada 34(3): 3301-3304.
- Hughes MH.** 2019. Reproducción a partir de esporas de *Gigartina skottsbergii* y *Sarcothalia crispata* (Rhodophyta) de la Patagonia argentina y aplicación farmacéutica de sus carragenanos. Tesis Doctoral, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, 134 pp. <<https://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/4520>>
- Korzen L, A Abelson & A Israel.** 2016. Growth, protein and carbohydrate contents in *Ulva rigida* and *Gracilaria bursa-pastoris* integrated with an offshore fish farm. Journal of Applied Phycology 28: 1835-1845.
- Li Y, Y Tao, Q Wang, Q Gong & X Gao.** 2023. Effects of organic carbon source and pH on growth, astaxanthin accumulation and endogenous phytohormone secretion of *Haematococcus pluvialis*. Journal of Applied Phycology 35(6): 2815-2828.
- Limoli D H, CJ Jones & DJ Wozniak.** 2015. Bacterial extracellular polysaccharides in biofilm formation and function. Microbiology Spectrum 3, 10.1128. <<https://doi.org/10.1128/microbiolspec.mb-0011-2014>>
- Macchiavello JC, C Bulboa, K Sepulveda, F Véliz, L Saez, L Vega & R Véliz.** 2012. Manual de cultivo de *Chondracanthus chamussoi* (Chicorea de Mar), 47 pp. Proyecto HUAM FONDEF, Universidad Católica del Norte, Coquimbo. <https://sembrandoelmar.cl/web/wp-content/uploads/2021/02/Manual_chicoria_UCN.pdf>
- Montoya V, A Meynard, L Contreras-Porcia & CB Contador.** 2020. Molecular identification, growth, and reproduction of *Colaconema daviesii* (Rhodophyta; Colaconematales) endophyte of the edible red seaweed *Chondracanthus chamussoi*. Journal of Applied Phycology 32(5): 3533-3542. <<https://doi.org/10.1007/s10811-020-02176-3>>
- Oyarzo S, M Ávila, P Alvear, J Remonsellez, L Contreras-Porcia & C Bulboa.** 2021. Secondary attachment disc of edible seaweed *Chondracanthus chamussoi* (Rhodophyta, Gigartinales): Establishment of permanent thalli stock. Aquaculture 530, 735954. <<https://doi.org/10.1016/J.AQUACULTURE.2020.735954>>
- Park W K, G Yoo, M Moon, CW Kim, YE Choi & JW Yang.** 2013. Phytohormone supplementation significantly increases growth of *Chlamydomonas reinhardtii* cultivated for biodiesel production. Applied Biochemistry and Biotechnology 171: 1128-1142.
- Spagnuolo D, V Russo, A Manghisi, A Di Martino, M Morabito, G Genovese & P Trifilò.** 2022. Screening on the presence of plant growth regulators in high biomass forming seaweeds from the Ionian Sea (Mediterranean Sea). Sustainability 14(7), 3914. <<https://doi.org/10.3390/su14073914>>
- Stirk WA & J van Staden.** 2010. Flow of cytokinins through the environment. Plant Growth Regulation 62(2): 101-116. <<https://doi.org/10.1007/s10725-010-9481-x>>
- Sun D, E Rahman, S Sun, X Sun & N Xu.** 2023. Effects of polyamines on the early development of cystocarps, spore release, survival, and germination rate of *Gracilariaopsis lemeneiformis*. Journal of Oceanology and Limnology 41(3): 1133-1144.
- Thomas J B E, FS Ramos & F Gröndahl.** 2019. Identifying suitable sites for macroalgae cultivation on the Swedish West Coast. Coastal Management 47(1): 88-106.
- Uji T & H Mizuta.** 2022. The role of plant hormones on the reproductive success of red and brown algae. Frontiers in Plant Science 13, 1019334. <<https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1019334>>
- Vásquez JA & JM Alonso-Vega.** 2001. *Chondracanthus chamussoi* (Rhodophyta, Gigartinales) in northern Chile: ecological aspects for management of wild populations. Journal of Applied Phycology 13: 267-277.
- Vilcanqui Y, L Mamani-Apaza, M Flores, J Ortiz-Viedma, N Romero, M Mariotti-Celis & N Huamán-Castilla.** 2021. Chemical characterization of brown and red seaweed from southern Peru, a sustainable source of bioactive and nutraceutical compounds. Agronomy 11(89), 1669. <<https://doi.org/10.3390/agronomy11081669>>

- Wang C, M Qi, J Guo, C Zhou, X Yan, R Ruan & P Cheng.** 2021. The active phytohormone in microalgae: the characteristics, efficient detection, and their adversity resistance applications. *Molecules* 27(1), 46. <<https://doi.org/10.3390/molecules27010046>>
- Xiao Y, F Yi, J Ling, G Yang, N Lu, Z Jia, J Wang K Zao, J Wang & W Ma.** 2020. Genome-wide analysis of lncRNA and mRNA expression and endogenous hormone regulation during tension wood formation in *Catalpa bungei*. *BMC genomics* 21, 609. <<https://doi.org/10.1186/s12864-020-07044-5>>
- Yang MY, EC Macaya & MS Kim.** 2015. Molecular evidence for verifying the distribution of *Chondracanthus chamussoi* and *C. teedei* (Gigartinaceae, Rhodophyta). *Botanica Marina* 58(2): 103-113. <[10.1515/bot-2015-0011](https://doi.org/10.1515/bot-2015-0011)>
- Yokoya NS, M Ávila, MI Piel, F Villanueva & A Alcapán.** 2014. Effects of plant growth regulators on growth and morphogenesis in tissue culture of *Chondracanthus chamussoi* (Gigartinales, Rhodophyta). *Journal of Applied Phycology* 26(2): 819-823. <<https://doi.org/10.1007/s10811-013-0130-4>>
- Yuan H, L Zhao, W Guo, Y Yu, L Tao, L Zhang, X Song, W Huang, L Cheng, J Chen, F Guan, G Wu & H Li.** 2019. Exogenous application of phytohormones promotes growth and regulates expression of wood formation-related genes in *Populus simonii* x *P. nigra*. *International Journal of Molecular Sciences* 20(3), 792. <[doi: 10.3390/ijms20030792](https://doi.org/10.3390/ijms20030792)>
- Žižková E, M Kubeš, PI Dobrev, P Přibyl, J Šimura, L Zahajská, L Záveská, O Novák & V Motyka.** 2017. Control of cytokinin and auxin homeostasis in cyanobacteria and algae. *Annals of Botany* 119(1): 151-166.