

Importancia nutrimental de la diatomea *Odontella aurita*

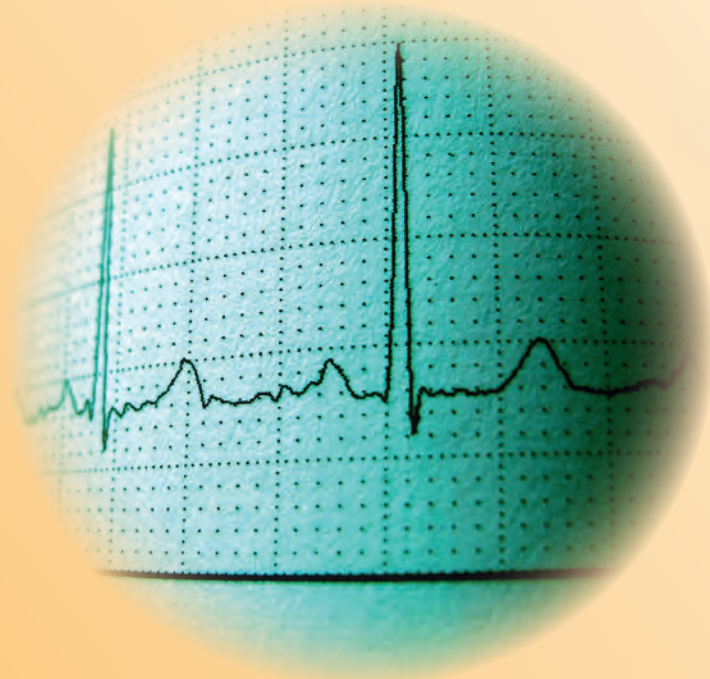
para su aprobación como suplemento generalmente reconocido como alimento seguro (GRAS) en México

Nutritional importance of the diatom *Odontella aurita* for its approval as a supplement generally recognized as safe food (GRAS) in Mexico



Autores:

Leonardo Sánchez Angulo¹, Karla Suzeth Trejo Berumen²,
Bertha Olivia Arredondo Vega^{2*}



Resumen

Las diatomeas son organismos fotosintéticos que se distribuyen en diferentes hábitats y son responsables de alrededor del 50% de la productividad primaria en los ecosistemas marinos. Por su elevado contenido de ácidos grasos altamente insaturados (HUFA) como el ácido eicosapentaenoico (EPA ω 3) y pigmentos

carotenoides como la fucoxantina, son candidatos en la prevención y regulación de enfermedades cardiovasculares humanas. Así mismo, se les ubica en un plano de interés biotecnológico principalmente para el sector alimenticio. En esta revisión tomamos como modelo de estudio a la diatomea bentónica *Odontella aurita*, aislada de La Ribera, Baja California Sur, México. Presentamos el potencial que tiene en cuanto a nivel nutrimental como posible alimento GRAS (generalmente reconocido como alimento seguro) y como alternativa viable para una futura comercialización.

Palabras clave: ácido eicosapentaenoico, fucoxantina, biorrefinería.

¹Instituto Tecnológico de La Paz. Boulevard Forjadores de Baja California Sur No. 4720. La Paz, Baja California Sur, 23080. México. leonardosanchezangulo1998@gmail.com

²Subcoordinación de Emprendimiento e Incubación de Base Científico y Tecnológico. Oficina de Transferencia Social del Conocimiento e Innovación Tecnológica (OTSCEIT). Coordinación de Vinculación, Innovación y Transferencia de Conocimiento a la Sociedad. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR). Avenida IPN 195. Colonia Playa Palo de Santa Rita Sur. La Paz, Baja California Sur, 23096. México. ktrejo@cibnor.mx

^{2*}Laboratorio de Biotecnología de Microalgas. Programa de Acuicultura. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR). Avenida IPN 195. Colonia Playa Palo de Santa Rita Sur. La Paz, Baja California Sur, 23096. México. *kitty04@cibnor.mx



Abstract

Diatoms are photosynthetic organisms that are distributed in different habitats. They are responsible for more than 50% of the primary productivity in marine ecosystems. Due to their high content of highly unsaturated fatty acids (HUFA) such as eicosapentaenoic acid (EPA $\omega 3$) and carotenoid pigments such as fucoxanthin, they are candidates for the prevention and regulation of human cardiovascular diseases. They have biotechnological interest in the food sector. In this review, we took as a study model the benthic diatom *Odontella aurita*, isolated from La Ribera, Baja California Sur, Mexico. We present the potential of this species has in terms of a nutritional level as a GRAS food (generally recognized as safe food), and as a viable alternative for a future commercialization.

Key words: *eicosapentaenoic acid, fucoxanthin, biorefinery.*

1. Antecedentes

En las últimas décadas, se ha incrementado el interés por el cultivo y el aprovechamiento biotecnológico de microalgas. Son diversos las aplicaciones en fitorremediación, en la obtención de compuestos bioactivos, biomasa para reemplazar aceites y proteínas extraídos de fuentes convencionales de consumo, además de adicionar valor nutricional a favor de la salud humana; sin embargo, se requiere continuar investigando para lograr procesos de producción de biomasa microalgal que sean más eficientes, así como el aprovechamiento integral para obtener bioproductos que sean aplicables en diferentes áreas. A este proceso integral se le conoce como biorrefinería microalgal (Pulz y Gross, 2004).

La biotecnología microalgal ha generado ingresos a nivel mundial de 6×10^9 dólares/año, y su cultivo alcanza un poco más de 7.5×10^6 toneladas/año de biomasa microalgal (Pulz y Gross, 2004), sin embargo, está pendiente asegurar que ésta cumpla con los requisitos de sanidad para la elaboración de alimentos de consumo humano, así como para la obtención de otros productos de alto valor agregado que satisfaga las necesidades de una futura población que se estima superará los 9,000 millones de personas para el año 2050 (Godfray *et al.*, 2010). En este contexto, las microalgas son consideradas como una de las fuentes naturales con mayor potencial para cubrirlas (Tredici *et al.*, 2010).

Entre las ventajas que presenta el cultivo de microalgas con respecto a los cultivos vegetales tradicionales, es que no requieren de tierra cultivable, por lo que no compiten con la producción de éstos. Por otro lado, las microalgas son organismos

ubiguos, es decir, se encuentran en diferentes hábitats, como agua de mar, agua salobre, agua dulce, aguas residuales, en la nieve, en el suelo, en zonas desérticas. Son organismos fotosintéticos que sintetizan y almacenan carbohidratos, aceites, proteínas, pigmentos liposolubles como los carotenoides e hidrosolubles como la ficocianina, ficoeritrina, aloficocianina, antioxidantes enzimáticos y no enzimáticos (Hernández-Urbe, 2016).

Estos compuestos se pueden fraccionar y separar a través de procesos de biorrefinería, lo que constituye un aprovechamiento integral de la biomasa microalgal (Wijffels *et al.*, 2010). Además, por su elevado contenido de ácidos grasos altamente insaturados (HUFA, por su abreviación en inglés), como el ácido araquidónico (ARA $\omega 6$), ácido eicosapentaenoico (EPA $\omega 3$) y el ácido docosahexaenoico (DHA $\omega 3$); pigmentos carotenoides con capacidad antioxidante, como el β -caroteno, la astaxantina, la fucoxantina y

la luteína, entre otros. Por lo anterior, se les considera una fuente natural de compuestos bioactivos, cuyas aplicaciones abarcan la industria alimentaria, cosmética, biotecnológica y médica.

Se ha estimado que existen entre 200,000 a varios millones de especies de microalgas (Pulz y Gross, 2004). Lee (2008) clasificó a las algas en dos grupos; procariotas y eucariotas (ver tabla 1). Las procariotas solo tienen la división Cyanophyta (son las cianobacterias), mientras que las eucariotas se encuentran divididas de acuerdo al número de membranas en los cloroplastos.

Su reproducción ocurre principalmente por división binaria, con tiempos de duplicación desde una hora para procariotas y

Tabla 1. Clasificación de algas propuesta por Lee, 2008 (Sahoo y Seckbach, 2015).

	Grupos	Divisiones	Clases	
Procariota	I	(i) Cyanophyta	Cyanophyceae	
	II. Cloroplastos rodeados por las dos membranas de la envoltura cloroplástica	(b) Glaucophyta		
		(c) Rhodophyta		
		(d) Chlorophyta		
		III. Cloroplasto rodeado por una membrana del retículo endoplásmico cloroplástico	(a) Euglenophyta (Euglenoides)	
	(b) Dinophyta (Dinoflagellates)			
	(a) Cryptophyta (cryptophytes)			
	(b) Prymnesiophyta (haptophytes)	Prymnesiophyceae		
Eucariota			Chrysophyceae	
			Synurophyceae	
	III. Cloroplasto rodeado por dos membranas de la envoltura del retículo endoplásmico cloroplástico			Dictyophyceae
				Pelagophyceae
		(c) Heterokontophyta (heterokonts)	Bacillariophyceae	
			Raphidophyceae	
				Xanthophyceae
				Eustigmatophyceae
				Phaeophyceae



de ocho a veinticuatro horas para eucariotas. La mayoría de las especies, tienden a dividirse en un momento particular ya sea del día o de la noche, por lo que su comportamiento se puede ver influenciado tanto por la disponibilidad de luz, como por la temperatura a la cual se cultivan (Abalde *et al.*, 1995).

En la actualidad el estilo de vida del hombre, en su mayoría, está basado en un consumo abundante de comida alta en calorías, una excesiva ingesta de carnes rojas, además de tener baja o nula actividad física, características que favorecen que se presenten diferentes factores de riesgo en su salud, como el metabolismo dañado de la glucosa, la resistencia a la insulina, la dislipidemia aterogénica, la hipertensión y la obesidad. Estos síntomas inducen a enfermedades cardiovasculares, aumento del colesterol total, enfermedad de la gota, ciertos tipos de cáncer, lo que en conjunto constituye el síndrome metabólico (Mimouni *et al.*, 2015; Petermann *et al.*, 2018). Estudios recientes han demostrado un efecto sinérgico del carotenoide fucoxantina y el EPA $\omega 3$ contra el síndrome metabólico, hiperlipidemia, estrés oxidativo, entre otros (Haimeur *et al.*, 2012; Xia *et al.*, 2013).

Se han descrito alrededor de 100,000 especies de diatomeas, tanto fósiles como vivientes. Son organismos microscópicos y unicelulares que poseen una cubierta de sílice llamada frústula, constituida por dos valvas que encajan entre sí y pueden tomar formas muy variadas: alargada, elíptica, esferoidal, cúbica, estrellada. Fijan el CO_2 por fotosíntesis, quizá en mayor cantidad que los bosques tropicales (Illana y Blanco, 2008).

Las diatomeas pueden llevar una vida libre o en forma de agregados formando cadenas. Aparecen flotando libremente como componentes de fitoplancton y sobre superficies húmedas e incluso sobre otras algas. También están presentes en el barro, el hielo y hasta en algunas vísceras (hígado, riñón) de organismos (Illana y Blanco, 2008). Son una fuente importante de HUFA, por lo que son de gran interés biotecnológico en la obtención

de compuestos que pueden emplearse como insumos para la industria farmacéutica y nutracéutica. La combinación de los ácidos grasos con algunos carotenoides como la fucoxantina, se ha utilizado en la industria cosmetológica como en cremas antienvjecimiento.

Algunas especies han mostrado efectos antidiabéticos, antihipertensivos y anti obesidad (Haimeur *et al.*, 2016).

Cuando las diatomeas mueren, su pared celular constituye la tierra de diatomeas o diatomita, que tiene aplicaciones industriales, como por ejemplo, en la fabricación de dinamita, al absorber y estabilizar la nitroglicerina; como insecticida, al bloquear la tráquea de los insectos; como abrasivo para limpieza de materiales; como filtro fino para diversos líquidos como agua, cerveza y otras sustancias farmacéuticas, como aislante térmico al actuar como difusor de calor y como exfoliantes en

cosmetología (Bozarth *et al.*, 2009). También, la compleja y entrecruzada estructura de la pared celular de las diatomeas ha resultado atractiva para la nanotecnología, por la posibilidad de aplicarlas en la producción o sustitución de chips electrónicos (Mishra *et al.*, 2017), así como en la industria farmacéutica, como adyuvante en vacunas y posible sustitución del aluminio (Nazmi *et al.*, 2017).

Dentro de la gran diversidad de grupos de microalgas, las diatomeas constituyen uno de los de mayor interés, ya que además de que son responsable de alrededor del 50% de la productividad primaria en los ecosistemas marinos, presentan un elevado contenido de EPA $\omega 3$ y de fucoxantina. La península de Baja California, está rodeada de mar tanto por el Océano Pacífico como por el Golfo de California o Mar de Cortés, siendo ésta una zona con alta productividad fitoplanctónica, y su riqueza está conformada por diatomeas entre otras

especies (Moreno *et al.*, 1996). Entre las diatomeas, está el grupo de las especies bentónicas, que son aquellas que se adhieren o depositan en un sustrato, como superficies rocosas, corales, macroalgas o en el fondo marino. Un ejemplo es la microalga *O. aurita*, que por sus características de composición bioquímica (alto contenido de EPA $\omega 3$, fucoxantina), se considera de interés biotecnológico principalmente para el sector alimenticio. Entre los estudios realizados con este enfoque, se encuentra, el de un grupo de investigación francés, quienes la aislaron, la identificaron, la caracterizaron y llevaron a cabo los análisis para su empleo como aditivo alimentario (Moreau *et al.*, 2006).

En años recientes, con el interés de aislar y caracterizar cepas nativas de Baja California Sur, el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR) ha llevado a cabo una bioprospección de la riqueza fitoplanctónica de una zona del Mar de Cortés, aislando una amplia diversidad de microalgas y entre ellas, a la cepa de *Odontella aurita*, la cual constituye el modelo de estudio de este trabajo de investigación (Bárcenas-Pérez *et al.*, 2017).

2. Aplicaciones biotecnológicas de microalgas

Las microalgas presentan diversos campos de aplicación, como fuente de alimento vivo para larvas de peces, crustáceos y moluscos marinos, en la obtención de moléculas bioactivas de interés en investigación en medicina, como fuente de pigmentos naturales con aplicación en productos cosméticos y en la industria alimentaria, para la obtención de fertilizantes para cultivos de interés comercial, entre otros (Vanegas y Hernández-Benítez, 2018). También se han utilizado como complementos nutricionales por su contenido de ácidos grasos esenciales, específicamente los altamente insaturados (HUFA).

Otros pigmentos hidrosolubles (ficocianina, ficoeritrina) y liposolubles (fucoxantina, astaxantina, β -caroteno, luteína, entre



otros) también tienen aplicación como antioxidantes. Dentro de la producción de fuentes alternas de biocombustibles, los aceites de las microalgas (saturados e insaturados) sirven como materia prima para la obtención de biodiesel. Además, las microalgas se han considerado en la mitigación de gases de efecto invernadero por la capacidad de capturar el CO₂, así como en la biorremediación de aguas industriales de granjas acuícolas y porcícolas mediante la absorción de nitrógeno y fósforo (Vanegas y Hernández-Benítez, 2018; Olguín-Palacios y González-Portela, 2021). Entre los factores que influyen en el crecimiento y calidad de la biomasa microalgal, están la intensidad luminosa, temperatura, salinidad, pH y concentración de nutrientes (Abalde *et al.*, 1995). Esta variabilidad, incluso con una misma especie, constituye una ventaja ya que permite tener una amplia gama de características en cuanto a la calidad de la biomasa y por ende, una gran cantidad de aplicaciones biotecnológicas (Camacho y Flores-Castillo, 2020).

En los años 50's y 60's las microalgas se propusieron como una fuente importante de proteína unicelular con fines de consumo humano. El perfil de aminoácidos en la mayoría de las microalgas es más favorable que el comparado con fuentes convencionales como cereales, legumbres, nueces, carne, leche, pescado, soya y mariscos (Draaisma *et al.*, 2013). De lo anterior, algunas microalgas se han utilizado como complementos dietéticos. En la actualidad, se estima que el 30% de las microalgas producidas a nivel mundial son usadas en nutrición humana (Luna, 2007).

Los carbohidratos se encuentran en forma de almidón, glucosa, azúcares u otros polisacáridos de naturaleza sulfatada. Éstos son excretados al medio de cultivo como producto del metabolismo de las células. Los carbohidratos acumulados intracelularmente, pueden ser usados como agentes gelificantes o para la producción de bioetanol (Bernaerts *et al.*, 2018).

En los años 70's, las investigaciones se dirigieron al

tratamiento de aguas residuales, energías renovables, así como a la obtención de productos químicos de alto valor comercial. Se han aprovechado las propiedades depuradoras de las microalgas para el tratamiento de aguas residuales, tanto de origen doméstico, con materia orgánica detergentes y organismos patógenos fecales, como industrial, con altos contenidos de sólidos suspendidos, microorganismos y toxinas (Monroy, 2021). Al proceso de depuración utilizando microalgas se le denomina fitorremediación (Olguín-Palacios, 2012). El tratamiento de aguas residuales inicia con la eliminación de sólidos suspendidos, seguido de atenuar o eliminar la demanda bioquímica de oxígeno

Las microalgas participan principalmente en eliminar altas concentraciones de nitrógeno y fósforo, algunas pueden disminuir la carga bacteriana y absorber compuestos tóxicos.

Utilizando las microalgas (*Neochloris oleoabundans* y *Chlorococcum* sp.) y la planta acuática *Pistia stratiotes*, en el Instituto de Ecología (INECOL), en Xalapa, Veracruz, se desarrolló una biorrefinería a escala piloto de tercera generación, para una laguna de fitofiltración con el fin de purificar el agua de un río altamente contaminado; así como efluentes de digestión anaerobia de excretas de una granja porcícola. Uno de los productos de dicha biorrefinería fue la ficocianina obtenida de *Arthrospira maxima* (Olguín-Palacios y González-Portela, 2021).

La ficocianina es una proteína con propiedades antioxidantes, inmunomoduladoras y antiinflamatorias.

Los ácidos grasos esenciales, son lípidos muy importantes para la nutrición humana y con una mayor posibilidad de ser usada para la alimentación.

Se les denominan esenciales, porque los organismos no los pueden

producir y solo se obtienen a través del consumo de alimentos, es decir, a través de la cadena trófica. Las microalgas *Porphyridium cruentum*, *Ochromonas danica* y *Monodus subterraneus* contienen una gran cantidad de ácidos grasos insaturados como el ácido araquidónico (ARA ω 6), el ácido eicosapentaenoico (EPA ω 3) y el ácido docosahexaenoico (DHA ω 3), los cuáles en estas especies, se encuentran almacenados como gotas de aceite dentro de la célula (Valenzuela *et al.*, 2015).

El EPA ω 3 se ha aplicado en el tratamiento de la hiperlipidemia, enfermedad relacionada a la arteriosclerosis y en la insuficiencia coronaria; además, tienen la capacidad de disminuir las altas concentraciones de colesterol “malo” y triglicéridos en la sangre. También se han utilizado como saborizantes y aditivos cosméticos en la industria (Hernández-Pérez y Labbé, 2014).

3. El potencial de las microalgas para su comercialización

A nivel mundial, la mayoría de los países enfrentan el reto de la producción y abastecimiento, es decir, cómo resolver el problema de producir alimentos de manera lineal frente a un crecimiento poblacional que lo hace de forma exponencial y que, además, cumplan con elementos para la nutrición humana. Históricamente esto ha ocasionado falta de alimento, desnutrición en adultos e infantes y enfermedades (OMS, 2021). Por tanto, garantizar la seguridad alimentaria, se convierte en un tema relevante donde la industria alimentaria tiene un papel importante desde su legislación y normativa, hasta los sistemas innovadores de producción y creación de nuevos productos que incluye a los derivados de nuevas fuentes naturales, que contribuyan al crecimiento de esta industria y a la solución de este gran reto.

Considerando que los recursos naturales son cada vez más limitados, la ciencia a través de las microalgas ha buscado



alternativas para producir mayor biomasa en espacios reducidos, cuyo alto valor nutricional pueda ser empleada como aditivo en alimentos, fármacos o incluso en energías alternativas.

Varios estudios presentan a las microalgas como una alternativa alimenticia por su alto valor nutritivo y proteínico.

Desde la antigüedad, en algunos países ya se usaban microalgas como fuente de alimento. En México, los aztecas incluyeron a la *Spirulina maxima* en su alimentación (Ciferri, 1983), lo que significó una fuente de proteínas y antioxidantes muy importante. En la actualidad, solo algunas especies se están comercializando, entre ellas: *Chlorella vulgaris*, *Haematococcus pluvialis*, *Dunaliella salina*, *Isochrysis galbana*, *Arthrospira platensis*, *Arthrospira maxima*, *Spirulina subsalsa* (estas tres últimas se conocen en el mercado como Espirulina). Estas especies se utilizan principalmente como complementos

alimenticios para el hombre, como alimento para animales y como nutraceuticos (Gouveia *et al.*, 2008). *Chlorella vulgaris* se ha utilizado como medicina alternativa y como alimento tradicional en Oriente, dado su contenido de nutrientes, carotenoides, vitaminas y minerales, por lo que se ha posicionado en el mercado como complemento alimenticio en China, Japón, EUA y en Europa. Alemania ha iniciado la distribución en el mercado de alimentos funcionales suplementados con microalgas y cianobacterias, en productos como pastas, pan, yogurt y bebidas. Debido a la capacidad que tienen las microalgas de acumular grandes cantidades de lípidos y carbohidratos, se convierten en excelentes candidatas para la producción de biocombustibles, industria con gran potencial de comercialización y fuentes alternas de energía (Otero, 2017). Otras aplicaciones de las microalgas incluyen el empleo a nivel nanométrico como precursoras de carbono y nitrógeno, de plantillas biológicas para sintetizar microesferas de carbono porosas en baterías de litio-azufre (Camacho y Flores-Castillo, 2020). Algunas de las aplicaciones biotecnológicas de las microalgas se presentan en la figura 1.

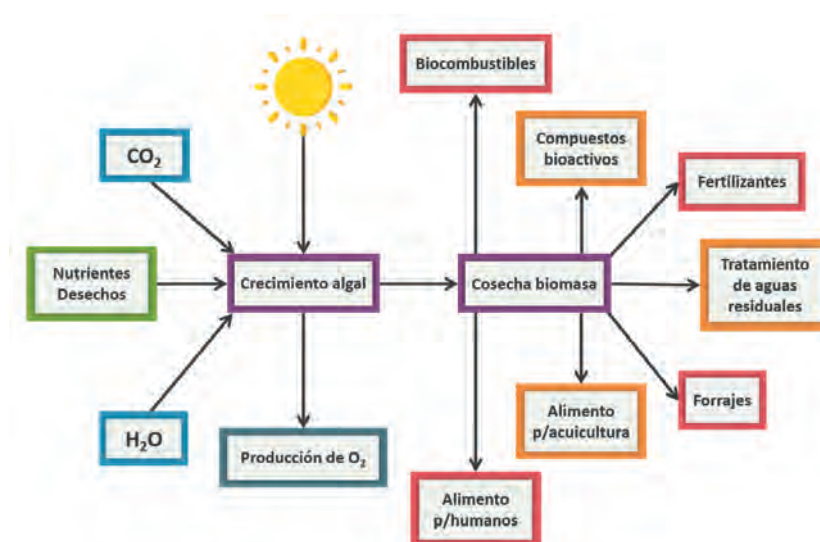


Figura 1. Algunas aplicaciones biotecnológicas de las microalgas.

Martínez-Angulo y Ramírez-Mérida (2017) realizaron una exploración acerca de las diferentes empresas que se han creado en América Latina, a partir del cultivo y extracción de biomasa a base de microalgas. Encontraron que existen catorce empresas dedicadas a esta actividad: dos en México, una en Ecuador, dos en Perú, una en Cuba, seis en Brasil y una en Chile, principalmente dedicadas al uso comercial de complementos alimenticios para humanos y para la acuicultura, que se venden en presentación como tabletas, cápsulas y microcápsulas, como aceite, los cuales contienen *Spirulina*, *Chlorella* y *Dunaliella salina* principalmente (ver tabla 2).

Uno de los grandes desafíos para la comercialización de las microalgas es, en primer lugar, lograr el escalamiento biotecnológico para tener la capacidad de producción que satisfaga la demanda comercial. Para el escalamiento de un cultivo, se deberá tomar en cuenta los siguientes puntos: a) selección de la cepa de microalga, b) conocer su ciclo de vida y biología, c) qué metabolito(s) de interés se va(n) a producir, d) estacionalidad del clima (temperatura, irradiación y ciclos de luz:oscuridad anual) en el lugar en donde se realizará el escalamiento, e) costos del terreno, construcción del sistema de cultivo, mano de obra, electricidad, bombeo de agua (dulce o de mar), nutrientes, f) método de cosecha y almacenamiento de biomasa, g) método de extracción del o los metabolitos, h) a qué mercado va dirigido el metabolito y h) aplicar el concepto de biorrefinería. Entre los diferentes sistemas de cultivo de microalgas que se han usado para su escalamiento a lo largo de la historia, están: estanques de canal abierto (raceway), fotobiorreactores tubulares cerrados (horizontales y verticales), fotobiorreactores rectangulares cerrados, columnas cilíndricas, sistema en capa fina o lámina delgada (Masojideck *et al.*, 2011). Se ha determinado que el costo de producción de microalgas a gran escala se podría reducir de 130 dls/kg de biomasa seca a 16 dls/

kg, cuando se optimicen tanto el sistema de cultivo a usar como el método de cosecha de la microalga seleccionada (Draaisma *et al.*, 2013). En América Latina, el sistema de cultivo que predomina es el de estanque de canal abierto (raceway), posiblemente por las condiciones climáticas favorables de las regiones, así como sus bajos costos asociados a la producción en comparación con otros sistemas (Martínez-Angulo y Ramírez-Mérida, 2017). En la figura 2 se presenta el cultivo de *O. aurita* en columnas en las instalaciones del CIBNOR de La Paz, Baja California Sur, México

El interés en el desarrollo de cultivos masivos de esta especie, sigue aumentando por lo que las investigaciones con esta especie continúan. Por otro lado, además del EPA $\omega 3$ y la fucoxantina, también se extrae la crisolaminarina, un glucano con actividad antioxidante (Xia *et al.* 2014).

Metabólicamente, las diatomeas tienen la capacidad de almacenar carbohidratos.



Tabla 2. Principales empresas productoras de suplemento alimenticio a partir de microalgas en Latinoamérica (Martínez-Angulo y Ramírez-Mérida, 2017).

Empresa	Productos	Ubicación	Microalgas cultivadas	Sistema de cultivo	Año de fundación
Genix	Suplementos alimenticios	Cuba	<i>Spirulina</i> sp.	Abierto	1996
Solarium Biotechnology S.A.	Suplementos alimenticios en cápsula y polvo	Chile	<i>Spirulina maxima</i>	Abierto	1999
Algae Fuels S.A.	Harina enriquecida	Chile	<i>Spirulina</i> sp.	Abierto	2010
BioLets S.A. de C.V.	Suplementos alimenticios en cápsula y polvo	México	<i>Spirulina</i> sp.	Cerrado	2013
Biomex	Suplementos alimenticios en cápsula	México	<i>Spirulina</i> sp. <i>Chlorella</i> sp.	-	2005
Acuisur	Suplementos alimenticios para humanos y acuicultura en polvo, cápsula y Suginori	Perú	<i>Spirulina platensis</i> <i>Chorella vulgaris</i>	Abierto	2010
Andexs Biotechnology SRL	Suplementos alimenticios en cápsula y polvo	Perú	<i>Spirulina platensis</i> <i>Haematococcus pluvialis</i> <i>Dunaliella salina</i> <i>Chorella vulgaris</i> <i>Nostoc</i> sp.	Abierto	2007
AndesSpirulina C.A.	Suplementos alimenticios en cápsula, polvo, tableta y microcápsula	Ecuador	<i>Spirulina</i> sp.	Abierto en invernadero	2005
Solazyme	Suplementos proteicos y aceites	Brasil	Especies autóctonas de Brasil	Cerrado	2003
Ocean Drop LTDA ME*	Suplemento alimenticio en cápsulas	Brasil	<i>Spirulina</i> sp. <i>Chlorella</i> sp.	-	2016

*No es una empresa productora de biomasa. Adquieren y procesan para comercialización.

Un tipo de almidón que se produce en el cloroplasto es la crisolaminarina, que se almacena en vesículas así como otras sustancias que se acumulan como “gotas de grasa” en su citoplasma. El contenido de lípidos puede variar entre 20 hasta más del 60% con respecto al peso seco (Abalde *et al.*, 1995) (ver tabla 3). Este incremento se presenta cuando un cultivo se somete a estrés por deficiencia de nitrógeno o silicio (Lora-Vilchis *et al.*, 2020). Las diatomeas mayormente utilizadas en alimentación de larvas de especies marinas son *Chaetoceros muelleri* y *Skeletonema costatum*, ya que aportan entre 45% de proteínas, 14% de lípidos y 18% de carbohidratos (Vásquez-Suárez *et al.*, 2010).



Figura 2. Cultivo en columnas de la diatomea *Odontella aurita* (CIB-17). Solarío del CIBNOR, La Paz, Baja California Sur, México. Imagen cortesía del Laboratorio de Biotecnología de Microalgas-CIBNOR.

La diatomea bentónica *O. aurita* se ha caracterizado en su morfología y composición bioquímica (Bárcenas-Pérez *et al.*, 2017) en el Laboratorio de Biotecnología de Microalgas del CIBNOR. En la tabla 4 se presenta la clasificación taxonómica (Guiry y Guiry,

2011). *Odontella aurita* tiene un diámetro apical entre 10 a 95 μm , y un diámetro transapical entre 5 a 45 μm (ver figura 3). Se colectó en el año 2009 en La Ribera, Baja California Sur, México (ver figura 4) y fue transportada en hielera hasta las instalaciones del CIBNOR para su posterior aislamiento e identificación morfológica.

Se mantiene en la Colección de Microalgas del CIBNOR con la clave CIB-17. Los intervalos ambientales en los que se desarrolla se indican en la tabla 5 (OBIS 2011, citado en EOL 2011).

Odontella aurita tiene una rica composición en ácidos grasos, destacando los ácidos grasos saturados (SFA por sus abreviaciones en inglés), ácidos grasos monoinsaturados (MUFA por sus abreviaciones en inglés) y el EPA $\omega 3$. De igual manera se puede observar en la tabla 6 una extensa composición de pigmentos como la fucoxantina que le da el color característico café a las diatomeas (Bárcenas-Pérez *et al.*, 2017).



En cuanto a procesos de comercialización, desde el año 2016, en Francia se han realizado esfuerzos para promover a la diatomea *O. aurita*. Un grupo de expertos multidisciplinares con experiencia en microalgas, nutrición humana, gastronomía y emprendimiento, fundaron la empresa “Odontella” (Odontella, 2021), la cual ha obtenido patentes relacionadas con el uso de *O. aurita* para consumo humano, además, los productos que ofrecen son complementos alimenticios a base de esta misma microalga.

Tabla 3. Diferentes fracciones de lípidos presente en distintas clases de algas (*expresada en % con respecto al peso seco; # % con respecto al total de lípidos) (Abalde *et al.*, 1995).

Clase	Lípidos totales*	Neutros#	Glicolípidos#	Fosfolípidos#
Cianobacterias	2-23	11-68	12-41	16-50
Chlorophyceae	1-70	21-66	6-26	17-53
Crysophyceae	12-72	-	-	-
Prymnesiophyceae	5-48	-	-	-
Cryptophyceae	3-17	-	-	-
Xanthophyceae	6-16	44	17	39
Rhodophyceae	1-14	41-58	42-59	-
Bacillariophyceae	1-39	14-60	13-44	10-47

Estratégicamente, “Odontella” estudió el comportamiento del mercado vegano y flexitariano en Europa, encontrando una fuerte tendencia al crecimiento. De acuerdo con Vegayvege (2021), el veganismo y el flexitarianismo creció 49% en dos años, lo que representó ventas equivalentes a 3,600 millones de euros.

Tabla 4. Clasificación taxonómica de *Odontella aurita* (Guiry y Guiry, 2011. <http://www.algaebase.org>)

Imperio	Eucariota
Reino	Cromista
Subreino	Harosa
Infrareino	Heterokonta
Phylo	Bacillariophyta
Subphylo	Kakhista
Clase	Mediophyceae
Subclase	Biddulphiophycideae
Orden	Triceratiales
Familia	Triceratiaceae
Género	Odontella
Especie	Odontella aurita

Las ventas de sustitutos de proteínas, crece cada vez más a nivel mundial y se espera que haya un incremento del 60% en el 2021 con ventas cercano a los 5,000 millones de euros (Odontella, 2021).

Uno de los principales obstáculos para la comercialización de este tipo de productos a nivel nacional e internacional, es cubrir todos los requisitos regulatorios y reglamentarios ante las instancias locales, federales e internacionales, en el caso de la exportación como aditivos alimentarios (Suarez-Diéguéz, *et al.*, 2014). Es así que las condiciones legislativas en cada país definen el camino a transitar para hacer llegar estos productos a la sociedad.

Tabla 5. Intervalos ambientales, concentración de nutrientes y oxígeno de la diatomea *Odontella aurita* (OBIS 2011, citado en EOL 2011).

Profundidad (m)	0 a 70
Temperatura (°C)	0.934 a 24.63
Nitratos (µM)	0.36 a 24.78
Salinidad (UPS)	27.25 a 35.63
Oxígeno (mL L ⁻¹)	4.86 a 8.57
Fosfatos (µM)	0.074 a 2.12
Silicatos (µM)	1.31 a 50.31

Tabla 6. Composición bioquímica de *Odontella aurita* (Bárceñas-Pérez et al., 2017).

Proteínas (% ps)	23±3
Carbohidratos (% ps)	26±3
Lípidos (% ps)	38±3
Ácidos grasos (% del total de ácidos grasos)	
ΣSFA	56
ΣMUFA	27
ΣPUFA	16
ΣHUFA	20
EPA	19.3±1.2
ARA	0.8±0.05
DHA	0.2±0.02
Pigmentos (µg mg ps)	
Fucoxantina	5.5±1.2
Clorofila <i>a</i>	13.2±2.2
Luteína	0.2±0.05

ps: peso seco.

4. Una mirada a las condiciones legislativas y normativas de las microalgas para su posible comercialización como aditivo alimentario.

La ciencia, la tecnología y la innovación han tenido un papel importante en la industria alimentaria, pues han contribuido a la producción de gran cantidad de aditivos alimentarios; según el DOF (2012), los que existen actualmente, en algunos casos provienen de fuentes naturales como las microalgas, que cumplen con las condiciones y exigencias de los consumidores quienes demandan cada vez más, productos nutritivos, variados, asequibles y seguros.

De acuerdo con la Guía de la Industria Química (2015), para determinar si un aditivo alimentario es seguro para consumo humano, debe ser atendido desde tres perspectivas:

- 1) de la comunidad médica quienes determinan si un aditivo puede ser nocivo a la salud del ser humano;
- 2) de la comunidad científica quienes realizan experimentos y encuentran nuevos hallazgos en la industria y;

3) de la perspectiva del Comité del Codex Alimentarius, autoridad internacional que se encarga de llevarlo a nivel normativo. Además, para que una sustancia pueda ser considerada como aditivo alimentario debe pasar por un proceso regulatorio y normativo, entre ellos se indican:

1) Codex Alimentarius.

Norma general para los aditivos alimentarios,

2) Acuerdo por el que se determinan los aditivos y coadyuvantes en alimentos, bebidas y suplementos alimenticios, su uso y disposiciones sanitarias,

3) Norma Oficial Mexicana. NOM-251-SSA1-2009. Prácticas de higiene para el proceso de alimentos, bebidas o suplementos alimenticios y

4) Reglamento de control sanitario de productos y servicios Título Vigésimo tercero.

En Estados Unidos, la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA, por sus abreviaciones en inglés)



es responsable de proteger la seguridad y protección de la mayor parte de los alimentos de dicha nación, los cosméticos, suplementos dietéticos y productos que emiten radiación. La FDA sirve como referente internacional sobre el uso y comercialización de aditivos, y generó una lista de aditivos para alimentos denominados tipo “GRAS” (Generally Recognized As Safe) según Suárez-Diéguez y colaboradores (2014).

De acuerdo con Williams y colaboradores (2016) para aprobar que una sustancia sea considerada como GRAS, su determinación se deberá basar en datos científicos, opiniones de expertos y en una base histórica del uso seguro de la sustancia en alimentos. Se puede considerar que una sustancia es “segura” cuando según el juicio de los científicos expertos dictaminan que la sustancia no causa daño bajo las condiciones en las que se busca sea consumida, todo esto sin la necesidad de notificar a la FDA. Es importante contar con evidencia preclínica sobre

la identidad y especificaciones del aditivo, propiedades como absorción, distribución, metabolismo y excreción.

De igual manera se requiere documentación sobre pruebas de genotoxicidad, toxicidad aguda, toxicidad subcrónica de 90 días, toxicidad reproductiva y carcinogenicidad.

Aquellas sustancias reconocidas como “GRAS” tienen una ventaja hacia la comercialización del producto que lleve el aditivo ya que permite agilizar los procesos de la FDA.

En México, quien se encarga de regular cualquier compuesto como un aditivo alimentario es la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) a través del subcomité No. 10, el cual se encuentra bajo el nombre de “Aditivos y Contaminantes de los Alimentos” y pertenece al Comité Mexicano para la Atención del Codex Alimentarius. Las listas de aditivos pueden ser modificables, de acuerdo con el DOF (2012) en su artículo décimo cuarto y el Reglamento de Control Sanitario de Productos y Servicio (RCSPS) en su artículo 208, siempre y cuando se cumplan con los requisitos que marcan las regulaciones.

5. La diatomea *Odontella aurita* como alimento GRAS

Estudios recientes han mostrado que una dieta rica en HUFA $\omega 3$ puede reducir el riesgo de enfermedades cardíacas como resultado de efectos antiaterogénicos, antiinflamatorios y antitrombóticos (Goodnight *et al.*, 1981). El EPA $\omega 3$ y el DHA $\omega 3$ son los ácidos grasos que, de acuerdo a su actividad biológica a nivel de membrana celular, entre los cuales se encuentran las prostaglandinas, esenciales para el buen funcionamiento del sistema inmune, entre otros (Haimeur *et al.*, 2012). Actualmente una de las fuentes principales de estos ácidos grasos, es el aceite de pescado, sin embargo, éstos no tienen la capacidad de sintetizarlos por lo que todo el EPA $\omega 3$ y el DHA $\omega 3$ que

logran acumular, provienen de la ingesta de microalgas o de sus consumidores en forma de zooplancton (Judé *et al.*, 2006). Por otro lado, utilizar aceite de pescado, podría presentar desventajas por la presencia de contaminantes, como metales pesados; además de los cambios en el perfil cuantitativo de los ácidos grasos debido al efecto estacionalidad, debido principalmente a la temperatura y ciclos de luz (día:noche) (Amine *et al.*, 2015).



Figura 3. *Odontella aurita*: imagen al microscopio óptico (Bárceñas-Pérez y Virgen-Félix, CIBNOR, 2017).

La Agencia Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA por sus abreviaciones en inglés) recomienda un consumo diario de 250 mg/día de EPA $\omega 3$ y DHA $\omega 3$ en adultos (EFSA, 2009). *O. aurita* es una diatomea marina que contiene un alto nivel de EPA $\omega 3$, además de una gran cantidad de compuestos con importante actividad biológica en la salud humana, como es la fucoxantina, fibras y fitoesteroles (Goodnight *et al.*, 1981).

La fucoxantina es uno de los compuestos bioactivos más importantes en el sector médico, ya que tiene propiedades antioxidantes, antiinflamatorias, anticancerígenas y antidiabéticas, así como efectos benéficos para el hígado, los vasos sanguíneos

del cerebro, huesos, piel y ojos (Peng *et al.*, 2011). Heo y Jeon (2009) mostraron que disminuyó de manera significativa la concentración de especies reactivas de oxígeno generadas por la exposición a radiación ultravioleta, en fibroblastos humanos.

En estudios realizados con ratones a los cuales se les suplementó *O. aurita* en su dieta, se observó una disminución de los niveles de triglicéridos y colesterol en la sangre y en el hígado, y generó un efecto de hipoglucemia e hipolipidemia, reduciendo los factores de riesgo para el síndrome metabólico (Haimeur *et al.*, 2016). De los trabajos anteriores se ha concluido que los beneficios que presenta el consumo de *O. aurita* se debe a una actividad sinérgica de todos los componentes presentes en dicha diatomea (Lattimer *et al.*, 2010; Peng *et al.*, 2011).

La fucoxantina es uno de los carotenoides con mayor presencia en la naturaleza,



estimándose una proporción del 10% respecto a todos los pigmentos que se podrían encontrar en las microalgas (Nomura *et al.*, 1997). La concentración que se ha obtenido a partir del cultivo de *O. aurita* en fotobiorreactores, ha sido de 79.56 mg/L, con un medio de cultivo sin restricción de nitrato (18 mM), alta intensidad de luz (300 $\mu\text{mol foton/m}^2 \text{ s}$), y una productividad de biomasa máxima de 6.36 g/L día (Xia *et al.*, 2013).

Considerar a las microalgas como un producto alimenticio comercializable depende principalmente de procesos de regulación en cada país. En la actualidad, solamente es posible comercializar aquellas especies que sean reconocidas como GRAS (Burdock *et al.*, 2004), tales como *Chlorella*, *Spirulina*, *Dunaliella* y *Haematococcus*. Todas las demás microalgas deberán de pasar por un proceso largo y costoso para lograr su registro como un nuevo alimento (Acien *et al.*, 2018). Un ejemplo es la diatomea *O. aurita* en Francia,

en donde la compañía INNOVALG logró registrarla como un nuevo alimento bajo la Regulación EC 258/97 en el año 2002, lo cual implica un gran avance para que dicha especie sea permitida como alimento para humanos en los demás países (Pulz y Gross, 2004).

6. Discusión académica

Utilizar a las diatomeas, específicamente a *O. aurita* como un alimento GRAS podría verse justificado gracias a los beneficios que aportan dos de sus componentes principales, el EPA $\omega 3$ y la fucoxantina. Haimeur y colaboradores (2016) mostraron que un elevado estrés oxidativo fue contrarrestado en ratones alimentados con *O. aurita*, comprobando así su alto poder antioxidante.

Los beneficios que presenta la fucoxantina en el organismo, se deben a su capacidad antioxidante ya que elimina las especies reactivas de oxígeno (Sachindra *et al.*, 2007). La diferencia estructural que presenta la fucoxantina con respecto a los demás pigmentos encontrados en microalgas, es la presencia de un carbono alénico poco usual. Además, la fucoxantina cuenta con seis átomos de oxígeno, lo que le proporciona mayor sensibilidad a los radicales, especialmente bajo condiciones anóxicas. Nomura *et al.*, (1997) demostraron que la actividad antioxidante de los carotenoides se debe a la presencia intramolecular de átomos de oxígeno

Por otra parte, Woo *et al.*, (2009) señalaron que el potencial antiobesidad que presenta la fucoxantina podría ser mediado a través de mejorar los niveles de adipoquinas en el plasma sanguíneo, regular procesos enzimáticos lipogénicos y de producción de grasas, en aumentar la β -oxidación de ácidos grasos y desacoplar la expresión genética de proteínas en tejidos adiposos. Estas características sugieren que la fucoxantina actúa

como un regulador del metabolismo de lípidos en tejidos grasos

La dosis letal media de fucoxantina es más del 2000 mg/kg respecto al peso corporal, con lo cual los estudios concluyeron que la fucoxantina es un compuesto seguro que no presenta toxicidad o mutagenicidad bajo condiciones experimentales (Beppu *et al.*, 2009).

7. Consideraciones finales y perspectivas

Es evidente que las microalgas representan un gran potencial para el desarrollo biotecnológico gracias a la gran variedad de especies, cada una cuenta con características peculiares, es posible aplicarlas a una amplia variedad de campos, desde la industria alimenticia, cosmética e incluso para la fabricación de biocombustibles, entre otras (figura 3), por lo que las diatomeas siguen siendo campo abierto para muchas más investigaciones.

La comercialización es uno de los principales retos para aprovechar los grandes beneficios que microalgas como *O. aurita* pueden brindar a nuestra salud. Las condiciones legislativas, regulatorias y reglamentarias deben estar presentes desde el diseño del producto y selección de mercado objetivo, por ello, hay la intención de que *O. aurita*, pase por el proceso riguroso de aprobación para adquirir el estatus “GRAS”, que sería una ventaja para su introducción en el mercado como aditivo alimentario. La clasificación de la diatomea *O. aurita* como “nuevo alimento” en Francia, es un paso relevante en esta cepa, pues podría tomarse como referencia para la aprobación en México. En el CIBNOR, existe un gran interés en realizar las pruebas y análisis de toxicidad de *O. aurita*, para etiquetarla como alimento GRAS, lo que ha sido interrumpido por la pandemia del SARS-CoV-2. En Baja California Sur, el cultivo y escalamiento de la cepa nativa *O. aurita* podría ser una alternativa con enfoque sostenible y viable de comercialización ante los retos de alternativas de desarrollo que presenta el Estado, por encontrarse geográficamente en zonas

áridas y semiáridas. Además, las condiciones climáticas y geográficas de Baja California Sur, la disponibilidad de agua de mar, una alta irradiancia y temperatura templada durante casi todo el año, son factores idóneos para llevar a cabo el desarrollo de una industria biotecnológica de biorrefinería de microalgas en este estado, aún incipiente a nivel nacional en el sentido comercial. Esto podría realizarse a partir de los desarrollos biotecnológicos generados en los Centros de Investigación e Instituciones Académicas del Estado de Baja California Sur, aprovechando las instalaciones del Parque de Innovación Tecnológico del CIBNOR, ofrecería fuentes de empleo altamente especializado, para aquellos jóvenes investigadores que se preparan en el apasionante mundo de las microalgas, evitando así la “fuga de cerebros” a otras partes del mundo (Arredondo-Vega y Vázquez-Duhalt, 1991).



8. Agradecimientos

Los autores agradecen al Programa de Acuicultura del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), por el apoyo brindando para la escritura del presente artículo, facilitando las herramientas necesarias para trabajar en modo “online”. A los proyectos CONACYT (198102, 216279), con los que fue posible adquirir equipos como el HPLC, ofrecer becas a estudiantes y contratar técnicos por honorarios. A la Coordinación de Vinculación, Innovación y Transferencia de Conocimiento a la Sociedad (COVITECS) y a la Oficina de Transferencia Social del Conocimiento e Innovación Tecnológica (OTSCEIT) en especial al Dr. Luis Felipe Beltrán Morales y al M.C. Jesús Alfredo de la Peña, por brindar apoyo para complementar el presente escrito. A los estudiantes que previamente desarrollaron el cultivo y escalamiento de la diatomea *Odontella aurita*, generando conocimiento de esta especie. A la Ing. Biotecnol. Daniela Bárcenas Pérez, quien realizó su tesis de licenciatura con esta diatomea. A la M. en C. Araceli Cazares Salazar, M. en C. Fredy Hernández Uribe, Ing. Bq. Diana Kareli Valenzuela Ruiz, QFB Marte Virgen Félix y a la Dra. Laura Carreón Palau por el apoyo técnico, al DG Gerardo Hernández García por la edición gráfica editorial.

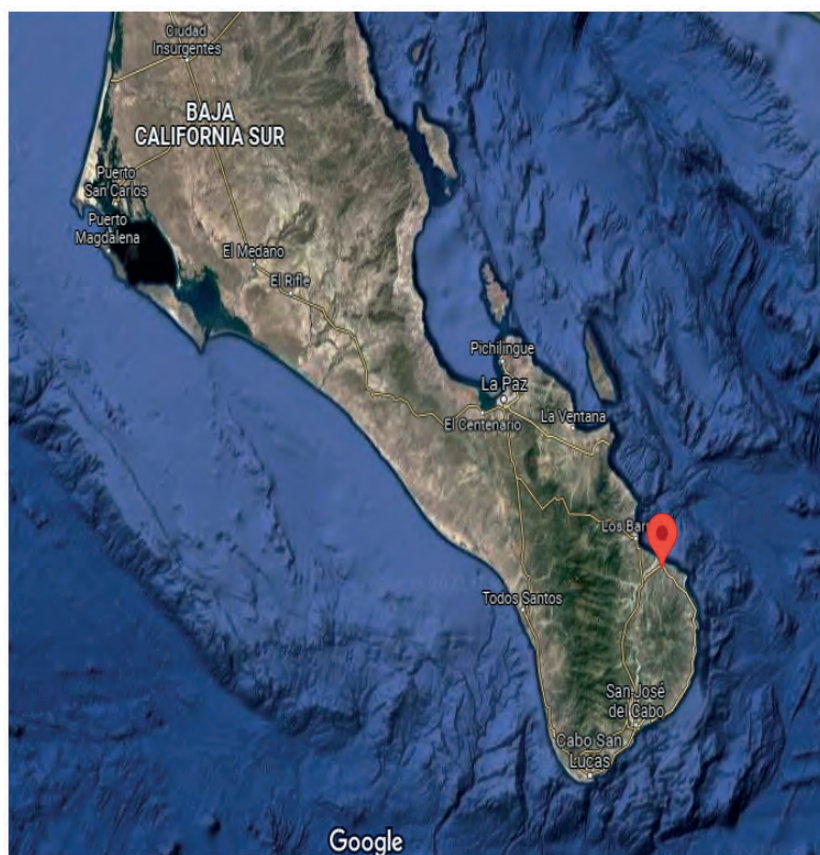


Figura4. Lugar de aislamiento de *Odontella aurita*: *La Ribera, Baja California Sur, México. (Latitud: 23.5833 Longitud: -109.583). Google Maps, 2021. maps.google.com.

9. Literatura citada

- Abalde, J., A. Cid, J. P. Fidalgo, E. Torres y C. Herrero. 1995. *Microalgas: Cultivos y Aplicaciones* (1st ed.). Universidad de Coruña, Tórculo.
- Acien Fernández, F. G., J. M. Fernández Sevilla y E. Molina Grima. 2018. *Contribución de las microalgas al desarrollo de la bioeconomía*. Mediterráneo Económico 31 (31), 309–332.
- Amine, H., Y. Benomar, A. Haimeur, H. Messaouri, N. Meskini, y M. Taouis. 2015. *Odontella aurita-enriched diet prevents high fat diet-induced liver insulin resistance*. The Journal of Endocrinology, 228(1), 1-12.
- Arredondo-Vega, B. O. y R. Vázquez-Dulhalt. 1991. *Aplicaciones biotecnológicas en el cultivo de microalgas*. Ciencia y Desarrollo, 17, 99–111.
- Bárcenas-Pérez, D., A. Cazares-Salazar, D. Valenzuela-Ruiz, L. Carreón, F. Hernández-Uribe, B. O. Arredondo-Vega. 2017. *Evaluación del rendimiento y calidad de la biomasa de la diatomea Odontella aurita cultivada en condiciones ambientales*. Memorias del VI Congreso Latinoamericano de Biotecnología Algal (CLABA), Lima, Perú. Octubre 2017, 126.
- Beppu, F., Y. Niwano, T. Tsukui, M. Hosokawa, y K. Miyashita. 2009. *Single and repeated oral dose toxicity study of fucoxanthin (FX), a marine carotenoid, in mice*. The Journal of Toxicological Sciences, 34(5), 501-510.
- Bernaerts, T. M., L. Gheysen, C. Kyomugasho, Z. J. Kermani, S. Vandionant, I. Foubert y A. M. Van Loey. 2018. *Comparison of microalgal biomass as functional food ingredients: Focus on the composition of cell wall related polysaccharides*. Algal Research, 32, 150-161.
- Bozarth, A., U. G. Maier y S. Zauner. 2009. *Diatoms in biotechnology: Modern tools and applications*. Applied Microbiology and Biotechnology, 82(2), 195–201. <https://doi.org/10.1007/s00253-008-1804-8>
- Burdock, G. A., y I. G. Carabin. 2004. *Generally recognized as safe (GRAS): History and description*. Toxicology Letters, 150(1), 3–18. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2003.07.004>
- Camacho, P. y J. Flores-Castillo. 2020. *Microalgas y sus aplicaciones biotecnológicas*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15543.14247>
- Colección de Microalgas del CIBNOR. <https://www.cibnor.gob.mx/investigacion/colecciones-biologicas/coleccion-de-microalgas>.
- Ciferri, O. 1983. *Spirulina. The Edible Microorganism*. Microbiology Review 47, 551.
- DOF (Diario Oficial de la Federación) 2012. *Acuerdo por el que se determinan los aditivos y coadyuvantes en alimentos, bebidas y suplementos alimenticios, su uso y disposiciones sanitarias*.



- http://www.salud.gob.mx/cdi/nom/compi/Acuerdo_aditivos_160712.pdf a 23 de octubre del 2021.
- Draaisma, R. B., R. H. Wijffels, P. E. Slegers, L.B. Brentner, A. Roy y M. J. Barbosa. 2013. *Food commodities from microalgae*. Current Opinion in Biotechnology, 24(2), 169-177.
- EFSA (European Food Safety Authority). 2009. *Labelling reference intake values for n-3 and n-6 polyunsaturated fatty acids*. EFSA Journal, 7(7), 1176.
- Godfray, H. C.J., J.R. Beddington, I.R. Crute, L. Haddad, D. Lawrence, J. F. Muir y C. Toulmin. 2010. *Food security: the challenge of feeding 9 billion people*. Science, 327(5967), 812-818.
- Goodnight, S.J., W.S. Harris y W.E. Connor. 1981. *The effects of dietary omega 3 fatty acids on platelet composition and function in man: a prospective, controlled study*. Blood, 58, (5), 880-885. <https://doi.org/10.1182/blood.V58.5.880.880>
- Gouveia, L., Batista, A. P., Souza, I. Raymundo, A., Bandarra, N. M. 2008. *Microalgae in novel food productivity*. In: Papadopoulos, K. N. (Eds). Food Chemistry Research Developments. Vol. 2. Nova Science Publishers, Inc. pp. 1-37.
- Guía de la Industria Química 2015. *Aditivos alimentarios: seguridad e innovación*. <https://guiaquimica.mx/articulo/26/guia-de-aditivos-alimentarios>. 23 de octubre de 2021.
- Guiry, M. D. y G. M. Guiry. 2011. *Algae Base*. En: <http://www.algaebase.org>, Julio 2021.
- Haimeur, A., V. Mimouni, L. Ulmann, A. S. Martineau, H. Messaouri, F. Pineau-Vincent, G. Tremblin y N. Meskini. 2016. *Fish Oil and Microalga Omega-3 as Dietary Supplements: A Comparative Study on Cardiovascular Risk Factors in High-Fat Fed Rats*. Lipids, 51(9), 1037–1049. <https://doi.org/10.1007/s11745-016-4177-2>
- Haimeur, A., L. Ulmann, V. Mimouni, F. Guéno, F. Pineau-Vincent, N. Meskini y G. Tremblin. 2012. *The role of Odontella aurita, a marine diatom rich in EPA, as a dietary supplement in dyslipidemia, platelet function and oxidative stress in high-fat fed rats*. Lipids in Health and Disease, 11(1), 1-13.
- Heo, S.J. y Y.J. Jeon. 2009. *Protective effect of fucoxanthin isolated from Sargassum siliquastrum on UV-B induced cell damage*. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 95(2), 101-107.
- Heo, S.J., S. C. Ko, S. M. Kang, H. S. Kang, J. P. Kim, S. H. Kim y Y.J. Jeon. 2008. *Cytoprotective effect of fucoxanthin isolated from brown algae Sargassum siliquastrum against H₂O₂-induced cell damage*. Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und-Forschung. European Food Research and Technology, 228, 145-151.
- Hernández-Pérez, A. y J. I. Labbé. 2014. *Microalgas, cultivo y beneficios*. Revista de Biología Marina y Oceanografía, 49(2), 157-173.

- Hernández-Urbe, F. 2016. *Efecto de la deficiencia de nitrógeno y la radiación UV en la actividad fotosintética y en los compuestos antioxidantes de las cianobacterias Spirulina (Arthrospira) maxima y Phormidium persicinum*. Tesis de grado de Maestro en Ciencias. Programa de Posgrado del CIBNOR. 241 págs.
- Illana, C., y M. N. Blanco. 2008. *Usos industriales de las algas diatomeas*. Quercus, 267(3), 32–37.
- Judé, S., S. Roger, E. Martel, P. Besson, S. Richard, P. Bougnoux, P y J. Y. Le Guennec. 2006. *Dietary long-chain omega-3 fatty acids of marine origin: a comparison of their protective effects on coronary heart disease and breast cancers*. Progress in Biophysics and Molecular Biology, 90(1-3), 299-325.
- Lattimer, J. M., y M. D. Haub. 2010. *Effects of dietary fiber and its components on metabolic health*. Nutrients, 2(12), 1266-1289.
- Lee, R. E. 2008. *Phycology* (4th ed). Cambrige University Press. London, United Kingdom, pp 561.
- Lora-Vilchis, M., F. López-Fuertes y C. Pérez-Rojas. 2020. *Algas de cristal; diatomeas*. Recursos Naturales y Sociedad, 6(1), 25–42.
<https://doi.org/https://doi.org/10.18846/renaysoc.2020.06.06.01.0003>
- Luna, L. M. G. (2007). *Microalgas: Aspectos ecológicos y biotecnológicos*. Revista Cubana de Química, 19(2), 3-20.
- Martínez-Angulo, L. y Ramírez-Mérida L. 2017. *Estado actual de las empresas productoras de microalgas destinadas a alimentos y suplementos alimenticios en América Latina*. Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos, 8(2), 130-147.
- Masojídeck, J., J. Kopecký, L. Giannelli y G. Torzillo. 2011. *Productivity correlated to photobiochemical performance of Chlorella mass cultures grown outdoors in thin-layer cascades*. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, 38(2), 307-317.
- Mimouni, V., L. Ulmann, A. Haimeur, F. Guéno, N. Meskini y G. Tremblin. 2015. *Marine microalgae used as food supplements and their implication in preventing Cardiovascular Diseases*. Oilseeds and Fats Crops and Lipids, 22(4), D409.
- Mishra, M., A. P. Arukha, T. Bashir, D. Yadav y G. B. K. S. Prasad. 2017. *All new faces of diatoms: Potential source of nanomaterials and beyond*. Frontiers in Microbiology, 8(JUL), 1–8. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01239>
- Monroy, O. 2021. *Problemática de las aguas residuales*. Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal. 12(2), 40-44.
- Moreau, D., C. Tomasoni, C. Jacquot, R. Kaas, R. Le Guedes, J. P. Cadoret y C. Roussakis. 2006. *Cultivated microalgae and the carotenoid fucoxanthin from Odontella aurita as potent anti-proliferative*



- agents in bronchopulmonary and epithelial cell lines*. Environmental Toxicology and Pharmacology, 22(1), 97-103.
- Moreno, J. L., S. Licea y H. Santoyo. 1996. *Diatomeas del Golfo de California*. Universidad Autónoma de Baja California Sur. La Paz, Baja California Sur, México. 272 pág.
- Nazmi, A., R. Hauck, A. Davis, M. Hildebrand, L. B. Corbeil y R. A. Gallardo. 2017. *Immunology, health, and disease: Diatoms and diatomaceous earth as novel poultry vaccine adjuvants*. Poultry Science, 96(2), 288–294. <https://doi.org/10.3382/ps/pew250>
- Nomura, T., M. Kikuchi, A. Kubodera y Y. Kawakami. 1997. *Proton-donative antioxidant activity of fucoxanthin with 1, 1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH)*. Biochemistry and Molecular Biology International, 42(2), 361-370.
- OBIS (The Ocean Biogeographic Information System) 2011. *A global open-access system in where EOL hosts source databases*. <https://opendata.eol.org/es/dataset/obis>
- Odontella 2021. Bienvenida. <https://www.odontella.com/fr/odontella-accueil/>, 22 de Octubre de 2021.
- Olguín-Palacios, E. J. 2012. *Dual purpose microalgae–bacteria-based systems that treat wastewater and produce biodiesel and chemical products within a biorefinery*. Biotechnology Advances. 30, 1031-1046.
- Olguín-Palacios, E. J. y R. González-Portela, R. 2021. *Microalgae-Based Biorefineries Integrating Phytoremediation and Wastewater Treatment*. Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal. 12(2), 40-44.
- OMS (Organización Mundial de la Salud) 2021. Mal Nutrición, <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/malnutrition> , 22 de Octubre de 2021.
- Otero, A. 2017. *Biotecnología de microalgas: un campo en expansión*. Sem@Foro, 64(1), 40–41.
- Peng, J., J. P. Yuan, C. F. Wu y J. H. Wang. 2011. *Fucoxanthin, a marine carotenoid present in brown seaweeds and diatoms: metabolism and bioactivities relevant to human health*. Marine Drugs, 9(10), 1806-1828.
- Petermann, F., Leiva, A., Martínez, M. A., Durán, E., Labraña, A. M., Garrido-Méndez, A., y Celis-Morales, C. 2018. *Consumo de carnes rojas y su asociación con mortalidad*. Revista Chilena de Nutrición, 45(3), 293-295.
- Pulz, O. y W. Gross. 2004. *Valuable products from biotechnology of microalgae*. Applied Microbiology and Biotechnology, 65(6), 635–648. <https://doi.org/10.1007/s00253-004-1647-x>

- Sachindra, N. M., E. Sato, H. Maeda, M. Hosokawa, Y. Niwano, M. Kohno y K. Miyashita. 2007. *Radical scavenging and singlet oxygen quenching activity of marine carotenoid fucoxanthin and its metabolites*. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 55(21), 8516-8522.
- Sahoo, D. y J. Seckbach, J. 2015. *The Algae World, Cellular Origin, Life in Extreme Habitats and Astrobiology*, Vol. 26. Springer. New York, USA. p 51.
- Suarez-Diéguez, T., E. González- Escalante, Y. Reséndiz-Martínez y D. Sánchez-Martínez. 2014. *La importancia de los aditivos alimentarios en los alimentos industrializados*. Educación y Salud Boletín Científico de Ciencias de La Salud Del ICSa, 2(4). <https://doi.org/10.29057/icsa.v2i4.752>.
- Tredici, M. R. 2010. *Photobiology of microalgae mass cultures: understanding the tools for the next green revolution*. Biofuels, 1(1), 143-162.
- Valenzuela, A., J. Sanhueza y R. Valenzuela. 2015. *Las microalgas: Una fuente renovable para la obtención de ácidos grasos omega-3 de cadena larga para la nutrición humana y animal*. Revista Chilena de Nutrición, 42(3), 306-310. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182015000300013>
- Vanegas, J., R. E. y Hernández-Benítez. 2018. *Potencial biotecnológico de microalgas en zonas áridas* (1st ed.). SERVICIO NACIONAL DE APRENDIZAJE - SENA Bogotá.
- Vásquez-Suárez, A., M. Guevara, M. González, N. Lemus y B. O. Arredondo-Vega. 2010. *Crecimiento y composición bioquímica de Skeletonema costatum (Greville, 1866) Cleve, 1878 (Heterokontophyta: Bacillariophyceae) en función de la irradiancia y del medio de cultivo*. SABER. Revista Multidisciplinaria Del Consejo de Investigación de La Universidad de Oriente, 22(2), 149–159.
- Vegayvege 2021. Noticias. *El mercado vegano europeo creció un 49% en 2 años, según nuevo informe*. <https://vegayvege.com/mundo/el-mercado-vegano-europeo-crecio-un-49-en-2-anos-segun-nuevo-informe/> 23 de octubre del 2021.
- Wijffels, R. H., M. J. Barbosa y M. H. Eppink. 2010. *Microalgae for the production of bulk chemicals and biofuels*. Biofuels, Bioproducts and Biorefining: Innovation for a Sustainable Economy, 4(3), 287-295.
- Williams, G. M., T. Kobets, M. J. Iatropoulos, J. D. Duan y K. D. Brunnemann. 2016. *GRAS determination scientific procedures and possible alternatives*. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 79, S105–S111. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2016.06.015>
- Woo, M. N., S. M. Jeon, H. J. Kim, M. K. Lee, S. K. Shin, Y. C. Shin y M. S. Choi. 2010. *Fucoxanthin supplementation improves plasma and hepatic lipid metabolism and blood glucose concentration in high-fat fed C57BL/6N mice*. Chemico-Biological Interactions, 186(3), 316-322.



- Woo, M. N., S. M. Jeon, Y. C. Shin, M. K. Lee, M. A. Kang y M. S. Choi. 2009. *Anti-obese property of fucoxanthin is partly mediated by altering lipid-regulating enzymes and uncoupling proteins of visceral adipose tissue in mice*. Molecular Nutrition and Food Research, 53(12), 1603-1611.
- Xia, S., K. Wang, L. Wan, A. Li, Q. Hu y C. Zhang. 2013. *Production, characterization, and antioxidant activity of fucoxanthin from the marine diatom Odontella aurita*. Marine Drugs, 11(7), 2667-2681.

CITA DE ARTICULO:

Sánchez Angulo L., K. S. Trejo Berumen y B. O. Arredondo Vega. 2022. Importancia nutricional de la diatomea *Odontella aurita* para su aprobación como suplemento generalmente reconocido como alimento seguro (GRAS) en México. Recursos Naturales y Sociedad, 2022. Vol. 8 (1): 15-38. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2022.08.08.01.0002>

Sometido: 13 de septiembre de 2021

Revisado: 11 de octubre de 2021

Aceptado: 18 de diciembre de 2021

Editor asociado: Dr. José Bustillos Guzmán

Diseño gráfico editorial: Lic. Gerardo Hernández

Fotos: pexels-luan-rezende-1093161.jpg, pexels-pixabay-208518 y 461428 en .jpg, pexels-ron-lach-8131589.jpg, CIBNOR- Programa de Acuicultura, QFB Marte Virgen Félix