

# Cultivo y aplicaciones de *Porphyridium cruentum*: principales tendencias y proyecciones

## Culture and applications of *Porphyridium cruentum*: main trends and projections

Cynthia Ramos Frómeta\*, Liliana María Gomez Luna\*\*

DOI: 10.15446/rev.colomb.biote.v26n1.108815

### RESUMEN

*Porphyridium cruentum* es una microalga que posee múltiples aplicaciones, a partir de la cual se obtienen valiosos bioproductos como la ficoeritrina, y polisacáridos sulfatados. Esta investigación es un estudio exploratorio-descriptivo que realiza una revisión sistemática con herramientas de metanálisis con el objetivo de analizar las tendencias de las investigaciones sobre *P. cruentum*, su cultivo y principales aplicaciones, con énfasis en el campo magnético (CM). Se conformó una base de datos con 851 artículos entre 1914 - septiembre 2022. En el análisis bibliométrico, se identificaron los principales temas en tendencia y algunos aspectos específicos. Se demostró que existe un marcado interés científico y comercial por *P. cruentum*, cuyos bioproductos tienen un amplio espectro de aplicaciones, en la industria alimentaria, médico-farmacéutica, energética y cosmética. Los temas relevantes están relacionados con el aumento del rendimiento de bioproductos a gran escala, sin embargo, existe una aplicación limitada del campo electromagnético para dichos fines. Se reporta para la especie que las condiciones de cultivo dependen de los propósitos para los que se utiliza la biomasa. Los cultivos más utilizados son los autotróficos, con iluminaciones de tipo lámparas LED en fotobiorreactores de columnas con burbujes constantes. Los estudios relacionados con las aplicaciones de campos magnéticos a los cultivos de *P. cruentum* son limitados, sin embargo, existen reportes de la interferencia positiva de los CM sobre el crecimiento y productividad en algunas especies de microalgas, por lo que se sugiere utilizar el campo magnético estático en la estimulación del crecimiento de *P. cruentum*.

**Palabras clave:** *Porphyridium cruentum*; ficoeritrinas; polisacáridos; biomasa.

### ABSTRACT

*Porphyridium cruentum* is a microalga that has multiple applications, from which valuable bioproducts such as phycoerythrin and sulfated polysaccharides are obtained. This research is an exploratory-descriptive study that carries out a systematic review with meta-analysis tools to analyze the trends in research on *P. cruentum*, its cultivation, and its main applications, with emphasis on the applications of the magnetic field (MF). A database of 851 articles was formed between 1914 - September 2022. Bibliometric analysis was carried out, the main trending topics were identified, and specific aspects. It was shown that there is a marked scientific and commercial interest in *Porphyridium cruentum*, whose bioproducts have a wide spectrum of applications in the food, medical-pharmaceutical, energy, and cosmetic

\* Laboratorio de Ecotoxicología y Servicios Ambientales, Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado (CNEA), Universidad de Oriente. Santiago de Cuba; Cuba. <https://orcid.org/0000-0003-4581-9223>; cramosfrometa@gmail.com

\*\* Laboratorio de Ecotoxicología y Servicios Ambientales, Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado (CNEA), Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, Cuba. <https://orcid.org/0000-0002-1282-3392>; lilimagl@gmail.com

industries. The relevant topics are related to increasing the yield of bioproducts on a large scale, however, there is a limited application of the electromagnetic field for such purposes. It is reported for the species that cultivation conditions depend on the purposes for which the biomass is used. The most used crops are autotrophic, with LED lamp-type lighting in column photobioreactors with constant bubbling. Studies related to the applications of magnetic fields to *P. cruentum* cultures are limited, however, there are reports of the positive interference of magnetic fields on the growth and productivity of some species of microalgae, so it is suggested to use static magnetic field in stimulating the growth of *P. cruentum*.

**Keywords:** *Porphyridium cruentum*; phycoerythrin; polysaccharides; Publish or Perish.

**Recibido:** octubre 4 de 2023      **Aprobado:** mayo 10 de 2024

## INTRODUCCIÓN

Las microalgas son organismos unicelulares fotosintetizadores de tamaño microscópico (Abalde *et al.*, 1995) de las que se obtienen varios productos de interés para diferentes industrias (Pulz and Wolfgang, 2004; Spolaore *et al.*, 2006). Entre las microalgas de mayor interés comercial se pueden mencionar las especies del género *Porphyridium* spp.; algas rojas unicelulares (Rodophyta) cosmopolitas, con mayor abundancia en aguas templadas y cálidas, presentes en los ecosistemas bentónicos litorales; con especies capaces de acumular de forma natural sustancias bioactivas de alto valor comercial, útiles para la producción de alimentos, la industria médico-farmacéutica y la cosmética (Garza-Valverde *et al.*, 2023; Kavitha *et al.*, 2016).

*P. cruentum* es productora de polisacáridos extracelulares, ácido araquidónico y pigmentos, destacando como una de las especies más atractivas del género, con gran potencial para la comercialización. Presenta células esféricas con un tamaño aproximado de 10 µm de diámetro (Servel *et al.*, 1994). Se distribuye en aguas costero-marinas, salobres y suelos húmedos; las células carecen de pared celular, y presentan una membrana rodeada por una cápsula de polisacáridos sulfatados.

Es un organismo versátil, a partir del que se obtienen pigmentos y polisacáridos para la industria alimentaria y la cosmética (Ozório *et al.*, 2015; Syaifudin *et al.*, 2017); antioxidantes (Agustina *et al.*, 2020; Gargouch *et al.*, 2021; Sun *et al.*, 2012), además de otros compuestos que le permiten aplicaciones relacionadas con la acumulación y retención de iones, la producción de biomasa, y la genómica (Irwani *et al.*, 2013; Soeprbowati and Hariyati, 2013).

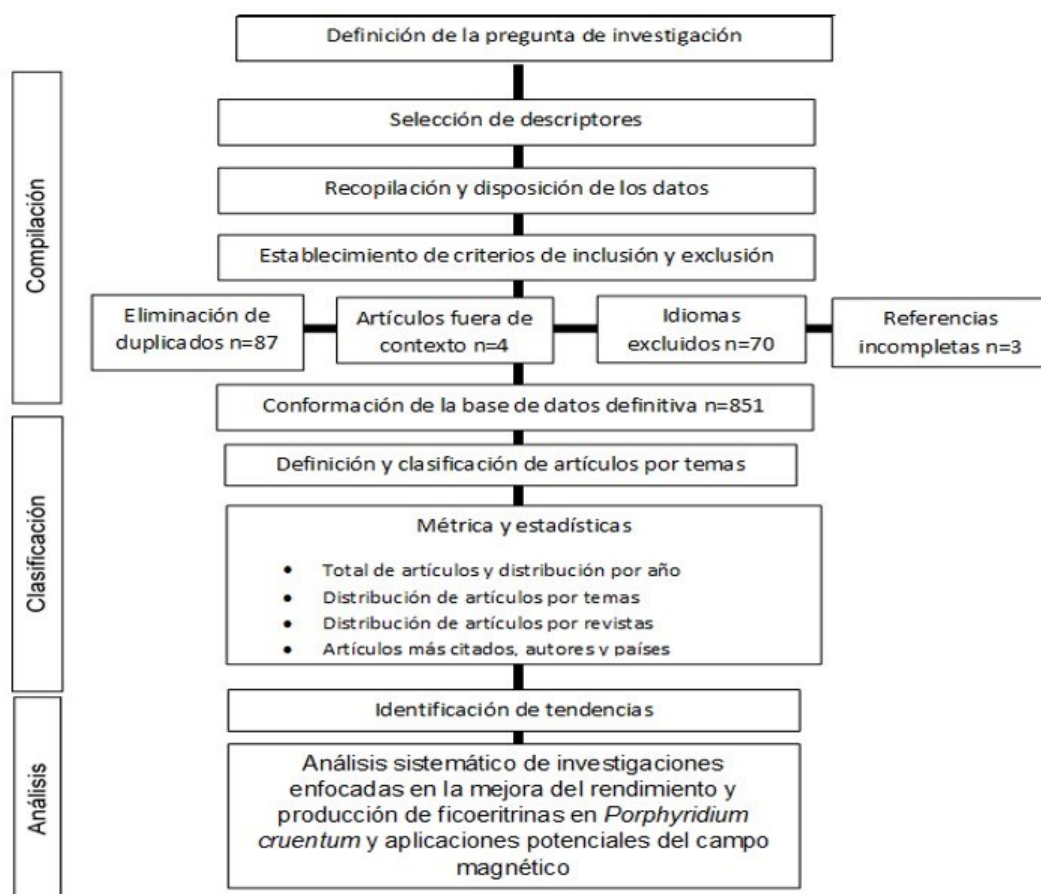
Su biomasa se obtiene, dependiendo de las condiciones de cultivo con un contenido de proteínas entre el 28 - 39 %; 40 - 57 % de carbohidratos, y los lípidos totales pueden representar del 9 - 14 % de su peso seco; composición que depende del manejo de diferentes variables de cultivo. Entre los pigmentos accesorios que le

dan su color característico, están la ficoeritrina, la ficocianina y los carotenoides; siendo mayoritaria la concentración de clorofila a (Rivera-Talamantes, 2014).

Las B ficoeritrinas (B-PE) constituyen uno de los productos de mayor interés comercial de *P. cruentum*; estas tienen diferentes aplicaciones en la industria alimentaria, médico-farmacéutica y cosmética, ya que son colorantes naturales con un alto coeficiente de absorción. Se aprovechan en la producción de bebidas y cosméticos (Agustina *et al.*, 2020). Además, por las propiedades fluorescentes que poseen son utilizadas como marcadores bioquímicos en inmunoensayos (Cervantes-Blanco *et al.*, 2021; S. Li *et al.*, 2019), en el desarrollo de biosensores y como potencial agente antitumoral (Minkova *et al.*, 2011; Rivera-Talamantes, 2014).

Las ficoeritrinas (PEs) son moléculas solubles en agua, fluorescentes, que pertenecen a la familia de las ficobiliproteínas (PBPs). Poseen estabilidad en un rango de pH de 3 a 10, pero la exposición a temperaturas mayores de 40°C reduce notablemente su estabilidad, y la intensidad del color (Simovic *et al.*, 2022). Las PBPs se pueden clasificar según los espectros de absorción en tres subgrupos: B-PE (B-ficoeritrina) con un pico máximo de absorción a 545 nm y un pico a 495 nm, R-PE (R-ficoeritrina) con picos máximos de absorción a 565, 545 y 495 nm, mientras que la C-PE (C-ficoeritrina) tiene picos máximos de absorción a 563, 543 y 492 nm (Garza-Valverde *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2020). Algunas compañías como Biomeda Corporation (EUA) destacan en la producción de PBPs puras para su uso como marcadores fluorescentes (Guerrero *et al.*, 1999). Otras como Yemoja (Israel) producen polisacáridos extracelulares (EPS) para el sector de la cosmética, y biomasa para la obtención de alimentos veganos de nueva generación.

El valor comercial de la ficoeritrina pura ha fluctuado, desde varios miles de dólares por kilogramo en la década de 1990 (Guerrero *et al.*, 1999), \$ 50.000,00 dólares por kg en 2005 (Market Corporation, 2005), hasta \$ 450,00 dólares por 10 mg o \$ 600,00 dólares por 25 mg en 2022 (Fivephoton Biochemicals, 2022). También hay que consi-



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 1.** Diagrama con los principales pasos de la revisión sistemático-crítica con herramientas de metanálisis, desde la compilación hasta el análisis.

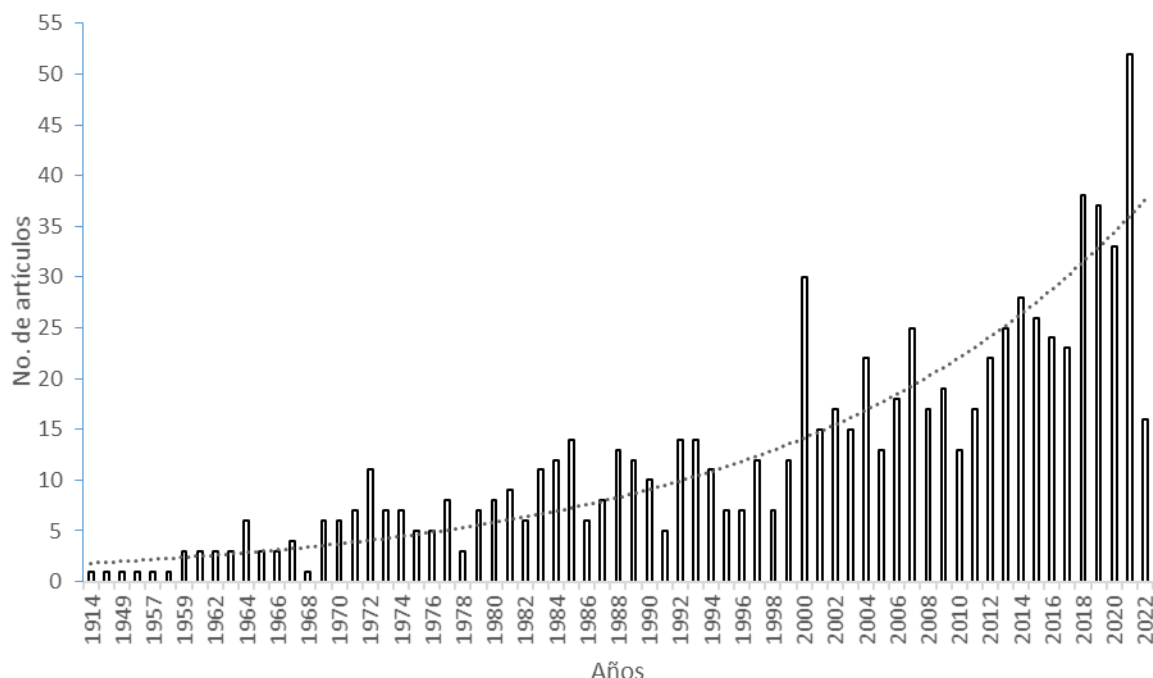
derar los precios actuales de productos elaborados con PE como los conjugados de R-ficoeritrina (SAPE); 1 mgmL<sup>-1</sup> se expende con diferentes nombres comerciales, entre los que puede mencionarse la Estreptavidina RPE de Molecular Probes. Este conjugado está compuesto por una proteína tetramérica, no proviene de *P. cruentum*, sino de la bacteria *Streptomyces avidinii* y tiene un precio de 421.565,00 € (Thermo Scientific, 2023).

Para incrementar su producción se han empleado varias estrategias de optimización, encaminadas, fundamentalmente, a desarrollar biomasa mediante la implementación de fotobiorreactores tubulares (Cervantes-Blanco *et al.*, 2021; Erbil *et al.*, 2021), si bien los cultivos a cielo abierto siguen sosteniendo importantes producciones comerciales. Otra estrategia ha sido la inducción con determinadas concentraciones de hierro (Fe<sup>2+</sup>) con el propósito de aumentar las tasas de crecimiento (Rizky *et al.*, 2013); y el uso de cloruro férrico (FeCl<sub>3</sub>) para estimular la producción de pigmentos (Erbil *et al.*, 2022), entre otras.

El objetivo de esta investigación se centra en analizar las tendencias de las investigaciones sobre *P. cruentum*, su cultivo y principales aplicaciones, con énfasis en las aplicaciones del (CM), el que ha sido utilizado con éxito para mejorar el crecimiento y la producción de pigmentos en diferentes especies de microalgas (Gómez-Luna *et al.*, 2011; Silveira-Font *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2006).

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó un estudio exploratorio-descriptivo mediante una revisión sistemático-crítica con herramientas de metanálisis, siguiendo una metodología que permitió integrar de manera objetiva los resultados de un conjunto de estudios empíricos (Sánchez Meca, 2010) con el propósito de determinar el estado de conocimiento sobre el tema seleccionado para el análisis: el cultivo de *P. cruentum*, sus aplicaciones, y estrategias utilizadas para mejorar la producción de metabolitos de interés. Para la confección de la base de datos se utilizó el software Publish or Perish, compilando artículos comprendidos entre 1914 y septiembre de 2022.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 2.** Distribución de los artículos sobre *Porphyridium* spp. analizados por año (1914 - 2022).

Se consultaron diferentes bases de datos (ScienceDirect, Scopus, Scielo), siendo clave el uso de Google Académico y Cross-Ref. El diagrama metodológico se presenta en la Figura 1. Se compilaron en total de 1014 trabajos, de los cuales se eliminaron duplicados (n=86), trabajos fuera de contexto (n=4), en otros idiomas (mandarín, ruso y árabe) (n=70) y las referencias incompletas (n=3). Conformando finalmente una base de datos con 851 artículos, a partir de la que realizó un análisis bibliométrico, la identificación de las principales temáticas, y la selección de artículos para la revisión de aspectos específicos.

En el análisis de la base de datos se tuvieron en cuenta los siguientes indicadores: *Temas* (Temas principales, Temas tendencia); *Interés* (Total de artículos y distribución por años, Distribución de artículos por temas); *Revistas y artículos relevantes* (Distribución de artículos por revistas, Artículos más citados, autores y países); *Contribución por países* (Distribución de artículos por países); *Especificidades* (Aspectos relevantes sobre el cultivo y aplicaciones de *P. cruentum*, mejora del rendimiento y producción de metabolitos, así como el uso del CM en dicha especie). Para la identificación de los temas tendencia, se analizó la cantidad de artículos en los últimos tres años y el porcentaje que representan respecto a al total de publicaciones de los últimos cinco años. Para ello se realizaron análisis utilizando la estadística descriptiva mediante distribuciones de frecuencia, porcentajes,

cálculos básicos y gráficas con líneas de tendencia. Los datos se procesaron en Microsoft Excel 2016.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Las investigaciones sobre *Porphyridium* spp. : principales temas de interés y tendencias.

Los resultados indican que ha existido un interés creciente en las investigaciones sobre *Porphyridium* spp. desde 1914 hasta septiembre de 2022, resaltando cuatro períodos de acuerdo con el número de publicaciones obtenidas: 1914-1972, 1973-1985, 1986-2000 y 2001-2022, marcados por picos temporales, con un total de 65, 102, 168 y 515 publicaciones, respectivamente (Figura 2).

A partir de 1969 comienza a observarse un incremento estable de las publicaciones. En el segundo período, hay un discreto incremento respecto al precedente; en el tercero se observan 1,65 veces más publicaciones que el segundo, y en el último período hay 3,07 veces más publicaciones que en el anterior. En la última etapa (2001-2022) la especie más estudiada fue *P. cruentum*, con un total de 304 artículos, lo que representa el 59 % de las publicaciones de este período. A partir del análisis de cada artículo se identifican 16 temas y 72 subtemas (Tabla 1), siendo los temas más representativos:

- Optimización de cultivos, crecimiento, aislamiento, aspectos fisiológicos y procesamiento de la biomasa (Total: 315)
- Aplicaciones médico-farmacéuticas, biotecnológicas, cosméticas y en la industria alimentaria (Total: 119)
- Pigmentos: análisis, obtención, purificación y aplicaciones (Total: 110)
- Polisacáridos: biosíntesis, extracción, producción y aplicaciones (Total: 110).

El subtema con mayor número de artículos resultó ser: Cultivo de *Porphyridium* spp., con 185 artículos, de los cuales, 109 (59 %) tratan sobre *P. cruentum*, lo que reafirma la importancia de dicha especie, con una amplia gama de aplicaciones en relación con sus componentes, destacando las ficoeritrinas y polisacáridos, con usos potenciales como antioxidantes, antivirales, anticancerígenos, e hipoglucemiantes, entre otras (Sun *et al.*, 2009; Tannin-Spitz *et al.*, 2005).

**Tabla 1.** Distribución de artículos por temas de investigación sobre *Porphyridium* spp.

TEMAS GENERALES	SUBTEMAS	NO. DE ARTÍCULOS
Optimización de cultivos, crecimiento, aislamiento, aspectos fisiológicos y procesamiento de la biomasa <b>(total: 315)</b>	Cultivos	185
	Aspectos fisiológicos	97
	Crecimiento	16
	Procesamiento de la biomasa	13
	Interacción de cultivos con cepas bacterianas	2
	Aislamiento de microorganismos	2
Características de <i>Porphyridium</i> , taxonomía, sistemática, ultraestructura y ciclo celular <b>(total: 61)</b>	Estudios ultraestructurales	30
	Características y sistemática	18
	Ciclo celular	6
	Aislamiento de ficobilisomas	5
	Estructura del ficobilisoma	2
Pigmentos: análisis, obtención, purificación y aplicaciones <b>(total: 110)</b>	Obtención, aislamiento, purificación y análisis de la ficoeritrina	74
	Análisis de pigmentos: estudios de fluorescencia y propiedades ópticas	21
	Extracción, purificación y análisis de ficobiliproteínas	8
	Producción, conservación y aplicación de ficoeritrina	3
	Análisis del complejo de ficoeritrina y ficocianina	1
	Identificación de pigmentos y composición de ficocianinas	2
	Aislamiento y función de la aloficocianina B	1
Toxicología <b>(total: 7)</b>	Toxicidad de metales pesados sobre el crecimiento	4
	Producción de bioplásticos por la captación de CO <sub>2</sub>	1
	Fitomediación de metales pesados	1
	Influencia de cobalto en la acumulación de ácido araquidónico y eicosapentanoico	1
Composición bioquímica y características de otros metabolitos de interés <b>(total: 71)</b>	Composición bioquímica general	26
	Polisacáridos extracelulares	15
	Ácidos grasos	14
	Fitoesteroles	6
	Protoplastos	5
	Lípidos y galactolípidos	2
	Tocoferol, vitamina k y quinonas	1
	Citocromo c	1
	Polisacáridos	1

Elaboración propia.

**Continuación...Tabla 1.** Distribución de artículos por temas de investigación sobre *Porphyridium* spp.

TEMAS GENERALES	SUBTEMAS	NO. DE ARTÍCULOS
Aplicaciones <b>(total: 119)</b>	Aplicaciones biotecnológicas	26
	Actividad antioxidante	27
	Polisacáridos sulfatados	11
	Actividad antiviral	11
	Actividad antibacteriana	11
	Biomasa: alimento animal y humano, y usos terapéuticos	5
	Actividad anticancerígena	4
	Bioabsorción de iones	4
	Actividad antimicrobiana	3
	Producción de colorantes	2
	Efecto hipoglucemiante	3
	Producción de biocombustibles	3
	Aplicaciones de las sustancias bioactivas	1
	Identificación, caracterización y usos de las fosfolipasas	1
	Aplicaciones oftalmológicas: inhibición de la formación de cataratas	1
	Actividad inmunológica	6
Genómica <b>(total: 22)</b>	Secuenciación y análisis del genoma	20
	Fusión de protoplastos y recombinación genética	1
	Mutaciones	1
Polisacáridos: biosíntesis, extracción, producción y aplicaciones <b>(total: 110)</b>	Biosíntesis de polisacáridos	54
	Obtención de polisacáridos extracelulares	26
	Producción de polisacáridos	24
	Biodegradación de polisacáridos	3
	Síntesis de polisacáridos en la pared celular	1
	Inhibición de la formación de polisacáridos	1
Biosíntesis y producción de otros metabolitos <b>(total: 34)</b>	Acumulación de sulfato	1
	Biosíntesis y producción de ácido eicosapentaenoico y ácido araquidónico	13
	Extracción de componentes intracelulares	6
	Producción de ácidos grasos poliinsaturados	6
	Biosíntesis de laminitol	2
	Biosíntesis de fitoesteroles	1
	Biosíntesis de polipéptidos	1
	Extracción de compuestos bioactivos	1
	Ferredoxinas	1
	Extracción y purificación de fracciones lipídicas	1
	Producción de ficocoloides	1
Aplicaciones del CM	Aislamiento de polipéptidos	1
		2

Elaboración propia.

Entre los temas que constituyen tendencia destacan las aplicaciones médicas, con énfasis en bioproductos como las ficoeritrinas y polisacáridos sulfatados; específicamente su actividad antioxidante, antiviral, inmunoestimulante y su efecto hipoglucemiante; la optimización de cultivos, el crecimiento, estudios sobre el ciclo celular;

mente su actividad antioxidante, antiviral, inmunoestimulante y su efecto hipoglucemiante; la optimización de cultivos, el crecimiento, estudios sobre el ciclo celular;

**Tabla 2.** Revistas con más de 10 artículos publicados en el período analizado: 1994-2022.  
Fuente: Elaboración propia.

Revistas	Cantidad de artículos
Journal of Phycology	25
Plant Physiology	20
Journal of Applied Phycology	18
Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics	16
Phycologia	16
Bioresource Technology	15
Algal Research	11

extracción de bioactivos a partir de la biomasa, producción de biocombustibles, estudios toxicológicos y análisis de pigmentos; por lo que el desarrollo de investigaciones en cualquiera de estos sería de interés para la ciencia en la actualidad.

#### Revistas y artículos con resultados relevantes sobre *Porphyridium* sp.

Los artículos seleccionados fueron publicados en 317 revistas, de las cuales solo 27 (18 %) publicó más de 5 artículos (Tabla 2). La revista con mayor número de artículos publicados fue el "Journal of Phycology" (J. Phycol.; n=25). Esta fue fundada en 1965 por la Sociedad Americana de Ficología. Es una revista de alto factor de impacto ( $Fi=4.4$ ) que pertenece al primer cuartil en las temáticas Ciencias de las Plantas y Ciencias Acuáticas.

Entre las revistas con mayor número de artículos publicados destacan, además, con más de 10 artículos: Plant Physiology, Journal of Applied Phycology, Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics, Phycologia, Bioresource Technology y Algal Research; todas específicas sobre temas relacionados con la Ficología aplicada, la Biotecnología; Fisiología vegetal y Bioquímica.

En cuanto a los artículos más citados, 48 de los incluidos en la compilación han obtenido más de 100 citas; estos representan el 5,63 % del total. De estos 16 han tenido más de 200 citas, y solo 1 tiene más de 500 citas. El artículo más relevante en cuanto a número de citas corresponde a: "Control of excitation transfer in photosynthesis I. Light-induced change of chlorophyll a fluorescence in *Porphyridium cruentum*", del investigador japonés Norio Murata, con un total de 655 citas. Los artículos de este investigador han sido citados 49 140 veces, desde 2017 hasta el corte de esta investigación que es septiembre de 2022. En el momento de la consulta dicho autor tenía un índice Hirsch (h) de 122 y un índice i10 de 342.

Un aspecto que destacar en relación con otros autores es que la autora y/o coautora de 4 artículos, quien es la más nombrada entre los más citados es el investigador estadounidense Edwin Elizabeth Gantt, quien tiene un total de 1 549 citas, un índice h=16. El tema que específico que aborda es el de la ultraestructura de *P. cruentum*, con énfasis en los ficobilisomas, su aislamiento y análisis. Es importante señalar que, 12 de los 48 artículos más citados (25%) tratan sobre la especie *P. cruentum*, lo que confirma su importancia.

El análisis de distribución por países de los artículos más citados se basó en el país de la institución del autor principal. De manera general, hay 6 países representados entre los artículos de mayor relevancia: Israel, Reino Unido, España, Japón, China y Estados Unidos, siendo este último es el que posee mayor número de artículos (n=8, 17 %).

#### Cultivo y aplicaciones de *Porphyridium cruentum*: aspectos clave

Se realiza un análisis de los principales resultados en cuanto al cultivo y aplicaciones (Tabla 3). En este apartado se hace énfasis en aspectos claves para el cultivo de la especie, sus aplicaciones más reconocidas y una breve fundamentación de la necesidad de desarrollar investigaciones sobre el efecto del campo magnético; así como los vacíos identificados en las investigaciones realizadas hasta la fecha.

La especie más reportada del género por sus propiedades y aplicaciones es *P. cruentum*, considerada una de las más primitivas dentro de las Rodofitas, descrita por Naegli (1849). Su color rojo fue por mucho tiempo el único criterio válido para definirla dentro del Phylum. Las células son solitarias o forman colonias mucilaginosas; material que posee características polianiónicas. La morfología de las células de *P. cruentum* es polarizada,

**Tabla 3.** Resumen de las condiciones de cultivo y principales aplicaciones de *P. cruentum*.

Tipo de cultivo	Condiciones de cultivo	Objetivo	Referencias
Reactores de columna tipo burbuja	Temperatura: $25 \pm 2$ °C. Medio: F2 modificado. pH: 8 Aireación: constante $8,33 \text{ cm}^3\text{s}^{-1}$ . Iluminación: ciclo nictimeral. Intensidad: 1200-1500 lux. Duración: 15 días.	Optimizar el crecimiento de <i>P. cruentum</i> .	(Garza-Valverde, 2023)
	Temperatura: $20-40$ °C. Medio: Walne. pH: 7,5. Aireación: burbujeo con flujo de aire $0,23 \text{ gs}^{-1}$ . Iluminación: ciclo nictimeral. Intensidad: $40 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ .		(Cervantes-Blanco et al., 2021)
Reactores de columna tipo burbuja	Temperatura: $25 \pm 1$ °C. Medio: medio Porphyridium (Koch, 1953; Harder and Bederke, 1957). pH: 8. Aireación continua. Intensidad: lámparas. fluorescentes $13 \pm 1 \text{ PAR } \mu\text{mol}^*\text{fotones/m}^2\text{/s}$ .	Biorrefinería convencional para aprovechamiento de la biomasa y el medio de <i>P. cruentum</i> en la recuperación de exopolisacáridos, ficoeritrinas, carotenoides y lípidos.	(Liberti et al., 2022)
	Temperatura: $26 \pm 2$ °C. Medio: F2 modificado. pH: 8 Aireación continua. Iluminación: ciclo nictimeral. Intensidad: $180 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ .		
Experimental (erlenmeyer, bolsas desechables de 50 mL de capacidad con 10 mL de medio de cultivo)	Temperatura: $20-24$ °C. Medio: Walne. Ci: $8,7 \times 10^5 \text{ cél.mL}^{-1}$ . pH: 8 Intensidad: 300 lux, lámparas de 40 W (GEDEME, Suecia). Conductividad: $50-55 \text{ mScm}^{-1}$ . Salinidad: 35-37 %.	Determinar la capacidad de la biomasa de <i>P. cruentum</i> para inhibir <i>in vitro</i> el crecimiento de diferentes microorganismos, y determinar el efecto sobre la viabilidad celular en monocitos humanos THP-1 y macrófagos murinos RAW 264.7.	(Ferrer-Salas et al., 2023)
Cultivos Batch experimentales	Temperatura: $25$ °C. Ci: $5 \times 10^5 \text{ cél.mL}^{-1}$ . Medio: Vonshak (1998). pH: 7,5 Aireación continua. Iluminación: ciclo nictimeral. Lámparas fluorescences. Duración: 7 días.	Caracterizar los polisacáridos extraídos de <i>P. cruentum</i> y evaluar su efecto sobre la producción de pro-citocinas inflamatorias, como TNF- $\alpha$ , IL-6 y NO, en para establecer su papel potencial como inmunomoduladores.	(Abdala-Díaz et al., 2010)
Cultivo experimental (Matraz de 100 mL con bomba de aire)	Temperatura: $20$ °C. Medio: Jaworski. Aireación: constante. Iluminación: ciclo nictimeral. Duración: 12 días.	Comparación de condiciones de cultivo para la producción de bioetanol.	(Kim et al., 2017)
	Temperatura: $20$ °C. Medio: F/2. Aireación: constante. Iluminación: ciclo nictimeral. Duración: 12 días.		



**Tabla 3.** Resumen de las condiciones de cultivo y principales aplicaciones de *P. cruentum*.

Tipo de cultivo	Condiciones de cultivo	Objetivo	Referencias
Cultivo discontinuo monoespecifico y no anéxico (Matraz Erlenmeyer de 100 mL)	Temperatura: $20 \pm 1$ °C. Salinidad: $33 \pm 1$ ‰. Medio: "F" modificado. pH: 7,9-9,0. Agitación manual sin aireación. Iluminación: ciclo nictimeral. Lámparas fluorescentes. Intensidad: $50-200 \mu\text{mol fotones m}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Duración: 7 días.	Evaluación del efecto de la fuente de nitrógeno y la irradiancia sobre la composición, contenido de pigmentos y fotosíntesis de <i>P. cruentum</i> .	(Sánchez-Saavedra et al., 2018)
Cultivo discontinuo en columnas	Temperatura: $25 \pm 1$ °C. Salinidad: $33 \pm 1$ ‰. Medio: Agua de mar artificial (Valsan, #42). pH: 7,9-9,0. Aireación: constante $16 \text{ mLs}^{-1}$ . Iluminación: continua. Lámparas fluorescentes. Intensidad: $15 \text{ mmolm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Duración: 15-18 días.	Evaluación de la permeabilidad de la membrana celular causado por campos eléctricos pulsados para la extracción de ficoeritrinas en la biomasa de <i>P. cruentum</i> .	(Martínez et al., 2019)
Cultivo discontinuo en fotobioreactor tubular	Temperatura: $25 \pm 2$ °C. Medio: Bold modificado. pH: 7,5. Iluminación: continua. Intensidad: $120 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ .	Efecto de la velocidad del flujo cruzado sobre la concentración y purificación de exopolisacáridos mediante filtración por membrana.	(Balti et al., 2018)
Cultivo en columnas de vidrio (400 mL) sumergidas en un baño de agua termostático	Temperatura: $25$ °C. Medio: medio "F". Iluminación: continua. Intensidad: $150 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ .	Purificación de ficobiliproteínas de la biomasa de <i>P. cruentum</i> .	(Lauceri et al., 2019)
Matraz Erlenmeyer de 150 mL	Temperatura: $25$ °C. Medio: F/2 modificado. Agitación 120 rpm con agitador orbital SH30. pH: 7,5. Iluminación: continua. Luz LED blanca. Intensidad: $60 \mu\text{mol fotones m}^{-2}\text{s}^{-1}$ .	Crecimiento y producción de polisacáridos sulfatados de <i>P. cruentum</i> .	(Han et al., 2021)

presentan una vesícula grande, cuyo contenido fibrilar se localiza en la parte posterior. Presenta un cloroplasto prominente estrellado con un pirenoide central.

El núcleo se ubica entre los brazos de los plástidos. La superficie de la membrana del tilacoide está cubierta de ficobilisomas y los gránulos de almidón están libres en el citoplasma. Contiene además mitocondrias, retículo endoplasmático y aparato de Golgi (Benavides Lozano, 2003; Gantt and Conti, 1965). Agregar información no solo de la parte citológica y fisiológica, también acerca de los macanismo para el incremento de la producción

de los compuestos de interés, según lo encontrado en la revisión que se menciona.

#### Condiciones de cultivo

*P. cruentum* crece en un rango de temperatura de 10 a 35 °C, siendo su rango óptimo de 21-30 °C. A temperaturas menores a 13 °C y mayores que 31 °C su crecimiento es lento. La actividad fotosintética máxima de la especie ocurre a 25 °C.

En la base de datos conformada para esta estudio, el tipo de luz más utilizado como tendencia para la pro-

ducción de biomasa, es la luz de tipo LED (Kim *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2021); además de la luz día y otras con rangos específicos del espectro de potencia (Abdala-Díaz *et al.*, 2010; Arredondo, 1995; Garza-Valverde, 2023). El régimen de luz varía según los intereses de la investigación, usándose desde ciclos nictimerales, luz continua u otros ciclos específicos. Respecto al pH, el valor óptimo para el crecimiento adecuado de *P. cruentum* se ha reportado entre 7 - 8, valor que se mantiene en la literatura más actualizada (Garza-Valverde, 2023; Oprescu *et al.*, 2019; Velea *et al.*, 2011).

En relación al cultivo, las condiciones hidrodinámicas en los biorreactores o cultivadores utilizados influyen directamente en la productividad de los cultivos. En *P. cruentum* como en otras microalgas, el fotobiorreactor es considerado esencial en todo proceso biotecnológico, destacando el uso de los fotobiorreactores de columnas con burbujeo para la producción de ficoeritrina (Cervantes-Blanco *et al.*, 2021). Sin embargo, resultan alternativas muy viables los estanques o cultivadores a cielo abierto, utilizados con éxito en cultivos con fines comerciales, siendo las compañías más destacadas en cuanto a su producción: Greentech, Greensea, Market Corporation, Fivephoton Biochemicals, Yemoja, Biomeda Corporation, Phyto Bloom y Microphyt, entre otras.

Es recomendable para la obtención de biomasa enriquecida con ficobiliproteínas (PBPs) realizar cultivos semi-continuos, al igual que para la producción de polisacáridos (Abdala-Díaz *et al.*, 2010), pues permite mantener tanto la irradiancia, como la concentración de nitrógeno en el nivel deseado. Sin embargo, incluso en este modo, la variación en los parámetros de cultivo (flujo específico del medio e irradiancia) altera significativamente el metabolismo y la dirección de las vías biosintéticas (Fábregas *et al.*, 1998).

Los cultivos más utilizados son los autoróficos (Amir *et al.*, 2014), donde se utiliza luz como fuente de energía, CO<sub>2</sub> y sustancias inorgánicas para el desarrollo de su metabolismo. Los factores ambientales y nutricionales ejercen un marcado efecto en la morfología y composición bioquímica, efecto que es considerado como una ventaja, ya que dentro de ciertos límites se puede obtener la composición química deseada (Arredondo, 1995; Garza-Valverde, 2023; Garza-Valverde *et al.*, 2023).

El tiempo de cultivo para *P. cruentum* es de aproximadamente 15 - 21 días, realizándose la cosecha de la biomasa, generalmente, al séptimo día de la fase exponencial temprana (Cervantes-Blanco *et al.*, 2017), llegando a tener densidades máximas en un tiempo de cosecha de 10 - 21 días, siempre que se usen las densidades iniciales recomendadas para los cultivos de *P. cruentum* ( $4 - 8 \times 10^5$  cél.mL<sup>-1</sup>).

Uno de los principales medios de cultivo utilizados para el crecimiento de *P. cruentum* y el aumento de la producción de compuestos bioactivos es el agua de mar artificial (ASW) (Jones *et al.*, 1963; Li *et al.*, 2019). Además, se han realizado diferentes investigaciones con medios preparados con fertilizantes agrícolas (Cervantes-Blanco *et al.*, 2021; Joo and Choi, 2008), con los cuales se obtienen tasas de crecimiento y composición bioquímica similares a las obtenidas con el medio tradicional f/2 de Guillard (1975).

Se sugiere que el uso de fertilizantes agrícolas tiene un costo de elaboración menor a (30 %) en comparación con los cultivos realizados en medio f/2. El abaratar los costos es importante desde el punto de vista comercial, por lo que esta tendencia, existente para otros cultivos algales, puede ser clave para el desarrollo futuro que no comprometa la calidad de la biomasa y su inocuidad para ser utilizada con fines alimentarios. Otras investigaciones refieren el uso del medio Walne explicar en que consiste este medio (Cervantes-Blanco *et al.*, 2017; Cervantes-Blanco *et al.*, 2021).

### Principales aplicaciones

El cultivo de microalgas resulta una alternativa prometedora para producir biomoléculas de alto valor añadido. *P. cruentum*, específicamente, presenta aplicaciones biotecnológicas reconocidas; su estudio se ha enfocado en la búsqueda de alternativas viables relacionadas con el crecimiento celular (Darvehei *et al.*, 2018; Gaignard *et al.*, 2019) y la influencia de algunos factores clave para el cultivo, en este sentido la mejora y optimización de cultivos para la obtención de metabolitos de interés comercial sigue siendo preocupación para la ciencia. Los principales factores a manejar en el cultivo de *P. cruentum* son: temperatura, salinidad, intensidad de luz, pH, y concentración de nutrientes, con énfasis en el nitrógeno.

Otros aspectos claves son la inducción de los cultivos para la producción de metabolitos de interés comercial mediante el tratamiento de aguas residuales mediante que método de crecimiento de biomasa (Ulusoy-Erol *et al.*, 2020), la interacción con bacterias (M Iqbal *et al.*, 1993), la obtención de protoplastos (Echeverri *et al.*, 2019) y la variación de la composición bioquímica de la biomasa (Obando-Montoya *et al.*, 2021). En este contexto entre los aspectos más relevantes destacan los relacionados con la producción, extracción, optimización y análisis de la ficoeritrina, además del estudio de su estructura, y los principales factores que la modifican (Castro-Varela *et al.*, 2021; Yin *et al.*, 2022), así como los métodos para su obtención y purificación (Ramu-Ganesan *et al.*, 2022).

*P. cruentum* ha demostrado ser eficiente en la producción de grandes cantidades de ficobiliproteínas (PBPs); específicamente la B-ficoeritrina (B-PE), la cual representa aproxi-

madamente el 1,66 % del peso seco total (Benavides Lozano, 2003) y el 5 % de la proteína total; además, la especie produce grandes cantidades de polisacáridos (35 %) (Amir *et al.*, 2014; Huang *et al.*, 2006), por lo que existen muchas investigaciones enfocadas en la obtención y purificación de ficoeritrinas y polisacáridos, principalmente (Ramu-Ganesan *et al.*, 2022; Yin *et al.*, 2022).

Un problema que se ha revelado en relación con los pigmentos, se debe a que los procedimientos de recuperación y purificación son largos y complejos, dificultando en su momento el incremento en la obtención de la proteína purificada (Benavides Lozano, 2003; Bermejo-Román *et al.*, 2002). Como regla general, para la recuperación y purificación de productos biotecnológicos de interés, un mayor número de etapas se traduce en un menor rendimiento y en mayores gastos de inversión y operación (Bermejo-Román *et al.*, 2002), por lo que se ha trabajado en resolver estas limitaciones, integrando incluso la producción de PEs y polisacáridos (Benavides and Rito-Palomares, 2004; Bermejo *et al.*, 2013; Ramu-Ganesan *et al.*, 2022; Yin *et al.*, 2022), o bien buscando alternativas para acelerar el crecimiento y disminuir el tiempo de cultivo, con el propósito de ganar en eficiencia.

Las PE y polisacáridos obtenidos de *P. cruentum* y otras especies del género, presentan actividades biológicas con gran impacto económico en la industria farmacéutica, cosmética y alimentaria, por lo que las estrategias de cultivo relacionadas con su producción han estado en el foco de las investigaciones. Estos poseen una amplia gama de actividades biológicas: potenciales anticancerígenos, antivirales, antitumorales e inmunorreguladores (Han *et al.*, 2021). La actividad de los polisacáridos ha sido evaluada frente a la infección por algunos virus como el de la septicemia hemorrágica viral (VHSV) y el virus de necrosis nerviosa (VNN), en el cual el polisacárido ha logrado bloquear la unión virus-célula, actuando sobre la replicación viral (Moreno García *et al.*, 2021). Además, estos desempeñan un papel relevante en la industria alimentaria como espesantes, estabilizadores y emulsionantes (Amir *et al.*, 2014).

Existen además nuevas tendencias, entre las que destaca la producción de un nuevo activo marino con nombre comercial: Silidine® obtenido a través de la inducción metabólica de *P. cruentum* hasta obtener una mezcla de oligosacáridos y oligoelementos esenciales. El fitoactivo mejora la tonicidad vascular, corrige las disfunciones cutáneas de la rosácea o de la eritrosis facial, las ojeras, edemas y microinflamaciones (Greentech), con una tendencia creciente en el mercado.

En el caso de la biomasa de *P. cruentum*, esta se utiliza con fines nutricionales, debido a la cantidad y diversidad de nutrientes que contiene. Además, puede ser modificada por medio de variables operativas, principalmente el uso de tiempos de residencia cortos para obtener ácido icosa-pentaenoico (M Iqbal *et al.*, 1993) y aumentar los niveles de proteínas (Reboloso Fuentes *et al.*, 2000). La optimización de los cultivos se ha realizado con la finalidad de producir grandes cantidades de biomasa para luego extraer y/o purificar sus principales compuestos activos; no obstante la incorporación directa de la biomasa a alimentos veganos, ha resultado en la mejora de la apariencia y el sabor, aspectos desarrollados por compañías como Yemoya (Arnaud *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2007).

Para mejorar la producción y calidad de los bioproductos a partir de microalgas, los sistemas de cultivo exigen atención en la selección del biorreactor o tipo de cultivo adecuado; de las especies algales con un potencial previo demostrado para la producción, así como la necesaria disponibilidad de nutrientes, y en general, la optimización de los parámetros fisicoquímicos. Si bien los polisacáridos de microalgas son ampliamente investigados, existen pocos estudios que recopilen información sobre los principales parámetros y sistemas de cultivo favorables para su incremento (Greque de Moraes *et al.*, 2023), lo que también sucede para otros metabolitos.

En busca de métodos que contribuyan al éxito en el crecimiento de diferentes microorganismos de interés biotecnológico, se han llegado a establecer relaciones con fenómenos que involucran otras ciencias particulares como es el caso de la física, dentro de la cual el magnetismo ha desempeñado un importante papel por sus disímiles aplicaciones, además de los beneficios ambientales, la viabilidad y comodidad de aplicación de dispositivos magnéticos, y en el caso del campo magnético estático (CME) la generación de beneficios sin costos energéticos. Los campos magnéticos inducen perturbaciones en el ambiente circundante e inducen cambios morfológicos y fisiológicos en diferentes tipos celulares, condicionando diferentes respuestas en los sistemas biológicos; sin embargo, en algunos casos, como en *P. cruentum* es una alternativa no explorada.

#### **Aplicaciones del campo magnético: estado actual y perspectivas**

Existe un número creciente de experimentos que muestran una gran variedad de efectos de la exposición a los campos magnéticos en diferentes sistemas biológicos, entre los que se pueden mencionar planarias (Brown Jr, 1962; Gomez-Luna and López de la Puente, 2018), paramecios (Elahee and Poinapen, 2006), microalgas (Ascoli *et al.*, 1978; Baldev *et al.*, 2021; Deamici *et al.*, 2016;

Gómez- Luna *et al.*, 2009; Medeiros-Bauer *et al.*, 2017; Silva-Costa *et al.*, 2020), bacterias (Qian *et al.*, 2016), cianobacterias (Cardias *et al.*, 2014; Gomez-Luna *et al.*, 2016; Hirano *et al.*, 1998; Mosquera-Deamici *et al.*, 2016) y diferentes especies vegetales (Ferrer-Dubois *et al.*, 2023), entre otros, demostrándose que las interacciones del CM con las células en cultivo puede afectar de forma positiva el metabolismo y la producción de diferentes biomoléculas (da Costa-Menestrino *et al.*, 2020).

En la agricultura los CM han sido aplicados para acelerar la germinación de las semillas y el crecimiento de las plantas (Cakmak *et al.*, 2010; Efthimiadou *et al.*, 2014; Hernandez-Aguilar *et al.*, 2009; M. Iqbal, ul Haq, Jamil, *et al.*, 2016; M. Iqbal, ul Haq, Malik, *et al.*, 2016; Izmailov *et al.*, 2018; Kataria *et al.*, 2017; Martinez *et al.*, 2017; Matwijczuk *et al.*, 2012), demostrándose su efecto estimulador, dependiendo el protocolo aplicado. Sin embargo, en *Porphyridium* spp. las aplicaciones del CME estático han sido muy limitadas, encontrándose solamente una tesis de diploma relacionada con su efecto sobre el crecimiento (Ferrer, 2012).

Existen, entre los artículos revisados, algunos que reportan aplicaciones puntuales como el uso de la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) para el tratamiento de aguas residuales, usando biomasa de *P. cruentum*, debido a su alto contenido de polisacáridos, la que funciona como una matriz depuradora (Permatasari and Rilyanti, 2020; Rilyanti and Permatasari, 2021). Autores como Permatasari, Desy y Mita Rilyanti (2021) conformaron un híbrido de alga-sílice-magnetita (HA-SM) para la depuración de aguas residuales mediante la adsorción de una solución multicomponente de iones Cu (II), cristal violeta (CV) y azul de metileno (MB); estos componentes de estructura compleja, difíciles de degradar y que se encuentran en muchas aguas residuales. Por otra parte, se menciona una aplicación indirecta del CM con múltiples beneficios, que es la agitación magnética (Cervantes-Blanco *et al.*, 2017; Cervantes-Blanco *et al.*, 2021), sin embargo; se necesitarían evidencias que demuestren los beneficios e implicaciones moleculares y subcelulares del CM en *P. cruentum*.

La exposición al CM depende de su intensidad, frecuencia y tiempo de exposición, entre otros factores; este agente físico puede ser usado para estimular el crecimiento o para inhibirlo (Huayhua-Huamaní *et al.*, 2022). Los efectos pueden ser positivos, negativos o nulos, dependiendo además del estado fisiológico de las células y las características de los dispositivos de aplicación (Oliveira-Santos *et al.*, 2022).

Por su variada respuesta y al no existir consenso en su uso, algunos investigadores muestran resistencia al uso

de esta tecnología; otros se mantienen escépticos, a pesar de lo que ya ha sido demostrado, y constituye una limitante la variedad de instalaciones, dispositivos, la heterogeneidad del campo magnético que se genera, y la incertidumbre respecto a la respuesta de uno u otro microorganismo. Sin embargo, ha sido reconocido que las respuestas no son lineales y que dependen además del tipo celular, su forma, incluso el medio utilizado para el cultivo, además del tiempo, la frecuencia e intensidad el CM (Radhakrishnan, 2019), de aquí la necesidad de experimentar y no extrapolar.

No obstante, los efectos primarios que se producen en el metabolismo por su aplicación son evidentes. Algunos investigadores describen que los efectos metabólicos se manifiestan como procesos tróficos estimuladores y de reparación celular (Azanza and Del Moral, 1994; Bardasano and Elorrieta, 2000; Ursache *et al.*, 2009; Vashisth and Nagarajan, 2010). Otros han demostrado que el CM aplicado a las microalgas modifica la respuesta normal de las células en cultivo y puede favorecer la producción de algunas biomoléculas, afectando sus parámetros de crecimiento. Como resultado, se producen cambios en la composición de la biomasa y en la concentración de biomoléculas (Oliveira-Santos *et al.*, 2022), e incluso en su ultraestructura (Gomez-Luna *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2007). Generalmente los resultados obtenidos han sido positivos en cuanto a la producción de carbohidratos, lípidos, proteínas y pigmentos, con regularidad.

En microalgas y cianobacterias el CM ejerce un efecto sobre el crecimiento celular, toda vez que este es aplicado de forma permanente o durante diferentes períodos de tiempo en la fase exponencial del crecimiento (Gómez- Luna *et al.*, 2009). Además, se ha descrito que en clorofitas estimula el crecimiento, la síntesis de clorofilas y la viabilidad celular, por lo que parece operar directamente sobre la eficiencia fotosintética mediante una modulación de la respuesta ante el estrés, sin excluir la posibilidad de que redirija el nitrógeno celular hacia la síntesis de clorofilas, mediante la activación de sistemas multienzimáticos (Gómez- Luna *et al.*, 2009).

Algunos autores han descrito otros mecanismos de acción, relacionados fundamentalmente con el incremento en la actividad, concentración y tiempo de vida media de los radicales libres en las células, lo que está asociado al estrés oxidativo (Oliveira-Santos *et al.*, 2017; Silveira-Font *et al.*, 2023). Por otra parte, puede ejercer fuerzas sobre iones móviles en solución, especialmente sobre metales de transición propensos a la hidratación, alterando su dinámica de acoplamiento con la enzima, cofactor o sustrato, mecanismo relacionado con la llamada memoria magnética (Colic and Morse, 1999), que puede estar relacionado además con alteración del fun-

cionamiento de complejos multienzimáticos. El CM puede, además, modificar la velocidad de absorción de iones minerales, a través de efectos directos en los canales iónicos o en las membranas celulares (Repacholi and Greenebaum, 1999).

El CM ha estimulado la síntesis de astaxantina en la microalga cianofita *Haematococcus*, y la formación de gránulos de cianoficina en la cianobacteria *Synechocystis aquatilis* (Gómez- Luna *et al.*, 2009; Gomez-Luna *et al.*, 2016), cultivados ambos microorganismos en medio sin nitrógeno; evidencias que indican un efecto del CM sobre el metabolismo del nitrógeno como respuesta al estrés. Es importante considerar que la concentración de ficoeritrinas depende en gran medida de la concentración de nitrógeno; después de su agotamiento las B-PE disminuyen drásticamente (Shuai *et al.*, 2021), por lo que el uso del CME podría beneficiar el crecimiento de *P. cruentum* y la síntesis de ficoeritrinas, abriendo un campo de investigaciones de gran interés biotecnológico para la aplicación de esta tecnología en dicha especie. Por lo que es necesario seleccionar las dosis y protocolos de aplicación adecuados para la especie, con las especificidades que se requiera según el propósito del cultivo o destino de la biomasa; luego habrá que realizar el escalado correspondiente.

No obstante, es importante profundizar en la comprensión de mecanismos subyacentes, posibles efectos positivos y desventajas de esta exposición sobre el crecimiento y producción de diferentes metabolitos, si bien puede esperarse un aumento en la disponibilidad y absorción de los nutrientes (Zhi-Yong *et al.*, 2007), así como en la velocidad de consumo de nitrógeno y fósforo (Li *et al.*, 2007), induciendo la senescencia temprana de los cultivos (Elahee and Poinapen, 2006), lo que podría estimular la síntesis de PES; activándose algunas enzimas, entre ellas las relacionadas con el metabolismo del nitrógeno.

En resumen, el uso de la tecnología de CM en el cultivo de microalgas ha demostrado ser una alternativa para aumentar la productividad de la biomasa microalgal y la producción de biocompuestos y tiene un valor económico añadido en la producción a gran escala. En algunos estudios realizados con *Chlorella fusca* se ha demostrado que con la inducción de un campo magnético de 60 mT incrementó la concentración de su biomasa y contenido de carbohidratos en un 20,5 y 25,8 % respecto al control, respectivamente. También se ha evaluado la biofijación de CO<sub>2</sub> y se observó que cultivos expuestos a 1 h d<sup>-1</sup> mostraron un 34 % más de productividad y un 50 % más de biofijación de CO<sub>2</sub> (Deamici *et al.*, 2019). Por lo que, el CM es un método alternativo relativamente novedoso que podría tener un impacto económico

positivo al incrementar la productividad y producir mayores ingresos en el cultivo de *P. cruentum*, ya que posee ventajas como un bajo costo de capital y operación, no tiene efectos tóxicos comprobados, no produce daños al medio ambiente, además de su larga vida útil proporciona una gama amplia de aplicaciones.

## CONCLUSIONES

Existe interés creciente en las investigaciones sobre *Porphyridium cruentum*, siendo tendencia los temas relacionados con la optimización de cultivos, la extracción de compuestos bioactivos, la producción de biocombustibles, los estudios toxicológicos, procesamiento de la biomasa, biosíntesis y producción de polisacáridos; temas que son de interés para la ciencia en los que se pueden proyectar hacia nuevas investigaciones. En cuanto a sus condiciones de cultivo, *P. cruentum* crece en un período aproximadamente de 15 - 21 días, su rango óptimo de temperatura es de 21 - 30 °C, el pH oscila entre 7 - 8. El medio de cultivo más utilizado es el de ASW y el tiempo de luz que generalmente se utiliza para el incremento de su biomasa es de tipo LED. Sin embargo, el régimen de luz varía en cuanto a la finalidad de la investigación. Los cultivos más utilizados son los de tipo autoróficos y el uso de fotobioreactores le ofrecen una mayor productividad al cultivo. *P. cruentum* posee una amplia gama de aplicaciones, destacándose la producción de sus bioproductos estrella, las ficoeritrinas y los polisacáridos, con un potencial uso en la industria médico-farmacéutica, cosmética, bioenergética e industria alimentaria. Las aplicaciones del campo magnético para la especie son hasta la fecha muy limitadas; sin embargo los beneficios reportados para otras especies podrían considerarse como proyección de investigaciones relacionadas con la optimización de los cultivos, así como la estimulación de la síntesis de ficoeritrinas y policarácidos, lo que permitiría desarrollar estrategias de cultivo acertadas para alcanzar mayor crecimiento en menos tiempo, y mejor rendimiento en cuanto a la producción de metabolitos de interés.

Es importante recomendar la lectura de los artículos Norio Murata y Edwin Elizabeth Gantt por la relevancia de sus artículos, a los investigadores que se dediquen al estudio, cultivo y aplicaciones de *P. cruentum*.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abalde, J., Cid, A., Fidalgo-Paredes, P., Torres, E., and Herrero, C. (1995). *Microalgas: cultivo y aplicaciones*: Universidade da Coruña, Servizo de Publicacións.
- Abdala-Díaz, R., Chabrillón, M., Cabello-Pasini, A., López-Soler, B., and Figueroa, F. (2010). Effect of *Porphyri-*

- dium cruentum* polysaccharides on the activity of murine macrophage cell line RAW 264.7. *Ciencias marinas*, 36(4), 345-353.
- Agustina, S., Aidha, N. N., Oktarina, E., and Setiawati, I. (2020). Antioxidant activity of *Porphyridium cruentum* water extracts for cosmetic cream. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 980(1), 012042. DOI 10.1088/1757-899X/980/1/012042
- Amir, M., Nurjanah, A., and Agustini, N. W. S. (2014). Analisis fikobiliprotein dan polisakarida dari mikroalga merah (*Porphyridium cruentum*) yang dikultivasi pada media limbah cair nata de coco. *Sainstech Farma*, 7(1).
- Arnaud, M. F., Roland, L. G., and Jérémy, P. (2003). Benefits and limitations of modeling for optimization of *Porphyridium cruentum* cultures in an annular photobioreactor. *Journal of Biotechnology*, 103(2), 153-163. doi:https://doi.org/10.1016/S0168-1656(03)00100-7
- Arredondo, B. (1995). *Crecimiento autotrófico y mixotrófico de la microalga marina Porphyridium cruentum*. Universidade de Santiago de Compostela.
- Ascoli, C., Barbi, M., Frediani, C., and Petracchi, D. (1978). Effects of electromagnetic fields on the motion of *Euglena gracilis* *Biophysical Journal*, 24, 601-612.
- Azanza, M. J., and Del Moral, A. (1994). Cell membrane biochemistry and neurobiological approach to biomagnetism. *Progress in neurobiology*, 44(6), 517-601. doi:https://doi.org/10.1016/0301-0082(94)90004-3
- Baldev, E., Mubarak-Ali, D., Sivasubramanian, V., Pugazhendhi, A., and Thajuddin, N. (2021). Unveiling the induced lipid production in *Chlorella vulgaris* under pulsed magnetic field treatment. *Chemosphere*, 279, 130673. doi:https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130673.
- Balti, R., Le Balc'h, R., Brodu, N., Gilbert, M., Le Gouic, B., Le Gall, S., et al. (2018). Concentration and purification of *Porphyridium cruentum* exopolysaccharides by membrane filtration at various cross-flow velocities. *Process Biochemistry*, 74, 175-184.
- Bardasano, J. L., and Elorrieta, J. (2000). Bioelectromagnetismo, ciencia y salud. *Serie Madrid: McGraw-Hill de Divulgación Científica*, 75-93.
- Benavides, J., and Rito-Palomares, M. (2004). Bioprocess intensification: a potential aqueous two-phase process for the primary recovery of B-phycoerythrin from *Porphyridium cruentum*. *Journal of Chromatography B*, 807(1), 33-38.
- Benavides Lozano, J. A. (2003). *Comportamiento de partición de B-ficoeritrina producida por Porphyridium cruentum en sistemas de dos fases acuosas*. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.
- Bermejo-Román, R., Álvarez-Pez, J. M., Acien-Fernández, F. G., and Molina-Grima, E. (2002). Recovery of puré B-phycoerythrin from the microalga *Porphyridium cruentum*. *Journal of Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 93, 73-85. doi:https://doi.org/10.1016/S0168-1656(01)00385-6.
- Bermejo, R., Ruiz, E., Ramos, A., and Acien, F. G. (2013). Pilot-scale recovery of phycoerythrin from *Porphyridium cruentum* using expanded bed adsorption chromatography. *Separation Science Technology*, 48(13), 1913-1922.
- Brown Jr, F. A. (1962). Responses of the planarian, *Dugesia*, and the protozoan, *Paramecium*, to very weak horizontal magnetic fields. *The Biological Bulletin*, 123(2), 264-281. doi:https://doi.org/10.2307/1539273.
- Cakmak, T., Dumlupinar, R., and Serkan, E. (2010). Acceleration of germination and early growth of wheat and bean seedlings grown under various magnetic field and osmotic conditions. *Bioelectromagnetics: Journal of the Bioelectromagnetics Society, the Society for Physical Regulation in Biology and Medicine, the European Bioelectromagnetics Association*, 31(2), 120-129. doi:https://doi.org/10.1002/bem.20537
- Cardias, B. B., Deamici, K. M., Menestrino, B. C., Do Santos, L. O., and Da Costa, J. A. V. (2014). Valiação dos efeitos da aplicação de campos magnéticos no crescimento da microalga *Spirulina*.
- Castro-Varela, P. A., Celis-Plá, P. S. M., Abdala-Díaz, R., and Figueroa, F. L. (2021). Photobiological effects on biochemical composition in *Porphyridium cruentum* (Rhodophyta) with a biotechnological application. *Photochemistry and Photobiology*, 97(5), 1032-1042. doi:https://doi.org/10.1111/php.13426
- Cervantes-Blanco, Y., Fernández-Duharte, G., Ferrer-Romero, J. C., and Vendrell-Calzadilla, F. (2017). Propuesta de ampliación de la capacidad productiva del proceso de obtención de la proteína  $\beta$ -ficoeritrina. *Tecnología Química*, 37(2), 372-390.
- Cervantes-Blanco, Y., Lobaina-Lobaina, E., Mas-Diego, S. M., and Fernández-Duharte, J. (2021). Evaluación de la producción de *Porphyridium cruentum* en fotobioreactor tipo columna de burbujeo. *Tecnología Química*, 41(2), 326-345. doi:http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v41n2/2224-6185-rtq-41-02-326.pdf
- Colic, M., and Morse, D. (1999). The elusive mechanism of the magnetic 'memory' of water. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 154(1-2), 167-174. doi:https://doi.org/10.1016/S0927-7757(98)00894-2
- da Costa-Menestrino, B., Chaves-Pintos, T. H., Sala, L., Vieira-Costa, J. A., and Oliveira-Santos, L. (2020). Application of static magnetic fields on the mixotrophic culture of *Chlorella minutissima* for carbohydrate production. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 192(3), 822-830. doi:https://doi.org/10.1007/s12010-020-03364-0
- Darvehei, P., Bahri, P. A., and Moheimani, N. R. (2018). Model development for the growth of microalgae: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 97, 233-258. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.027
- Deamici, K. M., Cardias, B. B., Viera-Costa, J. A., and Santos, L. O. (2016). Static magnetic fields in culture of *Chlorella fusca*: Bioeffects on growth and biomass

- composition. *Process Biochemistry*, 51(7), 912-916. doi:<https://doi.org/10.1016/j.procbio.2016.04.005>
- Deamici, K. M., Santos, L. O., and Costa, J. A. V. (2019). Use of static magnetic fields to increase CO<sub>2</sub> biofixation by the microalga *Chlorella fusca*. *Bioresource technology*, 276, 103-109. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.12.080>
- Echeverri, D., Romo, J., Giraldo, N., and Atehortúa, L. (2019). Microalgae protoplasts isolation and fusion for biotechnology research. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 21(1), 101-112. doi:<https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v21n1.80248>
- Efthimiadou, A., Katsenios, N., Karkanis, A., Papastilianou, P., Triantafyllidis, V., Travlos, I., et al. (2014). Effects of presowing pulsed electromagnetic treatment of tomato seed on growth, yield, and lycopene content. *The Scientific World Journal*, 2014. doi:<https://doi.org/10.1155/2014/369745>
- Elahee, K. B., and Poinapen, D. (2006). Effects of static magnetic fields on growth of *Paramecium caudatum*. *Bioelectromagnetics*, 27, 26-34. doi:<https://doi.org/10.1002/bem.20172>
- Erbil, G. C., Elp, M., and Durmaz, Y. (2022). Effect of ferric chloride (FeCl<sub>3</sub>) concentration on pigment production of *Porphyridium cruentum*. *International Aquatic Research*, 14(2), 127-137. doi:<https://doi.org/10.22034/IAR.2022.1950929.1234>
- Erbil, G. Ç., Mahmut, E., and DURMAZ, Y. (2021). Phycoerythrin Accumulation of *Porphyridium cruentum* Culture at Indoor Tubular Photobioreactor. *Yuzuncu Yıl University Journal of Agricultural Sciences*, 32(1), 81-88. doi:<https://doi.org/10.29133/yyutbd.986286>
- Fábregas, J., García, D., Morales, E., Domínguez, A., and Otero, A. (1998). Renewal rate of semicontinuous cultures of the microalga *Porphyridium cruentum* modifies phycoerythrin, exopolysaccharide and fatty acid productivity. *Journal of fermentation and bioengineering*, 86(5), 477-481. doi:[https://doi.org/10.1016/S0922-338X\(98\)80155-4](https://doi.org/10.1016/S0922-338X(98)80155-4)
- Ferrer-Dubois, A. E., Martínez-Manrique, C., Gómez-Luna, L. M., Isaac-Aleman, E., Hendrix, S., Beenaerts, N., et al. (2023). The use of Static Magnetic Field on irrigation water and its effect on mineral and nutrient content in *Solanum lycopersicum* L. In L. Associate Prof. Francesco (Ed.), *Tomato Cultivation and Consumption - Innovation, Sustainability and Health* (pp. Ch. 3). Rijeka: IntechOpen.
- Ferrer-Salas, D., Llauroadó-Maury, G., Fernández-Duharte, G., and Lebeque-Pérez, Y. (2023). Evaluación antimicrobiana del extracto acuoso de la biomasa de la microalga *Porphyridium cruentum*. *Revista Cubana de Química*, 35(1), 88-104.
- Ferrer, J. (2012). *Aceleración del crecimiento de Porphyridium cruentum con campos magnéticos*. (Tesis de Diploma), Universidad de Oriente.
- Gaignard, C., Gargouch, N., Dubessay, P., Delattre, C., Pierre, G., Laroche, C., et al. (2019). New horizons in culture and valorization of red microalgae. *Biotechnology Advances*, 37(1), 193-222. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.11.014>
- Gantt, E., and Conti, S. F. (1965). The ultrastructure of *Porphyridium cruentum*. *Journal of cell biology*, 26(2), 365-381. doi:<https://doi.org/10.1083/jcb.26.2.365>
- Gargouch, N., Elleuch, F., Karkouch, I., and al., e. (2021). Potential of exopolysaccharide from *Porphyridium marinum* to contend with bacterial proliferation, biofilm formation, and breast cancer. *Marine drugs*, 19(2), 66. doi:<https://doi.org/10.3390/md19020066>
- Garza-Valverde, E. (2023). *Optimización de un cultivo de Porphyridium cruentum para obtención de R-Ficoeritrina y su incorporación en alimentos*. (Maestría en Ciencias con orientación en Ingeniería en Industrias Alimentarias), Universidad Autónoma de Nuevo León, Nuevo León, México. Retrieved from <http://eprints.uanl.mx/25206/1/1080328761.pdf>
- Garza-Valverde, E., Cortez-Guardiola, S. A., Guzmán-Rodríguez, M. F., Vidales-Contreras, J. A., and García-Gómez, C. (2023). Optimización de métodos de extracción de R-Ficoeritrina a partir de *Porphyridium cruentum*. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 8(1), 73-83. doi:<https://doi.org/10.29105/idcyta.v8i1.15>
- Gómez-Luna, L. M., Menéndez-Sánchez, J., Álvarez, I., and Flores, I. (2009). Efecto de diferentes protocolos de aplicación de un campo magnético (0.03 T) sobre el crecimiento, viabilidad y composición pigmentaria de *Haematococcus pluvialis* Flotow en suficiencia y ausencia de nitrógeno. *Biotecnología vegetal*, 9(2).
- Gómez-Luna, L. M., Álvarez, I., and Rivero, R. (2011). Cultivo de *Chlorella vulgaris* sobre residual de soja con la aplicación de un campo magnético. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 13(2), 27-38.
- Gómez-Luna, L. M., and López de la Puente, V. (2018). A meta-analysis of Planarian: an animal model useful to understand the effect of magnetic field Planarian and magnetic field researches *bioRxiv preprint*. doi:<http://dx.doi.org/10.1101/252007>
- Gómez-Luna, L. M., Steffanie, N., Artoi, T., Benitez Amaro, A., Moya Gomez, A., Cuypers, A., et al. (2016). Cambios fisiológicos, bioquímicos y ultraestructurales inducidos por el campo magnético en *Synechocystis aquatilis*. *Cumbres*, 2(2).
- Greque de Moraes, M., Muniz-Bezerra, P. Q., Mosquera-Deamici, K., Goettems-Kuntzler, S., Botelho-Moreira, J., Laroche, C., et al. (2023). Algal Bioreactors for Polysaccharides Production. *Plants as Bioreactors for Industrial Molecules*, 485-501. doi: <https://doi.org/10.1002/9781119875116.ch20>
- Greentech. (noviembre, 2022). FITOBIOACTIVO SILIDINE. Retrieved from <https://www.greentech.fr/es/silidina/>

- Guerrero, M. G., Rodríguez, H., Vargas, M., García-González, M., Campo del Moreno, J. A., and Rivas, J. (1999). Las microalgas como productoras de pigmentos con interés comercial. *Biotecnología y Aplicaciones de Microorganismos Pigmentados*.
- Han, S.-I., Jeon, M. S., Park, Y. H., Kim, S., and Choi, Y.-E. (2021). Semi-continuous immobilized cultivation of *Porphyridium cruentum* for sulfated polysaccharides production. *Bioresource Technology*, 341, 125816. doi:https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125816
- Hernandez-Aguilar, C., Dominguez-Pacheco, A., Caraballo-Carballo, A., Cruz-Orea, A., Ivanov, R., López-Bonilla, J. L., et al. (2009). Alternating magnetic field irradiation effects on three genotype maize seed field performance. *Acta Agrophysica*, 14(1), 170.
- Hirano, M., Ohta, A., and Abe, K. (1998). Magnetic field effects on photosynthesis and growth of the cyanobacterium *Spirulina platensis* (Publication no. 10.1016/S0922-338X(98)80136-0).
- Huang, J., Liu, L.-p., Yu, Y., and al., e. (2006). Reduction in the blood glucose level of exopolysaccharide of *Porphyridium cruentum* in alloxan-induced diabetic mice. *J. Fujian Norm. Univ*, 22(7780), 62.
- Huayhua-Huamaní, E., Tito-Humpiri, J. M., Tuiro-Quispe, M., Casani-Cruz, M. R., and Zegarra-Cáceres, J. (2022). Estimulación de la germinación de semillas de trigo por exposición a Campos Magnéticos Estacionarios. *Ñawparisun-Revista de Investigación Científica*, 3(4). doi:https://doi.org/10.47190/nric.v3i4.6
- Iqbal, M., Grey, D., Sepan-Sarkissian, G., and Fowler, M. (1993). Interactions between the unicellular red alga *Porphyridium cruentum* and associated bacteria. *European Journal of Phycology*, 28(1), 63-68. doi:https://doi.org/10.1080/09670269300650101
- Iqbal, M., ul Haq, Z., Jamil, Y., and Nisar, J. (2016). Pre-sowing seed magnetic field treatment influence on germination, seedling growth and enzymatic activities of melon (*Cucumis melo* L.). *Biocatalysis and agricultural biotechnology*, 6, 176-183. doi:https://doi.org/10.1016/j.bcab.2016.04.001
- Iqbal, M., ul Haq, Z., Malik, A., Ayoub, C. M., Jamil, Y., and Nisar, J. (2016). Pre-sowing seed magnetic field stimulation: A good option to enhance bitter melon germination, seedling growth and yield characteristics. *Biocatalysis and agricultural biotechnology*, 5, 30-37. doi:https://doi.org/10.1016/j.bcab.2015.12.002
- Irwani, I., Ridlo, A., and Widianingsih, W. (2013). Optimalisasi total lipid mikroalga *Porphyridium cruentum* melalui pembatasan nutrisi dan fotoperiod. *Buletin Oseanografi Marina*, 2(2), 16-23. doi:https://doi.org/10.14710/buloma.v2i2.6932
- Izmailov, A., Smirnov, I., Khort, D., Filippov, R., and Kuttyrev, A. (2018). Magnetic-pulse processing of seeds of berry crops. *Research in Agricultural Engineering*, 64(4), 181-186.
- Jones, R. F., Speer, H. L., and Kury, W. (1963). Studies on the growth of the red alga *Porphyridium cruentum*. *Physiologia plantarum*, 16(3), 636-643. doi: https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1963.tb08342.x
- Joo, D.-S., and Choi, S.-Y. (2008). Effect of culture conditions on production of polysaccharides and growth rate of *Porphyridium cruentum*. *Korean Journal Fisheries Aquatic Sciences*, 41(6), 446-451. doi:https://doi.org/10.5657/kfas.2008.41.6.446
- Kataria, S., Baghel, L., and Guruprasad, K. N. (2017). Pre-treatment of seeds with static magnetic field improves germination and early growth characteristics under salt stress in maize and soybean. *Biocatalysis and agricultural biotechnology*, 10, 83-90. doi:https://doi.org/10.1016/j.bcab.2017.02.010
- Kavitha, M. D., Kathiresan, S., Bhattacharya, S., and Sarada, R. (2016). Culture media optimization of *Porphyridium purpureum*: production potential of biomass, total lipids, arachidonic and eicosapentaenoic acid. *Journal of food science and technology*, 53(5), 2270-2278. doi:https://doi.org/10.1007/s13197-016-2185-0
- Kim, H. M., Oh, C. H., and Bae, H. J. (2017). Comparison of red microalgae (*Porphyridium cruentum*) culture conditions for bioethanol production. *Bioresource Technology*, 233, 44-50. doi:https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.02.040
- Kim, S. H., Jeong, G. T., and Sung-Koo, K. (2019). Enhancement of biomass, lipid, and unsaturated fatty acid production in *Porphyridium cruentum* cultured in 14L LED bioreactor using a combination of wavelength and low pH in second-phase culture system. *한국생물공학회 학술대회*, 137-137.
- Kim, S. H., Lee, U. H., Lee, S. B., Jeong, G. T., and Kim, S. K. (2021). Improvement of unsaturated fatty acid production from *Porphyridium cruentum* using a two-phase culture system in a photobioreactor with Light-Emitting Diodes (LEDs). *J. Microbiol. Biotechnol.*, 31(3), 456-463. doi:https://doi.org/10.4014/jmb.2011.11004
- Lauceri, R., Chini-Zittelli, G., and Torzillo, G. (2019). A simple method for rapid purification of phycobiliproteins from *Arthrospira platensis* and *Porphyridium cruentum* biomass. *Algal Research*, 44, 101685. doi:https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101685
- Li, S., Ji, L., Shi, Q., Wu, H., and Fan, J. (2019). Advances in the production of bioactive substances from marine unicellular microalgae *Porphyridium* spp. *Bioresource Technology*, 292, 122048. doi:https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122048
- Li, W., Pu, Y., Tang, Z., Zhao, F., Xie, M., and Qin, S. (2020). Energy transfer dynamics in B-phycoerythrin from the red alga *Porphyridium purpureum*. *Chinese*



- Journal of Physics*, 66, 24-35. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cjph.2020.03.025>
- Li, Z. Y., Guo, S. Y., Li, L., and Cai, M. Y. (2007). Effects of electromagnetic field on the batch cultivation and nutritional composition of *Spirulina platensis* in an air-lift photobioreactor. *Bioresource Technology*, 98, 700-705. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.01.024>
- Liberti, D., Imbimbo, P., Giustino, E., D'Elia, L., Ferraro, G., Casillo, A., et al. (2022). Inside out *Porphyridium cruentum*: Beyond the Conventional Biorefinery Concept. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 11(1), 381-389. doi:<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c05869>
- Martinez, E., Florez, M., and Carbonell, M. V. (2017). Stimulatory effect of the magnetic treatment on the germination of cereal seeds. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 2(1), 375-381. doi:<http://dx.doi.org/10.22161/ijeab/2.1.47>
- Martínez, J. M., Delso, C., Álvarez, I., and Raso, J. (2019). Pulsed electric field permeabilization and extraction of phycoerythrin from *Porphyridium cruentum*. *Algal Research*, 37, 51-56. doi:<https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.11.005>
- Matwijczuk, A., Kornarzynski, K., and Pietruszewski, S. (2012). Effect of magnetic field on seed germination and seedling growth of sunflower. *International Agrophysics*, 26(3). doi:10.2478/v10247-012-0039-1
- Medeiros-Bauer, L., Vieira-Costa, J. A., Centeno-da Rosa, A. P., and Oliveira-Santos, L. (2017). Growth stimulation and synthesis of lipids, pigments and antioxidants with magnetic fields in *Chlorella kessleri* cultivations. *Bioresource Technology*, 244, 1425-1432. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.036>
- Minkova, K. M., Toshkova, R. A., Gardeva, E. G., Tchorbadjieva, M. I., Ivanova, N. J., Yossifova, L. S., et al. (2011). Antitumor activity of B-phycoerythrin from *Porphyridium cruentum*. *Journal of Pharmacy Research*, 4(5), 1480-1482.
- Moreno Garcia, P., Parra-Riofrio, G., Abdala-Diaz, R. T., García-Rosado, E., Uribe-Tapia, E., Alonso-Sanchez, M. C., et al. (2021). Polisacáridos de *Porphyridium cruentum* presentan actividad antiviral diferencial frente a infecciones causadas de VHSV y VNN. *Sociedad Española de Microbiología*.
- Mosquera-Deamici, K., Vieira-Costa, J. A., and Oliveira-Santos, L. (2016). Magnetic fields as triggers of microalga growth: evaluation of its effect on *Spirulina* sp. *Bioresource Technology*, 220, 62-67. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.08.038>
- Obando-Montoya, E. J., Dorion, S., Atehortua-Garcés, L., and Rivoal, J. (2021). Phycobilin heterologous production from the Rhodophyta *Porphyridium cruentum*. *Journal of Biotechnology*, 341, 30-42. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2021.09.001>
- Oliveira-Santos, L., Mosquera-Deamici, K., Costa-Menestrino, B., Garda-Buffon, J., and Vieira-Costa, J. A. (2017). Magnetic treatment of microalgae for enhanced product formation. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 33(9), 1-6. doi:<https://doi.org/10.1007/s11274-017-2332-4>
- Oliveira-Santos, L., Pereira-Silva, P. G., Roswag-Machado, B., Sala, L., and Mosquera-Deamici, K. (2022). Update on the application of magnetic fields to microalgal cultures. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 38(11), 211. doi:<https://doi.org/10.1007/s11274-022-03398-y>
- Oprescu, E. E., Enascuta, C. E., Galan, A. M., Bombos, M., and al., e. (2019). Evaluation of *Porphyridium purpureum* and *Nannochloropsis* sp. for carbohydrates and lipids production. *Revista de Chimie*, 70(9), 3305-3308.
- Ozório, R. A., Lopes, R. G., Góes, B. S., and al., e. (2015). Crescimento e perfil enzimático do camarão branco do Pacífico alimentado com extrato de *Porphyridium cruentum*. *B. Inst Pesca*, 41(1), 123-131.
- Permatasari, D., and Rilyanti, M. (2020). Adsorption isotherm of multicomponent solution of Cu (II) ions, crystal violet, and methylene blue on Silica-Magnetite *Porphyridium* sp. algae hybrid. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Bandar Lampung, Indonesia.
- Pulz, O., and Wolfgang, G. (2004). Valuable products from biotechnology of microalgae. *Applied microbiology and biotechnology*, 65(6), 635-648. doi:<https://doi.org/10.1007/s00253-004-1647-x>
- Qian, J., Zhou, C., Ma, H., Li, S., Abu-ElGasim, A. Y., and Abdulrahman, M. A. Y. (2016). Biological effect and inactivation mechanism of *Bacillus subtilis* exposed to pulsed magnetic field: Morphology, membrane permeability and intracellular contents. *Food Biophysics*, 11(4), 429-435. doi:<https://doi.org/10.1007/s11483-016-9442-7>
- Ramu-Ganesan, A., Kannan, M., Karthick-Rajan, D., Pillay, A. A., Shanmugam, M., Sathishkumar, P., et al. (2022). Phycoerythrin: A pink pigment from red sources (rhodophyta) for a greener biorefining approach to food applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1-19. doi:<https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2081962>
- Rebollosa Fuentes, M. M., Acién Fernández, G. G., and Guil Guerrero, J. L. (2000). Biomass nutrient profiles of the microalga *Porphyridium cruentum*. *Food Chemistry*, 70(3), 345-353. doi:[https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(00\)00101-1](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(00)00101-1)
- Repacholi, M. H., and Greenebaum, B. (1999). Interaction of static and extremely low frequency electric and magnetic fields with living systems: health effects and research needs. *Bioelectromagnetics: Journal of the Bioelectromagnetics Society, the Society for Physical Regulation in Biology and Medicine, the European*

- Bioelectromagnetics Association*, 20(3), 133-160. doi:https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-186X(1999)20:3<133::AID-BEM1>3.0.CO;2-O
- Rilyanti, M., and Permatasari, D. (2021). *Adsorption isotherm of multicomponent solution of Cu (II) ions, crystal violet, and methylene blue on Silica-Magnetite Porphyridium sp. algae hybrid*. Paper presented at the IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.
- Rivera-Talamantes, A. (2014). *Propiedades ópticas de la microalga Porphyridium cruentum en diferentes etapas de crecimiento*. (Tesis), Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.
- Rizky, Y. A., Suharja, J., Dirga, A., and Ilham, I. (2013). *Pengaruh penambahan logam Fe (ii) terhadap laju pertumbuhan fitoplankton Chlorella vulgaris dan Porphyridium cruentum*. Paper presented at the Pekan Ilmiah Mahasiswa Nasional Program Kreativitas Mahasiswa-Penelitian 2013, Jakarta, Indonesia.
- Sánchez-Saavedra, M. d. P., Castro-Ochoa, F. Y., Nava-Ruiz, V. M., Ruiz-Güereca, D. A., Villagómez-Aranda, A. L., Siqueiros-Vargas, F., et al. (2018). Effects of nitrogen source and irradiance on *Porphyridium cruentum*. *Journal of Applied Phycology*, 30, 783-792. doi:https://doi.org/10.1007/s10811-017-1284-2
- Sánchez Meca, J. (2010). Cómo realizar una revisión sistemática y un meta-análisis. In *Aula abierta* (Vol. 38, pp. 53-64).
- Servel, M. O., Claire, C., Derrien, A., Coiffard, L., and De Roeck-Holtzhauser, Y. (1994). Fatty acid composition of some marine microalgae. *Phytochemistry*, 36(3), 691-693. doi:https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)89798-8
- Shuai, G., Zi-Cheng, H., Dian, X., and al., e. (2021). Effects of different nitrogen concentrations on the growth and bioactive compounds biosynthesis of *Porphyridium cruentum* under green light. *Natural Product Research Development*, 33(10), 1751.
- Silva-Costa, S., Precipito-Peres, B., Roswag-Machado, B., Vieira-Costa, J. A., and Oliveira-Santos, L. (2020). Increased lipid synthesis in the culture of *Chlorella homosphaera* with magnetic fields application. *Bioresource Technology*, 315, 123880. doi:https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123880
- Silveira-Font, Y., Gómez-Luna, L., Kufundala-Wemba, M. D., Salazar-Hernández, D., and Ortega-Díaz, Y. (2018). Variación de la composición de pigmentos de *Chlorella vulgaris* Beijerinck, con la aplicación del campo magnético estático. *Revista Cubana de Química*, 30(1), 55-67.
- Silveira-Font, Y., Ortega-Díaz, Y., Cuypers, A., Isaac-Alemán, E., and Vandamme, D. (2023). The effect of magnetic field treatment on the cultivation of microalgae: An overview of involved mechanisms. *Journal of Applied Phycology*, 35, 1525-1536. doi:https://doi.org/10.1007/s10811-023-02994-1
- Simovic, A., Combet, S., Velickovic, T. C., Nikolic, M., and Minic, S. (2022). Probing the stability of the food colourant R-phycoerythrin from dried Nori flakes. *Food Chemistry*, 374, 1-10. doi:https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131780.
- Soeprbowati, T. R., and Hariyati, R. (2013). Bioaccumulation of Pb, Cd, Cu, and Cr by *Porphyridium cruentum* (SF Gray) Nägeli. *International Journal of Marine Science*, 3. doi:10.5376/ijms.2013.03.0027.
- Spolaore, P., Joannis-Cassan, C., Duran, E., and Isambert, A. (2006). Commercial applications of microalgae. *Journal of bioscience and bioengineering*, 101(2), 87-96. doi:https://doi.org/10.1263/jbb.101.87
- Sun, L., Wang, C., Shi, Q., and Ma, C. (2009). Preparation of different molecular weight polysaccharides from *Porphyridium cruentum* and their antioxidant activities. *International Journal of Biological Macromolecules*, 45(1), 42-47. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2009.03.013
- Sun, L., Wang, L., and Zhou, Y. (2012). Immunomodulation and antitumor activities of different-molecular-weight polysaccharides from *Porphyridium cruentum*. *Carbohydrate Polymers*, 87(2), 1206-1210. doi:https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.08.097
- Syaifudin, M., Sulmartiwi, L., and Andriyono, S. (2017). Addition of red microalgae *Porphyridium cruentum* to the feed against color brightness of betta fish (*Betta splendens*). *Journal of Aquaculture and Fish Health*, 6(1), 41-47.
- Tannin-Spitz, T., Bergman, M., Van-Moppes, D., Grossman, S., and Arad, S. M. (2005). Antioxidant activity of the polysaccharide of the red microalga *Porphyridium sp.* *Journal of Applied Phycology*, 17(3), 215-222. doi:https://doi.org/10.1007/s10811-005-0679-7
- Thermo Scientific, T. (2023). Catalog Product. In T. Scientific (Ed.).
- Ulusoy-Erol, H. B., Lara-Menegazzo, M., Sandefur, H., Gottberg, E., Vaden, J., Asgharpour, M., et al. (2020). *Porphyridium cruentum* grown in ultra-filtered swine wastewater and its effects on microalgae growth productivity and fatty acid composition. *Energies*, 13(12), 3194. doi:https://doi.org/10.3390/en13123194.
- Ursache, M., Mindru, G., Creangă, D. E., Tufescu, F. M., and Goiceanu, C. (2009). The effects of high frequency electromagnetic waves on the vegetal organisms. *Romanian Reports of Physics*, 54(1-2), 133-145.
- Vashisth, A., and Nagarajan, S. (2010). Effect on germination and early growth characteristics in sunflower (*Helianthus annuus*) seeds exposed to static magnetic field. *Journal of plant physiology*, 167(2), 149-156. doi:https://doi.org/10.1016/j.jplph.2009.08.011.

- Velea, S., Ilie, L., and Filipescu, L. (2011). Optimization of *Porphyridium purpureum* culture growth using two variables experimental design: light and sodium bicarbonate. *UPB Sci Bull Series B*, 73(4), 81-94.
- Wang, H. Y., Zeng, X. B., and Gui, S. Y. (2006). Growth of *Chlorella vulgaris* under different magnetic treatments. *Progress in Modern Biomedicine*, 12.
- Wang, H. Y., Zeng, X. B., and Guo, S. Y. (2007). Effects of magnetic treatment on ultrastructure of *Chlorella vulgaris*. *Acta Laser Biology Sinica*(4).
- Wang, J., Chen, B., Rao, X., and al., e. (2007). Optimization of culturing conditions of *Porphyridium cruentum* using uniform design. *World Journal of Microbiology Biotechnology*, 23(10), 1345-1350. doi:<https://doi.org/10.1007/s11274-007-9369-8>.
- Yin, H. C., Sui, J. K., Han, T. L., Liu, T. Z., and Wang, H. (2022). Integration bioprocess of B-phycoerythrin and exopolysaccharides production from photosynthetic microalga *Porphyridium cruentum*. *Frontiers in Marine Science*, 8, 2128. doi:<https://doi.org/10.3389/fmars.2021.836370>.
- Zhi-Yong, L., Si-Yuan, G., Lin, L., and Miao-Yan, C. (2007). Effects of electromagnetic field on the batch cultivation and nutritional composition of *Spirulina platensis* in an air-lift photobioreactor. *Bioresource Technology*, 98, 700-705. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.01.024>.