E.1.1.2. Evaluación preliminar del sector de macroalgas en Galicia y Portugal

Alternativa integral para la explotación de macroalgas en la zona del Galicia y Portugal

ALGALUP

0558_ALGALUP_6_E

Marzo 2020

1. INTRODUCCIÓN 4
2. GENERALIDADES 5
2.1. ANATOMÍA Y MORFOLOGÍA 5
2.2. CLASIFICACIÓN DE LAS MACROALGAS 7
2.2.1. Algas rojas (Phylum Rhodophyta) 7
2.2.2. Algas pardas (Clase Phaeophyceae) 8
2.2.3. Algas verdes (phylum Chlorophyta) 10
2.3. REPRODUCCIÓN Y CICLOS VITALES 11
2.4. PRODUCCIÓN 16
2.4.1. Producción mundial 16
2.4.2. Producción europea 18
2.4.3. Producción nacional 19
2.4.4. Producción por tipo de explotación 20
3. EXPLOTACIÓN 21
3.1. ESPECIES DE INTERÉS 21
3.1.1. Algas rojas 21
3.1.2. Algas pardas (Clase Phaeophyceae) 38
3.1.3. Algas verdes 53
3.2. TIPOS DE EXPLOTACIÓN 60
3.2.1. Recolección del medio natural 60
3.2.2. Cultivo industrial 62
3.3. NUEVAS TECNOLOGÍAS DE CULTIVO 67
3.3.1. Etapas del cultivo realizadas en instalaciones terrestres 67
3.3.2. Cultivo realizado en el mar "outdoor" 70
3.3.3. Sistemas de Acuicultura Multitrófica Integrada (IMTA) 72
3.4. SITUACIÓN ACTUAL DE LA EXPLOTACIÓN 73
3.4.1. España y Galicia 73
3.4.2. Portugal 78
4. COMPOSICIÓN Y UTILIZACIÓN 81
4.1. COMPOSICIÓN NUTRICIONAL Y BIOQUÍMICA DE LAS ALGAS 82
4.1.1. Composición nutricional 82
4.1.2. Bioactividad 83
4.2. USO Y CAMPOS DE INTERÉS 91
4.2.1. Usos tradicionales 92

4.2.2. Alimentación humana 93
4.2.3. Sector de la salud humana 94
4.2.4. Sector alimentación animal y acuicultura 105
5. GLOSARIO 107
6. BIBLIOGRAFÍA 110

1. INTRODUCCIÓN

Alternativa integral para la explotación de macroalgas en la zona del Galicia y Portugal (ALGALUP) es un proyecto transfronterizo que apoya el crecimiento inteligente a través de una cooperación transfronteriza para el impulso de la Innovación en el sector de las macroalgas. El proyecto ALGALUP pretende desarrollar una alternativa integral para promover la investigación y la innovación en el sector de la explotación de las macroalgas en la zona de Galicia y Portugal fomentado la interconexión entre centros tecnológicos y universidades especializadas del sector con la finalidad de mejorar el conocimiento sobre las especies de interés, la adaptabilidad de los procesos productivos a las condiciones específicas en la zona. Además, el proyecto intentará impulsar nuevas iniciativas para el aprovechamiento óptimo de la biomasa con la aplicación de derivados y compuestos bioactivos extraídos de las algas en sectores de interés estratégico.

La meta final del proyecto es aumentar el conocimiento de los usuarios finales, investigadores e inversores sobre las oportunidades que genera el sector de explotación de macroalgas. Implementar un sistema de explotación sostenible de los bancos naturales de macroalgas y fomentar la investigación en las diferentes etapas de cultivo de especies de interés. Desarrollar nuevas alternativas de aprovechamiento de los compuestos, extractos y bioactivos contenidos en las macroalgas. Fomentar la transferencia de los resultados obtenidos al tejido industrial de los sectores de interés.

En su primera actividad “A1. Evaluación preliminar del sector de macroalgas en Galicia y Portugal”, se pretende el desarrollo de una recopilación bibliográfica sobre los recursos naturales y especies de cultivo de interés, los sistemas de cultivos actuales y posibilidades de mejora además de los usos y valores añadido de las macroalgas. El objetivo de este documento es la realización de una revisión actualizada del estado del arte de la explotación de las macroalgas en la zona y análisis de las oportunidades que ofrece el sector.

2. GENERALIDADES

Alga es un término muy amplio y poco definido que comprende una gran variedad de organismos eucariotas, tanto unicelulares como pluricelulares, que presentan clorofila a y otros pigmentos complementarios y tienen la capacidad de realizar la fotosíntesis oxigénica (Tasende y Peteiro 2015). Las macroalgas son un grupo diverso de organismos eucariotas fotosintéticos pluricelulares, con un ciclo vital ligado al medio acuático, aunque predominantemente marinos, que se encuentran desde la superficie del agua o la zona intermareal hasta los 300 m de profundidad (Bajewa et al., 2016; APROMAR, 2014).

Se trata en general de un grupo muy diverso en cuanto a morfología, hábitat, ecología y ciclos biológicos que presenta un gran interés ecológico, ya que, además de ser productores primarios muy importantes, ejercen un gran papel en la formación y funcionamiento de los ecosistemas marinos proporcionando una serie de servicios esenciales como el reciclaje de nutrientes o la conversión de CO_2 en O_2, y funcionando como alimento y hábitat para otros organismos. Además, son también un recurso económico natural que el hombre ha utilizado desde tiempos inmemorables con una gran variedad de fines, tales como: alimentación humana, industria agropecuaria, materias primas para usos industriales, fármacos o cosméticos, etc. (Tasende y Peteiro 2015).

2.1. ANATOMÍA Y MORFOLOGÍA

El organismo o "cuerpo" de un alga se denomina talo y las algas, junto con los hongos, se denominan de forma genérica talófitos. Las células de las algas no están diferenciadas como en las plantas superiores, sino que todas ellas realizan funciones muy similares y no forman verdaderos tejidos, a excepción de algunas algas pardas. Como consecuencia, las algas poseen una anatomía y una morfología simples. Las plantas superiores, que cuentan con una gran especialización de tipos celulares, verdaderos tejidos y diferentes órganos que realizan funciones fisiológicas específicas, se denominan cormófitos.

El talo puede presentar distintos niveles de organización en cuanto a su complejidad:

- Consorcios de agregación o cenobios. Son individuos pluricelulares que se forman por la unión de individuos unicelulares inicialmente libres. Un ejemplo es el género *Pediastrum*.
- Colonias celulares. Las colonias celulares se originan a partir de la división de una célula inicial. Las células resultantes de la división no están totalmente

separadas, sino que permanecen unidas por puentes citoplasmáticos. En muchos casos (ej. *Volvox*) la colonia presenta una diferenciación funcional entre el polo anterior y el posterior y entre células somáticas y reproductivas, que son las únicas que se dividen para dar lugar a nuevas colonias.

- Talos sifonados. Tienen una morfología filamentosa y están unidos al sustrato por un elemento de fijación. No presenta divisiones intercelulares, sino que existe una única masa citoplasmática con numerosos núcleos.
- Talos filamentosos. Son talos con verdaderas divisiones entre células, aunque la separación puede no ser total. Existe una diferenciación polar entre los dos extremos del filamento, de forma que uno de ellos se fija al sustrato. El crecimiento puede producirse por división de la célula apical del otro extremo del filamento o por división de las células intermedias. Si el plano de división celular es perpendicular al eje del filamento, el filamento crecerá simplemente en longitud, pero si la división se produce de forma paralela al eje se formarán ramificaciones. En algunos casos, los filamentos principales y sus ramificaciones permanecen unidos, formando láminas o estructuras ramificadas macroscópicas. Este tipo de talos son característicos de algas rojas y muchas algas verdes.
- Este tipo de estructura se denomina también pseudoparénquima, es decir, es similar a un tejido pero carente de varias de las características de un verdadero tejido.
- Talos parenquimáticos. Estos talos presentan verdaderos tejidos en los que las células responsables del crecimiento se dividen en varios planos y las células resultantes permanecen unidas. Son característicos de algunas algas pardas, que presentan los niveles más elevados de organización anatómica.

En cuanto a la denominación de las distintas partes del talo, se emplean términos que establecen paralelismos con la anatomía de las plantas superiores:

- El elemento de fijación al sustrato se denomina disco basal o rizoide, según su forma sea discoidal o similar a la de una raíz. Pero hay que tener en cuenta que su función se limita a la fijación del individuo a una superficie; no está especializado en la absorción de agua y nutrientes como en una planta superior, ya que estas funciones tienen lugar a través de toda la superficie del alga.
- El fronde es la parte superior del talo, que puede presentar diversas morfologías como se ha indicado anteriormente: laminar, filamentosa, cilíndrica, ramificada o simple, etc. El fronde puede presentar diferentes proliferaciones como rámulas, ganchos, vesículas aeríferas, etc.
- El estipe es la zona de unión entre el disco basal o rizoide y el fronde, se asimila al tallo o tronco en una planta superior.

2.2. CLASIFICACIÓN DE LAS MACROALGAS

Hasta la fecha se han descrito unas 10.000 especies de macroalgas. Debe tenerse en cuenta que el término macroalga es una definición genérica que engloba a una gran cantidad de organismos que no guardan necesariamente relaciones filogenéticas estrechas entre sí, sino que se agrupan en base a que comparten determinadas características morfológicas y ecológicas. Por otra parte, la taxonomía y la clasificación de las macroalgas está en continua revisión; en este documento se hace referencia a las propuestas más recientes. La composición de pigmentos fotosintéticos, las sustancias de reserva, los componentes de la pared celular o la construcción y orientación de los flagelos, entre otros, son criterios taxonómicos aplicados en la clasificación de las algas. Basándose en estos criterios las macroalgas se dividen taxonómicamente en 3 grandes grupos (Gervasoni y Ritter 2012; APROMAR 2014; Machado Moreno, 2015) que han evolucionado durante los últimos 600–900 millones de años ocupando una variedad de nichos ecológicos (Bajewa et al., 2016).

2.2.1. Algas rojas (Phylum Rhodophyta)

El phylum Rhodophyta comprende unas 7.000 especies, de las cuales un 95 % son marinas. La mayoría, unas 6.800, son pluricelulares, desde formas filamentosas o laminares hasta talos complejos (Graham et al., 2009; AlgaeBase, 2020). Existe mayor diversidad y abundancia de rodófitas en aguas tropicales y templadas que en aguas frías. Se encuentran desde la zona intermareal hasta profundidades de 200 m, gracias a sus pigmentos que pueden captar la luz azul, que es la que penetra más profundamente en el agua (Lee, 2008). El régimen de luz, que incluye cambios en intensidad, calidad y fotoperíodo, es uno de los factores clave que afectan la distribución y la estacionalidad de las rodófitas (Sheath y Hambrook, 1990). Por estas necesidades específicas a menudo abundan en hábitats muy sombreados o profundos (Dodds y Whiles, 2020). Normalmente presentan un modo de vida bentónico, aunque se conocen también especies parásitas y epífitas.

Las células de las rodófitas presentan una pared formada internamente por un entramado de celulosa y de forma externa por sustancias pécticas y gelosas (agar, carragenatos y furcellarina) que unen y compactan las células del talo. Estas últimas, conocidas como ficocoloides, tienen un gran papel en la industria. Además, algunas especies o grupos, presentan depósitos de carbonato cálcico en la capa externa en forma de calcita (romboidal) o de aragonito (ortorrómbico), lo que les confiere una gran dureza y aspecto pétreo. Una de las características más distintivas del grupo es la carencia de flagelos (incluso en gametos), y la presencia de punteaduras (sinapsis), que

conectan las células para el transporte de metabolitos, haciendo que el protoplasma (interior celular) sea un continuo en todo el individuo (Sheath y Wehr, 2015).

En cuanto a las células, pueden ser uni o multinucleadas, con uno o varios plastos discoidales o en forma de estrella, con tilacoides desagrupados. Además de la clorofila a, las algas rojas contienen también clorofila d, a y ß-carotenos, xantofilas y ficobiliproteinas (ficoeritrina y ficocianina), que se localizan en los ficobilisomas, complejos proteicos situados en la superficie exterior del tilacoide. La presencia de ficoeritrina y ficocianina proporciona las tonalidades rojizas características de estas algas, siendo pigmentos de ficobilina similares a los encontrados en las cianobacterias que permiten que las algas rojas usen longitudes de onda de luz azul-verde (Dodds and Whiles, 2020). Las características estructurales del cloroplasto de las algas rojas incluyen además de ficobilisomas, plastoglóbulos, genóforos, ribosomas y pirenoides en algunas especies.

Como productos de reserva, las rodófitas acumulan almidón de florídeas o rodamilo en gránulos citoplasmáticos en el exterior del cloroplasto. También sintetizan compuestos galactoglicéricos (floridósidos) y en el estroma del cloroplasto, se observan gotas densas en electrones (plastoglóbulos) entre los tilacoides. Estas estructuras se interpretan como material lipídico (Bouzon et al., 2014).

2.2.2. Algas pardas (Clase Phaeophyceae)

Las denominadas algas pardas se incluyen en el phylum Ochrophyta. Este phylum forma parte a su vez del subreino Heterokonta, un taxón que agrupa a organismos unicelulares y pluricelulares, fotosintéticos y heterotróficos, que comparten como rasgo común una fase del ciclo vital en la que las células presentan dos flagelos de forma diferente al menos en alguna fase del ciclo vital. Se estima que su aparición ocurrió hace 1.000 millones de años (Brown y Sorhannus, 2010). La clase Phaeophyceae presenta dos rasgos distintivos principales: todos los miembros de este grupo son pluricelulares, y sus cloroplastos contienen elevadas cantidades de fucoxantina, pigmento que les confiere sus colores característicos, en la gama que va del verde oliva al marrón.

Se trata de un grupo formado por más de 2.000 especies mayoritariamente marinas, aunque también son frecuentes en aguas salobres, predominantemente en las zonas infralitoral e intermareal, incluyendo su franja superior, un ambiente hostil y cambiante donde los organismos están sujetos a restricciones marinas y terrestres. Aunque todas son multicelulares, los tamaños son muy variables, desde diminutas hasta grandes talos de 60 m. Las especies más primitivas presentan talos sencillos filamentosos, mientras que las más complejas llegan a tener estructuras densas similares a las de las plantas vasculares o estructuras parenquimatosas con divisiones celulares en varios planos. Muchas son perennes y algunas pueden llegar a vivir incluso 15 años (Graham et al., 2009). La pared celular de las algas pardas es de dos capas. La capa interna está

compuesta de microfibrillas de celulosa, que aportan la función estructural (Kloareg and Quatrano, 1988), y una fracción amorfa de ácido algínico y fucoidina. La capa externa es mucilaginosa y pegajosa debido a la presencia de alginato (Evans and Holligan, 1972; Vreeland, 1972). No presentan sinapsis, pero sus células se unen mediante plasmodesmos o poros, lo que también les permite tener una buena comunicación citoplasmática a lo largo de las diferentes células (Graham et al., 2009).

La célula es uninucleada con uno o dos nucleolos. Los núcleos de las Phaeophyceae son generalmente grandes y poseen un nucleolo grande y fácilmente teñido con una red delicada que tiene poco material cromático. Las células fotosintéticas en la mayoría de las algas pardas contienen numerosos cromatóforos discoides pequeños y parietales, adosados a la cara interna de la pared celular. Muestran movimiento a los cambios en la intensidad y dirección de la iluminación (Dhargalkar y Kavlekar, 2004). Los cloroplastos presentan tilacoides agrupados de tres en tres y están rodeados por una doble membrana del retículo endoplasmático. El pirenoide no está siempre presente, pero cuando aparece se proyecta fuera del cloroplasto y está unido a él mediante un pedúnculo. En cuanto a pigmentación, además de la clorofila a, presentan clorofilas c_1 y c_2. La mayoría de las algas pardas son además ricas en carotenoides. El carotenoide mayoritario es la fucoxantina, que enmascara al resto de pigmentos y es la que les confiere el color característico. Otros carotenoides importantes son el ß-caroteno y la violaxantina. Géneros como *Dictyota*, *Ectocarpus* o *Laminaria*, son especies ricas en fucoxantina, mientras que las especies de *Fucus* son pobres en fucoxantina. Las algas ricas en fucoxantina exhiben una tasa de fotosíntesis mucho más alta en luz azul que las algas con escasa fucoxantina.

En las Phaeophyceae, las esporas y los gametos son las células flageladas, dotadas de dos flagelos laterales, uno anterior, más corto, y uno posterior con función motora o de fijación al sustrato.

Como sustancia de reserva, este grupo acumula principalmente laminarina (polímero de glucanos), ácidos grasos saturados, aceites y manitol, usado para la supervivencia en climas fríos y la regulación de la presión osmótica. Además, algunas especies pueden acumular también taninos y terpenos que presentan una función protectora (Graham et al., 2009).

También muestran una gran plasticidad morfológica, respondiendo a restricciones ambientales específicas, como las corrientes marinas, la disponibilidad reducida de luz, los ataques de ramoneadores, la desecación y la exposición a los rayos UV (Charrier et al., 2012).

2.2.3. Algas verdes (phylum Chlorophyta)

Grupo muy amplio, formado por más de 8.000 especies distribuidas tanto en aguas continentales como en marinas, siendo más abundantes las especies continentales (casi un 90%). Su morfología es variable, desde especies unicelulares hasta pluricelulares (Graham et al., 2009). Sus talos varían de filamentos libres a formas definidas. La porción fotosintética de los talos puede aparecer de forma moderada a altamente calcificada en diversas formas como segmentos en forma de abanico, ramas en forma de pluma o en forma de estrella con dientes o pínulas y ramificaciones claviformes o globosas (Dhargalkar y Kavlekar, 2004). La diversidad se hace latente también en la cantidad de plastos, ya que puede haber desde uno a varios con morfologías y posiciones variadas.

Las células presentan una pared celular compuesta por celulosa y en ciertos grupos también glucoproteínas, pudiendo contener también mananos y xilanos o depósitos de compuestos pécticos o calcáreos. Tanto las células vegetativas de organismos unicelulares, como las reproductoras en los pluricelulares, presentan 2 flagelos isocontos (iguales) acronemáticos. Además, en ellas se suele presentar también un fotorreceptor, la conocida como mancha ocular. El cloroplasto está rodeado solamente de una doble envoltura originada en el cloroplasto y no por una envoltura adicional con origen en el retículo endoplásmatico, como en muchos otros grupos de algas. Los tilacoides forman lamelas en número de 2-6 o más; pseudograna (cúmulos de tilacoides sobrepuestos parcialmente) o grana verdaderos. Sin embargo, no dan lugar a lamelas circundantes.

Además de clorofila a, presentan también clorofila b asociada a proteínas, ß-caroteno, luteína y sifonoxantina. Como producto de reserva acumulan almidón en el interior del cloroplasto.

En cuanto a las formas pluricelulares, destaca la clase Ulvophyceae, que comprende más de 1.100 especies mayormente marinas, con una morfología muy variada, desde unas pocas formas unicelulares no flageladas hasta filamentos y láminas, pudiendo incluso encontrar talos de gran tamaño constituidos por una sola célula multinucleada (Graham et al., 2009).

2.3. REPRODUCCIÓN Y CICLOS VITALES

Los procesos reproductivos son un aspecto particularmente complejo de la biología de las algas, y aunque pueden clasificarse en varios tipos, muchas especies presentan particularidades.

Las algas se reproducen por vía asexual y sexual. Ambos procesos no son excluyentes, y pueden darse en una misma especie en función de las condiciones del medio, o en distintos momentos de su ciclo vital.

La reproducción asexual es un modo de generar nuevos individuos a partir de una célula o de grupos de células procedentes del original, sin combinar su material genético con el de otro individuo (Coelho et al., 2011a; Bowman et al., 2016; Horst and Reski, 2016). Las formas de reproducción asexual son muy variadas en las algas. Por ejemplo, los organismos unicelulares pueden dividirse en dos (bipartición celular) o en más células (pluripartición) que se liberan al romperse la pared de la célula madre. En las algas pluricelulares, puede tener lugar la propagación o multiplicación vegetativa, a partir de fragmentos que se desprenden de la planta original por rotura (ej. *Sargassum* sp.), o mediante propágulos, que son estructuras más especializadas que una vez desarrolladas se desprenden de la planta madre para dar lugar a nuevos individuos (ej. *Sphacelaria*).

La reproducción por esporas es otro tipo de reproducción asexual. Las esporas son células especializadas para la dispersión y la propagación, capaces de germinar dando nuevos individuos. Las esporas se forman mediante la división de una célula madre por mitosis (mitosporas) o por meiosis (meiosporas). En el primer caso, al germinar la espora dará lugar a un individuo diploide (2n), mientras que la meiospora dará lugar a un individuo haploide (n). La estructura que contiene las esporas, ya sea unicelular o pluricelular, se denomina genéricamente esporangio, aunque en muchas especies recibe nombres particulares. El individuo productor de esporas se denomina genéricamente esporófito, y puede ser haploide o diploide.

La reproducción sexual implica la unión de dos gametos para formar un cigoto (diploide, 2n) que se dividirá y crecerá hasta dar lugar a una nueva alga diploide. El individuo productor de gametos se denomina gametófito y puede ser haploide o diploide. En las algas encontramos diferentes tipos de reproducción sexual, los cuales se clasifican según el tipo de fecundación y la morfología de los gametos implicados: isogamia (gametos iguales), anisogamia (gameto femenino de mayor tamaño), oogamia (el gameto femenino es grande e inmóvil y el masculino pequeño y móvil) y tricogamia (el gameto femenino es inmóvil y permanece en el interior de una estructura tubular, la tricógina, a través de la que penetra el gameto masculino móvil). Las dos primeras, isogamia y anisogamia, son comunes en multitud de especies, mientras que la oogamia es característica de las algas pardas y la tricogamia de las algas rojas.

La mayoría de las algas presentan ciclos biológicos con alternancia de generaciones. Una generación es una etapa de desarrollo que comienza con una célula reproductora (espora) o fecundación (cigoto). Dicha célula da lugar a un nuevo individuo que se mantiene en el tiempo con actividad vegetativa y termina a su vez produciendo nuevas células reproductoras. Según el tipo de células producidas las generaciones pueden ser gametofíticas (producen gametos) o esporofíticas (producen esporas). La alternancia de generaciones implica que los gametófitos dan lugar a esporófitos a través de la fecundación y la formación del cigoto y viceversa, que los esporófitos generan gametófitos a través de la producción y la germinación de las esporas. La alternancia de generaciones está ligada por tanto una alternancia de fases nucleares, haploides y diploides, si presentan una cantidad de cromosomas n o 2n respectivamente. En numerosas ocasiones, la alternancia de generaciones implica también una alternancia morfológica, ya que el gametófito y el esporófito tienen aspectos diferentes, aunque esto no ocurre en todos los casos.

En función del número de generaciones, los ciclos biológicos pueden ser monogenéticos, digenéticos o trigenéticos, según presenten una, dos o tres generaciones respectivamente. Si los individuos son todos haploides, el ciclo será haplofásico; si los individuos son exclusivamente diploides, será un ciclo diplofásico, y si el ciclo alterna generaciones haploides y diploides, se denomina ciclo haplodiplofásico. Además, en función de la morfología de los individuos de cada generación los ciclos se clasifican en isomórficos, si tienen el mismo aspecto, y heteromórficos si presentan morfologías diferentes (Des Abbayes et al., 1989; Graham et al., 2009).

En los ciclos monogenéticos existe una sola generación que puede ser haploide, en la que el cigoto es la única célula diploide. En este caso, la primera división del cigoto es meiótica, con lo que se desarrolla un nuevo individuo haploide (Figura 1). Alternativamente, puede tratarse de un ciclo monogenético diplofásico, en el que la meiosis ocurre durante la gametogénesis y los gametos son las únicas células haploides. Tras la fecundación, el cigoto dará lugar a un nuevo individuo diploide (Figura 2). En ambos casos, solamente existen gametófitos. El primer caso se da por ejemplo en *Monostroma*, mientras que el segundo es el ciclo típico de *Hizikia* (Des Abbayes et al., 1989).

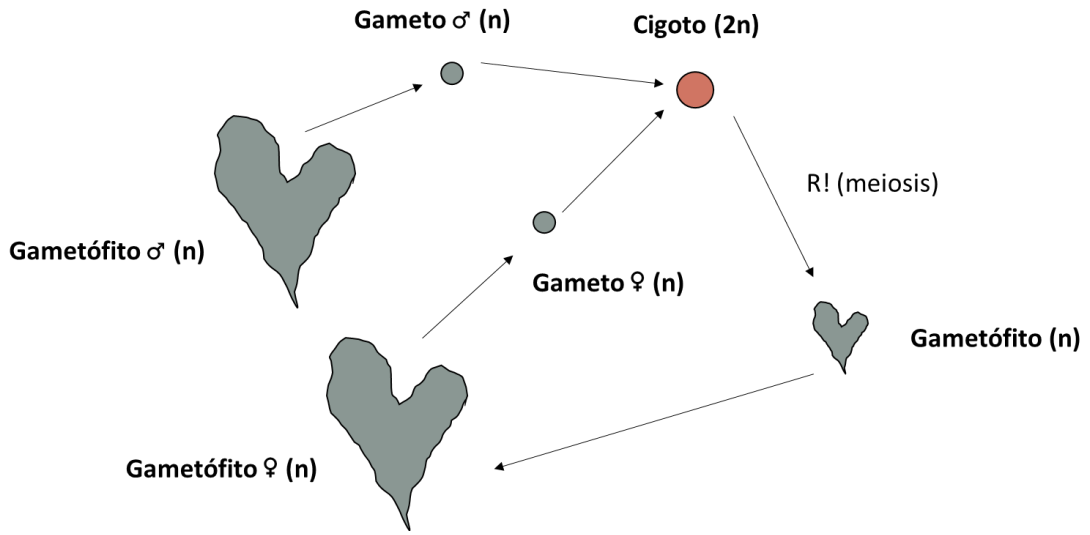

Figura 1. Esquema de un ciclo monogenético haplofásico.

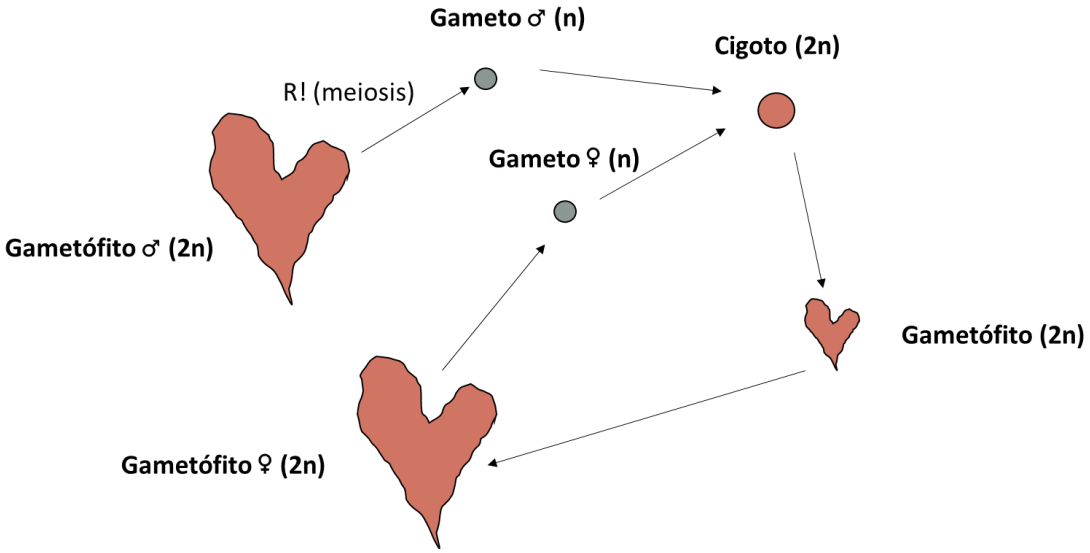

Figura 2. Esquema de un ciclo monogenético diplofásico.

En los ciclos digenéticos existen siempre dos generaciones: la gametofítica, haploide, y la esporofítica, diploide. Los gametófitos generan sus gametos haploides mediante mitosis, y tras la fecundación se origina un cigoto diploide que dará lugar a la generación esporofítica, la cual produce esporas haploides mediante meiosis, que al desarrollarse

darán lugar a un nuevo gametófito (Figura 3). En este caso, ambas generaciones pueden ser similares morfológicamente (ciclo isomórfico), como sucede en *Ulva*, o muy diferentes (ciclo heteromórfico), en el que puede darse que el gametófito sea macroscópico y el esporófito microscópico, como sucede por ejemplo en *Porphyra*, o que sea al revés, como sucede en *Laminaria, Undaria* o *Macrocystis*.

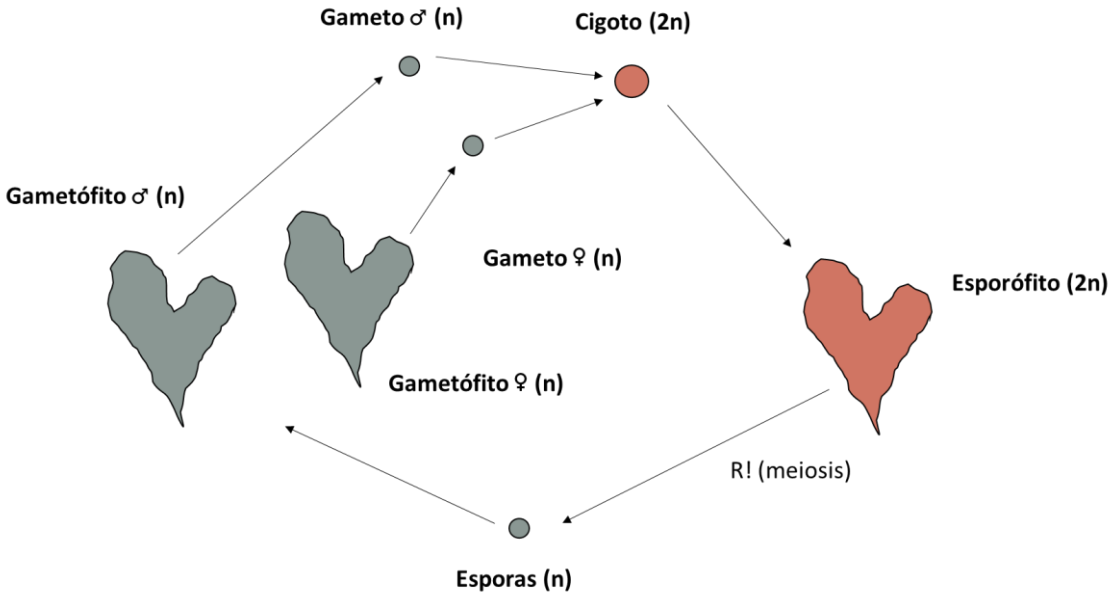

Figura 3. Esquema de un ciclo digenético. Al alternarse generaciones n y 2n, se denomina ciclo haplodiplofásico.

Por último, en los ciclos trigenéticos, al igual que en los anteriores, existe una generación gametofítica haploide y una esporofítica diploide. En este tipo de ciclos, la fecundación del gameto femenino se produce sobre el gametófito. El cigoto da lugar a una nueva estructura diploide, el carposporófito, que constituye la tercera generación. El carposporófito produce esporas diploides que al liberarse darán lugar a nuevos

esporófitos (

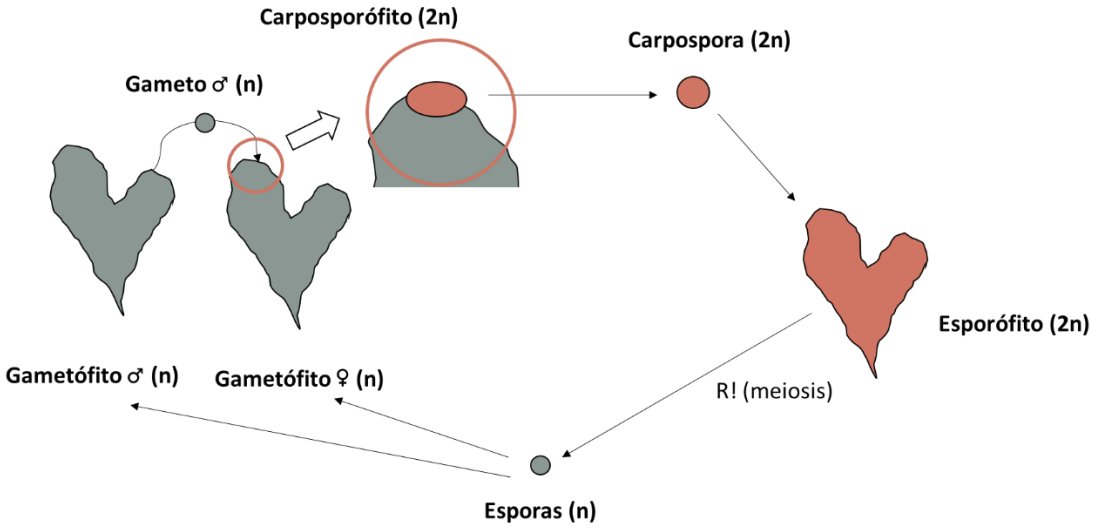

Figura 4). De nuevo, al igual que en los ciclos digenéticos, estos pueden ser isomórficos, cuando gametófito y esporófito son similares, como en *Chondrus, Gracilaria, Gelidium* o *Eucheuma*, o heteromórficos, cuando son diferentes, como es el caso de *Mastocarpus-Petrocelis* (Graham et al., 2009).

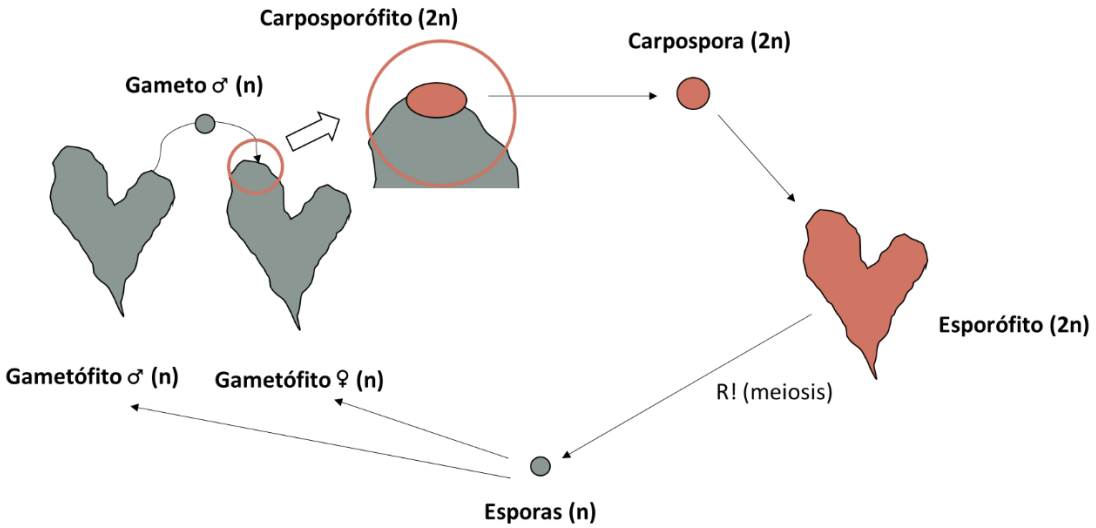

Figura 4. Esquema de un ciclo trigenético. Se trata de un ciclo haplodiplofásico, al alternar generaciones n y 2n.

Las algas rojas (Phylum Rhodophyta) presentan ciclos trigenéticos. En muchos casos coincide con lo descrito más arriba. En *Porphyra*, el gameto femenino se forma a partir de la transformación de una célula vegetativa en una célula especializada denominada carpogonio, que desarrolla una protuberancia con un canal interno (prototricógina), a través de la cual penetrará el núcleo del gameto masculino, produciéndose la fecundación. El cigoto se divide mitóticamente en carposporas, que se liberan para desarrollar un esporófito filamentoso e incrustante. Este esporófito puede reproducirse asexualmente mediante monosporas mitóticas, dando lugar a nuevos esporófitos, o generar esporas meióticas, que al germinar darán lugar a nuevos gametófitos.

En las algas verdes existen ciclos biológicos monogenéticos, en los que el cigoto se divide por meiosis. Esta primera división meiótica da lugar a esporas que se liberan y se desarrollan dando lugar a nuevos gametófitos. El género *Monostroma* presenta este tipo de ciclo. Otros, como *Ulothrix*, presentan este tipo de ciclo pero también pueden reproducirse asexualmente, cuando células vegetativas se dividen para formar zoosporas que dan lugar directamente a nuevos individuos. Un ejemplo de ciclo digenético es *Ulva*. Este género presenta un ciclo digenético isomórfico, en el que el esporófito y el gametófito son morfológicamente iguales. Además, *Ulva* presenta gametófitos masculinos y femeninos.

2.4. PRODUCCIÓN

2.4.1. Producción mundial

La producción mundial de macroalgas ha ido aumento progresivamente desde la década de 1990, cuando se situaba en los 13,5 millones de toneladas, hasta llegar, en 2017, a 31,8 millones de toneladas (Figura 5), correspondientes al 28,4 % del peso total de la acuicultura marina y con un valor anual en primera venta de 9.475 millones de euros. Dicho crecimiento se debe principalmente a la diversificación de las técnicas de cultivo y al incremento del cultivo de especies tropicales como *Kappaphycus alvarezii* y *Euchema* ssp., para la extracción de carrageninas en Indonesia, donde se producen más de 1/3 de la totalidad mundial (FAO 2018a; APROMAR 2019).

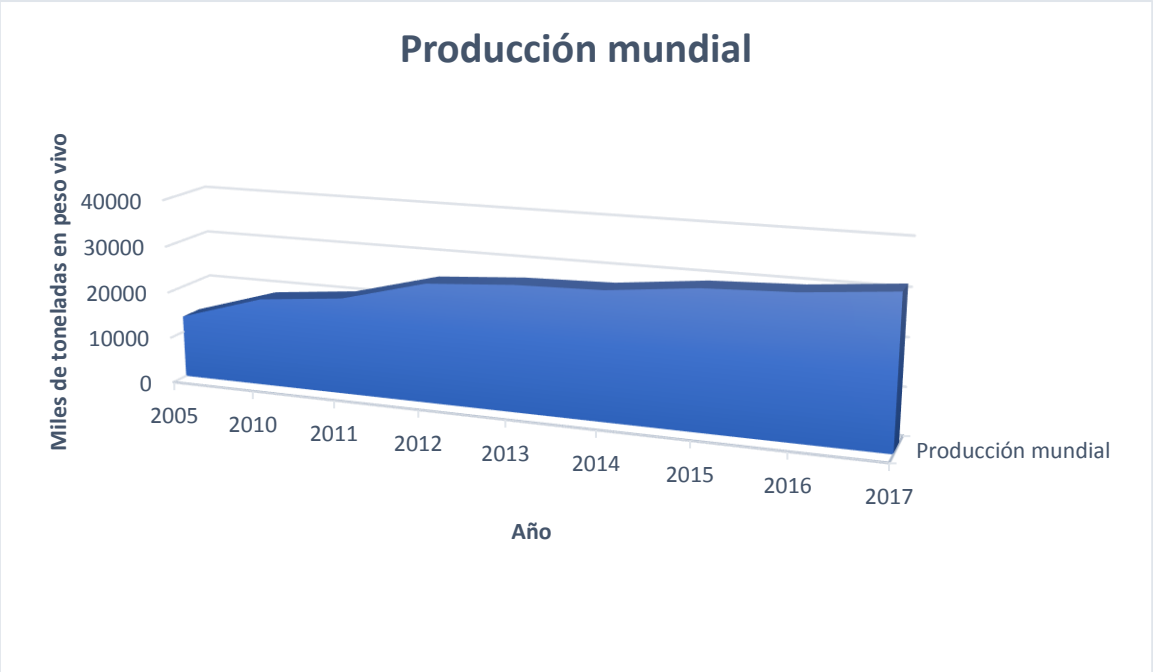

Figura 5. Variación de la producción mundial a lo largo de los años. Fuente: FAO 2018b.

En cuanto a la distribución mundial de la producción, el 95% se corresponde a países asiáticos (Tabla 1), entre los que destacan China e Indonesia con un 86,6 % de la producción total, seguidos muy de lejos por Filipinas, Corea del Sur, Corea del Norte y Japón.

China e Indonesia son los mayores productores de algas marinas con más de 26 millones de toneladas de producción agregada en 2016 (Tabla 1). China produce principalmente algas marinas para alimentación humana: algas pardas como *Saccharina japonica* y *Undaria pinnatifida* y algas rojas pertenecientes a los géneros *Gracilaria* y *Pyropia* (FAO, 2018b). Por otro lado, Indonesia produce principalmente los carragenófitos *Kappaphycus* y *Eucheuma* (FAO, 2018b). Además, Chile, China y Noruega lideran la explotación de las poblaciones silvestres de algas marinas de las cuales las laminarias son las más buscadas (FAO, 2018b).

Tabla 1. Principales países productores de plantas acuáticas en 2016. Fuente: FAO 2018a.

PAÍS	MILES DE TONELADAS EN PESO VIVO (2016)	PORCENTAJE (%)
China	14.387	47,9
Indonesia	11.631	38,7
Filipinas	1.405	4,7
República de corea	1.351	4,5
República Popular Democrática de Corea	489	1,6
Japón	391	1,3

Malasia	206	0,7
Tanzania	119	0,4
Madagascar	17	0,1
Chile	15	0
Islas Salomón	11	0
VietNam	10	0
Papua Nueva Guinea	4	0
Kiribati	4	0
India	3	0
Otros	8	0
TOTAL	**30.050**	**100**

Por otro lado, si nos referimos a las especies cultivadas, la producción está dominada por las algas rojas y pardas, mientras que las algas verdes suponen menos de un 1% del total (Comparini et al., 2015). Dominan sobre todo la laminaria japonesa (*Saccharina japonica*) y *Euchema* spp., las dos algas de mayor producción mediante acuicultura en el mundo (APROMAR 2019). Además, la variedad de algas cultivadas no superó las 40 especies en 2016. La mayor parte de la producción se centró en las laminarias *Saccharina japonica* y *Undaria pinnatifida*, y las algas rojas *Pyropia/Porphyra* spp. ('nori' en japonés o 'gim' en coreano), *Kappaphycus alvarezii* y *Eucheuma striatum* (carragenófitas) y *Gracilaria/Gracilariopsis* spp. (agarófitas) (Tabla 2). En total, estas especies y géneros suponen más del 81% de la producción mundial total (Kim et al., 2017).

Tabla 2. Principales especies de plantas acuáticas cultivadas a nivel mundial en 2016. Fuente: FAO 2018b.

ESPECIE	MILES DE TONELADAS EN PESO VIVO (2016)	PORCENTAJE (%)
Euchema spp.	10.519	34,9
Saccharina japonica	8.219	27,3
Gracilaria spp.	4.150	13,8
Undaria pinnatifida	2.070	6,9
Kappaphycus alvarezii	1.527	5,1
Porphyra spp.	1.353	4,5
Algas nep, *Algae*	1.049	3,5
Porphyratenera	710	2,4
Euchema espinosa, Euchema denticulatum	214	0,7
Sargassum fusiforme	190	0,6
Spirulina spp.	89	0,3
Phaeophyceae	34	0,1

Otros	17	0,1
TOTAL	30.139	100

2.4.2. Producción europea

La contribución de Europa a la producción mundial de algas es anecdótica y desde el año 2000, cuando se situaba en 350.000 toneladas, ha ido disminuyendo hasta llegar a las 300.000 toneladas actuales. Esta disminución es debida a varias razones, destacando sobre todo la disminución de los stocks litorales de algas, problemática medioambiental que obliga al desplazamiento de la industria a terceros países (Comparini et al., 2015; APROMAR 2019).

Al contrario de lo que sucede a nivel mundial, en Europa la mayor parte de las algas (99 %) provienen de la pesca o recolección de los recursos naturales. Las más importantes en términos de tonelaje son: *Laminaria digitata* (Francia), *Laminaria hyperborea* (Francia y Noruega) y *Ascophyllum nodosum* (Noruega e Irlanda), todas recolectadas mecánicamente. En cuanto a valor económico destaca *Gelidium sequispedale*, una especie recolectada manualmente pero con un alto valor económico y estratégico (APROMAR 2014; Lesueur y Comparini, 2015).

En cuanto a la distribución de la producción por países (Figura 6), Noruega es el más importante, siendo responsable de dos tercios del total de la producción, perteneciendo el resto, casi exclusivamente a Francia, con un 19% del total, e Irlanda, con un 10% (Comparini et al., 2015; Lesueur y Comparini, 2015).

Figura 6: Distribución de los porcentajes de producción en Europa. Fuente: FAO 2014; Lesueur y Comparini, 2015.

2.4.3. Producción nacional

España

La explotación de macroalgas en España supuso en 2017 un 4% de la producción europea total, estando concentrado principalmente en la cornisa cantábrica y la costa gallega (APROMAR 2019). A pesar de que la utilización de macroalgas es tradicional en esta zona para la obtención de agar y gelatinas o como fertilizante agrícola, las poblaciones naturales son suficientes para cumplir las necesidades, por lo que la mayor parte se obtiene directamente del medio natural mediante la recogida de arribazones (Lesueur y Comparini, 2015).

En España se recolectan del medio natural unas 12.000 toneladas de algas destinadas a la extracción de agares y carragenatos (APROMAR, 2014), mientras que la cosecha de acuicultura en 2017 fue de tan solo 8,5 toneladas, correspondientes en su totalidad a algas de los géneros *Laminaria* y *Gracilaria* destinadas a consumo humano directo (APROMAR 2019).

Portugal

El sector de macroalgas en Portugal asistió en los últimos años a una fuerte recesión. Tras el máximo alcanzado al final de la década de los 80 (3.451 toneladas de algas agarófitas) la producción comenzó a disminuir hasta ser considera una actividad residual. Este descenso fue debido principalmente a una sobreexplotación de las macroalgas que dañó las poblaciones naturales y al cambio de los ecosistemas marinos (Melo 2002; APROMAR 2014; Soares et al., 2017)

En la actualidad, aunque en un volumen pequeño, todavía se siguen recolectando de forma manual algunas especies agarófitas como son: *Gelidium sesquipedale, Gracilaria* spp*., Pterocladiella capillacea* y carragenófitas como: *Chondrus crispus, Mastocarpus stellatus, Gigartina pistillata* (APROMAR 2014). Siendo las más relevantes las cosechas de *Pterocladiella capillacea* en las Azores y de *Gelidium* en el suroeste del país, el cual es utilizado como materia prima por la mayor empresa de extracción de agar de la Península Ibérica (Abreu et al., 2005). Además, actualmente se están produciendo también algunas especies a nivel experimental en sistemas ITMA (Abreu et al., 2005; Santos 2017).

2.4.4. Producción por tipo de explotación

Extractiva

La producción de cosecha mundial a partir de poblaciones naturales se mantiene relativamente estable, fluctuando entre 1 y 1,3 millones de toneladas anuales desde 2000 (Tabla 1; Tabla 2; Tabla 3; FAO, 2014). En 2016 el volumen total de macroalgas generado mediante la explotación de recursos naturales fue de 1,092 millones de toneladas, correspondientes al 3,5 % del conjunto total de plantas acuáticas recolectadas en el medio natural y cultivadas (FAO 2018a). Los países que lideran la explotación de poblaciones silvestres son Chile, China y Noruega, y en cuanto a las especies, las más buscadas para su recolecta son las laminariales (Buschmann et al., 2017). La explotación de algas silvestres se ha llevado a cabo tradicionalmente en muchos países, entre ellos los mencionados anteriormente, pero con el aumento de la demanda del sector esta actividad se volvió insuficiente, creando la necesidad de desarrollar métodos de cultivo para evitar graves consecuencias sobre la situación de las poblaciones naturales y poder cumplir con las necesidades de la población mundial (Buschmann et al., 2017).

Tabla 3. Producción mundial de algas según su origen: cultivo o cosecha del medio natural (miles de toneladas).

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
TOTAL	21.245	22.892	25.799	29.283	30.253	32.128	32.742	32.922
Acuicultura	20.174	21.768	24.668	27.994	29.053	31.063	31.650	31.811
Cosecha	1.070	1.123	1.131	1.289	1.201	1.065	1.092	1.111
Porcentaje de cosecha sobre el total	5%	5%	4%	4%	4%	3%	3%	3%

Cultivo

En 2016, la acuicultura generó el 96,5% de los 31,2 millones de toneladas del conjunto de plantas acuáticas producidas a nivel mundial. Los mayores cultivadores de algas son China e Indonesia (Tabla 1), responsables de más de 26 millones de las toneladas totales, es decir, un 86,6 % del total del cultivo (FAO 2018b).

En 2016, los principales países productores de algas, China e Indonesia, produjeron cada uno más de 12 millones de toneladas, Filipinas y la República de Corea más de 1,2 millón de toneladas, mientras que la República Democrática Popular de Corea, Japón, Malasia y Zanzíbar produjeron más de 100.000 toneladas cada uno. En América, solo Chile ha aparecido en las tablas de estadísticas de la FAO, con 12.836 toneladas de *Gracilaria* cultivada. La mayoría de los países europeos y africanos no cultivan algas marinas y los pocos países en los que se cultivan algas producen cantidades mínimas.

El cultivo en China se centra principalmente en algas para consumo humano directo, tales como *S. japónica* o *U. pinnatifida*, y algas rojas de los géneros *Gracilaria* y *Pyropia*, mientras que en Indonesia, se producen principalmente las especies carragenófitas *Kappaphycus* y *Eucheuma* para la obtención de carrageninas (Buschmann et al., 2017).

En cuanto a la diversidad de especies cultivadas, son las anteriores las responsables del 92,4% de producción, destacando muy por encima del resto *Eucheuma* spp., con 10 millones de toneladas y *Laminaria japonica* con 8 millones de toneladas (Tabla 2) (FAO 2018b).

3. EXPLOTACIÓN

3.1. ESPECIES DE INTERÉS

Las macroalgas se clasifican de manera general en algas rojas, algas verdes y algas pardas. A continuación se describen algunas de sus principales características y algunas de las especies de cada grupo con mayor importancia económica.

3.1.1. Algas rojas

Las algas rojas o phylum Rhodophyta son un grupo grande y diversificado de organismos unicelulares y multicelulares con aproximadamente 7.300 especies conocidas AlgaeBase, 2020). La taxonomía del phylum Rhodophyta se encuentra en revisión en cuanto a la división en subfilos y la designación de nuevas clases, pero la mayor parte de las formas pluricelulares, incluidas las de interés económico, se agrupan en las clases Bangiophyceae (180-200 especies) y Florideophyceae (entre 6.700 y 6.900 especies, según los autores) (Saunders y Hommersand, 2004; Hwan Su Yoon et al., 2006; AlgaeBase, 2020).

Clase Bangiophyceae

Grupo pequeño de algas rojas que incluye las formas más sencillas y la mayoría de los representantes de aguas continentales (Saunders and Hommersand, 2004). Poseen talos unicelulares (*Porphyridium*), filamentosos (*Asterocystis, Bangia*) o parenquimáticos tipo laminar como *Porphyra*. Sus ciclos de vida son monogenéticos haplofásicos o digenéticos haplo-diplofásicos(Bárbara, 2017). Entre los dos órdenes constitutivos de esta clase, el orden Bangiales agrupa 194 especies reconocidas con especímenes de los géneros *Bangia* y *Porphyra* (Stiger-Pouvreau et al., 2016).

Géneros *Porphyra* y *Pyropia*

Varias especies pertenecientes a estos géneros son popularmente conocidos como "nori" en Japón, "laver" en el Reino Unido, Estados Unidos y Canadá, "purple laver" en Gran Bretaña e Irlanda, "karengo" en Nueva Zelanda, "kim" en Corea y " zicai "en China (Baweja et al., 2016). Ambos géneros fueron descritos a finales del siglo XIX por Agardh, y recientemente, numerosas especies asignadas al género *Porphyra*, incluidas muchas de importancia comercial, han sido reasignadas al género *Pyropia* en base a análisis filogenéticos (Sutherland et al., 2011).

Pertenecen al orden Bangiales y son dos géneros de algas laminares mono o diestromáticas que se unen al sustrato mediante un conjunto de células rizoidales. Presentan un ciclo vital digenético en el cual se alternan generaciones heteromórficas. El talo laminar, que es la morfología más reconocible y que recibe los diferentes nombres antes mencionados, es la generación gametofítica (n). Se desarrolla en otoño o principios del invierno en las costas rocosas y se alterna con una fase pequeña filamentosa, el esporófito (2n), conocida como fase conchocelis (McHugh, 2003), que crece sobre conchas de moluscos durante el verano y el otoño Antes de 1949, se creía que la fase filamentosa era una especie distinta, *Conchocelis rosea*, hasta que se descubrió el ciclo vital de *Porphyra* (Drew, 1949; FAO, 2009).

Generalmente, los primeros talos aparecen en febrero. Las láminas crecen vegetativamente y producen gran número de monosporas (n) mediante mitosis. Las monosporas germinan y producen largos rizoides que se fijan al sustrato, dando lugar a nuevos gametófitos. Esta reproducción asexual supone un considerable incremento de láminas durante la primavera, época en la que acontece la reproducción sexual. Dependiendo de la especie, los gametófitos pueden ser monoicos o dioicos. Los gametófitos masculinos o la región masculina del gametófito monoico presentan en el margen células que se transforman produciendo espermacios de color blanquecino y sin flagelos, que son liberados al exterior y llevados por las corrientes hacia los carpogonios situados en los gametófitos femeninos o en la parte femenina del gametófito monoico. El carpogonio contiene dos papilas o hinchamientos de la pared (prototricógina) en el caso de las especies monostromáticas, o una en las distromátricas. En la fecundación, el espermacio se une a la prototricógina y penetra hacia la ovocélula por un canal. La ovocélula fecundada en el interior del carpogonio origina un cigoto diploide que sedivide en 2-4 (o numerosas) esporas diploides (cigotosporas) que se desarrollan dentro del antiguo carpogonio. La máxima producción de esporas tiene lugar en verano. Las cigotosporas se fijan habitualmente a conchas muertas y germinan en 2-3 días, dando lugar al estado conchocelis (2n) filamentoso. El conchocelis penetra en el interior de las conchas por descalcificación y crece vegetativamente con poca luz. En condiciones de días largos, la fase conchocelis produce monosporas (2n) que sirven para producir nuevos talos filamentosos, lo que favorece un rápido desarrollo de la fase diploide. En días cortos se producen conchosporas (n), de origen meiótico. Las conchosporas se

liberan en condiciones de baja temperatura y tras su germinación dan lugar a láminas haploides gametofíticas (Figura 7).

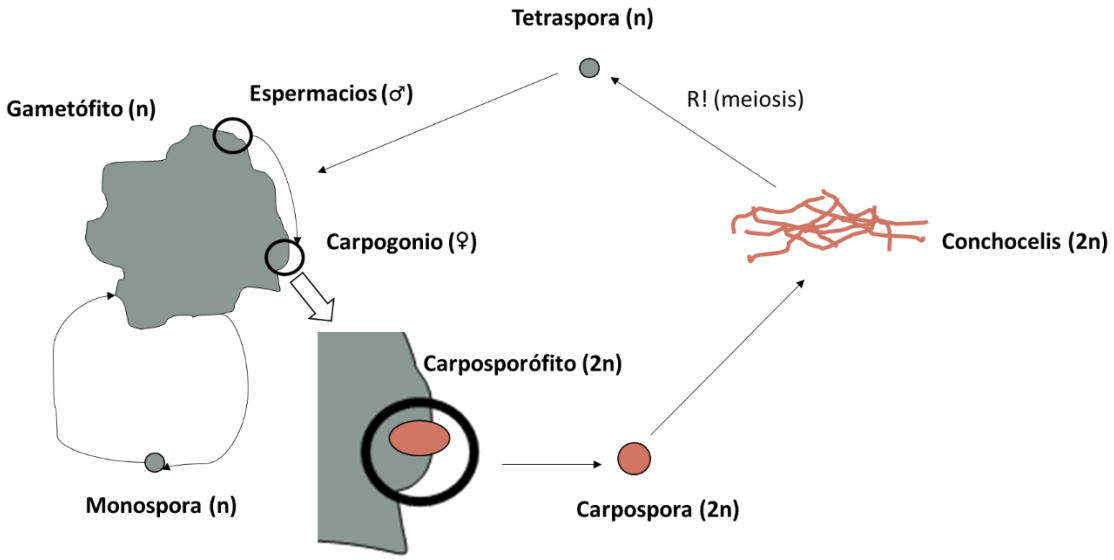

Figura 7. Diagrama esquemático del ciclo vital de *Porphyra/Pyropia*.

Actualmente hay descritas 79 especies de *Pyropia* y 59 de *Porphyra*, aunque se cree que pueden existir más de 200 en total. Las dos especies más importantes que se cultivan son *Pyropia tenera y P. yezoensis. Porphyra* y *Pyropia* aparecen en las costas rocosas de todo el mundo, incluyendo algunas especies en los trópicos y en los polos. La mayor diversidad se puede encontrar en las regiones boreales o en zonas con clima frío a templado. Las condiciones óptimas, tales como temperatura, salinidad y baja intensidad de luz, para el crecimiento de sus talos varían. En general, los talos jóvenes pueden resistir temperaturas más altas que los adultos, las temperaturas bajas inducen el crecimiento normal de *P. yezoensis* y *P. haitanensis* (menos de 3 °C y 8 °C, respectivamente). Una alta intensidad lumínica (5.000-8.000 lux) es buena para el crecimiento de ambas especies. Ambos géneros soportan la desecación, por lo que puede vivir en las regiones más altas y secas de la zona intermareal. En cuanto a los nutrientes, nitrato nitrogenado o amonio nitrogenado, los experimentos indican que se requiere 100-200 mg nitrógeno/m^3 para el crecimiento normal, y el crecimiento se verá inhibido si el nivel de nitrógeno es inferior a los 50 mg nitrógeno/m^3. (FAO, 2009).

Su cultivo se lleva a cabo en los países orientales desde el siglo XVII, siendo considerada una de las más importantes algas para la alimentación, destacando sobre todo por ser uno de los ingredientes fundamentales del sushi japonés. Es una macroalga con un alto contenido proteico que puede ser asimilable por los humanos, así como también es rica en sales minerales y vitaminas.

Pyropia leucosticta

Presenta láminas monostromáticas, de color marrón rojizo y consistencia frágil y membranosa, que se vuelven rosadas al secarse (Aguilera et al, 1997). El estipe es muy corto y se fija al sustrato mediante un disco basal distal. Soros masculinos blanquecinos dispuestos en líneas radiales o grupos romboidales en el margen de la lámina. Alcanza los 150 mm de largo (Aguilera et al., 1997). Epífita de algas más grandes, ampliamente distribuida desde el intermareal inferior al infralitoral de primavera a otoño (Brodie e Irvine 2003; Bárbara, 2017). Común.

Porphyra umbilicalis

Lámina monostromática orbicular, rojo marrón o verde oliváceo (por decoloración), fijada por su parte central por un disco basal pequeño pero firme (Guiry y Guiry, 2020a). Soros masculinos blanquecinos marginales. Se encuentra sobre rocas y *Mytilus*, en el intermareal medio en primavera y verano (Figura 8). La distribución geográfica es actualmente el Atlántico Norte, aunque hay evidencia de identificaciones erróneas en esta región (Brodie et al., 2008).

Figura 8. *Porphyra umbilicalis*. Fuente: Rosser1954, CC BY-SA 4.0, https://commons. wikimedia .org/w/index.php?curid=84148787

Porphyra linearis

Láminas alargadas de consistencia delicada, de color marrón púrpura a rojo rosado con manchas anaranjadas durante la época reproductiva, que se fijan por su parte distal. Cuenta con soros masculinos blanquecinos en líneas marginales. Tamaño en torno a los 20-40 mm (-200) mm de largo y 5-10 (-25) mm de ancho, aunque puede llegar a 200 mm de longitud y 25 mm de anchura. Sobre roca, en el intermareal superior y medio de

zonas expuestas al oleaje, en invierno y primavera (Bárbara, 2017; Bunker et al., 2010; Guiry y Guiry 2020b). Esta especie está ampliamente distribuida por las costas del Atlántico norte, pero el único registro documentado en el Mediterráneo es el de Sánchez et al. (2014).

Porphyra dioica

Lámina linear, membranosa y monostromática. De color rojo marronáceo a verde oliváceo, fijada por su parte distal. Alcanza los 500 mm de largo y 200 mm de ancho, desde el estípite corto y el agarre basal (Figura 9). De sexos separados, los soros masculinos blanquecinos y los grupos de gametocistos femeninos rojo intenso se disponen en líneas marginales del talo. Se fija sobre roca, parcialmente cubierta de arena, desde el intermareal superior al inferior (Brodie e Irvine 1997; Guiry, 2001; Guiry y Guiry, 2020c). Abundante en primavera y verano. Tiene una distribución bastante amplia y ha sido registrada en numerosas localizaciones en la costa atlántica europea (Guiry y Guiry, 2020c).

Figura 9. *Porphyra dioica* en la franja mesolitoral superior.

Porphyra purpurea

Lámina linear, rojo púrpura muy oscura, fijada por su parte distal. Contiene soros masculinos blanquecinos en líneas marginales alternando con grupos de gametocistes femeninos de color rojo intenso. Es una especie monoica. Se fija sobre roca, parcialmente cubierta de arena, en el intermareal medio. Abundante en primavera y

verano (Brodie et al., 1996; Guiry, 1997; Bárbara, 2017). Tiene una amplia distribución, con citas en todo el hemisferio norte, Australia y Nueva Zelanda (Guiry and Guiry 2020d).

Clase Florideophyceae

Grupo numeroso que incluye la mayoría de las especies marinas y representantes de morfología compleja, pseudoparenquimática (talos cilíndricos, comprimidos, foliosos) y cladomial. Crecimiento generalmente apical. Talos desde filamentos heterotricos hasta talos cladomiales macizos o parenquimáticos (Bárbara, 2017). Las algas pertenecientes a este grupo comparten una serie de caracteres, incluida la presencia de tetrasporangios y gonimoblastos filamentosos (Pueschel y Cole, 1982).

El ciclo vital es común a la mayoría de especies y se suele considerar trigenético haplo-diplófásico e isomórfico, ya que gametófito y esporófito son de morfología similar. Existen especies que presentan variaciones dentro de este ciclo o incluso hay ciclos que son digenéticos por reducción (Dixon e Irvine, 1995; Bárbara, 2017).

A continuación, se describen algunas de las especies y géneros con interés económico de la clase Florideophyceae.

Palmaria palmata "dulse"

Palmaria palmata, comúnmente conocida como dulse, dillisk (inglés), dilleasc o creathnach (irlandés: concha) es una de las especies de algas marinas más populares para el consumo humano en el mundo occidental (Irvine y Guiry, 1983; Mouritsen et al., 2013).

La morfología de *P. palmata* es extremadamente variable incluso dentro de un corto tramo de costa (Harvey, 1849). El talo es una lámina de consistencia membranosa o coriácea y contorno triangular, entera o dividida, que se fija al sustrato mediante un disco basal prolongado en un estipe cilíndrico. Posee una estructura multiaxial pseudoparenquimática (Irvine y Guiry, 1983). La ramificación palmeada con sus extensiones en forma de dedo es muy característica; la mayoría de las plantas tienen en el margen numerosas proliferaciones palmeadamente divididas. Existe también una variedad con láminas más estrechas y finamente divididas (

Figura 10). Los ejemplares crecen hasta una longitud de 50 cm y un ancho de 3 a 8 cm con una textura suave, coriácea y similar a la piel (Braune y Guiry 2011), son rojo-pardo oscuro, algunas veces algo violáceo, se vuelve rojo rosado después de secarse y decolorarse al sol (Mouritsen et al., 2013). Las plantas jóvenes pueden ser menos coriáceas y pueden ser delgadas y resbaladizas. Se encuentra en zonas intermareales o infralitoral es poco profundas en áreas expuestas y semiexpuestas. Crece como epífita en estípites de algas marinas (especialmente en *Laminaria hyperborea*), lechos de mejillones y en superficies rocosas (Irvine y Guiry, 1983). La variedad de láminas más

estrechas es característica de áreas más protegidas y con depósito de arena, sobre roca o *Fucus*. La distribución geográfica de *P. palmata* abarca todo el hemisferio norte. En el Atlántico, se encuentra desde el Ártico de Rusia hasta Portugal en el este, y desde el Ártico de Canadá hasta los Estados Unidos (Nueva Jersey) en el oeste. También crece en Alaska, Japón y Corea (Bárbara 2017).

Figura 10. Diversidad morfológica de *Palmaria palmata*. Fuente: Luis Fernández García - Own work, CC BY-SA 4.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=65158614

El ciclo presenta una variación al ciclo común tipo *Polysiphonia.* En *Palmaria palmata* falta el carposporófito; por tanto, el ciclo es digenético haplo-diplofásico. También es extremadamente heteromórfico, constituyendo un caso único de heteromorfía entre gametófito masculino y femenino. Los gametófitos masculinos son macroscópicos y de la misma morfología que el tetrasporófito, mientras que los gametófitos femeninos son microscópicos. El gametófito masculino es laminar erguido y produce espermacios en soros superficiales. El gametófito femenino es una costra fina (microtalo) que produce carpogonios directamente a partir de células vegetativas y sin células auxiliares. Después

de la fecundación se desarrolla un cigoto (2n) que germina directamente sobre el gametófito femenino y da lugar a una nueva lámina esporofítica (2n) que es similar al gametófito masculino. La lámina esporofítica (2n) produce tretrasporocistes en soros superficiales y da lugar a tetrásporas meióticas (n) que germinan originando gametófitos masculinos laminares o gametófitos femeninos costrosos (Bárbara 2017).

Palmaria palmata es consideradauna de las algas más deliciosas para el consumo humano, con un gran potencial todavía inexplorado para su uso en la cocina (Mouritsen 2012a). Se cosecha del medio natural en Irlanda, Bretaña, España, Islandia, Maine, Nueva Escocia y California (Mouritsen et al., 2013). En cuanto a la acuicultura, existen pequeños intentos de cultivo en Irlanda, Bretaña, España, Hawai y más recientemente en Dinamarca (Le Gal et al. 2004; Pang y Lüning 2004; Pereira 2012; Hafting et al. 2012; Mouritsen et al. 2013). En Europa, el intento más exitoso de cultivar dulse tiene lugar en mar abierto a lo largo de la costa del norte de España, un esfuerzo que ahora es responsable de la mayor producción comercial de algas rojas fuera de Asia (Martínez et al., 2006).

Chondrus crispus (musgo irlandés)

Chondrus crispus, comúnmente conocido como "musgo de Irlanda", también conocido como "sea moss", era la materia prima original para la producción de carragenina (Hernández-Carmona et al., 2013, Gordon 2017). Presenta un talo multiaxial, aplanado y ramificado dicotómicamente hasta formar una lámina en forma de abanico, de consistencia coriácea y de bordes rizados que parte de un disco basal mediante el que se fija. Las axilas (la zona donde se forman las ramificaciones) son redondeadas, y los ápices son redondeados o romos. *C. crispus* presenta una morfología variable según las condiciones ambientales (Guiry y Guiry 2020e), que se manifiesta en la anchura de las ramificaciones. Las estrechas (1-2 mm) aparecen en zonas batidas, pero en zonas más abrigadas son anchas, hasta 6 cm. Aunque típicamente de color marrón violáceo o marrón púrpura, presenta colores variables desde rojo oscuro a (Guiry y Guiry 2020e). Cuando se observa bajo el agua, el gametófito suele presentar irisaciones azuladas, una característica distintiva de la especie (Figura 11).

Figura 11. *Chondrus crispus*. Se aprecia la característica irisación azulada incluso fuera del agua.

C. crispus suele formar extensas poblaciones sobre las rocas (sustrato sólido) del intermareal inferior y submareal. Requiere aguas limpias eurihalinas y transparentes, con hidrodinamismo alto o medio (zonas medias y externas de rías) es decir, lugares preferentemente expuestos a las olas y de aguas frías y limpias (Graham et al., 2009). La especie está ampliamente distribuida en el noroeste y el noreste del Atlántico (Guiry y Guiry, 2020e). El gran polimorfismo de esta especie se hace patente en las costas de España encontrando una extensa gama de formas. En general se sabe que las formas que viven en la zona infralitoral estando siempre sumergidas varían menos que las que viven en la zona litoral más expuestas a las mareas (Seoane, 1967). Incluso se conocen formas de vida libre (Bárbara, 2017).

Chondrus tiene períodos de fertilidad variables, dependiendo de las zonas geográficas, pero generalmente son mínimos en agosto. La relación entre gametófitos y tetrasporófitos varía en función de la batimetría, siendo la abundancia relativa de gametófitos frente a esporófitos mayor a poca profundidad. Es una especie dioica, con ciclo sexual trigenético haplo-diplofásico, en el cual se dan gametófitos masculinos y femeninos, carposporófito (parásito del gametófito femenino) y tetrásporófito de vida independiente. Se observan pequeñas diferencias entre los gametófitos masculinos y femeninos. Los primeros son menos ramificados, pero es difícil apreciar la diferencia con los gametófitos femeninos inmaduros. Existen diferencias de producción de carrageninas entre gametófitos y esporófitos, siendo de mayor dureza el carragén de los gametófitos masculinos. Los gametocistes masculinos se desarrollan en la superficie del talo y los carpogonios internamente. Después de la fecundación de la ovocélula se desarrolla un cigoto (2n). Mediante la intervención de la célula auxiliar, células nutricias y filamentos gonimoblásticos sobre el gametófito femenino se desarrolla un

carposporófito o gonimocarpo, que constituye un cistocarpo escasamente emergente y con forma de pústulas hemisféricas. Las carpósporas (2n) se liberan por ruptura del pericarpo y germinan dando lugar a un tetrasporófito (2n) independiente del gametófito y de morfología similar. En el córtex se forman soros de tetrasporocistes, los cuales dan lugar cada uno, a cuatro tetrásporas meióticas cruciadas (Bárbara, 2017).

Chondrus crispus fue la primera materia prima utilizada como fuente de carragén en los países occidentales, pero a medida que la industria se expandía, los recursos naturales de la especie comenzaron a ser insuficientes, y a pesar de la posibilidad de cultivo para este fin. Además, esta especie se utiliza también en la alimentación. En Irlanda presenta una larga tradición como espesante y una de sus especies se cultiva en Canadá, destinada a la comercialización como alimento en Japón, donde se le conoce como hana nori y se utiliza como ingrediente de ensaladas, guarniciones o sopas (McHugh, 2003). También, en algunas partes del mundo se usa como bebida, hirviéndose con leche antes de agregar azúcar y especias como la canela y la vainilla (Gordon, 2017).

Eucheuma spp.

Eucheuma presenta un talo carnoso de 35 a 74 cm de longitud, y consistencia cartilaginosa, muy ramificado con estructura multiaxial, pseudoparenquimática con células rizoidales internas. Las ramificaciones son cilíndricas, aplastadas o planas, y presentan a lo largo de toda la superficie unas pequeñas proyecciones correspondientes con los carposporófitos (Graham et al., 2009). Se fija al sustrato por un disco basal, pero muy a menudo aparecen también discos basales secundarios (**Figura 12**). Este género presenta una distribución en mares cálidos de zonas intertropicales y subtropicales, Atlántico, Pacifico e Índico. Es abundante en Filipinas, Asia tropical, África oriental y la región del Pacífico occidental (Pereira y Yarish 2008). Las especies del género *Eucheuma* crece entre 24-34ºC, aunque existen algunas excepciones con temperaturas óptimas diferentes. Habita en ensenadas al abrigo de la barrera de coralináceas, a 0,5 m bajo el nivel del agua. Los mayores crecimientos se producen cerca de la superficie del agua, aunque a tan poca profundidad se pueden destruir los pigmentos y blanquear las plantas. En general es un género estenohalino (27-35 psu) por lo que está ausente en estuarios. En lo que se refiere al hidrodinamismo son algas que requieren cierto movimiento y agitación especialmente durante su reproducción. En cuanto al sustrato al que se fijan no es específico y crecen sobre corales muertos (Bárbara, 2017).

Figura 12. *Eucheuma denticulatum*. https://commons.wikimedia.org/wiki/File: Eucheuma_denticulatum_in_an_off-bottom_cultivation,_Bweleo,_Zanzibar.JPG#file

Las especies más importantes en cuanto a su explotación son:

- *E*. *denticulatum*: crece sobre sustratos arenoso-coralinos o rocosos en zonas constantemente afectadas por corrientes de moderada o elevada intensidad y con una temperatura mayor de 20ºC.
- *E. gelatinae*: crece sobre sustratos rocosos y coralinos, a pocos metros del borde del arrecife, donde está expuesta a fuertes olas y turbulencias.

Eucheuma posee gametófitos dioicos y similares a los esporófitos, con un ciclo trigenético haplo-diplofásico isomórfico típico de la clase Florideophyceae. El talo masculino produce espermacios ameboides en espermatangios que se originan por transformación de células madre de la zona cortical (Pereira and Yarish2008). Los gametocistes femeninos (carpogonios) se desarrollan a partir de células basales, dando lugar a ramas carpogoniales de tres células. La célula terminal constituye el carpogonio y termina en una larga tricógina (Pereira y Yarish 2008; Bárbara 2017).

Después de la fecundación, las células de la rama carpogonial degeneran, mientras se desarrollan células auxiliares en otras partes del talo. El antiguo carpogonio contiene 25-30 núcleos diploides procedentes de mitosis sucesivas del cigoto (2n). Paralelamente se originan unos filamentos que nacen del antiguo carpogonio y a través de los cuales los

25-30 núcleos diploides son transferidos a las células auxiliares y reemplazan al núcleo original haploide de la célula auxiliar. Finalmente, la célula auxiliar multiplica repetidas veces el nuevo núcleo diploide y origina varios gonimocarpos. De estemodo en el talo se pueden desarrollar entre 25 y 30 gonimocarpos procedentes de un mismo cigoto. Cada gonimocarpo es cubierto por células haploides del gametófito, dando lugar al cistocarpo. A través del carpostoma son liberadas las carpósporas (2n). Las carpósporas germinan y dan lugar a tetrasporófitos diploides. Las tetrásporas se originan por meiosis de células del córtex del esporófito (Bárbara, 2017).

Kappaphycus spp.

Las especies del género *Kappaphycus* son comúnmente conocidas en inglés como “agar agar”. La sistemática y taxonomía de *Kappaphycus* es confusa y difícil debido a la plasticidad morfológica, la falta de caracteres adecuados para identificar especies y la existencia de nombres comerciales de conveniencia (Zuccarello et al., 2006). Son de color variable dependiendo del hábitat, generalmente, va desde verde brillante a amarillo anaranjado. En cuanto a la morfología cuenta con talos gruesos y flexibles de hasta 2 m, formados por ejes cilíndricos de 1-2cm de diámetro y ramificación irregular (Bárbara, 2017) (Figura 13). Los ejes son multiaxiales y pueden contener una médula central de células isodiamétricas mezcladas con rizoides, aunque algunas especies son pseudoparenquimatosas en su totalidad, las células medulares son una mezcla de células grandes y pequeñas y, en algunos casos, tienen un número variable de bolsas distintivas llamadas "tílides" (Kraft, 1969). Tiene elevada capacidad de regeneración vegetativa mediante rotura de fragmentos apicales que pueden generar nuevos individuos. Las primeras etapas reproductivas no se han detallado, los cistocarpos maduros tienden a formarse directamente en los ejes en lugar de en laterales cortos o espinas y están construidos de una célula de fusión central rodeada de gonimoblastos carposporangiales radiantes y gonimoblastos estériles, este último se comunica con el casco filamentoso circundante (Santos, 1989; Guiry y Guiry 2020f).

Figura 13. *Kappaphycus alvarezii.* Fuente: Secretaria de Agricultura e Abastecimento Agriculturas – https://www.flickr.com/photos/39272011@N07/5257558324/, CC BY 2.0; https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=29473442

Posee un ciclo de vida tipo *Polysiphonia*, general de florideofíceas. Generalmente, es trifásico y comprende las fases tetrasporófito (2n), carposporófito (2n) y gametófito (n). Se han reportado las estructuras vegetativas y reproductivas de las poblaciones tetraspóricas y gametofíticas y su ocurrencia en sitios de cultivo en Filipinas.

Kappaphycus es un género frecuente en aguas tropicales. Se ha registrado en Filipinas, Malasia, Cuba, China, Vietnam, Micronesia, Fiji, Hawai y Tahití. Sin embargo, muchos de estos lugares no son parte de la distribución nativa, sino que son el resultado de la introducción de la acuicultura (Zemke-White y Smith 2006).

Los géneros *Kappaphycus* y *Eucheuma* constituyen las principales fuentes de carragenina, representando más del 80% de la producción mundial (Pereira y Yarish 2008; Kim et al., 2017). En particular, *Kappaphycus* produce kappa-carragén, que forma geles fuertes y rígidos en presencia de iones potasio.

Existen 6 especies a día de hoy reconocidas pero las más relevantes desde el punto de vista económico son *Kappaphycus alvarezii* y *K.s striatus*, siendo la primera la que se cultiva con mayor frecuencia (Kim et al., 2017).

Kappaphycus alvarezii

Es una especie con talos cilíndricos lisos de consistencia cartilaginosa que presenta ramificaciones rígidas o postradas. A pesar de ser un alga roja, según las condiciones ambientales se pueden encontrar 3 morfotipos diferentes: rojo, verde o marrón. Las poblaciones de esta especie se distribuyen por la parte superior del sublitoral, justo por debajo de la línea de marea baja, comúnmente en arrecifes sobre sustratos arenoso-coralinos o rocosos, donde el flujo de agua es moderado (Sahoo, 2010). Fue una de las especies determinantes en la sustitución de *C. crispus* como fuente de carragén. Originalmente era cosechada del medio natural en Indonesia y Filipinas, pero a partir de la década de 1970, se desarrollan, en estos mismos países, técnicas de cultivo, las cuales proporcionan desde entonces las cantidades de *Kappaphycus* necesarias para abastecer las necesidades de la industria. Actualmente el cultivo se ha extendido con éxito en Tanzania, Vietnam y algas Islas del Pacífico (McHugh, 2003). Esta especie se cultiva utilizando los mismos métodos que *Eucheuma*, los métodos van desde el fijo de línea de fondo, el método de la balsa flotante y el método de canasta (Kim et al., 2017). Es importante el sitio escogido para realizar el cultivo de estas especies ya que un gran número de animales como pueden ser las tortugas o erizos marinos suponen una gran amenaza.

Orden Gelidiales

El orden Gelidiales comprende aproximadamente 210 especies agrupadas en 3 familias: Gelidiaceae, Gelidiellaceae y Pterocladiaceae. La familia Gelidiaceae es la que presenta el mayor número de especies (77%) y *Gelidium* el género más representativo (Salvador-Soler et al., 2016).

Gelidium spp.

El género *Gelidium* presenta un conjunto único de características que hacen de este un género bien definido. Las especies de este grupo presentan ramas postradas estoloníferas de las cuales emergen ejes erguidos muy ramificados pinnadamente, talos con estructura uniaxial (Fan, 1961). Crecen por división transversal de una sola célula apical, con cada célula axial portando dos células periaxiales opuestas produciendo filamentos laterales de segundo orden, que a su vez producen pares opuestos de filamentos de tercer orden más o menos en ángulos rectos al eje axial y de segundo orden (Fan, 1961).

Tienen un ciclo reproductivo como el que ocurre en el género *Polysiphonia*, típico de las florideofíceas. El ciclo es trigenético haplo-diplófásico e isomórfico ya que gametófito y esporófito son de morfología similar. Las esporas germinan produciendo un sistema basal multicelular previo a la formación de ejes erguidos. Tiene una gran capacidad de

regeneración vegetativa, requiriendo de sustratos calcáreos para la fijación de las esporas (Bárbara 2017).

Crecen en zonas con alta influencia de las mareas, como el eulitoral y el sublitoral, sobre sustratos preferiblemente rocosos y arenosos con cierta pendiente a una profundidad variable entre los 2-20 m según la especie. De las 124 especies conocidas de este género destacan *Gelidium corneum* (antiguamente denominado *G. sesquipedale*; Figura 14) y *G. spinosum* (=*G. latifolium*).

Figura 14. *Gelidium corneum*.

Las especies de *Gelidium* son utilizadas como materia prima para la extracción de agar de mayor calidad, medido por la fuerza de una gelatina formada por una solución al 1,5%. Todo el *Gelidium* utilizado para la extracción comercial de agar proviene de recursos naturales, principalmente de Francia, Indonesia, la República de Corea, México, Marruecos, Portugal y España (Qin, 2018). Su intento de cultivo ha sido exitoso, pero su lento crecimiento hace que no sea económicamente rentable, por lo que actualmente sigue siendo recolectada del medio natural, aunque la compañía Marine BioProducts International, afirma que lanzó productos de agarosa derivados de *Gelidium* cultivado (McHugh 2003).

Gracilaria spp.

El género *Gracilaria* fue establecido por Greville en 1830 y es el tercer género más diverso en el phylum Rhodophyta con más de 150 especies en todo el mundo. Se han reportado cerca de 28 especies de *Gracilaria* de la costa india (Sahoo et al., 2001, Baweja et al., 2016).

Las especies del género *Gracilaria* cuentan con un disco de fijación del que emergen ejes ramificados de hasta 1,5 m (Figura 15). Cuenta con talos cartilaginosos con estructura pseudoparenquimatosa con células centrales voluminosas, de tamaño mediano en la zona de transición y más pequeñas hacia la periferia. En zonas tropicales los talos son fértiles todo el año, pero en zonas templadas es variable. En general, la máxima producción de gametos se produce en junio, y la de carpósporas en agosto. En condiciones de laboratorio el ciclo se completa en 8-10 meses, obteniéndose estadíos fértiles 4 meses después de la germinación de esporas (Bárbara, 2017).

Figura 15. *Gracilaria multipartita*.

Se adapta a gran cantidad de condiciones, tanto de temperatura como de salinidad o de concentración de materia orgánica, lo que le confiere un crecimiento cosmopolita en una amplia gama de latitudes (McHugh, 2003; Graham et al. 2009; Kim et al. 2017). En cuanto la salinidad es eurihalina entre 15 y 50 psu. La temperatura óptima se encuentra en un rango de 20-28º C pero es euriterma soportando un amplio rango que va de 4ºC a 30ºC. Bajo altas intensidades lumínicas, del orden de 1.000 µmol m^{-2} s^{-1} los talos se

decoloran. Su intensidad lumínica óptima se encuentra en 100 µmol m^{-2} s^{-1} bajo luz azul y amarilla. Crece en grandes grupos en bahías o lagunas poco profundas y turbias, generalmente sobre sedimentos arenosos o fangosos en la zona eulitoral o comienzo del sublitoral, también soporta variaciones de turbidez que limitan la fotosíntesis, así como epifitismo por ectocarpáceas, algas verdes y otras algas rojas (*Polysiphonia*, *Ceramium*) (Bárbara, 2017).

El ciclo de vida del género *Gracilaria* es trigenético haplo-diplofásico e isomórfico, y las plantas pueden ser monoicas o dioicas. Kain y Destombe (1995) también observaron que los talosgametofíticos son epífitos en los tetrasporófitos. Después de la fertilización, el carpogonio se fusiona con una de las células nutritivas que actúa como una célula auxiliar. El cistocarpo aparece como una estructura protuberante en forma de cúpula, que se desarrolla en los gametófitos femeninos después de la fertilización y le da un toque áspero al talo (Baweja et al., 2016).

Las especies de *Gracilaria* constituyen una fuente importante de agar y desde la década de 1980 países como Chile, Brasil, Taiwán y las Filipinas, iniciaron cultivos comerciales a gran escala para la extracción de este polisacárido (Michetti, 2015).

Originariamente, las especies de *Gracilaria* fueron consideradas inadecuadas para la extracción de agar, pero en la década de 1950 se descubre que pretratadas con álcali son capaces de producir un agar de buena calidad, lo que permitió una expansión de la industria del agar, limitada hasta entonces por las existencias de *Gelidium*. Los primeros años, especies de *Gracilaria* fueron recolectadas en países como Argentina, Chile, Indonesia y Namibia, pero pronto comenzó a haber evidencias de sobreexplotación, por lo que empezaron a desarrollarse métodos de cultivo que se extendieron a lo largo de Chile, China, la República de Corea, Indonesia, Namibia, Filipinas y Vietnam, utilizando especies nativas de cada país. A pesar de ello, actualmente la mayor parte de *Gracilaria* sigue procediendo de la naturaleza, y su cultivo es dependiente de las fluctuaciones de los precios del agar.

3.1.2. Algas pardas (Clase Phaeophyceae)

Las denominadas algas pardas pertenecen a la clase Phaeophyceae y representan el grupo más grande en términos de biomasa total producida. Dentro de este grupo se encuentran también las especies de mayor tamaño y mayor complejidad en cuanto a la estructura del talo. De las 1.836 especies estimadas distribuidas en aproximadamente 285 géneros, menos del 1% se encuentran en hábitats de agua dulce (Wehr, 2015). Estas algas exhiben una diversidad morfológica significativa y son los taxones dominantes de la zona litoral marina desde las regiones subpolares a las ecuatoriales (Cock et al., 2010).

Todos los miembros de la clase Phaeophyceae son pluricelulares y se caracterizan por el pigmento fucoxantina que imparte un color marrón y laminarina como principal sustancia de reserva (Baweja et al., 2016).

Orden Laminariales

Se conocen bajo el nombre genérico de kelp. Representan el grupo más complejo y más representativo de todas las algas pardas. Es considerado como uno de los géneros de algas marinas más importantes debido a su gran número de especies, biomasa, dominancia e importancia económica.

Las laminarias se caracterizan por el gran desarrollo del esporófito (Figura 16), diferenciado en un sistema de fijación (rizoide), un estipe (cauloide) y una lámina (filoide). Los estipes y láminas pueden ser enteros o divididos, dependiendo de las especies, pero siempre sin nervadura central. El talo tiene estructura parenquimatosa compleja con crecimiento intercalar a expensas de un meristemo. Anatómicamente consta de un estrato externo de células pigmentadas y un estrato interno de células voluminosas y decoloradas, que tienen paredes perforadas y dispuestas en filas longitudinales.

Todas las laminariales presentan un ciclo biológico digenético haplo-diplofásico, con alternancia de generaciones heteromórfica muy acusada, en la que el gametófito haploide está muy reducido (microtalo filamentoso microscópico formado por filamentos uniseriados ramificados con crecimiento apical) y una esporofítica con forma de macrotalo folioso, el cual es el de interés comercial en algunas especies (Kain, 1979; Bárbara, 2017). Los gametófitos masculinos y femeninos son filamentosos y el masculinocontiene racimos de anteridios incoloros unicelulares en las puntas de las ramas, cada uno de los cuales produce un único espermatozoide biflagelado, mientras que en el gametófito femenino se forman oogonios unicelulares que producen un solo huevo. Después de la fertilización, los cigotos germinan dando lugar a un esporófito joven (

El **ciclo de vida en la naturaleza muestra una fuerte estacionalidad en la mayoría de las especies con un rápido crecimiento en primavera y formación de esporas en verano y otoño (Kain 1979; Lüning, 1981; Bartsch et al., 2008).**

Los sectores más importantes y tradicionales de la utilización de las laminariales comprenden la producción de alimentos en Japón, China y en menor medida en la República de Corea (McHugh 2003) y la producción de alginato (Bartsch et al., 2008), pero en las últimas décadas han surgido varias aplicaciones nuevas. Los compuestos derivados de las laminarias se encuentran en cosméticos, alimentos saludables, medicamentos y fertilizantes entre otros (Bartsch et al., 2008, Kim & Bhatnagar 2011, Qin, 2018).

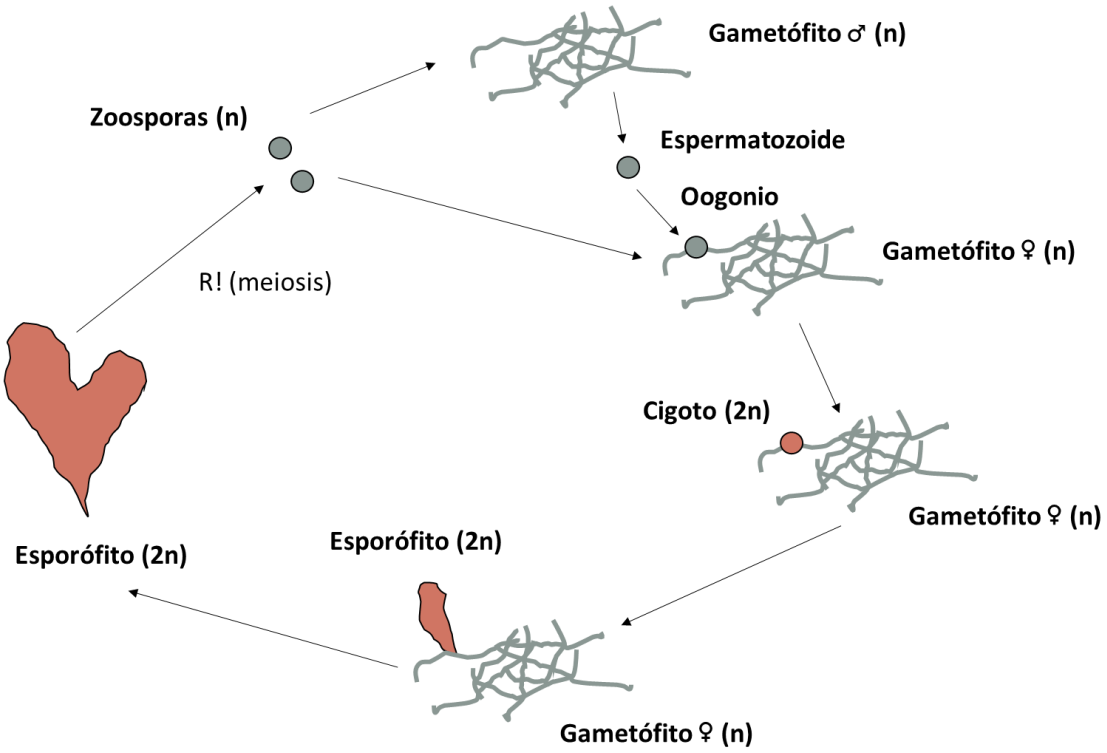

Figura 17). Es sobre el gametófito femenino (oogamia estricta) donde se desarrolla el esporófito (Baweja et al., 2016).

Figura 16. Bosque de *Macrocystis pyrifera*, el alga de mayor tamaño. https:// commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=13141471

El ciclo de vida en la naturaleza muestra una fuerte estacionalidad en la mayoría de las especies con un rápido crecimiento en primavera y formación de esporas en verano y otoño (Kain 1979; Lüning, 1981; Bartsch et al., 2008).

Los sectores más importantes y tradicionales de la utilización de las laminariales comprenden la producción de alimentos en Japón, China y en menor medida en la República de Corea (McHugh 2003) y la producción de alginato (Bartsch et al., 2008), pero en las últimas décadas han surgido varias aplicaciones nuevas. Los compuestos derivados de las laminarias se encuentran en cosméticos, alimentos saludables, medicamentos y fertilizantes entre otros (Bartsch et al., 2008, Kim & Bhatnagar 2011, Qin, 2018).

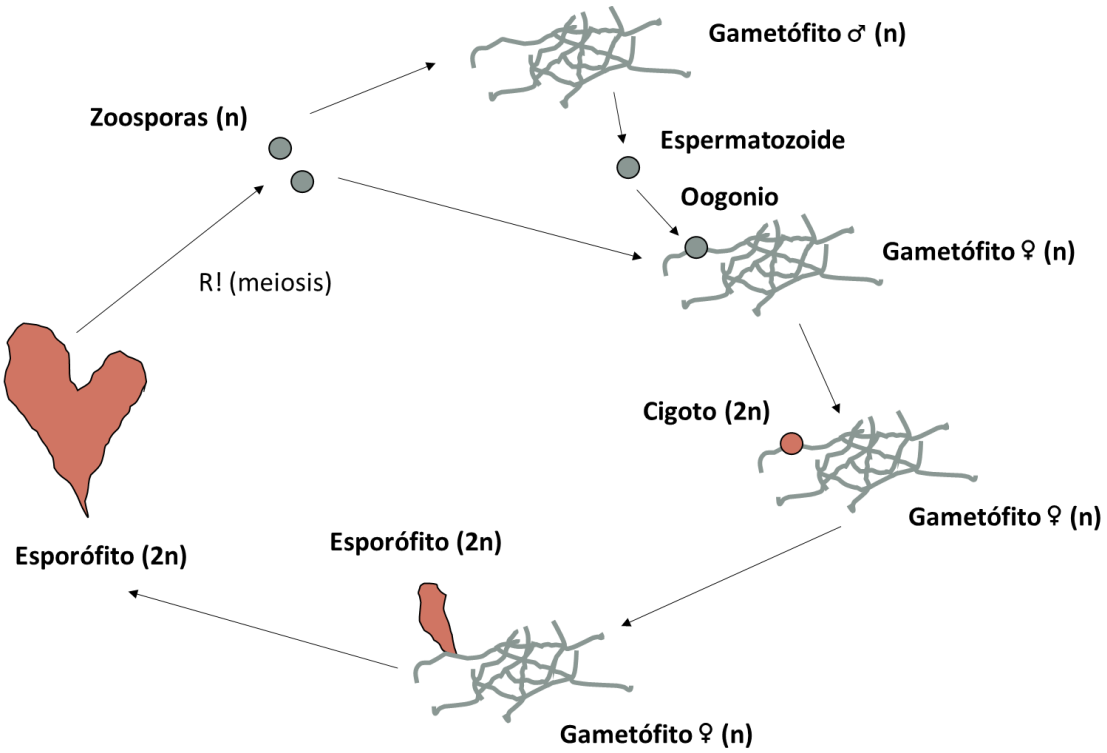

Figura 17. Ciclo vital de *Laminaria*.

Especies de interés dentro del grupo de las laminariales son:

Saccharina japonica (*Laminaria japonica*)

Especie conocida como "kombu", nativa de la costa noroeste del Pacífico. Es la especie más cultivada principalmente en China, Corea y Japón (Pereira y Yarish, 2008). Crece bien en arrecifes o rocas en la zona submareal, a una profundidad de 2–15 m (a veces hasta 30 m). Prefieren mares protegidos y tranquilos, en lugar de aguas abiertas (Pereira y Yarish, 2008). Algunas plantas pueden llegar a 12 m de largo y 40 cm de ancho (Bárbara 2017). Las plantas generalmente viven 3 años, aunque se han encontrado talos de hasta 10 años. El ciclo de vida de *Laminaria* está bien estudiado y consiste en una alternancia de generaciones entre una fase gametofítica microscópica y una fase esporofítica macroscópica de gran tamaño. Se distinguen cuatro etapas de desarrollo de los esporófitos: 1) una primera etapa de plántula (10-15 cm) con lámina monostromática en la que no se diferencia bien el estipe; 2) segunda etapa, con un ejemplar juvenil con diferenciación del meristemo; 3) tercera etapa de ejemplar adulto con proceso de elongación y deterioro de la lámina en su porción distal, 4) última etapa cuando el

esporófito se encuentra maduro con soros en los que se desarrollan los esporocistes (Bárbara, 2017).

El kombu tiene un área de distribución limitada a Japón, China y la costa del Pacífico de Rusia, se introdujo accidentalmente en el Mar Mediterráneo (Laguna de Thau, Francia) en 1984 (Guiry y Guiry, 2020g).

Saccharina latissima (=*Laminaria saccharina*)

Especie conocida como “kombu europeo” Se encuentra en todo el hemisferio norte. En el Atlántico Este desciende únicamente hasta el norte de Portugal. Presenta similitud morfológica con *S. japonica*, ya que consta de una lámina entera (< 4 m), un corto estipe y rizoides de fijación (Figura 18). Habita en fondos submareales de roca y arena, llegando a ascender hasta el intermareal inferior.

Figura 18. *Saccharina latissima*. Fuente: Cwmhiraeth - Own work, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=16543134

Laminaria digitata

Se distribuye en las aguas frías de todo el Atlántico. Es común encontrarla en zonas expuestas ya que es una de las laminarias más resistentes. Posee un cauloide comprimido y flexible (Figura 19). Se cosecha sobre todo en las costas de Francia para producir alginatos.

Figura 19. *Laminaria digitata*. Fuente: Hans Hillewaert, CC BY-SA 4.0, https:// commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=22420078

Laminaria hyperborea

Distribución en aguas frías del Atlántico Este. En Noruega se recolecta para producir alginatos. Cauloide rugoso con numerosos epífitos. Presenta una lámina gruesa y oscura.

L. digitata y *L. hyperborea* se diferencian fundamentalmente por su resistencia a las turbulencias del agua. *L. digitata* es la más resistente y por ello habita en zonas más expuestas, mientras que, por el contrario, *L. hyperborea* es la menos tolerante, habitando en la zona sublitoral media, donde forma "bosques submarinos" (McHugh, 2003; Graham et al., 2009).

Undaria pinnatifida (wakame)

El alga parda *Undaria pinnatifida* (Harvey) Suringar (Phaeophyta, Laminariales) es una especie originaria del este de China, Corea, Japón y sureste de Rusia donde es cultivada para consumo humano. En las últimas décadas ha ampliado enormemente su área de distribución a lo largo de casi todos los mares. Actualmente está presente en muchas partes de Europa. En el Atlántico la podemos encontrar en la Bretaña francesa, costas

de Gran Bretaña (Fletcher y Manfredi, 1995), Holanda y Bélgica, así como en la costa mediterránea de Francia e Italia. Ya en el hemisferio sur la podemos encontrar también en las costas atlánticas de Argentina, en las costas del Pacífico, de donde proviene, se ha extendido tanto por las costas de Nueva Zelanda, Australia y Tasmania, como más recientemente por las del noroeste de EE.UU. y México. En la Península Ibérica fue detectada su presencia por primera vez en la costa atlántica de Galicia en 1988 y en el mar Cantábrico de Asturias en 1995 (Cremades et al. 2006).

Esta especie es propia de sustratos rocosos, pero que puede colonizar incluso los fondos de cascajo, o aparecer también como epibionte sobre diversos invertebrados marinos: moluscos bivalvos, crustáceos cirrípedos (balánidos), ascidias, etc. Por su forma y consistencia es una especie muy bien adaptada a condiciones de alta hidrodinámica, lo que le permite resistir el fuerte mar del invierno, época en que experimenta su mayor tasa de crecimiento y vigor (Figura 20).

Figura 20. *Undaria pinnatifida*, ejemplares en diferentes fases de desarrollo. Fuente: Steve Lonhart / NOAA MBNMS http://sanctuarymonitoring.org/ photos/photo_info. php?photoID=1403&search=algae&s=180&page=10, Public Domain, https://commons. wikimedia.org/w/index.php?curid=40549776

U. pinnatifida, como especie perteneciente al orden Laminariales, tiene un ciclo vital digenético marcadamente heteromorfo, con la alternancia de una generación

gametofítica microscópica y otra esporofítica macroscópica y de fuerte desarrollo estacional. Los esporófitos pueden presentar 3 formas bien diferenciadas: 1) forma pinnatifida o forma typica, que presenta un estipe corto, nervadura central ancha y lámina con divisiones largas y profundas; 2) forma distans: estipe largo, nervadura central estrecha y divisiones de la lámina cortas y poco profundas; 3) forma narutensis: es una forma extrema de forma pinnatifida y presenta un estipe aún más corto. Diversos estudios en las costas asiáticas confirman la influencia de las condiciones ecológicas en la morfología de los esporófitos de *U. pinnatifida*, y en particular de la mayor o menor longitud del estipe según el régimen hidrodinámico o el efecto de sombreo (Cremades et al. 2006).

U. pinnatifida, conocida comercialmente con el nombre japonés de "wakame", es utilizada en la alimentación humana desde tiempos ancestrales en el sudoeste asiático (Cremades et al. 2006) siendo la tercera alga en importancia económica a nivel mundial (FAO, 2004). Actualmente, todos los productos comerciales procedentes de esta alga provienen del cultivo, pero sigue existiendo cierta cosecha para uso local en alguno de los países originarios.

Macrocystis spp.

Se conocen tres especies de *Macrocystis*: *M. pyrifera, M. integrifolia* y *M. angustifolia*, pero *M. pyrifera* es la única especie que se cultiva. Es un género de algas que viven en ambientes submareales (6-40 m) y son abundantes en toda la costa americana del Pacífico, así como en el sur de África y sureste de Australia.

Macrocystis pyrifera

Se caracteriza por ser el alga de mayor tamaño de todas, alcanza longitudes superiores a los 30 metros y posee tasas de crecimiento de hasta 50 cm diarios (North, 1971). Sus frondes están compuestos por estipes ramificados y numerosas láminas (hasta 40 cm) y aerocistes que se originan por escisión de una lámina simple que comienza por una pequeña hendidura que parte de la base. La lámina juvenil se escinde en dos frondes primarias que siguen el proceso. Un único talo puede abarcar 10 m^2 y vivir 8-10 años. Por cada m^2 se localizan 270-345 filoides, que representan una superficie de 8-9 m^2. Su crecimiento es mejor en aguas tranquilas y profundas, donde forman densos bosques submarinos en aguas con temperatura menor de 20-22ºC sobre fondos rocosos en el Pacífico, sur de África y Australia. Los bosques de kelp sirven de cría y refugio para muchos peces y especies marinas de valor económico y ecológico como las nutrias marinas (Figura 21).

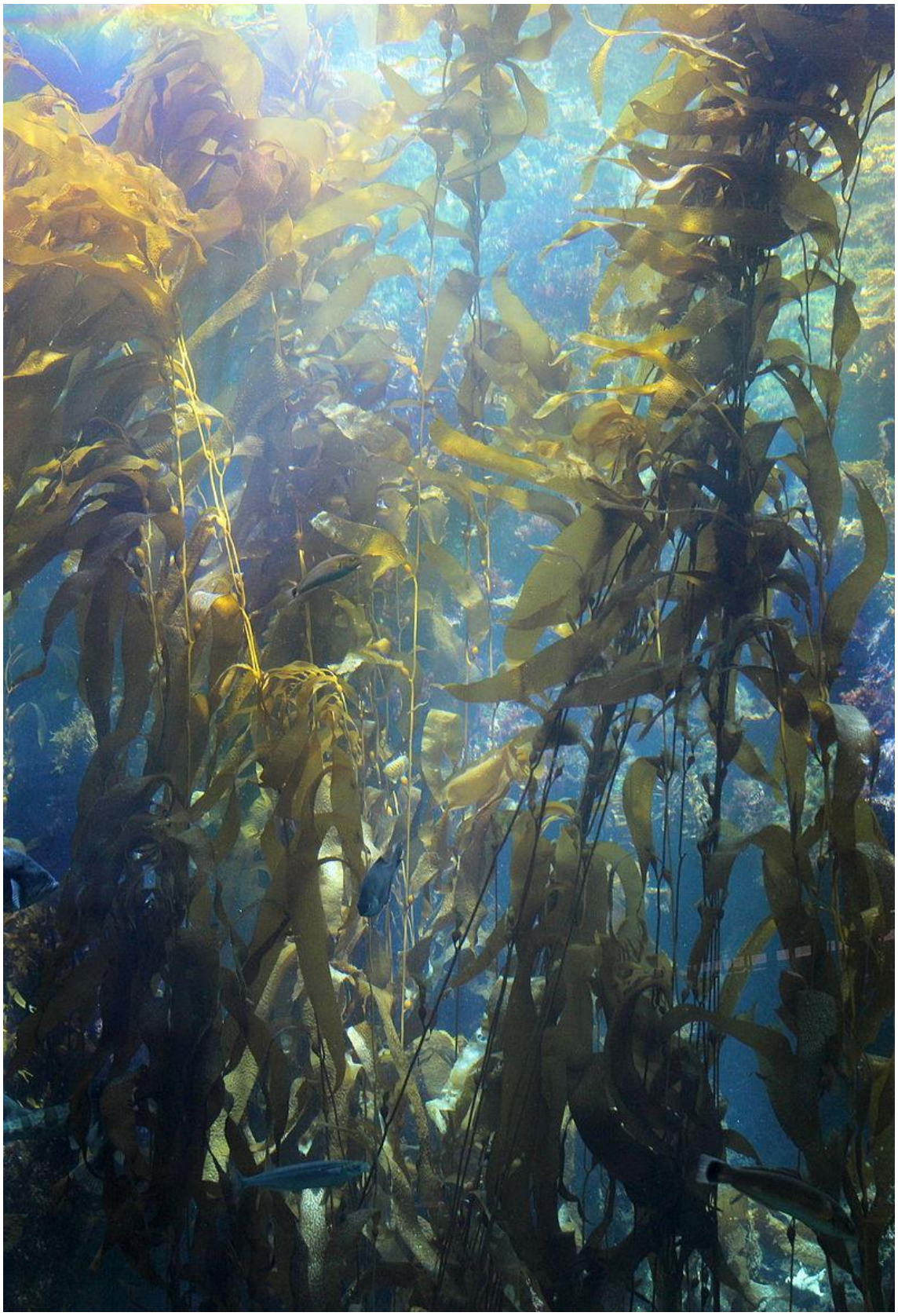

Figura 21. Bosque de *Macrocystis pyrifera*. By Miguel Hermoso Cuesta - Own work, CC BY-SA 4.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=45786282

Como miembro del orden Laminariales *Macrocystis* presenta un ciclo vital digenético heteromórfico. Los soros de la lámina contienen los esporocistes en los cuales que se originan unas 50 esporas flageladas. Las esporas se forman en cistes uniloculares meióticos. En 12-48 horas las esporas germinan y dan lugar a gametófitos masculinos y femeninos independientes. El femenino es muy pequeño y tiene muy pocas células, mientras que el masculino consta de más células. En las partes terminales del gametófito masculino producen gametos flagelados, que se desprenden y nadan hacia los gametos femeninos, situados en el extremo del gametociste femenino. En la atracción interviene una feromona (lamoxirene). Los gametos femeninos pueden permanecer unidos al gametófito femenino o ser liberados dependiendo del hidrodinamismo. En un segundo caso la oogamia no es estricta y los gametos femeninos son fecundados en la columna de agua, dando lugar a un cigoto que germina y origina una nueva planta esporofítica diploide, no necesariamente en el entorno del gametófito femenino. La duración de la fase microscópica oscila entre 12-14 días, siendo la fase dominante el esporófito diploide.

Macrocystis se cosecha principalmente para la producción de alginato, aunque actualmente también está siendo utilizada como alimento en el cultivo de abalón (McHugh, 2003; Graham et al. 2009).

Orden Fucales

Representan un orden de la clase Phaeophyceae en el que están incluidas algunas de las algas más comunes del litoral. Presentan la estructura típica de un alga marina: rizoide, estipe y lámina (Bárbara, 2017). Las láminas de las fucales generalmente contienen vejigas de gas para flotar libremente en la superficie del agua (Baweja, 2016). Las fucales alcanzan una longitud máxima promedio de hasta 30–50 cm. Por lo general, las fucales completan su ciclo de vida en 2–3 años, excepto *Ascophyllum*, que tiene un ciclo vital de 12–15 años (Lee, 2008). Presentan un crecimiento apical y un ciclo vital monogenético diplofásico con meiosis en el proceso de formación de gametos.

Son ejemplos de un ciclo de vida diplofásico donde solo el esperma y el óvulo representan la condición haploide (Lee, 2008). Los gametos se producen en el interior de los conceptáculos, los cuales se agrupan en receptáculos. Los gametos masculinos son flagelados y de pequeño tamaño. Se originan mediante y una meiosis y cuatro mitosis, que dan lugar a grupos de 64 células. Los gametos femeninos se originan mediante una meiosis y una mitosis que da lugar a 8 núcleos susceptibles de generar 8 gametos sin flagelos dentro del gametociste. Dependiendo del género, el número de gametos femeninos (8 en *Fucus*) puede reducirse hasta uno (*Sargassum*, *Cystoseira*), por degeneración de núcleos haploides inicialmente formados. La fecundación es oógama externa y la liberación de los gametos generalmente se produce durante la bajamar (se trata de especies adaptadas al intermareal). Generalmente la fecundación es rápida. A

las 2 horas de la formación del cigoto, éste desarrolla una pared celular y a las 12 horas se producen los primeros rizoides. El cigoto tiene una marcada polaridad regulada por la luz (Lee, 2008; Baweja, 2016; Bárbara, 2017).

Sargassum spp.

Es un género muy abundante en aguas templadas, tropicales y subtropicales en todo el mundo, con especies adaptadas a diversos ambientes oceánicos con una amplia variedad de estrategias reproductivas y morfologías. Presentan ramificaciones de aspecto foliáceo y vesículas aeríferas para facilitar la flotación. Muchas especies no viven fijadas a un sustrato, sino que forman densas masas pelágicas que constituyen valiosos hábitats para muchos animales.

Suele ser usada para alimentación directa y en algunos casos como fuente de alginatos, pero solo como último recurso, ya que su alginato no es de muy buena calidad. Además, actualmente se está usando en Filipinas para producir harinas para la alimentación animal y como fertilizante, en fresco a nivel local y seco para la exportación a otros países (McHugh, 2003; Kim et al., 2017).

Sargassum muticum

Originaria de las costas de Japón, esta especie se encuentra actualmente distribuida por todo el Pacífico norte, el Atlántico norte y el Mediterráneo. Se trata de una especie invasora que coloniza con gran densidad el intermareal, desplazando a especies autóctonas de elevada importancia ecológica, como laminarias e *Himanthalia elongata* (Figura 22).

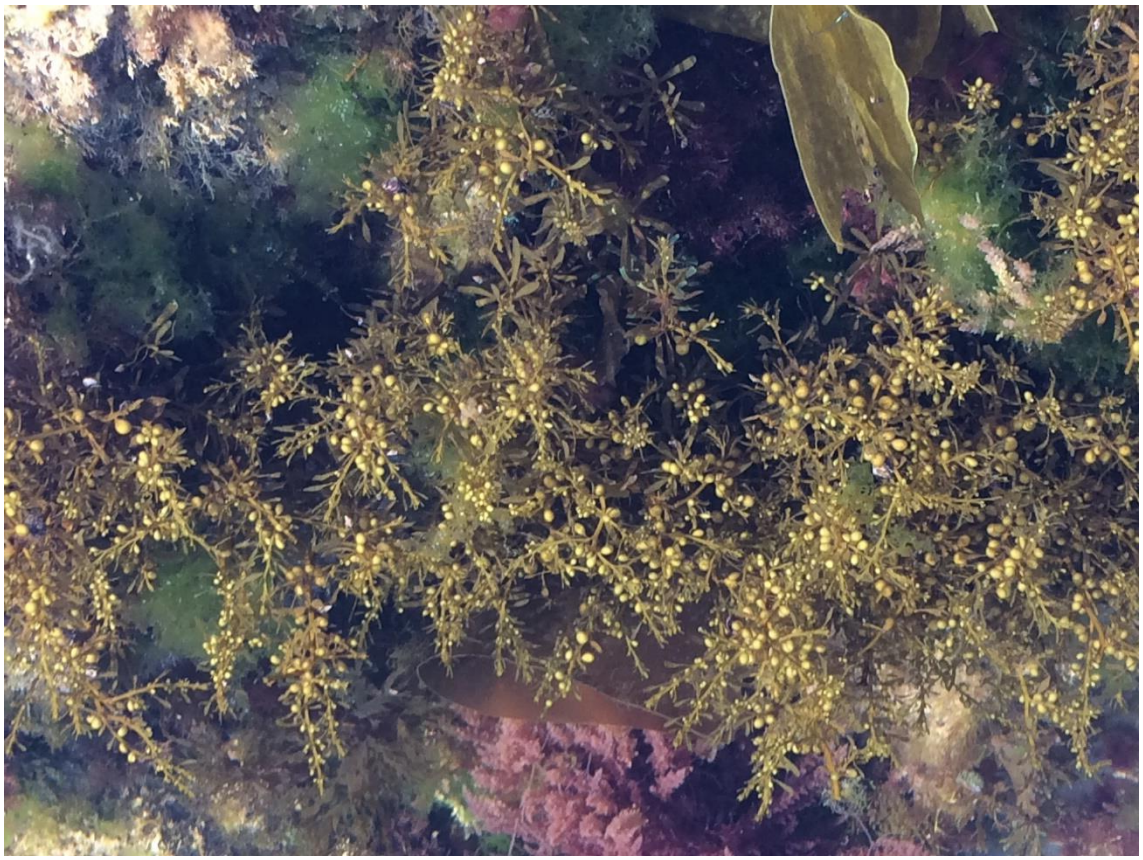

Figura 22. *Sargassum muticum.*

Sargassum fusiforme

Plantas formadas por ejes erguidos (1 a 30) que portan pequeñas y numerosas ramas cilíndricas. Habitan en el submareal superior, en zonas con cierta renovación y corriente pero resguardadas del oleaje. Son muy comunes en las costas templadas de Japón, Corea y China (Graham et al., 2009). El mayor crecimiento se produce de enero a abril (Bárbara, 2017).

Ascophyllum nodosum

Ascophyllum nodosum es una especie de alga parda conocida como alga de roca o kelp noruego. Presentan talos delgados y largos sin nervadura central que pueden alcanzar los 4 m de longitud, de un color verde oliva. Se fijan a las rocas mediante un rizoide. Se ramifican dicotómica y lateralmente y presentan vejigas de aire en los extremos (Figura 23). Tiene un crecimiento lento y puede vivir entre 10 y 15 años.

Habita en aguas frías en la zona del intermareal y es común en la costa occidental de Europa (de Svalbard a Portugal) incluyendo Groenlandia y de la costa noreste de América del Norte. Puede encontrarse mezclada con especies como *Fucus vesiculosus* y *F. serratus*. Su distribución está limitada por la salinidad, el hidrodinamismo, la

temperatura y la desecación; a diferencia de muchas otras especies de algas pardas, soporta en su hábitat natural, períodos de inmersión marina y períodos de exposición a la intemperie. Este ambiente presenta condiciones extremas de luz, temperatura, deshidratación, radiación ultravioleta y cambios de salinidad, hechos que constituyen un éxito de adaptación fisiológica frente a condiciones de estrés hídrico, salino y térmico e implica que estas algas estén dotadas de una singular composición bioquímica, debido a las condiciones de estrés experimentadas durante su ciclo de vida.

Los usos de esta especie son muy variados, destacando de forma cuantitativa su uso como materia prima para la extracción de alginatos, proviniendo las algas destinadas a este fin principalmente de Irlanda, Escocia, Islandia y Noruega. Por otro lado, *Ascophyllum* está actualmente considerada la principal materia prima para la fabricación de harinas para pienso, ya que presenta amplias y accesibles poblaciones naturales y las algas utilizadas para este fin deben estar recién cortadas. En esta industria destacan sobre todo Noruega y Francia (McHugh, 2003; Graham et al., 2009).

Figura 23. *Ascophyllum nodosum*. Fuente: Arneoste, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4888478

Orden Chordariales

Orden de algas pardas, dónde el gametófito es la generación microscópica mientras que el esporófito es de mayor tamaño y está constituido por un pseudoparénquima. La fecundación es isógama.

Cladosiphon okamuranus

Se conoce bajo el nombre de “Okinawa-mozuku”. Plantas con un talo cilíndrico (25-40 cm) con ramificación irregular abundante y consistencia gelatinosa (tiene un mucílago agradable al paladar, Figura 24). Presenta un color pardo y fijación al sustrato por un disco (3-5 mm). Se fija a sustratos diversos, hojas de *Thalassia*, conchas, plásticos, etc.

Figura 24. *Cladosyphon okamuranus*. Fuente: DryPot - CC BY 2.5, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=17402345

Se trata de una especie endémica del archipiélago Ryukuy (Mar de la China) donde se cultiva.

En su área de distribución se encuentra sometida a intervalos de temperatura de 18-22ºC en invierno y 25-31ºC en verano. Suele encontrarse en ensenadas, entre 1-3 m de profundidad en zonas protegidas por barreras de algas calcáreas. Es una especie muy sensible a los cambios bruscos de temperatura y a los movimientos del agua, no tolera ambientes batidos en los que se fragmenta el talo, que se suele fragmentar con facilidad, tampoco tolera las zonas de fondo de bahía, muy protegidas y con escasa renovación de agua. Aun así, necesita cierto movimiento y renovación de agua para poder crecer de forma óptima.

Su ciclo biológico es digenético, heteromórfico haplodiplofásico siendo el esporófito la generación aparente y con interés económico. Los talos aparecen en octubre, con la bajada de la temperatura (de 25 a 19ºC) y la disminución del fotoperíodo. Alcanzan 30-40 cm en abril, pero se degradan y desaparecen entre junio y julio, cuando la temperatura sobrepasa los 29ºC. Entre marzo y junio, los talos macroscópicos producen cistes uniloculares, en los cuales acontece una meiosis y varias mitosis. Estos cistes se rompen y se liberan numerosas esporas con dos flagelos laterales. Las esporas germinan y dan lugar a microtalos postrados haploides (gametófitos) masculinos y femeninos. En 20 días, en la superficie de los microprotalos se forman cistes pluriloculares mitóticos que dan lugar a gametos masculinos o femeninos. Los gametos se fusionan (isogamia) y originan un cigoto (2n) que se convierte en un microtalo postrado diploide, del cual emergen filamentos erguidos asimiladores fotosintéticos que darán lugar a una fronde multiaxial (esporófito maduro). Además del ciclo sexual existen varios ciclos de *C. okamuranus* en los cuales se realiza una reproducción asexual (Bárbara, 2017).

Se utilizan como alimento directo tras un proceso de desalado, y a pesar del aumento de la demanda, su cultivo sigue estando limitado al entorno original, aunque se han probado cultivos en otras islas del Pacífico, que no consiguieron progresar a nivel económico (McHugh, 2003; Lin et al., 2005).

Durvillaeales

Este orden está compuesto por géneros de especies perennes y dioicas, con un estipe que puede estar ramificado o no y una gran lámina coriácea que a menudo se encuentra desgarrada en varias tiras por la acción de las olas, y en cuyo interior se pueden formar acúmulos de gas. Viven entre 7-8 años y pueden alcanzar hasta 10 m de longitud, con un crecimiento restringido a las regiones subantárticas del hemisferio sur, siendo la especie dominante del intermareal y submareal. Se cosechan para consumo directo y sobre todo, para la producción de alginato en Chile, Australia y Nueva Zelanda, procediendo toda la materia prima de la recolección de arribazones, ya que su cosecha está prohibida (McHugh, 2003; Graham et al., 2009).

Durvillaea antarctica

Conocida como “cochayuyo”. Se distribuye por Sudamérica, Australia y Nueva Zelanda. Especie de plantas perennes, dioicas que habitan en ambientes expuestos al oleaje (Figura 25), conviviendo con *Lessonia nigrescens*.

Posee un talo macizo que recuerda al de una laminaria, pero tiene un ciclo monogenético diplofásico como las fucales. Las plantas son fértiles todo el año, lo que permite un reclutamiento continuo si el sustrato está disponible.

Se consume como alimento en Chile. La base de los estipes se utiliza fresca o en ensaladas, mientras que las frondes (cochayuyo) se utilizan para preparar guisos, después del secado al sol.

Figura 25. *Durviallaea antarctica*. *Fuente:* Erasmo Macaya, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2267480

3.1.3. Algas verdes

Las algas verdes representan un conjunto genéticamente y ecológicamente diverso de organismos fotosintéticos que se agrupan dentro de los phyla Chlorophyta y Streptophyta (John and Rindi, 2015). Las hipótesis recientes de la evolución de las algas verdes reconocen la divergencia temprana de estos dos linajes discretos (Lemieux et al., 2007; Leliaert et al., 2007). Basándose en estas nuevas clasificaciones el phylum Chlorophyta se compone principalmente de formas unicelulares de agua dulce y algas marinas macroscópicas (incluidas las Chlorophyceae, Ulvophyceae, Trebouxiophyceae y Prasinophyceae), mientras que el phylum Streptophyta comprende un conjunto parafilético de algas de agua dulce (Charophyceae, Chlorokybophyceae, Coleochaetophyceae, Klebsormidiophyceae, Mesostigmatophyceae, Zygnematophyceae) y las plantas terrestres.

Son más de 6.000 especies de macro y microalgas, que se encuentran predominantemente en hábitats de agua dulce (el 90 % de las especies) a marinas (Baweja, 2016). Existen especies con ciclos de vida haplobiónticos y otras con ciclos diplobiónticos. La identificación de algas verdes es especialmente difícil debido a su morfología a menudo simple que resulta en pocos caracteres de diagnóstico, plasticidad fenotípica mostrada en respuesta a factores ambientales, ciclos vitales solamente parcialmente conocidos, convergencia evolutiva y, en algunos casos, la necesidad de examinar las estructuras reproductivas (John and Rindi, 2015). A pesar de su diversidad filogenética, las algas verdes comparten un conjunto de características comunes, incluidas las paredes celulares de celulosa como principal polisacárido estructural, cloroplastos rodeados únicamente de una doble membrana y la presencia de clorofilas a y b.

Clase Ulvophyceae

Clase de macroalgas que comprende unos 100 géneros y 1.100 especies, predominantemente marinas y con los representantes de mayor tamaño dentro de las algas verdes (Bárbara, 2017). Se ha demostrado que todas las algas verdes marinas filamentosas o las algas verdes más grandes estudiadas ultra-estructuralmente pertenecen a la clase de Ulvophyceae (Lee, 2008). El ciclo de vida generalmente implica la alternancia de talos haploides y diploides. La amplia ocurrencia de alternancia de generaciones en las Ulvophyceae podría deberse a que el entorno marino más estable fomenta la evolución de un ciclo de vida más largo (Lee, 2008). La morfología es muy variada, desde formas unicelulares no flageladas hasta filamentos y láminas, pudiendo encontrarse grandes talos constituidos por una sola célula multinucleada. En la clasificación es importante el tipo de ciclo y el número de núcleos por célula (Bárbara, 2017).

Orden Ulotrichales (=Codiolales)

Orden que comprende 10 géneros y 90 especies, marinas y algunas de agua dulce. Las especies de este género están formadas por un talo en filamentos no ramificados de longitud indefinida que están adheridos al sustrato por una célula basal especial. Todas las células, excepto la basal, son capaces de dividirse y formar zoosporas o gametos. Presentan un ciclo monogenético con fase haploide gametofítica y un cigoto característico (única fase diploide), denominado fase Codiolum. Éste, después de la meiosis, forma cuatro esporas tetraflageladas que germinan dando lugar a nuevos gametófitos (Lee, 2008; Bárbara, 2017).

Monostroma spp.

Género de especies que poseen una lámina monostromática que deriva de una vesícula de 3-5 mm de diámetro, que se rompe por su parte apical y crece en forma de lámina. Las células contienen un plasto acopado con un pirenoide. En general son muy resistentes a cambios de salinidad, pudiendo habitar tanto en aguas marinas como salobres o dulces, siendo especialmente abundantes en zonas estuáricas protegidas del oleaje (Graham et al., 2009).

Monostroma latissimum

Especie más importante a nivel mundial, se distribuye a lo largo de ambientes marinos y estuarinos de América del Sur, Noroeste Europa, Asia oriental, Australia y Nueva Zelanda (Guiry y Guiry, 2020h*).*

Su ciclo de vida es digenético con alternancia de generaciones heteromórficas donde el esporófito es microscópico y el gametófito macroscópico. Las láminas producen gametos isogamos/anisógamos (n) de abril a junio que se fecundan y dan lugar a un cigoto que se fija al sustrato por un pedúnculo basal y se mantiene en estado vegetativo entre 3 y 4 meses (estado Codiolum). La germinación del cigoto está inducida por días cortos y bajas temperaturas; el cigoto se divide inicialmente en cuatro células por intervención de una meiosis y varias mitosis originando numerosas esporas tetraflageladas. Las esporas germinan y desarrollan discos, vesículas y nuevas láminas durante el otoño e invierno.

Monostroma latissimum y la mayoría de las especies de *Ulva*, tienen una alta capacidad de multiplicación vegetativa, ya que fragmentos de láminas son capaces de generar individuos clónicos independientes. En aguas ricas en nutrientes y con cierto hidrodinamismo, este proceso se ve acentuado en forma de mareas verdes.

Orden Ulvales

Constituyen importantes productores primarios de ecosistemas costeros marinos y salobres. Las especies de lechuga marina o ulva son algunos de los representantes más abundantes, ubicuos en las comunidades bentónicas costeras de todo el mundo (Wichard et al., 2015). En este orden se encuentran géneros de algas en las que los talos pueden ser filamentosos, tubulares (antiguo género *Enteromorpha*; actualmente considerado sinónimo de *Ulva*), macizos (*Schizomeris*) o laminares (*Ulva*). Las células son uninucleadas con un plasto acopado o parietal y uno o varios pirenoides (Lee, 2008).

Especies resistentes y adaptables al ambiente. Soportan cambios de salinidad y existen formas tolerantes a alta y baja temperatura. Tienen la capacidad de utilizar el bicarbonato como fuente inorgánica de carbono, presentan altas tasas de saturación

durante la fotosíntesis. Se caracterizan por su rápida reproducción (efemerofíceas) y gran capacidad de fijación rápida de formas flageladas al sustrato (Bárbara 2017).

Presentan un ciclo de vida digenético haplo-diplofásico con alternancia isomórfica. Las dos etapas macroscópicas, el esporófito y el gametófito, pueden originarse de varias formas. Los esporófitos multicelulares diploides pueden originarse por la fusión de dos gametos. Los gametófitos haploides pueden derivar de zooides haploides formados meióticamente o de gametos biflagelados no apareados. Además, los partenosporófitos diploides pueden originarse a partir de gametos no apareados por diploidización espontánea y dar lugar a zooides de un solo tipo de apareamiento, que se convierten en nuevos gametófitos (Hoxmark, 1975; Fjeld y Løvlie, 1976).

Ulva spp.

Género caracterizado por sus láminas conspicuas, de hasta 1 metro de largo, formadas por dos estratos celulares (

Figura 26). El crecimiento es difuso y la morfología de las células es similar en todo el talo, excepto en la base en el que existen células más alargadas y con sustancias de reserva (células rizoidales). Pueden encontrarse láminas adheridas al sustrato rocoso mediante rizoides o en masas flotantes, ya que cuando su lámina se parte puede vivir de forma libre, creando, junto a otras especies del género, las conocidas como “mareas verdes” (Graham et al., 2009).

Existen numerosas especies, generalmente cosmopolitas y tolerantes a amplios intervalos de temperatura y salinidad, y también resistentes a altas concentraciones de nutrientes, motivo por el cual se encuentran presentes en casi todos los océanos y del planeta y son especialmente abundantes en zonas portuarias u otros lugares protegidos como estuarios. Habitan en zona intermareal, en charcas, rocas o sublitoral hasta 20 m.

Ulva posee un ciclo digenético anisógamo, isomórfico, haplo-diplofáfico. El desarrollo y maduración de gametos y esporas se produce en los márgenes de la lámina, lo que confiere la capacidad de liberar estas células aunque parte de la lámina esté dañada. El número de gametos y esporas varía según las especies. Los gametófitos producen varios gametos biflagelados en cada célula del margen que al fusionarse (anisogamia) forman un cigoto tetraflagelado que germina sobre las rocas, formando un filamento que se transforma en una lámina esporofítica diestromática similar a la gametofítica. En el margen de la lámina del esporófito se producen esporas tetraflageladas meióticas haploides que son liberadas al medio y germinan en forma de gametófitos. Los esporófitos son diploides, pero se han detectado casos de poliploidía. Las esporas producen estadíos filamentosos, pluriseriados y tubulares, pero finalmente se colapsan (no rompen) y originan una lámina diestromática. Este crecimiento normal de *Ulva* acontece en presencia de bacterias y otros organismos, sin embargo, en cultivos axénicos se ve alterado, formándose filamentos uniseriados ramificados. La aportación de aislados de bacterias procedentes del medio natural restaura el crecimiento y la morfología característica de *Ulva* (Bárbara, 2017).

Figura 26. *Ulva rigida*.

Orden Caulerpales (=Bryopsidales)

Generalmente habitan en aguas tropicales y subtropicales, de salinidad oceánica. Comprende 26 géneros y 350 especies de estructura sifonal y células multinucleadas. En algunas especies el talo se compone de una única célula multinucleada de gran tamaño (hasta 1 metro). Para evitar la pérdida del citoplasma, la célula genera sustancias (caulerpinas) que "taponan" los puntos de rotura. En algunos grupos, las paredes celulares están formadas por polisacáridos no celulósicos como mananos, xilanos o xiloglucanos. Algunas especies precipitan carbonato cálcico.

El talo no septado se asemeja a una manguera de jardín sin paredes cruzadas que separan el talo generalmente grande, excepto durante la reproducción. Las células tienen numerosos cloroplastos en forma de lente o de forma fusiforme y, en algunos casos, amiloplastos (Lee, 2008; Bárbara 2017). Dos carotenoides, la sifonoxantina y la sifonina, que normalmente no se encuentran en las clorófitas, aparecen en este orden, con la excepción de *Dichotomosiphon*, que solo tiene sifonina (Kleinig, 1969). La celulosa generalmente no es un componente de la pared y se reemplaza por un xilano ligado -1,3 o un manano ligado -1,4 (Parker, 1970).

Los ciclos pueden ser monogéticos diplofásicos o digenéticos heteromórficos.

Caulerpa spp.

Género de algas sifonales de estructura uniaxial y células multinucleadas que presentan una morfología diferenciada en rizoides, ejes rastreros y expansiones laminares, que recuerda a la de plantas vasculares. Los ejes rastreros se extienden varios metros por el sustrato en respuesta gravitatoria positiva. La pared celular está compuesta de un polímero de xilosa y produce evaginaciones hacia el interior de la célula (trabéculas) que le confieren rigidez.

Reproducción holocárpica, ya que todo el contenido celular se transforma en gametos biflagelados anisógamos. La maduración y liberación de gametos se produce de modo masivo y sincrónico, originando numerosos cigotos diploides que germinan y dan nuevos gametófitos. Los gametos se mantienen activos durante una hora y se desplazan unos pocos metros. Después de la fecundación se produce un cigoto que germina rápidamente, pierde rápidamente movilidad y se fija al sustrato.

Se conocen 70 especies en aguas tropicales que se diferencian en la forma de las expansiones laminares (Bárbara, 2017).

Caulerpa lentillifera

Se trata de una especie con el talo compuesto por dos tipos de ejes: ejes rastreros, dispuestos de forma horizontal; y ejes erguidos fotosintéticos, los cuales emergen del anterior y portan ramas esféricas con un aspecto similar a las uvas (caviar verde o uvas de mar). Habita en aguas cálidas, tranquilas y someras (0,5-5 metros) bien iluminadas y con poca turbidez, sobre fondos marinos arenosos o fangosos, en zonas tropicales del Índico y el Pacífico (McHugh, 2003; Graham et al., 2009). Alga estenohalina que vive en salinidades superiores a 30 psu, y que no soporta descensos de salinidad debidas a precipitaciones. Tiene facilidad de acumular metales pesados en cantidades tóxicas para el hombre, por lo que se deben evitar las zonas contaminadas para los cultivos (Bárbara 2017).

Se consume para alimentación humana por su delicada textura, agradable al paladar. Se cultiva en Filipinas y en la costa este de África. Para su cultivo se aprovecha la alta capacidad de propagación vegetativa, mediante fragmentación de plantas y el desarrollo clonal de las mismas.

Codium spp.

Género que incluye más de 50 especies de estructura multiaxial, esponjosa y color verde oscuro (Figura 27). La morfología es muy variable, desde talos dicotómicos (*C. tomentosum*), hasta costrosos (*C. adhaerens*) o esféricos (*C. bursa*). Son comunes las formas constituidas por ejes cilíndricos o comprimidos, ramificados dicotómicamente y sustentados por un disco basal (*C. tomentosum* y *C. fragile*). En estructura interna

contiene numerosos filamentos medulares incoloros que se expanden hacia el exterior en forma de sacos ensanchados (utrículos) en los cuales se concentran cloroplastos discoidales y numerosos núcleos. Los utrículos portan gametocistes en los cuales acontece la meiosis. Las paredes celulares contienen mananos y arabinogalactanos sulfatados, no tienen celulosa.

Su ciclo de vida es monogenético diplofásico. Los gametocistes se disponen en la parte inferior de los utrículos, desarrollándose gametocistes masculinos y femeninos en plantas separadas (dioicas). Los núcleos del gametocistes sufren meiosis y dan lugar gametos biflagelados anisógamos. Los gametos son liberados al exterior, donde se produce la fecundación y desarrollo de un cigoto diploide que germina produciendo nuevos gametófitos masculinos o femeninos (Bárbara, 2017).

Figura 27. *Codium* sp.

Codium fragile

Especie que cuenta con un talo de color verde intenso que al tacto tiene una consistencia esponjosa. Las ramas son cilíndricas y se ramifican dicotómicamente de manera regular. Estas ramas suelen llevar generalmente numerosos pelos, visibles cuando la planta está sumergida. Sus utrículos acaban en punta y son característicos de la especie. Las dimensiones de esta alga oscilan entre los 20 y 30 cm de longitud (Bárbara, 2017).

Esta especie se puede encontrar en el mediolitoral medio, inferior y en el infralitoral. Su área de distribución natural corresponde al océano Pacífico que baña las costas japonesas, aunque en la actualidad presenta una distribución casi globalizada, probablemente debida a la introducción accidental por medio del comercio de especies de mariscos, enganchados los cascos de los barcos, fijadas a cuerdas, cabos y amarres de los mismos barcos, en tanques de lastre; así como por causas naturales a través de ejemplares que flotan libremente en el océano.

Se utiliza como alimento en países orientales como Japón, Corea y China. La composición química de algunos de sus elementos parece tener aplicación en la industria médica.

3.2. TIPOS DE EXPLOTACIÓN

Las interacciones entre el ser humano y las macroalgas parecen remontarse al período neolítico (Dillehay et al., 2008; Ainis et al., 2014; Erlandson et al., 2015), pero el primer registro escrito de su uso humano se origina en China, alrededor de 1.700 años a.c. (Yang et al., 2017). Durante siglos, las poblaciones costeras cosecharon una gran variedad de algas de todos los grupos de algas (Buschmann et al., 2017). Mientras que en Asia el 99% de la producción de algas se obtiene del cultivo (que representa el 93% de la producción mundial en 2013) (FAO, 2018b), la práctica dominante de los países no asiáticos sigue siendo la recolección de existencias naturales.

3.2.1. Recolección del medio natural

Las algas han sido recolectadas desde la antigüedad. Hoy en día, y aunque la recolección natural abarca solo una pequeña porción del mercado mundial de algas marinas, esta modalidad todavía juega un papel importante en muchas culturas. Por ejemplo, la producción europea de macroalgas representó el 1% del suministro mundial de biomasa, con un total de 275.390 t producidas en 2014 (FAO, 2014). La recolección de reservas silvestres suplió aproximadamente el 99% de la biomasa durante este período, lo que pone de relieve la importancia de los recursos de algas silvestres, particularmente para la industria europea de algas.

La metodología de recolección ha ido desarrollándose con los años, aunque depende en gran parte de la importancia económica, finalidad y legislación de cada especie. En función de esto puede ser manual, mecanizada o mixta.

La recolección 'salvaje' de los recursos de algas generalmente ocurre mediante el corte selectivo de rodales monoespecíficos de algas marinas (por ejemplo, algas de roca y kelps) o, alternativamente, la recolección de ejemplares de arribazón, lo que daría como

resultado múltiples especies mixtas, junto con restos contaminantes (Mac Monagail et al., 2017). Actualmente se lleva a cabo en playas y zonas costeras, donde se recogen los arribazones de algas que llegan a las orillas arrastradas por las corrientes o las algas que quedan descubiertas cuando baja la marea, y también en el mar, donde se siguen estrategias diferentes.

Recolección manual

Existen dos estrategias fundamentales:

- Cosecha de especies vivas durante la marea baja. Generalmente se usan herramientas pequeñas y livianas como hoces o guadañas aserradas para cortar *Palmaria palmata* (dileasc) en Escocia, la pequeña herramienta nejiri de corte de kombu (Japón) o el corrán (anzuelo irlandés) utilizado para cortar feamainnbhuí (*Ascophyllum nodosum*) en Irlanda (Mac Monagail et al., 2017).
- Recogida de especies a poca profundidad mediante buceo.

Recolección mecánica

En la década de 1970, cuando la demanda de las macroalgas comenzó a aumentar, los métodos de recolección manual resultaron insuficientes, creando la necesidad de idear nuevos métodos con una mayor capacidad de recolección. Los sistemas utilizados para este tipo de recolección son muy variados, siendo dependientes de la especie que se pretende extraer y del país en el que se vaya a llevar a cabo la acción. La recolección mecánica de algas se ha llevado a cabo en varios países del Atlántico norte durante décadas. Usando una gama de dispositivos y barcos personalizados, la cosecha mecánica ha sido el método elegido en Islandia, Noruega, Bretaña y Maine, EE. UU. (Hallsson, 1992; Ugarte y Sharp, 2001; Vea y Ask, 2011; Mesnildrey et al., 2012). Podemos detallar:

- Recogida de las algas flotantes mediante el uso de barcos equipados con redes de pesca. Ya sea que se utilicen redes, caballos, excavadoras o tractores, la recolección de material de tormenta de las playas. (APROMAR 2014, Mac Monagail et al., 2017).
- Dragado, que arranca las plantas enteras del fondo.
- Dragas para fondos rocosos que no remueven el sustrato.
- Cintas recolectoras que cortan la parte superior de las algas y las transportan hasta el barco.
- Sistemas de raspado acoplados a bombas de succión.
- Dispositivos que separan las plantas vivas más grandes que un determinado tamaño y dejan plantas más pequeñas para que sigan creciendo.
- “Scoubidou”, típico de la recolección de *Laminaria digitata* en Francia. Este se compone de un gancho que gira sobre sí mismo enroscando las algas a su alrededor y haciéndolas ascender por su eje hasta que se recubre totalmente y

es subido a la superficie mediante la ayuda de una grúa (McHugh, 2003; APROMAR, 2014; Kim et al., 2017).

Recolección mixta

La recolección mixta consiste en usar buceadores para cortar las especies en el fondo y tubos succionadores para transportarlas hasta las embarcaciones.

El principal problema que acarrea la recolección es el daño a las poblaciones naturales, ya sea por la sobreexplotación de los recursos naturales para satisfacer la demanda comercial que ha llevado al deterioro de los fondos de algas marinas en algunas regiones (Buschmann et al., 2014) y ha generado preocupaciones genuinas sobre la sobreexplotación de estos recursos naturales (Ugarte y Sharp, 2001), o por el carácter invasivo de alguno de los métodos, que dragan el fondo llevándose por delante la totalidad de la planta, incluidos los rizoides, impidiendo que puedan volver a regenerarse. Un ejemplo de estos sistemas es la cosechadora de succión noruega que fue la causa de una sobreexplotación en la costa canadiense a principios de la década de 1990 (Ugarte y Sharp, 2012), solo ocho años después de su introducción.

En la actualidad son muchas todavía las especies con valor comercial que provienen del medio natural, ya sea de forma única o complementada con cierta producción mediante cultivo. Destaca sobre todo la producción de algas pardas, ya que prácticamente todas las especies usadas en la industria proceden de la recolección (*Macrocystis, Ascophyllum, Laminaria*, etc.), lo que es posible gracias a la abundancia de sus poblaciones naturales, capaces de abastecer la demanda. Además, la industria del agar también está basada fundamentalmente en la recolección, ya que los cultivos de *Gracilaria* y *Gelidium* todavía no han resultado económicamente rentables (McHugh, 2003; Kim et al. 2017).

3.2.2. Cultivo industrial

La historia del cultivo de algas o maricultura es bien conocida entre los maricultores asiáticos (Cordero Jr., 2003). Con el crecimiento de la demanda, la oferta procedente de las poblaciones naturales se hizo insuficiente, creando la necesidad de nuevas estrategias que permitieran aumentar la producción. Hasta la década de 1950, la única especie que disponía de cultivo era *Porphyra*, aunque no tenía un rendimiento óptimo por falta de conocimientos sobre la biología de la misma. A partir de esta década, con el descubrimiento y estudio de los ciclos biológicos de las algas, comienzan a desarrollarse multitud de métodos de cultivos de forma satisfactoria, habiendo llegado hoy en día a conseguir técnicas de cultivo estandarizadas que resultan rutinarias y muy económicas (Andersen, 2005).

Hoy día, más de 30 países están involucrados en la producción de algas marinas (Hayashi et al., 2017), con casi 30 géneros que se cultivan en todo el mundo. Las algas cultivadas comercialmente incluyen especies de 17 géneros: *Agardhiella, Eucheuma, Gelidium, Gigartina, Gracilaria, Hydropuntia, Hypnea*, *Kappaphycus, Meristotheca, Porphyra* (Rhodophyta); *Saccharina, Laminaria, Undaria, Cladosiphon* (Phaeophyta), *Monostroma, Ulva y Caulerpa (Chlorophyta). Agardhiella*, *Gelidium*, *Gigartina*, *Porphyra*, *Saccharina*, *Laminaria*, *Undaria*, *Monostroma* y *Ulva* se cultivan en zonas templadas, y *Eucheuma*, *Gracilaria*, *Hydropuntia*, *Hypnea*, *Kappaphycus*, *Cladosiphon* y *Caulerpa* se cultivan principalmente en los trópicos y subtrópicos (Titlyanov y Titlyanova, 2010).

Decenas de miles de pescadores que viven en comunidades costeras, a menudo en zonas económicamente desfavorecidas, se dedican al cultivo de algas marinas. Este suele ser el caso en el sudeste asiático, especialmente en Filipinas, Indonesia y Malasia y, en menor medida, en Vietnam, Camboya y Myanmar, y en África oriental; por ejemplo, Tanzania (Hurtado et al., 2019).

Los métodos de cultivo de algas marinas varían. Se elige una especie de alga para el cultivo de acuerdo con la ubicación del sitio y las instalaciones de cultivo (en mar abierto, en la tierra, en las aguas frías de una zona templada o en las aguas cálidas de los trópicos), según la productividad y la adaptabilidad de una especie (puede ser de crecimiento lento, de crecimiento rápido, adaptada a la sombra, adaptada a la luz, capaz de crecer en aguas oligotróficas o requerir altos niveles de nutrientes), según las características dimensionales de un ecosistema acuático (tamaño y profundidad) y también sobre factores tales como la irradiación, las condiciones de temperatura, el enriquecimiento de nutrientes, la contaminación, el movimiento del agua y el grado de acción de las olas (Titlyanov y Titlyanova, 2010). También, varían con cada especie, ya que cada una presenta una biología diferente. Conocer la morfología, la adaptación y tolerancia a parámetros físico-químicos y en especial su ciclo biológico, resulta fundamental para poder desarrollar un cultivo con éxito (Andersen, 2005). A pesar de todas estas diferencias, a grandes rasgos se diferencian actualmente dos tipos de cultivos, extensivos e intensivos, según el grado de intervención humana.

La tecnología ha avanzado considerablemente desde el uso de "Hibi" hasta las actuales redes de cultivo popularizadas para *Porphyra*, *Monostroma* y *Ulva*. Para la producción de *Eucheuma*, el uso del sistema monoline, en el que las cuerdas están atadas a postes en ambos extremos, se ha adoptado en Asia (Cordero Jr., 2003).

A pesar de todas estas diferencias, a grandes rasgos se diferencian actualmente dos tipos de cultivos, extensivos e intensivos, según el grado de intervención humana.

Cultivo extensivo

Es el método de cultivo más tradicional. Las algas cultivadas en el sistema extensivo se cultivan en áreas naturales de agua utilizando solo luz, calor, energía de movimiento del

agua y nutrientes disponibles de forma natural (Titlyanov y Titlyanova, 2010). En algunos casos se realizan mejoras del crecimiento de las poblaciones naturales mediante algún tipo de acción humana como por ejemplo, aumentar las superficies de fijación o diseminar plántulas transportando los talos fértiles de un lugar a otro (APROMAR 2014A). En ningún momento se añade fertilizantes como nutrientes.

Según Titlyanov y Titlyanova, 2010 se puede diferenciar los métodos de cultivo extensivo en 2 subdivisiones:

- Aquellos que explotan comunidades de algas naturales con la aplicación de ciertas técnicas para mejorar su productividad, apoyar la estabilidad estructural y protegerlos de los impactos negativos de los factores naturales y antropogénicos. Estos utilizan la planificación estratégica y la estimación de la cosecha máxima permitida que no implicará la degradación de los ecosistemas naturales. El sistema más antiguo conocido, en este caso, es el uso de hibi. Es un sistema que fue introducido por los pescadores japoneses mucho antes de que se conocieran otros métodos de cultivo. El protocolo de cultivo consiste en un sustrato artificial compuesto de haces cortados de bambú o matorral, fijado en áreas poco profundas al que se unen las esporas de *Porphyra* salvaje, una vez liberadas. Después de algún tiempo, los haces de hibi se recogen y se transportan a un área de crecimiento de 0.9–1.5 m de profundidad donde las esporas germinan en cultivos y luego en plantas cosechables.

- Aquellos que introducen cultivos de especies nativas o no nativas en biocenosis naturales, lo que generalmente causa el cambio o la degradación completa de estas biocenosis, que son reemplazadas por comunidades artificiales dominadas por especies de algas cultivadas. Este método combina el cultivo de algas en el fondo y en varios sustratos naturales y artificiales suspendidos en el agua con el máximo uso de los recursos naturales (luz, calor y nutrientes). Estos métodos están destinados a obtener la mayor biomasa de algas posible con el máximo contenido de sustancias útiles.

Cultivo intensivo

Las algas son cultivadas de forma tecnificada mediante un proceso controlado. Existen 3 tipos:

En el mar o estanques "outdoor"

Las especies con reproducción mediante multiplicación vegetativa permiten establecer sistemas de cultivos sencillos. Estos están basados en 2 pasos, la siembra y la recolección del medio natural, anteriormente explicada. La siembra consiste en la fragmentación manual y la resiembra de los fragmentos sobre estructuras sencillas, formadas generalmente con cuerdas y estacas de madera sumergidas en zonas poco profundas.

Su rendimiento es bajo, está condicionado por las variaciones naturales y es muy susceptible a patologías y pandemias, pero es poco costoso a nivel económico (APROMAR 2014). En el caso del cultivo en estanques, las instalaciones se llenan con agua de mar, o agua de mar mezclada con agua de río (o agua de arrozales). Se suelen agregan fertilizantes orgánicos e inorgánicos. Los fertilizantes orgánicos a menudo se introducen en el fondo al preparar estanques para el cultivo de algas. El suministro de agua, el intercambio y la velocidad del flujo de agua están controlados por un sistema de cerraduras. Los estanques pueden estar sombreados con malla de plástico para dar sombra a las algas cultivadas (Titlyanov y Titlyanova, 2010).

Algunas de las especies con capacidad de multiplicación vegetativa que se cultivan de este modo en la actualidad son las algas rojas *Gracilaria, Kappaphycus* y *Euchema,* y las algas verdes *Monostroma* y *Ulva* (Andersen, 2005; Kim et al., 2017). *Gracilaria* se cultiva ampliamente en estanques en China y Vietnam (Titlyanov y Titlyanova, 2010). Este sistema es más adecuado para especies de las cuales es fácil obtener las esporas y que se cultivan en estanques de agua de mar, lagos salinos o salinas abandonadas (Foscarini y Prakash, 1990). Estas especies se cosechan cada 30 a 45 días mediante el uso de dragnets o rastrillos, dejando aproximadamente la mitad de ellas en estanques para su posterior cultivo (Titlyanov y Titlyanova, 2010).

Mixto, tierra-mar

Es el cultivo necesario para especies con ciclos biológicos más complejos, como *Porphyra, Laminaria* o *Undaria* (Andersen, 2005). Las algas son producidas en instalaciones en tierra mediante el control de su fase reproductiva y una vez alcanzan determinado tamaño son trasladadas hasta el mar donde crecen en diferentes estructuras hasta tener el tamaño necesario para su recolección. Es un método más controlado, capaz de adaptarse a las necesidades estacionales de la producción y que además genera cosechas más homogéneas y de mayor calidad. Pero, por otra parte, es más costoso que el anterior y necesita una mano de obra más especializada (APROMAR 2014).

Las técnicas empleadas en este tipo de cultivo son dependientes del ciclo biológico de la especie de interés, poniendo a continuación los ejemplos de las especies citadas anteriormente.

En el caso de *Porphyra*, con un ciclo digenético heteromórfico con esporófito reducido, el cultivo se basa en cuatro fases: (1) cultivo en instalaciones de la fase conchocelis (esporófito poco aparente), (2), siembra de redes con conchosporas (asexuales), (3) desarrollo del gametófito en cultivos exteriores y (4) cosecha. Las láminas fértiles de los gametófitos son seleccionadas del medio natural y se trasladan a las instalaciones en tierra para proceder a la inducción de la liberación de cigotosporas (esporas producidas tras la fecundación). Estas se introducen en tanques con condiciones controladas y en

cuyo interior se disponen conchas a modo de sustrato para la nueva generación. Una vez liberadas, las zigotosporas se asientan sobre el sustrato y germinan, dando lugar al esporófito (fase conchocelis), que se mantendrá en los tanques hasta que madure y libere conchosporas (esporas asexuales), las cuales originarán nuevos gametófitos que al alcanzar determinado tamaño se trasladarán al mar para crecer hasta su recolección (Andersen, 2005; Kim et al. 2017).

Por otro lado, el cultivo de *Laminaria* y *Undaria*, con ciclo digenético haplo-diplofásico heteromórfico con gametófito microscópico, está compuesto también por 4 fases, pero estas difieren un poco con las de la especie anterior, (1) recolección y asentamiento de zoosporas, (2) producción de plántulas, (3) desarrollo vegetativo en el mar y (4) cosecha. La obtención de esporas asexuales haploides se realiza mediante la introducción en tanques de talos fértiles de esporófitos. Una vez liberadas, estas se asientan sobre un sustrato artificial a base de cadenas filamentosas y tiene lugar la germinación, dando lugar a la nueva generación gametofítica. Los gametófitos maduran y liberan gametos, que tras la fecundación darán paso a nuevos esporófitos macroscópicos. Estas nuevas plántulas son mantenidas en tanques hasta que consiguen un tamaño óptimo para ser trasladadas al mar y continuar allí su desarrollo hasta el momento de la cosecha (Andersen, 2005; Kim et al. 2017).

En instalaciones en tierra, "indoor"

El cultivo experimental intensivo de algas en tanques indoor se inició en la década de 1970 en Canadá y Estados Unidos, y algo más tarde en Chile. Es un sistema totalmente controlado y mecanizado que se lleva a cabo de forma completa en instalaciones en tierra. El cultivo en planta requiere insumos de alta potencia y el uso de materiales y equipos costosos y, por lo tanto, es demasiado costoso e inapropiado para la producción a escala comercial de algas marinas, por el momento (Titlyanov y Titlyanova, 2010). Es un método de cultivo que actualmente no consigue grandes rendimientos, siendo utilizado prácticamente solo de manera experimental, aunque se prevé que en un futuro próximo va a tener una gran importancia para la realización de sistemas de cultivos integrados (IMTA) (APROMAR 2014).

3.3. NUEVAS TECNOLOGÍAS DE CULTIVO

El gran aumento de la demanda de macroalgas a nivel global en los últimos años ha obligado al desarrollo de nuevas técnicas de cultivo orientadas a lograr una mayor productividad y poder suplir las necesidades de la población (Escribano 2019).

3.3.1. Etapas del cultivo realizadas en instalaciones terrestres

Selección y modificación de especies

Una de las mayores limitaciones para el crecimiento de la ficocultura es la carencia de estudios genéticos. Gran parte de la biología molecular de las algas está todavía por descubrir, impidiendo la optimización de los procesos de cultivo industrial como ya se lleva a cabo por ejemplo en la agricultura terrestre.

Recientemente se han hecho grandes avances en este campo gracias a la secuenciación de los genomas nucleares de muchas especies de interés comercial (Mikami, 2014a), lo que ha permitido a su vez el desarrollo de técnicas de transformación genética con potencial para poder mejorar caracteres de interés para el cultivo a nivel industrial, como por ejemplo resistencia a temperatura, enfermedades, contenido en proteínas, etc. (Mikami, 2014b).

Criaderos y reproducción

Las perspectivas de futuro para la utilización de macroalgas en la industria energética prevén un aumento todavía mayor de la demanda de las mismas. Este hecho ha desencadenado una serie de investigaciones tratando de conseguir un aporte mayor de plántulas durante todo el año.

Una de las especies emergentes en los cultivos de todo el mundo por su potencial como biocombustible es *Ulva*, cuyos métodos tradicionales de cultivo no consiguen satisfacer las necesidades numéricas de la industria. Sin embargo, en los últimos años, se han ido desarrollando nuevas técnicas de producción capaces de generar un gran número de individuos minimizando el espacio de cultivo.

Una de las técnicas más prometedoras es el uso de protoplastos (células sin pared) en lugar de las células reproductivas. Los talos se fragmentan y se tratan con una solución enzimática, dando lugar a la liberación de los protoplastos, que son cultivados en placas de Petri hasta que comienzan a germinar, momento en el que se traspasan a matraces, para finalmente, cuando alcancen un tamaño adecuado, ser trasladados al lugar definitivo de cultivo, que puede ser tanto en tierra como en el mar. Un primer experimento utilizando este método reporta la obtención de aproximadamente 10^6 plántulas a partir de tan solo 100 mg de peso fresco en un espacio de 0,15 m^2. Además, se determinó también la posibilidad de reutilizar la misma solución enzimática hasta en 5 ciclos de producción, lo que, además de mejorar la producción, contribuye a aminorar los gastos económicos (Gupta et al. 2018).

Por otro lado, se investiga también la posibilidad de prescindir de estructuras superficiales para la fijación, como redes o cuerdas, en busca de estructuras que permitan el cultivo en libre flotación, ampliando las opciones de cultivo a espacios más reducidos como tanques terrestres, canales o estanques. Uno de los métodos más factibles es actualmente el desarrollado por Praeger y de Nys (2017) utilizando biobolas para el asentamiento de las células germinales. Las algas crecen fijadas a estos sustratos móviles y una vez cosechadas, las biobolas son extraídas de forma mecanizada para volver a ser utilizadas, por lo que además de disminuir el espacio de cultivo, esta técnica consigue también disminuir el impacto medioambiental al generar menos residuos.

Cultivo indoor

Otra de las carencias de la ficocultura es el bajo desarrollo de sistemas viables económicamente para el cultivo en interior. Aunque los estanques y tanques se emplean ampliamente como sistemas de cultivo, los costos fijos y variables de la construcción, operación y mantenimiento siguen siendo un punto débil de las plantas de cultivo de macroalgas. Además, el gran espacio necesario para producir cantidades de algas económicamente viables durante todo el año también ha impedido una mayor expansión del cultivo de macroalgas en tierra (Sebök et al., 2017). Por todo esto, a pesar de la existencia de numerosos cultivos interiores a pequeña escala, todavía no se ha llevado ninguno a nivel industrial.

En los últimos años, las investigaciones sobre estos métodos han ido en aumento, desarrollando variadas técnicas basadas en el cultivo a pequeña escala con el objetivo de realizar estudios de viabilidad económica para su paso a una escala mayor. Se han creado sobre todo nuevas estructuras de cultivo que permiten ahorrar espacio sin afectar a la productividad. Destacan por ejemplo los tanques cerrados en forma de anillo y de tambor de lavadora (Figura 28) creados por Sebök et al. (2017), que permiten minimizan la cantidad de agua y energía necesarias, ya que contienen poco volumen y aprovechan las propias corrientes generadas por el agua para realizar los movimientos de agitación. O los desarrollados por Sato et al., (2016), basados en un sistema de cultivo en flotación en tanques cilíndricos de 2.000 l de capacidad (**Figura 28**), con posibilidad de regular la temperatura, la intensidad lumínica y la velocidad del agua, distribuida al tanque a partir de una estructura cónica central.

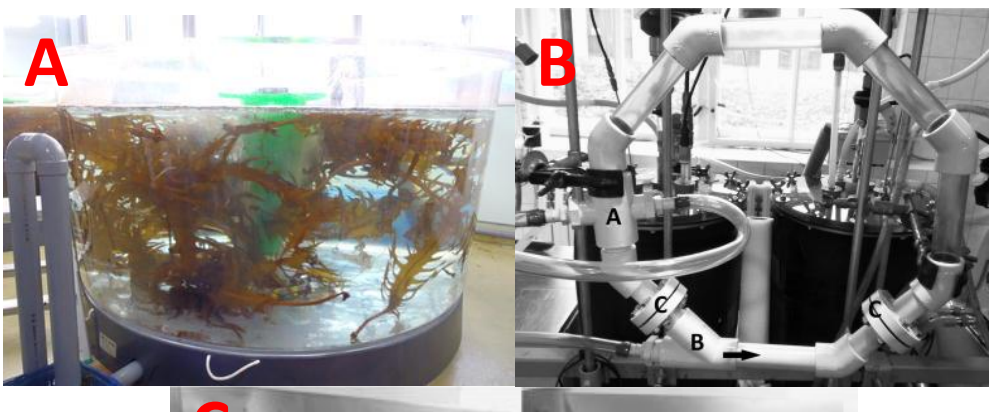

Figura 28. A: Tanques cilíndricos de flotación libre creados por Sato et al. 2016. B-C: Tanques en forma de anillo y tambor de lavadora (cerrado a la izquierda y con la tapa abierta a la derecha), respectivamente, diseñados por Sebök et al. 2017.

Por otro lado, aunque mucho más tradicional, surgen también estructuras diseñadas para un cultivo a mediana o gran escala en invernaderos utilizando un sistema semicerrado sin tanques, con estructuras sencillas como la "bolsa de bolsas" o recipientes plásticos apilados, que abre la posibilidad de generar cultivos más económicos o a escala experimental, en zonas donde el espacio es reducido (Mendoza et al. 2018). Con el objetivo de cultivar a pequeña escala, destacan también los fotobiorreactores de macroalgas diseñados por Chemodanov et al. (2017) para cultivos en entornos urbanos sin necesidad de estar en las proximidades del mar. Estas estructuras, basadas en los diseños de fotobiorreactores de microalgas, presentan un sistema de recirculación de agua continuo y una iluminación natural, conseguida mediante la colocación de paneles de tubos solares simulando la forma de una pantalla de luces led (Figura 29).

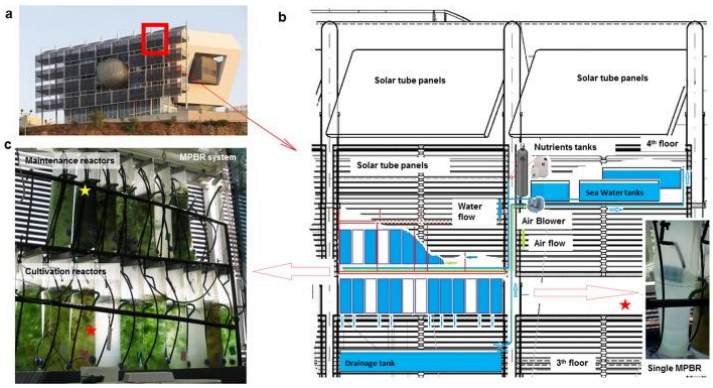

Figura 29. Fotobiorreactores para macroalgas diseñados para entornos urbanos por Chemodanov et al. (2017).

3.3.2. Cultivo realizado en el mar "outdoor"

Uno de los objetivos de la acuicultura en los últimos años ha sido la expansión a zonas de mar abierto, donde se abre una enorme posibilidad de cultivo, tanto por la cantidad de superficie disponible como por la reducción de conflictos con otros sectores que explotan la costa. Sin embargo, el cultivo lejos de la costa presenta una serie de retos para la ficocultura que deben ser superados para poder conseguir modelos de cultivo eficientes.

Las condiciones de mar abierto son extremas, con fuertes oleajes y tormentas, por lo que uno de los principales requisitos de las estructuras debe ser su tolerancia y resistencia a estas condiciones. Aunque actualmente no existe prácticamente ningún cultivo en mar abierto, ya se han llevado a cabo numerosos proyectos a escala piloto de diseño de estructuras resistentes, como el de Oirschot et al. (2017), consistente en una estructura permanente anclada en el fondo marino en la que se disponen, de forma superficial, 1 o 2 tiras de palangres horizontales que a su vez sirven de base para las cuerdas de cultivo, únicos componentes cambiados cada año (**Figura 30**). O el propuesto por Chung et al. (2015), en el que se utilizan estructuras tipo TLP (Tension-legplatform) para crear módulos de cultivo añadiendo un entramado de cuerdas en direcciones perpendiculares simulando el diseño de un tablero de ajedrez. Cuenta además con un sistema automático de siembra y cosecha y con aparatos de teledetección y monitoreo a distancia que facilitan las labores y minimizan los viajes de los responsables hasta las estructuras.

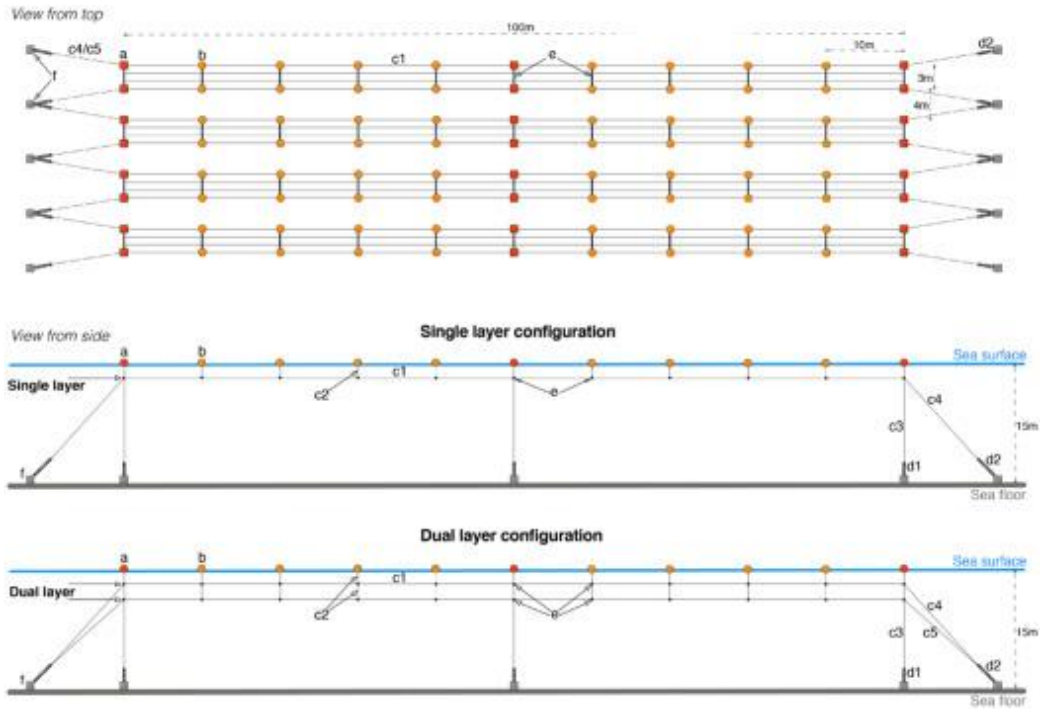

Figura 30. Sistema de cultivo en mar abierto basado en sistema de palangres, vista superior y lateral (Oirschot et al. 2017).

Otra de las dificultades que nos encontramos en este tipo de cultivos son las limitaciones de nutrientes. Un buen suministro de nitrógeno es uno de los mayores requisitos para el cultivo de macroalgas, pero hay zonas en las que este suministro es escaso, y dada la imposibilidad de añadirlo de forma artificial, deben estudiarse otros métodos para conseguir un suministro continuo y suficiente de los nutrientes (Zollmann et al., 2019).

Una de las novedades surgidas en los últimos años consiste en el bombeo de agua de mar profunda, rica en nutrientes, hacia la zona eufótica en la que tiene lugar el cultivo. Actualmente se encuentran en funcionamiento dos proyectos, Takumi y OTEC, en Japón y Hawai respectivamente, que demuestran la posibilidad de bombear agua de las zonas profundas del Océano Pacifico hacia la superficie por medio de bombas que funcionan gracias a la energía solar (Buschmann et al., 2017). Pero además, existen numerosas simulaciones en las que se va un paso más allá aprovechando la diferencia térmica entre el agua de las profundidades y la de la superficie como fuente de energía, lo que permitiría cubrir los gastos energéticos del bombeo y crear energía excedente aprovechable para otras actividades (Zollmann et al., 2019).

Al margen de esta colonización hacia nuevas áreas de cultivo, la tecnología de los cultivos exteriores cercanos a la costa también sigue creciendo. Siendo una de las prioridades desarrollar sistemas autónomos, productivos y a su vez respetuosos con el medio ambiente. Alguna de las propuestas que se están poniendo en marcha los últimos años son: (1) La utilización de textiles reciclados, sintetizados a partir de las propias macroalgas (AtSeaNova 2019); (2) Sistemas de asentamiento en formas de lámina de macroalga de gran tamaño que permite una fácil cosecha y un movimiento más o menos libre con un solo amarre en el fondo que minimiza los daños ocasionados por las corrientes (Buck et al., 2017); (3) Sistemas de cultivo y cosecha para el cultivo de kelp en Noruega en el proyecto SPOke (Macrosea), totalmente automatizados diseñado basándose en las tecnologías del cultivo del salmón. Formada por estructuras circulares, en cuyo interior se sitúa una boya de recolección de datos a tiempo real, con cuerdas formando numerosas veces su radio, insertadas y cosechadas por una grúa mecánica.

3.3.3. Sistemas de Acuicultura Multitrófica Integrada (IMTA)

El aumento del cultivo de peces provoca, en las zonas donde se realiza la actividad, un aumento de contaminación debido al excesivo aporte de materia orgánica al que están sometidas. En sistemas a pequeña escala esta contaminación puede tratarse mediante la mezcla y dispersión de los sedimentos para su transporte con las corrientes, pero a gran escala estos mecanismos no resultan eficientes, con los efectos negativos que ello

conlleva. Además, en el caso de las instalaciones terrestres, es el agua de los efluentes la que lleva esta alta carga de nutrientes, por lo que, para minimizar los efectos de la contaminación de las zonas adyacentes, deben ser tratadas por algún mecanismo capaz de reducir las cantidades de materia orgánica.

Con el objetivo de mitigar estos efectos adversos surge la conocida como Acuicultura Multitrófica Integrada (IMTA), que se basa en el cocultivo de especies alimentadas de forma artificial (por ejemplo peces o camarones), junto con especies extractivas alimentadas por suspensión (bivalvos) o por depósitos (pepinos de mar) y macroalgas, capaces de alimentarse de los efluentes orgánicos e inorgánicos generados por las anteriores. Este sistema se crea para aumentar la sostenibilidad de los cultivos, pero para poder llevarlo a cabo y que sea económicamente viable, todos sus componentes deben tener valor comercial o agregar algún tipo de valor a alguno de los demás.

Los sistemas IMTA pueden ser utilizados para todo tipo de cultivos, tanto en el mar (Fang et al., 2016; Viera et al., 2016) como en instalaciones terrestres (Castelar et al., 2015; Neori et al., 2017) y a pesar de que el término fue acuñado de 2004, esta práctica lleva realizándose de forma tradicional en muchos lugares del mundo desde mucho tiempo antes, como por ejemplo, los cultivos de abalón-macroalgas realizados en China desde la década de 1980 (Fang et al., 2016).

La perspectiva de futuro para este tipo de sistemas es muy prometedora, ya que el grado de concienciación ambiental y las limitaciones impuestas por leyes ambientales en prácticamente todos los países donde se realizan cultivos industriales impulsan a los productores a inclinarse por sistemas más sostenibles como los que permiten desarrollar los sistemas IMTA.

Actualmente, al igual que sucede en el cultivo de algas, la expansión de la acuicultura a mar abierto es uno de los grandes objetivos de investigaciones a lo largo de todo el mundo, ya que permitiría reducir los impactos ambientales y ofrecería nuevas áreas para sustituir a aquellas amenazadas por el cambio climático. Uno de los mayores retos que se les presenta en este campo es, precisamente, el cultivo de las algas, ya que como se ha comentado con anterioridad, tanto las algas como sus estructuras de cultivo tradicionales son sensibles a las fuertes corrientes (Buck et al., 2018). Sin embargo, la gran cantidad de estudios centrados en el desarrollo de nuevas estructuras compatibles con el cultivo de algas en sistemas IMTA está dando sus frutos, descubriendo nuevas técnicas y probando la viabilidad de diferentes especies en mar abierto. Alguno de los ejemplos más actuales son el uso de estructuras circulares de 1 solo amarre, propuesto por Buck et al., (2018), o el cultivo de *Gracilaria* spp. sobre cuerdas de nylon colgadas en horizontal y protegidas de los consumidores salvajes mediante redes de malla, utilizada por Largo et al., (2016) en cultivos piloto en mar abierto en Filipinas.

Por otro lado, los sistemas IMTA también son prometedores para los cultivos en tierra, donde el sistema se basa en el cultivo de algas utilizando los efluentes procedentes de

plantas de cultivo de peces. Sin embargo, a diferencia de los cultivos en mar abierto, en sistemas IMTA costeros o en estructuras terrestres, la característica más importante para elegir la especie será su capacidad de biofiltración, también importante para los cultivos en mar abierto, pero mantenida en un segundo plano por la capacidad de adaptación a condiciones adversas. De este modo, las especies más utilizadas son *Ulva* y *Gracilaria*. Estos sistemas IMTA terrestres son menos abundantes, pero presentan un gran potencial, permitiendo el cultivo en cadena de varias especies de algas utilizando el efluente de 1 sola planta de cultivo o utilizando las macroalgas para mejorar las condiciones del agua de los sistemas RAS, aprovechando a su vez el valor económico de su comercialización (Castelar et al., 2015; Ashkenazi et al., 2019).

3.4. SITUACIÓN ACTUAL DE LA EXPLOTACIÓN

3.4.1. España y Galicia

Al igual que en la mayor parte de Europa, en España los recursos algológicos son explotados fundamentalmente por métodos extractivos para su utilización en la industria de los ficocoloides, aunque en los últimos años se ha generado una nueva industria basada en productos para la alimentación humana directa.

Aunque ya desde la antigüedad las poblaciones costeras españolas se servían de las algas para usos agrícolas, no fue hasta finales del siglo XIX cuando surgió la primera explotación industrial con fines comerciales para la obtención de compuestos como el yodo y la potasa. Más tarde, a mediados del siglo XX, tras la evolución de la industria, comienzan a explotarse las especies ricas en ficocoloides, actividad mantenida hasta la actualidad. Desde entonces, la industria ha crecido y se ha ido adaptando a nuevos tiempos, pero aun siendo así, no es un sector todavía muy explotado en España, aunque se espera una progresión en los próximos años, basada, fundamentalmente, en el desarrollo de la Acuicultura Multitrófica Integrada (IMTA) (Tasende y Peteiro 2015).

Actividad extractiva

De entre todas las comunidades costeras, destacan sobre todo las explotaciones producidas en el norte, tanto en la costa cantábrica (Asturias, Cantabria y Euskadi) como en la atlántica (Galicia). En el resto del país, la explotación de estos recursos es insignificante, aunque en los últimos años ha comenzado a expandirse en Andalucía.

La costa andaluza presenta dos zonas bien diferenciadas, la costa mediterránea y el litoral atlántico. Los recursos algológicos de ambas zonas han sido caracterizados en los últimos años con el objetivo de determinar la existencia de alguna especie con potencial

de explotación. Los resultados determinaron que no existen bancos naturales lo suficientemente abundantes como para poder ser usados como recursos para la industria, aunque sí se identificaron especies con potencial interés económico, destacando: en la costa mediterránea las especies *Asparagopsis armata* y *Gelidium spinosum*, con poblaciones más o menos abundantes y una gran riqueza en compuestos bioactivos; y en la atlántica especies de *Ulva* con interés para la industria alimentaria. En cuanto a las primeras, pese a su abundancia en comparación con el resto del litoral, la cantidad no se considera suficiente como para poder establecer una cosecha con fines industriales, mientras que por otro lado, las algas para alimentación humana sí que han empezado a recolectarse en pequeñas cantidades.

En cuanto a las costas del norte, el recurso más importante es el agarófito *Gelidium corneum* (=*G. sesquipedale*) u "ocle", recolectado principalmente en Asturias. Esta especie constituye la mayor fuente de materia prima para la industria de transformación de macroalgas en España, situando al país como primer productor mundial en la industria del agar y otorgándole el primer puesto en cuanto a la cantidad de cosecha de esta especie, perteneciéndole el 44% del 65% del total de la cosecha mundial, aunque actualmente sus poblaciones naturales se encuentran en retroceso y catalogadas como vulnerables debido a los efectos del cambio climático y procesos antropogénicos, llegando incluso a haberse prohibido su recolección en algunas zonas, como el País Vasco (Martínez et al., 2015).

Esta especie de algas rojas, perteneciente a la familia *Gelidiaceae* habita sobre sustratos rocosos en zonas del litoral inferior e infralitoral hasta los 25 m de profundidad, formando extensas praderas a lo largo del Atlántico Norte occidental, especialmente en las costas cantábricas, donde se cosecha mediante la recogida de arribazones o campañas de extracción.

Los arribazones se recogen en otoño-invierno, cuando el oleaje fragmenta las plantas y transporta los fragmentos hacia las orillas. La calidad de la materia prima obtenida mediante este método no es muy buena, ya que se encuentra mezclada con otras especies y con diversos objetos extraños como arena, hojarasca, plásticos, etc. Por este motivo, el agar producido con ellos tiene un bajo valor comercial y es utilizado fundamentalmente para procesos industriales. Por otro lado, las campañas de extracción se basan en la cosecha manual por parte de buceadores a bordo de embarcaciones pesqueras con una fuente de aire suministrada desde la superficie. Las algas son arrancadas y metidas en sacos de red, los cuales se izan a la embarcación mediante un cabo.

Otras especies importantes en esta zona son las carragenófitas (conocidas comúnmente como liquen) *Mastocarpus stellatus*, *Chondrus crispus* y *Gigartina pistillata,* explotadas principalmente en Galicia, donde se recolecta aproximadamente el 80% de la producción nacional mediante campañas de extracción, tanto por buceadores, de

manera similar a *G. corneum*, como a pie, realizando el arranque de las plantas durante la bajamar de forma manual o con ayuda de utensilios agrícolas.

Por último, como ya hemos comentado, empieza a expandirse la cosecha de algas para la alimentación humana. Las especies cosechadas para este fin son muy variadas, pero actualmente las más demandadas son *Laminaria ochroleuca, Saccharina latissima, Ulva spp., Codium spp., Porphyra spp., C. crispus, Saccorhiza polyschides* y *Osmundea pinnatifida.* Los métodos de recolección para estas algas se llevan a cabo mediante campañas de extracción similares a las anteriores, pero como es materia prima para un uso directo, estos deben ser más cuidadosos, lo que obliga a una mayor especialización de los recolectores.

La competencia de la ordenación y gestión de las explotaciones corresponde actualmente a las Comunidades Autónomas, en las cuales se han establecido una serie de leyes y decretos que incluyen las algas como materia regulatoria (Tasende&Peteiro 2015). Abordaremos a continuación, a modo de ejemplo, el reglamento de las comunidades más productivas de España: Asturias y Galicia.

- En Asturias la Ley 2/1993 de pesca marítima en aguas interiores y aprovechamiento de recursos marinos incluye un artículo (Capítulo V-Artículo 34) sobre la extracción de algas de fondo que indica que este proceso deberá llevarse a cabo mediante embarcaciones de la 3ª lista (pesca profesional). Por otro lado, en cuanto a la recogida de arribazones, el Decreto 82/1988 del 7 de julio regula la recogida, extracción y circulación de algas en el Principado de Asturias.
- Galicia: El Decreto 423/1993 del 17 de diciembre (DOGA nº 13 del 20 de enero de 1994) establece que la recolección de las algas está sujeta al Plan General de Explotación Marisquera, un conjunto de normas y orientaciones destinadas a regular y programar la recolección de algas con carácter anual. Limitando esta actividad solo a personas y embarcaciones en posesión del permiso de explotación.

  Los planes son redactados y enviados por las entidades interesadas y aprobados por la Xunta y en ellos se especifica: número de personas y embarcaciones, días de actividad, topes por persona y día y normas de comercialización y vigilancia (Tasende y Peteiro 2015).

  En el año 2019 hay aprobados 24 planes, 18 para cofradías de pescadores y 6 para empresas de diversos sectores (http://www.pescadegalicia.gal/).

  Por otro lado, los arribazones son de recogida libre, su recolección no está regulada (APROMAR, 2014).

Por último, cabe destacar el preocupante declive de algas rojas y grandes Laminariales en la costa Noroeste de la Península Ibérica en los últimos años, lo que crea cierta incertidumbre sobre la capacidad de estas áreas para mantener estos niveles de explotación. Los efectos del cambio climático y el aumento de la temperatura del agua

se dejan notar sobre las poblaciones naturales, siendo más afectadas las especies de aguas templado-frías, que se han ido desplazando hacia zonas profundas más frías, llegando algunas incluso a desaparecer de forma local, de tal forma que, por ejemplo especies típicas del cantábrico están apareciendo en los últimos años con mayor frecuencia en las costas gallegas (Martínez et al., 2015).

Cultivo

Las primeras experiencias de cultivo en España se realizaron a finales del siglo XX utilizando especies carragenófitas y agarófitas, motivadas por la alta demanda de ficocoloides del momento. Además, al mismo tiempo, la planta de Santander del Instituto Español de Oceanografía (IEO) comienza a desarrollar sistemas de producción de semilla de *Undaria pinnatifida*, una especie alóctona de gran interés comercial introducida accidentalmente en nuestras costas.

La segunda iniciativa, apoyada también por las universidades de Santiago de Compostela y A Coruña, siguió desarrollándose, dando lugar a una serie de cultivos experimentales a lo largo de las costas gallegas, que motivaron a su vez, el desarrollo de otros proyectos empresariales de cultivo de algas para la alimentación (Tasende y Peteiro 2015).

Actualmente es Galicia la comunidad autónoma que destaca en esta actividad, aunque sigue sin ser muy abundante, contando con una sola empresa activa, Porto-Muiños S.L., dedicada al cultivo y producción de algas para la alimentación y que en asociación con Algafres ha montado una planta de cultivo de en tanques en tierra en el puerto de Sada (A Coruña), planta pionera en nuestro país (APROMAR, 2014).

Por otro lado, en Asturias existe también alguna experiencia de cultivo, tanto cultivos experimentales con *U. pinnatifida* como alguno industrial, actualmente limitados a la producción de *Palmaria palmata* (Gobierno de España, 2014).

Nuevas tecnologías de explotación

Al igual que en el resto del mundo, las nuevas investigaciones sobre cultivos pasan en España por el desarrollo de sistemas de acuicultura multitrófica integrada (IMTA). En este sector destaca el proyecto JACUMAR dirigido por la Dirección General de Pesca y Acuicultura de la Junta de Andalucía, “Acuicultura integrada: experiencia piloto para el desarrollo de sistemas de cultivo multitróficos”, realizando entre 2008-2011 y que exploró las posibilidades del desarrollo de cultivos IMTA en las distintas regiones participantes, y en el caso de Galicia tanto sistemas en mar abierto como sistemas en tierra. Además, al finalizar, la Consellería do Medio Rural e do Mar de la Xunta de Galicia financió una acción especial de investigación (2013-2014) profundizando un poco más en la misma temática (APROMAR, 2014).

Por otra parte, en los últimos años, diferentes grupos de investigadores están centrándose en el desarrollo de sistemas IMTA, en los que los cultivos de macroalgas marinas tienen un papel relevante, con vistas a contribuir a la diversificación y sostenibilidad de la acuicultura gallega. Entre las instituciones investigadoras se encuentran por ejemplo: el Centro de Investigacións Mariñas (CIMA), el Instituto Galego de Formación en Acuicultura (IGAFA) y el equipo de algas marinas del grupo de investigación en Biología Costera (BioCost) de la Universidad de Coruña (APROMAR, 2014; Freitas et al., 2016).

Por otro lado, dada la poca variedad de técnicas de cultivo establecidas hasta ahora, la búsqueda de nuevos métodos, tanto terrestres como acuáticos es otra de las líneas de investigaciones más relevantes del momento.

En este campo destacan las empresas gallegas Algafrés S.L., centrada en el desarrollo de cultivos en tanque a escala piloto con fines industriales de diversas especies de macroalgas orientadas al sector de la alta gastronomía, y Porto-Muiños S.L. (única con concesión administrativa de tipo experimental para el desarrollo de cultivos), que junto con investigadores de la Universidad de A Coruña sigue desarrollando nuevas técnicas de cultivo en aguas de Galicia para algas destinadas al consumo, en particular de *U. pinnatifida* (“wakame”) y *S. latissima* (“kombu de azúcar”) (APROMAR, 2014).

3.4.2. Portugal

Los primeros registros de uso de algas en Portugal datan del siglo XIV, donde eran cosechadas de las playas en forma de arribazones para usos agrícolas. Siglos más tarde, durante la Segunda Guerra Mundial da comienzo la industria de los ficocoloides, motivada por la escasez de agar japonés, que potencia la explotación en los países occidentales. En este momento, la abundancia y calidad de las algas portuguesas convierten al país en uno de los más relevantes productores mundiales, aunque no es hasta 1960 cuando surgen las campañas de recolección por buceo, las cuales comienzan a regularse a partir de 1967, quedando definidas las zonas de cosecha y el número de barcos y cosechadores, consiguiendo un mayor control sobre estas actividades extractivas.

En términos de biogeografía de algas, Portugal comprende especies de tres regiones biogeográficas: el Mediterráneo, el Atlántico (Portugal continental) y el Macaronesio (archipiélagos de las Azores y Madeira). Existe una marcada transición entre las regiones de agua "fría" y "cálida", de tal forma que las algas marinas en el norte de Portugal son similares a las de las costas de Europa Central (Bretaña, sur de las islas británicas) y las del sur son muy diferentes, con una marcada influencia de las especies mediterráneas y africanas (Gaspar et al., 2019).

Sin embargo, en las últimas décadas esta distribución ha sufrido importantes cambios, siguiendo una tendencia global en la que las especies de agua fría se retiran hacia el polo

y las de aguas cálidas colonizan nuevas áreas de menores temperaturas. De tal forma que las especies del sur se han ido desplazando hacia la zona norte continental, que a su vez ha ido adquiriendo características típicas de aguas más cálidas, siendo sus especies, sobre todo los kelps, desplazadas hacia zonas de aguas más frías y profundas (Berecibar 2011).

Actividad extractiva

Como ya hemos dicho, las algas llevan cosechándose en Portugal desde por lo menos el siglo XIV. Inicialmente eran usadas como fertilizantes, pero a principios del siglo XX comenzaron a ser sustituidas por fertilizantes químicos, reduciéndose su explotación a pequeñas zonas del norte del país. Aunque actualmente ha aumentado de nuevo el interés de algunos agricultores por el uso de las algas como fertilizantes, ya que han demostrado conseguir unos mejores resultados en el cultivo de ciertas especies, como por ejemplo la uva.

Las algas de interés para esta actividad se agrupan normalmente en 2 mezclas, conocidas comúnmente como "moliço" y "sargaço".

El "moliço" es una mezcla de algas y pastos marinos, recolectados en la laguna de Ría de Aveiro, formada principalmente por las algas *Ulva*, *Rhizoclonium y Gracilaria* y las angiospermas marinas *Zostera, Ruppia* y *Potamogeton*. La recolección de estas especies se realizaba de forma tradicional usando rastrillos manuales de los barcos conocidos como "moliceiros", especialmente diseñados para esto. Esta mezcla tuvo una gran importancia económica en el pasado, llegando a registrarse, en el año 1911, 1.500 embarcaciones con este fin. Sin embargo, ya a finales del siglo XX, quedaban solo entre 6 y 10, de las cuales hoy en día no queda ninguna en activo.

Por otro lado, el "sargaço" es también una mezcla de diferentes especies, pero en este caso solo de algas, tales como: *Saccorhiza, Laminaria, Fucus, Codium, P. palmata* y *C. crispus*. El material se recoge de las playas durante el verano y se seca de forma natural en tierra, ya que se comercializa seco. Esta actividad es tradicional en el norte de Portugal y todavía se puede ver en las regiones de Viana do Castelo y Póvoa do Varzim. Aunque, dado que la venta del material suele ser directa a los agricultores, no hay datos de cosecha disponibles, se sabe que en 2009 había 15 recolectores de "sargaço" ("sargaceiros") registrados en Viana do Castelo y en 2013 un total de 20 en todo el país (Gaspar et al., 2019).

A pesar del declive de la industria de los fertilizantes, la explotación de macroalgas se diversificó y comenzaron a extraerse para otros fines, destacando la industria de los ficocoloides. Esta industria se instaura en Portugal a principios de la década de 1940, con la cosecha manual del agarófito *G. corneum*, que fue exportado hasta 1960, cuando se prohibió la exportación para impulsar la industria portuguesa del agar, coincidiendo en el tiempo con el comienzo de la recolección con buzos.

La primera fábrica de agar en Portugal se construyó en 1947, y en 1971 ya había seis, cuatro en la zona continental y dos en las Azores, lo que hizo que Portugal se convirtiera en uno de los principales productores mundiales de agar. Sin embargo, contra todo pronóstico, la producción comenzó a disminuir y nunca volvió a resurgir, quedando actualmente solo una empresa en operativo, IBERAGAR S.A.

Actualmente, las principales algas recolectadas en Portugal con fines industriales son *G. corneum*, en la costa continental, *Pterocladiella capillacea*, cosechada en las Islas Azores y, en menor medida, *Gracilaria spp*. *G. corneum* se cosecha en la bahía de São Martinho do Porto de forma manual, por buzos acompañados de embarcaciones especializadas para la actividad. La cosecha comercial de *P. capillacea* en las Azores fue llevada a cabo por buzos y buceadores (en aguas poco profundas), y complementada con la recolección de arribazones en playas después de las tormentas. Su cosecha estuvo paralizada durante años, pero en 2013 el Gobierno Regional de las Azores puso en marcha una iniciativa para revitalizar el sector y volvieron a explotarse nuevamente. Esta cosecha se lleva cabo actualmente en cuatro de las nueve islas del archipiélago, Islas Faial, Graciosa, Terceira y São Miguel y es vendida casi exclusivamente a dos empresas, IBERAGAR S.A. y Terceira Algae Export TAE Unipessoal, Lda (Gaspar et al., 2019).

Cultivo

El cultivo de algas ha sido objeto de investigación durante los últimos 20 años, lo que impulsó el inicio del cultivo de algas marinas en Portugal. Estas han sido cultivadas bajo el concepto de IMTA en Ílhavo (región de Aveiro) en una granja de lubina y dorada por la empresa ALGAplus.

ALGAplus comenzó sus actividades en 2012 y desde entonces ha lanzado las marcas ALGA+ (algas a granel), Tok de Mar (productos alimenticios) y SeaOriginals (productos de bienestar). Las especies que produce son mayormente *Ulva spp*. y *Porphyra spp*., de las que controla todas las etapas de producción, desde la planta de incubación hasta el embalaje final. Aunque también comercializa, en menor medida, especies *como C. crispus, Gracilaria spp., P. palmata*, *Codium tomentosum* y *Fucus spp.*

Además, actualmente, la empresa Aquazor - Aquicultura e BiotecnologiasMarinhas dos Açores, S.A, tiene licencias para comenzar a cultivar algas marinas alrededor de diferentes islas del archipiélago, aunque este proyecto todavía no ha comenzado (Gaspar et al., 2019).

Nuevas tecnologías de explotación

La limitada explotación de macroalgas en Portugal limita también las investigaciones producidas en este campo.

En cuanto a la acuicultura multitrófica integrada, objeto de investigación a nivel mundial, Portugal cuenta ya con alguna granja funcional con producción activa de macroalgas (ver apartado Cultivo).

4. COMPOSICIÓN Y UTILIZACIÓN

Las propiedades de las algas son conocidas por el hombre desde hace miles de años, siendo en los países orientales donde se reportan datos de su uso más primitivo, datando del año 2700 a. C. el primer manuscrito en el que se incluye el uso de algas en procedimientos medicinales. Además, en las antiguas Grecia y Roma se valían de las mismas para la realización de ungüentos medicinales y cosméticos o para la alimentación del ganado.

A nivel histórico, el mayor uso de las algas siempre ha sido el uso directo para la alimentación humana, siendo especialmente relevante en los países orientales, donde existe una amplia cultura tradicional de consumo de estos productos. Actualmente, tres cuartas partes de las algas cosechadas se destinan a este fin en todo el mundo, ya que el aumento de la emigración desde países orientales hacia occidentales también ha desplazado el interés de las algas en la gastronomía, siendo cada vez más apreciadas tanto por su valor nutricional como por sus características organolépticas.

Sin embargo, a pesar de esta tendencia actual, el uso tradicional de las algas en países orientales se ha basado fundamentalmente en su valor como materia prima para la industria o en su uso agropecuario.

Las algas comienzan a ser un recurso de interés para la industria a partir del siglo XVII, utilizadas fundamentalmente para la extracción de compuestos inorgánicos como sosa, potasa o yodo, y pronto reemplazadas por otros recursos más rentables. Por otro lado, es en ese mismo siglo es cuando en Japón se descubren las propiedades gelificantes de uno de los más importantes ficocoloides procedentes de las algas, el agar, al cual le sigue la carragenina, en el siglo XIX, y por último los alginatos que comienzan a comercializarse como agentes espesantes a partir de 1930. Al contrario de la industria de extracción de compuestos inorgánicos, la extracción de ficocoloides se vio favorecida con los avances en la investigación, y gracias al desarrollo de técnicas de cultivo, esta industria no ha parado de aumentar desde la finalización de la Segunda Guerra Mundial, consolidándose actualmente como el segundo uso más relevante para las algas a nivel mundial tras la alimentación.

Por otro lado, el uso de las algas en la agricultura y ganadería se remonta muchos siglos atrás, cuando las poblaciones costeras recogían arribazones llegados a las playas. Estos eran utilizados directamente como alimento a los animales o como fertilizante del suelo. Las fibra de las algas ayuda a estabilizar y a retener la humedad de los suelos y su alto contenido en minerales aporta oligoelementos. A raíz de esto, a partir del siglo XX, comienzan a surgir pequeñas industrias basadas en el secado y molienda de dichos recursos con el fin de ser usados en piensos industriales o como fertilizantes. Aunque estos últimos presentaron un éxito limitado por la aparición de nuevos fertilizantes

químicos sintéticos. A pesar de ello, hoy en día, con el incremento de la agricultura ecológica, este uso ha comenzado a recuperarse, y se espera una tendencia al alza con el desarrollo de productos líquidos más manejables.

En la actualidad, las algas, son consideradas una gran fuente de recursos y riqueza, con una gran variedad de aplicaciones que se han sabido adaptar a las nuevas necesidades de la población. Siendo previsible un gran aumento y diversificación de la industria basada en grandes proyectos de futuro, entre los que podemos destacar: la creación de biocombustibles, el tratamiento de aguas residuales o la creación de un papel vegetal a base de algas que permita reducir la tala masiva de árboles.

Al igual que el uso y el tipo de recurso extraído de las algas, la propia materia prima, es decir, las especies de algas utilizadas, han variado también con los años, adaptándose a las nuevas necesidades. En un inicio las algas utilizadas procedían completamente del medio natural, utilizándose especies de fácil recolección o aquellas que formaban los arribazones en la costa. Poco a poco, con la llegada de los métodos de cultivo y el aumento de la demanda, estas se fueron sustituyendo por especies cultivadas o por aquellas cuya población natural fuera capaz de abastecer las necesidades de la población.

4.1. COMPOSICIÓN NUTRICIONAL Y BIOQUÍMICA DE LAS ALGAS

4.1.1. Composición nutricional

Los polisacáridos de algas, en particular los polisacáridos estructurales, mucopolisacáridos, extracelulares y de almacenamiento de la pared celular son reconocidos como un biomaterial importante para aplicaciones médicas y farmacéuticas. Estos polímeros compuestos de azúcares simples (monosacáridos) unidos entre sí por enlaces glucosídicos presentan una enorme variedad de estructuras y, por lo tanto, son una fuente extraordinaria de diversidad química para el descubrimiento de compuestos bioactivos. Las algas se componen de 4–76% de polisacárido por unidad de peso seco. Los polisacáridos de la pared celular consisten principalmente en celulosa, hemicelulosas y polisacáridos neutros. Estos polisacáridos tienen numerosas aplicaciones comerciales en productos como estabilizadores, espesantes, emulsionantes, alimentos, piensos, bebidas, etc. Las algas verdes contienen polisacáridos ácidos sulfurados, galactanos sulfatados y xilanos, mientras que las algas pardas tienen ácido algínico, fucoidan (fucosa sulfatada), laminarina (β-1,3 glucano) y sargassan. Las algas rojas producen agar, carragenanos, xilanos, almidón florideano (glucano similar a la amilopectina), galactano sulfatado soluble en agua, así como porfirán como mucopolisacáridos ubicados en los espacios intercelulares.

4.1.2. Bioactividad

En los últimos años, el interés en el desarrollo de bioprocesos para producción o extracción de compuestos bioactivos de fuentes naturales ha aumentado, debido a sus posibles aplicaciones en las industrias alimentaria, farmacéutica y cosmética (Freitas et.al., 2015), y muy asociada a la creciente búsqueda por parte del consumidor de productos que tengan en su composición ingredientes o aditivos naturales, sostenibles y con propiedades beneficiosas para la salud (

	Algas verdes	Algas rojas	Algas pardas
Clorofilas	a, b	a, d	a, c
Carotenoides	β-caroteno, luteína, neoxantina, violoxantina, zeaxantina	β-caroteno, luteína, zeaxantina	β-caroteno, fucoxantina, violoxantina
Polifenoles	Bromofenoles, ácidos fenólicos y flavonoides	Bromofenoles, ácidos fenólicos y flavonoides	Florotaninos
Polisacáridos	Ulvano y celulosa	Carragenina y agar	Alginato, laminarina y fucoidano

Tabla 4).

Los compuestos bioactivos son compuestos que normalmente ocurren en pequeñas cantidades en los alimentos y pueden ser beneficiosos para la salud. La diferencia con los macro y micronutrientes esenciales (como grasas, carbohidratos, proteínas, vitaminas y minerales), es que el organismo puede funcionar adecuadamente sin ellos. Algunos ejemplos de compuestos bioactivos que se encuentran comúnmente en nuestras dietas son los polifenoles y los carotenoides (Freitas et. al., 2015; Nova et al., 2020).

El océano es un interesante reservorio natural, todavía poco explotado, de compuestos y materiales con potencial biomédico (ej. Zhang et al., 2019). Las macroalgas albergan una gran cantidad de compuestos bioactivos, algunos de los cuales aún no se han explorado. La identificación y caracterización de compuestos bioactivos en algas es el objetivo actual de una amplia gama de estudios para encontrar nuevas moléculas biológicamente activas que tengan beneficios potenciales en la lucha contra enfermedades como el cáncer, alergias, estrés oxidativo, inflamación, obesidad, diabetes, trombosis o enfermedades neurodegenerativas, entre otras (Plaza et al., 2008; Madhusudan et al., 2011, Mohamed et al., 2012; Freitas et al., 2015; Nova et al., 2020). La composición química de las macroalgas varía según la especie, el estado fisiológico, la estación y el hábitat. Como ya se mencionó, las características que distinguen a las

macroalgas son el ciclo de vida y sus compuestos bioactivos, principalmente los carotenoides, los polisacáridos y la clorofila que las caracterizan (

Tabla 4) (Peng et al., 2015). De estos grupos de compuestos destacan los polisacáridos, que han recibido una atención creciente debido a su abundancia, coste de extracción reducido y propiedades fisicoquímicas y biológicas únicas, tales como actividades anticancerígenas, antioxidantes, antibacterianas, antiinflamatorias o

	Algas verdes	Algas rojas	Algas pardas
Clorofilas	a, b	a, d	a, c
Carotenoides	β-caroteno, luteína, neoxantina, violoxantina, zeaxantina	β-caroteno, luteína, zeaxantina	β-caroteno, fucoxantina, violoxantina
Polifenoles	Bromofenoles, ácidos fenólicos y flavonoides	Bromofenoles, ácidos fenólicos y flavonoides	Florotaninos
Polisacáridos	Ulvano y celulosa	Carragenina y agar	Alginato, laminarina y fucoidano

inmunoestimuladoras y actividad regenerativa de heridas. De entre los polisacáridos marinos destacan el fucoidano, la laminarina, el alginato, los carragenanos, el agar y la amilopectina, que se han utilizado ampliamente en el área farmacéutica y biomédica. Los materiales naturales encapsulan e interactúan con las células más fácilmente, y junto con su biodegradabilidad son características determinantes para su aplicación en el área biomédica. Los principales productos comerciales de las algas marinas siguen siendo los alginatos, el agar y la carragenina que se extraen y refinan a granel y tienen usos importantes como hidrocoloides, emulsionantes y espesantes (Jönsson et al. 2020). Algunos polisacáridos, aunque menos abundantes y sin aplicaciones industriales, son objeto de investigación actualmente, tales como la laminarina, los xylanos, los porphyranos, el argassan y el florideano, como ha sido revisado por Salehi et al. (2019).

Tabla 4. Compuestos bioactivos (clorofilas, carotenoides, fenoles y polisacáridos) que distinguen a las macroalgas, (adaptado de: Pereira y Neto, 2014; Rosa et al., 2020).

Además del componente nutricional, las algas contienen compuestos bioactivos con alta capacidad antioxidante, derivada de la presencia de los carotenoides y los compuestos fenólicos, los principales compuestos bioactivos presentes en las algas (Gutiérrez Cuesta

	Algas verdes	Algas rojas	Algas pardas
Clorofilas	a, b	a, d	a, c
Carotenoides	β-caroteno, luteína, neoxantina, violoxantina, zeaxantina	β-caroteno, luteína, zeaxantina	β-caroteno, fucoxantina, violoxantina
Polifenoles	Bromofenoles, ácidos fenólicos y flavonoides	Bromofenoles, ácidos fenólicos y flavonoides	Florotaninos
Polisacáridos	Ulvano y celulosa	Carragenina y agar	Alginato, laminarina y fucoidano

et al., 2016). Estos compuestos pueden reemplazar, por ejemplo, antioxidantes sintéticos (hidroxibutilanisol (HBA), butilhidroxitolueno (BHT) y tert-butilhidroquinona (TBHQ)) que, aunque todavía se usan ampliamente en productos alimenticios, han demostrado algunos efectos nocivos para la salud, a saber, efectos tóxicos, cancerígenos y anómalos en los sistemas enzimáticos. También se sospecha que los antioxidantes HBA y BHT son responsables de daño hepático (Balboa et al., 2013, Balasundram et al. 2013). Las proteínas y péptidos, lípidos, compuestos halogenados y polisacáridos también les confieren propiedades funcionales (Stengel y Walker 2015; Gutierrez Cuesta et al., 2016). Sus bioactividades incluyen desde antioxidantes, antibacterianos, antifúngicos, antivirales, antidiabéticos, antiinflamatorios y potenciales para la formación de biomateriales (geles de celulosa, geles de alginato) (Sánchez-Machado et al., 2004a,b, Pielesz et al., 2011; Plaza et al., 2008; Thomas y Kim 2011; Miyashita et al., 2013; Nova et al., 2020).

Los compuestos como los esteroles, los compuestos heterocíclicos y fenólicos poseen propiedades antimicrobianas y propiedades antisépticas (Déléris et al., 2016; Nova et al., 2020; Rosa et al., 2020). Los estudios han demostrado que los polisacáridos de algunas macroalgas como el alginato, el funorano, el fucoidano, el laminarano, el porphyrano y el ulvano producen una respuesta hipocolesterolémica e hipolidémica debido a la reducción de la absorción de colesterol en el intestino (Lamela et al. 1989; Panlasigui et al. 2003; Kammoun et al., 2018; Nova et al., 2020).

A continuación se enumeran algunos de los compuestos bioactivos de cada grupo de macroalgas y sus propiedades.

Algas rojas

Las algas rojas tienen un color rosado brillante característico debido a las ficobiliproteínas, complejos formados por proteínas hidrosolubles unidas covalentemente a través de aminoácidos de cisteína a las ficobilinas, que son moléculas pigmentadas. Las ficoeritrinas, una clase de ficobiliproteínas, son los principales pigmentos de las algas rojas.

Las ficobiliproteínas son compuestos bioactivos con propiedades antioxidantes, antiinflamatorias, inmunomoduladoras, antimicrobianas, neuroprotectoras, hepatoprotectoras y anticancerígenas. Además, estos compuestos tienen la capacidad de mejorar la efectividad de los medicamentos anticancerígenos estándar, reduciendo sus efectos secundarios (Nova et al., 2020; Torres et al., 2019).

Los carotenoides presentes en las algas rojas son la luteína, β-caroteno, astaxantina, echinenona, violaxantina, neoxantina y zeaxantina, con propiedades antioxidantes (Cherry et al., 2019).

Las algas rojas contienen también polifenoles, como bromofenoles, ácidos fenólicos y flavonoides. Aproximadamente el 90-95% de los polifenoles tras ser ingeridos alcanzan el colon intactos, donde a través de la acción de la microbiota intestinal experimentan biotransformación y metabolismo produciendo compuestos de bajo peso molecular con menos heterogeneidad química que los compuestos originales. Los polifenoles están asociados con la mitigación de los factores de riesgo asociados a la diabetes tipo 2 y a enfermedades cardiovasculares (hiperglucemia, hiperlipidemia, inflamación y estrés oxidativo), y presentan también actividad antimicrobiana (Cherry et al., 2019).

Las algas rojas son ricas también en polisacáridos (almidón floridano y galactanos sulfatados, como carragenanos o agaranos), proteínas y derivados de péptidos (ficobiliproteínas, fitolectinas y aminoácidos de tipo micosporina), minerales, lípidos y otros compuestos valiosos (Torres et al., 2019). En muchas algas rojas, los productos metabolizados de los ácidos grasos poliinsaturados (AGPI o PUFAs según sus siglas en inglés), también se denominan oxilipinas y se parecen a las hormonas eicosanoides en plantas y animales superiores, que cumplen su función fisiológica (Gerwick et al., 1993; Imbs et al., 2001; Nova et al. 2020). Así, el eicosanoide y sus derivados reciben mucha más atención en la investigación debido a su efecto antiinflamatorio (Jacobs et al., 1993). Los eicosanoides, como los leucotrienos y el ácido hidroxieicosatetraenoico, muestran algunas propiedades fisiológicas, como la quimio-atracción de los neutrófilos o las células del músculo liso, la contracción de los músculos y conexión con diversas enfermedades en mamíferos (El-Refaey y Templeton 1995; Lee et al. 1998; Korivi et al., 2019). Otras bioactividades asociadas incluyen protección contra enfermedades cardiovasculares y coronarias, acción antiinflamatoria, propiedades antitrombóticas y antiarrítmicas (Torres et al., 2019).

Laurencia es una de las fuentes más ricas de nuevos compuestos entre las algas rojas. En estas especies, se puede encontrar laurinterol (L1), un sesquiterpeno bromado, con antibacterianos, citotóxicos, antiincrustantes, inhibidores de ATPasa de Na / K, y propiedades insecticidas y repelentes (Kladi et al., 2006; Rojas Pérez et al., 2016; Tsukamoto et al., 2005; Vairappan et al., 2001, 2004).

Wang et al. (2015a) utilizó extracción asistida por ultrasonido durante la purificación de taurina de algas rojas, *Porphyra yezoensis*. Los autores demostraron *in vitro* que la homotaurina, un compuesto de aminosulfonato presente en diferentes especies, tiene un efecto neuroprotector y puede ser un fármaco prometedor para la prevención de la enfermedad de Alzheimer (Torres et al., 2019; Wang et al., 2015a).

Algas pardas

Las algas pardas se usan tanto en alimentación como en la extracción de alginato, siendo por esta razón denominadas alginófitos. Dentro de las algas pardas los géneros de mayor interés comercial son *Laminaria* (principalmente *L. hyperborea, L. digitata y Saccharina latissima/L. saccharina), Ascophyllum, Durvillaea, Macrocystis* y *Sargassum*.

Las algas pardas varían en tono debido a la presencia de carotenoides, a saber, fucoxantina, que les da un color más parduzco y otros como β-caroteno y violaxantina, y clorofila a, c1 y c2 y también a polifenoles como los taninos. Estas algas se caracterizan por tener una mayor concentración de polifenoles que las algas verdes y rojas, a saber, florotaninos (compuestos característicos de algas pardas). Son además ricos en polisacáridos primarios que incluyen alginatos, laminarinas, fucoidanos y celulosa; proteínas, lípidos ricos en AGPI y esteroles (Balboa et al. 2004, Balasundram et al. 2013). El alto contenido de AGPI incluye omega-3 (ω-3) y omega-6 (ω-6), donde el ácido eicosapentaenoico (EPA, 20: 5n-3), ácido estearidónico (SDA, 18: 4n-3) y el ácido α-linolénico (LNA, 18: 3n-3) son los principales ω-3, y el ácido araquidónico (ARA, 20: 4n-6) es el principal ω-6. El ω-3 tiene efectos beneficiosos para reducir la enfermedad cardíaca, la trombosis y la aterosclerosis además promover la función cognitiva (Sánchez-Machado, 2004b).

De *Sargassum* spp. es posible aislar compuestos como terpenoides, flavonoides, esteroles, polisacáridos sulfatados, ácidos sargaquinoicos, sargacromenol y feofitina. Estos compuestos tienen propiedades funcionales como actividad analgésica, antiinflamatoria, antioxidante, neuroprotectora, antimicrobiana, antitumoral, fibrinolítica, inmunomoduladora, anticoagulante, hepatoprotectora o antiviral. Por lo tanto, el género *Sargassum* tiene un alto potencial para ser utilizado en las áreas de productos farmacéuticos, nutracéuticos y cosméticos (Herath et al., 2019; Nova et al., 2020).

El fucoidano es un polisacárido sulfatado que muestra propiedades antitumorales, anticancerígenas, antimetastáticas y fibrolíticas en ratones. Tiene una actividad antitrombótica y anticoagulante similar a la heparina *in vivo* e *in vitro*, mediada por

inhibidores de la coagulación sanguínea, como el cofactor heparina II o anti-trombina III (Church et al. 1989; Colliec 1991). Incluso hay una patente para el fucoidano sulfatado de *Fucus vesiculosus* y de *Ascophyllum* spp. en esta área (Nova et al. 2020; Rosa et al. 2020; Smit, 2004). Además, el fucoidano tiene una potente actividad antiviral contra los tipos 1 y 2 de HSV, el citomegalovirus humano (Wu et. al. 2012) y el VIH (Sugawara et al. 1989, Feldman et al. 1999; Majczak, et al. 2003; Ponce et al. 2003; Karimi et al. 2016). El fucoidano muestra propiedades antivirales al inhibir la unión de la partícula viral a la célula huésped (Baba et. Al., 1988).

Los principales compuestos bioactivos con efectos beneficiosos para la salud se encuentran en los esteroles, lípidos, polisacáridos, carotenoides, polifenoles y fibras del género *Padina* (Minetti et al. 2019). Los florotaninos también han mostrado varios potenciales farmacológicos. Estos posibles beneficios para la salud se han estudiado para su aplicación en la industria farmacéutica y también en las industrias cosmética y alimentaria (Thomas y Kim, 2011). Los compuestos de florotaninos presentes en grandes cantidades en las especies de *Ecklonia* han llamado la atención de los investigadores sobre las enfermedades neurodegenerativas. Las propiedades de estos compuestos incluyen: propiedades antioxidantes, antiinflamatorias, antivirales, anticancerígenas, antimelanogénicas, antidipogénicas y antidiabéticas (Seong et al., 2019). Seong et al. 2019 demostraron que el mecanismo molecular de los efectos neuroprotectores del eckol, uno de los florotaninos de *Ecklonia*, dependía de la inhibición de la monoamino oxidasa A y del agonismo del receptor de dopamina D3 / D4. Asimismo, el dieckol y el phlorofucofuroeckol-A (PFFA) mostraron inhibición de MAOs-A / B, agonismo del receptor D3R / D4R y antagonismo del receptor D1 / 5HT1A / NK1. Además, estos autores mostraron que la actividad anti-AD de los florotaninos, incluidos el eckol, el dioxinodesidroeckol, el dieckol y el PFFA se produjo a través de la inhibición de la β-secretasa y la acetilcolinesterasa.

Algas verdes

Los pigmentos predominantes de las algas verdes son las clorofilas a y b, pero presentan pequeñas concentraciones de pigmentos carotenoides, como luteína, β-caroteno, astaxantina, echinenona, violaxantina, neoxantina y zeaxantina (Cherry et al., 2019), que pueden ejercer una acción moduladora sobre la microbiota intestinal, influyendo en la liberación de hormonas intestinales que regulan la resistencia y liberación de insulina, impactando positivamente el manejo de la diabetes (Yan et al., 2019; Nova et al., 2020). Los flavonoides también tienen potencial para modular el equilibrio de la microbiota intestinal. Se ha observado su capacidad de actuar sobre la diabetes tipo 2, con la mejoría de la tolerancia oral a la glucosa, la sensibilidad a la insulina, disminución de los niveles de glucosa en sangre en ayunas y protección de riñón e hígado en una dieta rica en sacarosa con estreptozocina tipo 2 ratones diabéticos inducidos. *Ulva prolifera* es un alga verde especialmente rica en flavonoides.

Los miembros del orden *Ulvales* tienen el ulvano como su polisacárido principal. Se trata de un polisacárido sulfatado soluble con propiedades gelificantes. Su actividad biológica

incluye propiedades inmunomoduladoras, antivirales, antioxidantes, antihiperlipidémicas y anticancerígenas (Kidgell et al., 2019).

La caulerpeninesesquiterpeno de *Caulerpa prolifera* es un compuesto bioactivo que es activo contra la fosfolipasa A_2 (Mayer et al., 1993). Los fenoles de las algas verdes son los mismos de las algas rojas, presentando las mismas propiedades.

La Tabla 5 identifica compuestos de macroalgas aislados con posibles beneficios para la salud

Tabla 5. Compuestos biológicamente activos aislados de macroalgas.

Familia de compuestos	Compuesto	Especie	Tipo de alga	Aplicaciones/actividad	Referencias
Carotenoides	Astaxantina	*Chlorococcum sp.*	Alga verde	Antioxidante	Liu y Lee, 2000
	Zeaxantina	*Gracilaria sp.*	Alga roja		Silva et al., 2019
	Fucoxantina	*Undaria pinnatifida*	Alga parda	Antiobesidad y antidiabética	Miyashita et al., 2013
				Antitumoral	Wang & White, 2014
		Sargassum horneri		Inmunomodulador	Herath et al., 2019
	Zeaxantina	*Ascophyllum nodosum*		Disminución del riesgo de enfermedades oculares	Holdt y Kraan, 2011
	Luteína				
Esteroles	β-sitosterol	*Sargassum glaucescens*	Alga parda	Antidiabética	Payghami et al., 2015
	Fucosterol	*Pelvetia siliquosa*		Reducción del colesterol	Pal et. al, 2014; Lee et al., 2004a
				Antioxidante	Lee et al., 2003
Vitaminas	α-tocoferol	*Saccharina latissima*			Pal et. al, 2014; Marinho et al., 2019
Terpenoides halogenados y bromofenoles	Neorogioldiol 19	*Laurencia microcladia*	Alga roja	Atenuación de la neurotoxicidad inducida por el oligómero Aβ en células SYH-SY5Y	Daskalaki et al., 2019
	O11,15-ciclo-14-bromo- 14,15-dihidrogiol- 3.11-diol 20	*Laurencia glandulifera*		Atenuación de la neurotoxicidad inducida por el oligómero Aβ en células PC12	
	BDDE	*Odonthalia corymbifera*		Antimicrobial activity	Oh et al., 2008
				Antidiabética	Xu et al., 2016
		Leathesia nana	Alga parda	Anticoagulante	Xu et al., 2004
				Antibacteriana Antifúngica	Liu et al., 2014
		Rhodomela confervoides	Alga parda	Reducción del daño inflamatorio del colon y la expresión de citocinas	Abrantes et al.,2010; Seong et al., 2019
Diterpenos	8,10,18-tri-hidroxi2,6-dolabeladieno	*Dictyota pfaffii*	Alga parda	Antiviral; Inhibición de la infección por HSV-1; Disminución temprana del contenido de proteína HSV-1	

	(6R)-6hidroxidicotoma 4,14-dieno-1,17dial	*Dictyota menstrualis*		Reducción de los niveles de glucosa en sangre. Disminución de la hemoglobina glucosilada, triglicéridos y peso corporal.	
Lípidos y ácidos grasos	Ácido estearidónico y ácido γ-linolénico	*Enteromorpha linza*	Alga verde		Seong et al., 2019
	PUFAS ω-3 e ω-6				Miyashita et al., 2013
Fenoles	Extracto rico en dieckol (AGdieckol)	*Ecklonia cava*	Alga parda	Disminución significativa de la resistencia a la insulina e hiperglicemia posprandial	Lee y Jeon, 2015
	Florotaninos	*Sargassum thunbergii; Laminaria japónica*	Alga parda	Inhibición de la agregación de Aβ y la glucosilación de insulina	Seong et al., 2019
Polisacáridos	Galatofucanos (fucoidanos)	*Adenocystis utricularis*	Alga parda	Inhibición de la infección por HSV 1 y 2 (antiviral)	Trinchero et al., 2009
	Fucoidano	*Ecklonia cava, Sargassum hornery, Costaria costalla y Undaria pinnatifida*	Alga parda	Antitumoral	Pal et al., 2014; Wei et al., 2017; Lee et al., 2019; Alghazwi et al., 2019
				Inhibición de enzimas proinflamatorias	
				Prevención del péptido beta-amiloide	
	Laminarina	*Laminaria japonica*	Alga parda	Antiapoptótica	Kim et al., 2006
	Fucoidanos	*Gracilaria sp.*	Alga roja	Antiinflamatoria, antitumoral, y antiangiogénica	Seong et al., 2019
	Sulfato de galactano	*Gracilaria corticata*	Alga roja	Antiviral (VIH, virus del herpes simple tipos 1 y 2, virus sincitial respiratorio)	Mazumder et al. 2000
		Gelidium crinal	Alga roja	Anticoagulante	Pereira et al., 2005
		Aghardhiella tenera	Alga roja	Antiviral (VIH, virus del herpes simple tipos 1 y 2, virus sincitial respiratorio)	Witvrouw et al., 1994
		Nothogenia fastigiata			Damonte et al., 1996
	Carragenano-Carraguard®	*Chondrus spp.*	Alga roja		Damonte et al., 2012
		Nothogenia fastigiata			Damonte et al., 1994; Rosa et al., 2020

	Furanona halogenada	*Delisea pulchra*	Alga roja	Bloqueo del VIH y otras enfermedades de transmisión sexual	Smit, 2004; Spieler, 2002
	Sulfato de fucano	*Fucus vesiculosus*	Alga parda	Inhibición de la unión inicial del virus HSV tipos 1 y 2 a la célula huésped	Ahmadi et al., 2015
Péptidos	Ficoeritrina	*Porphyra haitanensis*	Alga roja	Antitumoral Disminución temprana del contenido de proteína de choque HSP Inhibición del cáncer de colon, incluido el metabolismo y las proteínas relacionadas con la apoptosis	Pan et al., 2013
		Gracilaria lemaneiformis	Alga roja		Li et al., 2016

4.2. USO Y CAMPOS DE INTERÉS

Las aplicaciones industriales de las algas son muy variadas. Algunas tienen su origen en tiempos prehistóricos mientras que otras se han empezado a desarrollar en la década de los 90 impulsadas por las mejoras en la calidad de vida de los países desarrollados y las nuevas tendencias nutricionales. Ha sido sobre todo en los países asiáticos, principalmente Japón, la república de Corea y China, donde en mayor medida se ha desarrollado el mercado de las algas, especialmente su cultivo y comercialización para consumo humano. En Europa, sin embargo, este mercado se encuentra menos desarrollado y se centra en la extracción de tres tipos de ficocoloides, los alginatos (extraídos a partir de las algas pardas) y los carragenatos y el agar (extraídos a partir de las algas rojas).

Se estima que la industria de las algas tiene un valor anual de más de 6 billones de dólares americanos siendo la industria alimenticia para consumo humano la que presenta la mayor aportación con un 85% (FAO, 2018b). Los extractos derivados de las algas (carragenatos, agares y alginatos) representan el 40% del mercado mundial de hidrocoloides utilizado en alimentación, el resto proviene de animales, microbios y plantas terrestres. Los principales mercados de explotación de las algas son el de la alimentación, el de la agricultura, el de la salud (extracción de compuestos bioactivos) y la acuicultura y producción de biofuels.

En España hasta el año 1990 se produjeron alginatos a partir principalmente de la recogida de arribazones de *Laminaria ochroleuca* y *Laminaria hyperborea*. Por otra parte, en Galicia es frecuente la extracción de *Gelidium corneum y de "liquen" (mezcla*

de Chondrus crispus, *Mastocarpus stellatus* y *Gigartina* spp.) para la obtención de carragenatos. Las especies que concentran más atención en la actualidad son aquellas susceptibles de ser utilizadas en la alimentación tanto humana como animal.

En Galicia, en el año 2019 se recolectaron un total de 404 toneladas por un importe de 336.500 euros repartidas entre 8 especies (dato del año 2019; fuente www.pescadegalicia.com). Actualmente (año 2020) en Galicia hay 24 planes de explotación para algas como recursos específicos. Cinco de estos planes de explotación pertenecen a empresas, 18 a cofradías y uno a un profesional autónomo en A Coruña.

4.2.1. Usos tradicionales

Las algas marinas, especialmente en Asia, llevan utilizándose desde hace más de 2500 años. En algunos países como China, las algas eran un alimento solo al alcance de las clases ricas, situación que contrasta con otro país con una larga tradición en la utilización de algas como es Irlanda, donde tradicionalmente las algas eran consideradas como un alimento para indigentes.

En Galicia, cuyas costas se caracterizan por la gran diversidad de especies de macroalgas presentes, las algas se han utilizado tradicionalmente como fertilizantes y acondicionadoras del suelo y como suplemento en la alimentación de animales. Para estos fines se recogían y utilizaban las algas de arribazón que aparecían varadas en las playas generalmente tras los temporales de otoño e invierno. La aplicación de algas como *Fucus*, *Laminaria* o *Ascophyllum* a las tierras de cultivo supone un incremento en sales minerales (especialmente potasio) y oligoelementos, así como una mejora en la estructura del suelo. Por otra parte el uso de las algas como forraje para el ganado se ha debido más bien a una cuestión de necesidad ya que en términos generales se puede decir que las algas no son un complemento ideal para el ganado por su alto contenido en sustancias no asimilables (fibras) y su bajo aporte energético.

Estos usos se fueron abandonando a medida que se desarrollaron fertilizantes químicos y los piensos para animales.

En épocas de hambruna, las algas también fueron empleadas ocasionalmente como suplemento en la alimentación humana (Tasende y Rodríguez González, 2003).

La recolección con fines industriales se inició en Galicia a principios del siglo XX con el establecimiento en 1932 del reglamento de explotación de algas pardas para la producción de iodo. Si bien esta actividad cesó cuando dejó de ser rentable por la importación de iodo de origen mineral, fundamentalmente procedente de Chile.

Más tarde, en 1945 se establecieron en España las primeras empresas procesadoras de ficocoloides y se inicia a su vez la regulación de la recogida de macroalgas para su extracción industrial. Hasta ese momento, esos compuestos eran importados del Suroeste Asiático (principalmente agar procedente de Japón) si bien con el estallido de la Segunda Guerra Mundial, las importaciones de oriente cesaron lo que provocó que

en occidente se iniciase el desarrollo de la tecnología necesaria para la obtención de ficocoloides a partir de especies autóctonas (McHugh, 2003).

El mercado de los ficocoloides tuvo un gran desarrollo durante la segunda mitad del siglo XX, lo que motivó la creación de la industria procesadora. En Galicia, en 1969, se habían establecido cuatro empresas, dos de ellas localizadas en Ribadeo, una en A Coruña y otra en O Porriño. A partir de los años 80, el escaso desarrollo tecnológico de la recogida de algas en Galicia y la ausencia de una gestión real de los recursos, junto con los bajos precios, provocó que los productores no pudieran competir con la materia prima procedente de países que apostaron por la modernización del sector extractivo como Francia, Canadá o Noruega.

Actualmente en Galicia una empresa localizada en o Porriño y fundada en el año 1966, es la principal productora de carrageninas dentro del estado español. Dicha empresa cuenta con 236 empleados y unos ingresos medios anuales de 100 millones de dólares.

4.2.2. Alimentación humana

La utilización de las algas para consumo humano tiene su mayor mercado en los países asiáticos, donde hasta 21 especies son consumidas de manera habitual en la dieta. Por el contrario, en occidente, las algas han sido utilizadas principalmente para la extracción de compuesto utilizados en la industria farmacéutica, cosmética y de la alimentación como fuente de ficocoloides y de agentes espesantes y gelificantes (FAO, 2002). Sin embargo, en los últimos años ha habido un interés creciente por el consumo directo de las algas como alimento y más recientemente como alimento funcional debido a sus especiales propiedades nutricionales.

Si bien las propiedades de las algas varían entre las distintas especies, estas son conocidas de manera general por ser ricas en vitaminas, minerales, polisacáridos y proteínas y por su bajo contenido en lípidos (1-3% del peso seco del alga).Por otra parte las algas ayudan a regular los niveles de colesterol y son usadas como antioxidantes naturales en la industria alimenticia lo que les confiere el potencial de ser utilizadas en el campo de la tecnología de los alimentos para producir alimentos de bajo índice calórico y para prevenir enfermedades cardiovasculares y gastrointestinales. Varias especies comestibles de algas presentes en las costas de Galicia, y que son comúnmente conocidas por sus nombres japoneses como nori (género P*orphyra*), kombu (género *Laminaria*) y wakame (*Undaria pinnatifida*) son una fuente importante de fibra, proteínas y minerales. Sin embargo, además de estas especies de algas, las costas gallegas presentan muchas otras que de las que en su gran mayoría desconocemos en detalle su composición química. Sería necesario adquirir estos conocimientos para satisfacer la demanda creciente de productos derivados de algas que existe en nuestro país. En este sentido cabe destacar el trabajo de Gómez y colaboradores (Gómez-Ordoñez et al., 2010) los cuales tras examinar 5 especies de algas recogidas en las costas gallegas (3 especies de algas pardas y 2 de algas rojas) concluyen que todas las especies

examinadas son una fuente importante de fibra, proteínas y minerales para el consumo humano.

Por otra parte, el desarrollo económico, cultural y científico de nuestra sociedad en los últimos años ha provocado importantes cambios en nuestros hábitos de alimentación y en nuestro estilo de vida. Como consecuencia, actualmente existe un alto interés entre los consumidores y la industria alimenticia por aquellos alimentos que además de sus efectos nutricionales presentan una serie de ingredientes funcionales que producen un beneficio demostrado en el organismo, como puede ser mejorar la salud y disminuir el riesgo de contraer enfermedades. Estos alimentos han sido llamados de manera genérica alimentos funcionales (Diplock et al., 1999). Esta tendencia ha incrementado en los últimos años la investigación de fuentes naturales de productos con este tipo de ingredientes y recientemente se han detectado las enormes posibilidades de las algas como fuente de compuestos bioactivos como pueden ser los carotenoides, los polifenoles, los ácidos grasos poliinsaturados y los pigmentos con capacidad antioxidante.

4.2.3. Sector de la salud humana

La primera referencia del uso de las algas con fines medicinales aparece en un tratado sobre medicina china que data del año 2700 ac. De hecho, su uso para tratar ciertas enfermedades forma parte de la tradición de los pueblos costeros del sudoeste asiático desde hace ya muchos años. En Occidente, su uso medicinal ha sido mucho más limitado a lo largo de la historia si bien en los últimos años su uso en los sectores de la talasoterapia y de la salud y el bienestar ha ganado popularidad.

Algunas características de las algas ya están bien reconocidas, como sus propiedades ficocoloides que se han explorado durante mucho tiempo tanto en la industria farmacéutica, en la medicina e incluso en la investigación. Sin embargo, es la naturaleza química y estructural de su inmensa variabilidad bioquímica lo que atrae cada vez más el interés en el desarrollo de la biotecnología para la identificación y análisis de posibles bioactividades de estos compuestos como promotores de la salud humana y posibles nuevos medicamentos (Kang et al. 2015). Las algas tienen varias aplicaciones, a saber: antioxidantes, fuente de vitaminas, agentes antitumorales, fuente de antibióticos, fuente de compuestos antivirales, fuente de biocosméticos, suplementos alimenticios, nutracéuticos, anestésicos, antipiréticos, medicinas para la tos y compuestos para la cura de heridas (Batista González et al. 2009; Nova et al. 2020; Wang et al. 2017).

Nutracéuticos

Debido al estilo de vida actual, los nutracéuticos se están volviendo populares por ser beneficiosos para la salud. Esto combina los términos "nutrición" y farmacéutica”, y estudia los componentes fitoquímicos de los alimentos para descubrir sus beneficios para la salud y posibles curas para enfermedades(Cornish y Garbary, 2010; Teixeira et al., 2014).

Los nutracéuticos incluyen fibras dietéticas que ayudan con problemas de salud como estreñimiento, aumento de peso y deficiencia de vitaminas. Las algas son una excelente fuente de fibra dietética, vitaminas y minerales. estos últimos incluyen vitamina C en niveles equivalentes a cítricos y vitaminas A, B1, B12, D, E, riboflavina, niacina, ácido pantoténico y ácido fólico. Además, el contenido de proteínas de moco de algas es 20-25% en peso seco (Batista González et al., 2009; Gomez-Zavaglia et al., 2019).

Antioxidante

El exceso físico y emocional entre otros factores conducen a la producción de radicales libres activos (radicales libres de oxígeno, radicales libres sin oxígeno, que también se producen en el metabolismo normal). Estos radicales en exceso son peligrosos para las moléculas biológicas, ya que causan peroxidación lipídica que puede acelerar el envejecimiento y causar enfermedades como cáncer, arteriosclerosis, lesión por reperfusión y daño hepático. La alta actividad antioxidante de las algas verdes, como *Chlorococcum sp.,* se debe al alto contenido de astaxantina, un carotenoide, que es superior a la presentada por el betacaroteno. En las algas pardas *Sargassum thunbergii* y *Laminaria japonica*, su actividad antioxidante está asociada con sus polisacáridos sulfatados, con actividad antioxidante (Cornish y Garbary, 2010).

Anticoagulante y antitrombótica

La interacción entre las plaquetas y los vasos sanguíneos es importante en el desarrollo de trombosis y enfermedades cardiovasculares. La acumulación no controlada de plaquetas es significativa en la trombosis arterial y puede tener trastornos potencialmente mortales. Por lo tanto, los agentes antiplaquetarios se consideran una herramienta vital en el tratamiento y/o prevención de enfermedades trombóticas cardiovasculares (Gómez-Ordóñez, 2013). Tanto la alga parda *Fucus vesiculosus,* como *Ascophyllum nodosum* han sido patentados como sustancias anticoagulantes (Cornish y Garbary, 2010; Smit, 2004).

Antiinflamatoria

La inflamación a menudo ocurre en los tejidos vivos, siendo responsable de innumerables muertes. Cabe señalar que muchos medicamentos antiinflamatorios tienen efectos secundarios, lo que representa un riesgo para la salud humana. Por lo tanto, es imprescindible encontrar alternativas. Como las algas se encuentran en un ambiente estresante, se cree que contiene muchos compuestos bioactivos que desencadenan una respuesta inmune en los humanos. Actualmente, se encuentran en el mercado mezclas con translam, laminarano y fucoidano con propiedades beneficiosas para el sistema inmunitario (Smit, 2004).

Antiviral

Los virus son pequeños agentes que pueden infectar una gran variedad de organismos vivos. Para tratar infecciones virales son utilizados los antivirales. Los estudios muestran que algunas algas como las algas rojas tienen propiedades antivirales, como *Schizymenia pacifica,* debido a que sus polisacáridos sulfatados inhiben la transcriptasa inversa *in vitro*. *Gracilaria corticata* muestra propiedades antivirales contra HSV tipos 1 y 2, esto se debe a la inhibición de la unión inicial del virus a la célula huésped (Mazumdar et al., 20002). Las algas pardas muestran actividades antivirales de fucanos sulfatados de *Cystoseira indica* contra el virus del herpes simples 1 y 2 sin citotoxicidad para cultivos de células Vero (Ahmadi et al., 2015).

Actualmente, el uso de polisacáridos sulfatados en medicina es limitado. Esto es porque se absorben poco después de la administración oral (Smit, 2004). Se pueden usar en aplicaciones tópicas como formulaciones en gel para prevenir la transmisión del VIH y la transmisión del VHS (Notário-Pérez et al., 2017). Un gel de algas de la costa brasileña fue formulado como una protección innovadora para las mujeres contra el VIH.

Antimicrobianos

El uso de los antibióticos en exceso ha provocado que muchos microorganismos causantes de enfermedades infecciosas hayan desarrollado resistencias. Por lo tanto, es importante utilizar alternativas, como los compuestos bioactivos. Estos compuestos, que están presentes en las algas y que en algunos casos tienen efectos antimicrobianos, pueden desempeñar un papel crucial en el tratamiento de enfermedades bacterianas en el futuro. Sin embargo, aunque existen estudios *in vitro*, en algas verdes (*Ulva*), en algas pardas (*Saccharina*) y en algas rojas (*Chondrus crispus, Gracilaria vermiculophylla, Porphyra dioica*) son necesarios estudios *in vivo* para determinar la eficacia y seguridad en el uso de estos compuestos (Mendes et al. 2013; Wang et al. 2017).

Vermífugos

La ascariasis es una enfermedad parasitaria causada por el gusano nematodo *Ascaris lumbricoides*. Muchas de las algas rojas, como las *Palmaria palmata* y *Digena simplex*, contiene ácido α-kaínico, un aminoácido, que causa bloqueo muscular en este parásito, por lo que no puede mantener su posición contra los movimientos peristálticos en el intestino y el huésped lo elimina mediante la defecación (Déléris et al., 2016; Smit, 2004).

Prevención de enfermedades cardiovasculares

Según la Organización Mundial de la Salud, las enfermedades cardiovasculares son la principal causa de mortalidad (alrededor del 30% en todo el mundo). Una de las causas de esta enfermedad son los niveles altos de colesterol, que pueden elevar la presión arterial (Smit, 2004).

Las algas se pueden usar para prevenir enfermedades cardiovasculares. Según la literatura, los polisacáridos de las algas producen actividad hipocolesterolémica y hipolipidémica, reducen la absorción de colesterol en el intestino tienen la capacidad de reducir la presión arterial sistólica, los niveles de colesterol y los fosfolípidos en el hígado (Gutierrez Cuesta et al. 2016; Nova et al. 2020; Panlasigui et al. 2003). *Saccharina latissima*, una de las especies de algas pardas más comercializadas a nivel mundial, es un buen ejemplo por su contenido en polisacáridos de cadena larga que funcionan como fibras (Ledesma-Hernandez y Herrero, 2014; McHugh, 2003). Las algas pueden metabolizar acido araquidónico (20:4 ω-6) por rutas oxidativas y generar dos productos principales prostaglandina y oxilipinas. La producción de prostaglandinas se puede realizar por dos métodos: involucrando la ciclooxigenasa de ácidos grasos actuando sobre el ácido araquidónico, como en las células de mamíferos; y el uso de lipooxigenasa, que también actúa como el ácido araquidónico En muchas algas rojas, los productos metabolizados de PUFAs se llaman oxilipinas, que se parecen a la hormona eicosanoide en plantas y animales superiores. El eicosanoide y sus derivados reciben una atención especial debido a su potencial antiinflamatorio (Nova et al., 2020; Pal et al., 2014; Torres et al., 2019).

Por ejemplo la *Ulva sp., Porphyra tenera y Laminaria digitata* fueron utilizados en un estudio en ratas, teniendo un efecto positivo tanto en la disminución de los niveles de colesterol como en su composición lipídica (Hassan et al., 2011). Un extracto etanólico de *Caulerpa racemosa* muestra actividades hipolipidémicas, y como resultado, la disminución del colesterol total en suero, triglicéridos y niveles de colesterol de lipoproteínas de baja densidad en ratas. Por lo tanto, las empresas nutracéuticas tienen más probabilidades de explotar estas sustancias, o principalmente fibras y comercializarlas como un producto de salud (Ara et al. 2002).

Además de reducir los niveles de colesterol, algunas algas, como las pardas, que contienen fucoxantina, se pueden usar para reducir los factores de riesgo de presión arterial y accidente cerebrovascular (Nova et al., 2020; Rosa et al., 2020). Por lo tanto, pueden usarse las algas para prevenir enfermedades cardiovasculares.

Obesidad

La obesidad es la afección médica en la que el exceso de grasa corporal se ha acumulado hasta el punto de causar un efecto perjudicial en la salud, lo que lo convierte en uno de los problemas de salud pública más graves del mundo. De esta manera, se ha sugerido que las algas ricas en fibra y alginato no solo aumentan la sensación de saciedad, facilitan la pérdida de peso, sino que también cambian la masa de grasa a largo plazo (Nova et al., 2020; Rosa et al., 2020).

Diabetes tipo 2

La diabetes tipo 2 es una enfermedad metabólica crónica que resulta del uso ineficiente de insulina.

Esta enfermedad conlleva un mayor riesgo de muerte prematura, que se asocia con diferentes problemas de salud (ataque cardíaco y accidente cerebrovascular, insuficiencia renal, amputación, pérdida de visión y daño nervioso), pero también con varias comorbilidades (síndrome metabólico, obesidad y sobrepeso, hipertensión, enfermedad coronaria, fatiga hepática no alcohólica, estrés y depresión; Nova et al., 2020). Muchos estudios han demostrado el efecto antidiabético de las macroalgas. Akbarzadeh et al. (2018) descubrieron que la administración de *Sargassum oligocystum* reduce la resistencia a la insulina y regenera las células beta dañadas en el páncreas de las ratas diabéticas inducidas por estreptozotocina. Otros estudios con algas pardas, a saber, *Ascophyllum nodosum*, demuestran que tienen el potencial de controlar la digestión y la absorción de carbohidratos y, como tales, pueden ser útiles para prevenir la transición de la esteatohepatitis no alcohólica a la diabetes tipo 2. Las algas pardas, ricas en alginato, o las algas rojas ricas en carragenina, tienen efectos beneficiosos sobre muchos de los marcadores de diabetes, como la glucosa en sangre, los lípidos y el índice de masa corporal (Gabbia et al., 2017). Otro estudio con algas verdes, *Ulva prolifera*, rica en flavonoides, mejora la tolerancia oral a la glucosa, la sensibilidad a la insulina disminuye los niveles de glucosa en sangre en ayunas y protege el riñón y el hígado de la dieta rica en sacarosa con estreptozocina en ratones inducido con diabetes tipo 2 (Yan et al., 2019).

Salud ósea

La osteoporosis es una enfermedad degenerativa definida por la reducción de la masa ósea y el deterioro de la microarquitectura de los huesos. El mantenimiento de la salud ósea se puede promover aumentando la ingesta de alimentos ricos en calcio y sus derivados. Por lo tanto, la ingesta de algas con un alto contenido de calcio (el doble que en la leche), como es el caso de las algas pardas, *A. nodosum* y *Laminaria digitata*, y las algas verdes, *Ulva* sp., pueden desempeñar un papel en la prevención de las enfermedades óseas (Déléris et al., 2016).

Anticancerígena y antitumoral

Debido a las observaciones epidemiológicas, en las que muestran una menor incidencia de cáncer en poblaciones cuya dieta es rica en algas, el consumo de algas se asocia con efectos preventivos. Además, algunos investigadores también han demostrado propiedades antitumorales con estudios *in vivo* e *in vitro* (Liu et al., 2019; Smit, 2004).

El extracto de algas pardas de *Laminaria japonica* (kombu) muestra una fuerte actividad anticancerígena y disminuye la expansión del cáncer. Por ejemplo ha sido demonstrado que el uso regular de *Laminaria japonica* y *Undaria pinnatifida* inhibe considerablemente el riesgo de cáncer de mama (Vishchuk et al. 2011; Alam et al., 2013). Aunque estas algas también están disponibles como suplementos, existe evidencia científica limitada para apoyar el uso de suplementos de algas pardas. Otras

decocciones de *Sargassum sp., Laminaria sp.* en medicina china, se usan para tratar el cáncer (Déléris et al., 2016; Nova et al., 2020; Smit, 2004).

Además, el consumo de algas rojas *Porphyra* sp. se ha relacionado con los efectos preventivos contra el cáncer de mama en mujeres posmenopáusicas (Liu et al., 2019). Mientras *Chondria atropurpurea* tiene efectos contra las células cancerosas nasofaríngeas y colorrectales humanas (Gomez-Zavaglia et al., 2019).

Obstetricia y ginecología

En preparación para el parto, el cuello uterino se ablanda y se vuelve más distensible, un proceso llamado maduración cervical. Estos cambios químicos y físicos son necesarios para la dilatación cervical, el parto y el parto del feto. Como dilatadores cervicales se pueden usar el efecto combinado de prostaglandinas gel y la expansión de talos de *Laminaria* (Gregson et al. 1979, Blumenthal 1988, El-Refaey y Templeton 1995; Déléris et al., 2016). Igualmente, para *Saccharina latissima* también se ha usado en obstetricia, aplicando bandas de sacarina seca en el abdomen embarazado para dilatar el cuello uterino. El consumo de *Undaria pinnatifida* se ha descrito en algunos estudios como beneficioso para la salud, como la regulación menstrual (Pereira L. MACOI, 2015).

Aplicaciones varias

En medicina dental, los alginatos se utilizan en la preparación de moldes dentales. Las vendas para quemaduras están impregnadas de alginato, ya que este ficocoloide facilita la curación y contribuye a una curación menos dolorosa. También pueden ser empleados como agentes neutralizantes para ciertos metales pesados o radiactivos en casos de intoxicación por ingestión. Las algas pardas son principalmente ricas en yodo. Las tabletas de algas marinas se usan para tratar el bocio. El ácido algínico se usa para eliminar el estroncio radiactivo del cuerpo.

Cosmecéuticos

Las algas están ganando cada vez más popularidad en la cosmética. Su uso en tratamientos de belleza y salud se remonta a las medicinas tradicionales asiáticas, y existen indicios de que se habían comenzados a utilizar ya en el siglo XIX en Francia, concretamente en la zona de la Bretaña. Pero hoy en día el desarrollo de nuevos productos basados en extractos de algas marinas está de moda.

Los derivados de algas que se utilizan en cosmética pueden clasificarse en dos grandes grupos:

- Activos: aquellos derivados que aportan al producto cosmético una actividad determinada (ej: hidratante, emoliente, tonificante, etc).

- Excipientes: aquellos derivados que se utilizan para obtener una mejor textura del producto, modificar su viscosidad, su reología o dar una mayor estabilidad a la formula.

Las algas son utilizadas en cosmética por la riqueza y diversidad de su composición química, fundamentalmente por sus oligoelementos, pigmentos, carotenoides, ácidos grasos y vitaminas. Su utilización es generalizada en cremas bronceadoras, hidratantes y antienvejecimiento, mascarillas faciales, productos capilares, lociones para la piel, preparados para el baño, champús e incluso geles de ducha.

En cosmetología suelen utilizarse tres tipos de algas; *Fucus* spp., *Ascophyllum nodosum* y algunas especies de *Laminaria*, tanto por su actividad hidratante, antioxidante, drenante y anticelulítica como por sus propiedades para modificar la textura y la viscosidad de los productos gracias a las propiedades gelificantes de algunos de sus componentes.

La introducción del concepto de cosmecéuticos se basa en la fusión de cosméticos con productos farmacéuticos, dando lugar a productos cosméticos que contienen compuestos bioactivos en su composición. La explotación de compuestos bioactivos en algas y su extracción para su aplicación en productos cosméticos aseguraron su entrada en este nuevo mercado.

Estos son ricos en compuestos fenólicos y carotenoides que les proporcionan no solo protección contra la radiación UV-B y UV-A, sino también con propiedades antisépticas antiinflamatorias, antioxidantes, antitumorales y antibióticas, que también promueven el sistema circulatorio y la eliminación de toxinas.

Además, debido a su alto contenido de sal y yodo, permiten un equilibrio isotónico de la piel (Pereira, 2018). La aplicación del *Laminaria ochroleuca* se verifica principalmente en el área cosmética, para extracción de filoides (Cardoso et al., 2014). Varios estudios demuestran su actividad antimicrobiana, antifúngica y antibacteriana (Saidani, 2012; Wang et al., 2015b; Chemat et al., 2020) y también antiinflamatoria, utilizada en terapias tópicas.

Biomateriales

La industria farmacéutica utiliza excipientes tanto sintéticos como naturales. Entre los de origen natural, los excipientes a base de polisacáridos han estado registrando una mayor aplicación, debido a su capacidad para producir una amplia gama de materiales, transportadores y dispositivos, debido a propiedades específicas (Cunha y Grenha, 2016). Esta área, que incluye la ingeniería de tejidos, la medicina regenerativa y la administración de fármacos, está constantemente buscando nuevos biomateriales con propiedades innovadoras. Los polisacáridos son candidatos potenciales, no sólo por su propensión a la biocompatibilidad y biodegradabilidad, sino también por su coste relativamente bajo.

Los polisacáridos hidrófilos reticulados tienen la capacidad de absorber grandes cantidades de agua, solución salina o soluciones fisiológicas, una propiedad pertinente para el tratamiento de heridas. Además, debido a su bioactividad, estos productos pueden participar en el proceso de regeneración de heridas, lo que los convierte en una clase importante de biomateriales funcionales para el tratamiento bioactivo de lesiones cutáneas. Así, la aplicación de polisacáridos en formulaciones farmacéuticas incluye su utilización en la producción de implantes, películas, nanopartículas e hidrogeles, entre otros (Muhamad et al., 2019), además de su utilización en el desarrollo de cosméticos (Ahsan, 2019).

Algunas de las características de los polisacáridos sulfatados determinantes para su aplicación como biomateriales funcionales en biotecnología son: 1) los enlaces glucosídicos, que pueden ser fácilmente cortados por enzimas de hidrolasa, lo que contribuye a su biodegradabilidad; (2) la presencia de grupos sulfato cargados negativamente que potencian el comportamiento de los polielectrolitos y permiten la funcionalización para aplicaciones específicas (Raveendran et al., 2013); y (3) la presencia de grupos hidroxilo (OH) en la estructura que facilita potenciales modificaciones químicas, tales como la introducción de grupos hidrófobos, ácidos o básicos, capaces de alterar las propiedades de los biopolímeros, permitiendo una adaptación específica hacia la aplicación. Con base en estas características, el uso de polisacáridos en el desarrollo de sistemas de administración de compuestos activos y fármacos se ha propuesto con frecuencia, como extensamente ha sido revisado por Cunha y Grenha (2016) o Ruocco et al. (2016).

Los polisacáridos extraídos de las macroalgas son asequibles y sostenibles, y demuestran una alta eficacia terapéutica y seguridad para el uso humano. Sin embargo, su proceso de aislamiento, la inexistencia de procedimientos standard para su extracción, la variabilidad del hábitat o la estación, y la escasa correlación entre los resultados *in vitro* e *in vivo* pueden limitar su traducción clínica. Las diferencias entre los estudios pueden atribuirse predominantemente a la ausencia de sistemas de administración adecuados, y la maximización del potencial terapéutico de los polisacáridos marinos deberá estar asociada al diseño de nuevos sistemas de administración que sean altamente compatibles con los polisacáridos. Este esfuerzo continuo resultará en la utilización de estos polímeros como terapéuticos y materiales y su aplicación en la ingeniería biomédica y la industria farmacéutica, que ampliará la gama de aplicaciones de los polisacáridos, proporcionando ventajas novedosas que no se han logrado con los polímeros existentes (Lee et al., 2017). En los trabajos de Salehi et al. (2019) y de Ruocco et al. (2016) se describieron los polisacáridos extraídos de las macroalgas con mayor potencial industrial, identificando sus aplicaciones:

- Los **fucoidanos** son una familia de polisacáridos estructurales de L-fucosa con un porcentaje variable de grupos de sulfato y diferentes enlaces glucosídicos, que se encuentran en algas pardas, siendo la especie *Fucus vesiculosus* la que ha sido descrita con un contenido más alto. Varios estudios han reportado el interés farmacológico de los fucoidanos ya que exhiben actividades antiinflamatorias,

anticoagulantes, antimicrobianas y antitumorales, además de tener un efecto inmunomodulador. Además, el uso de fucoidanos en productos cosméticos ya ha sido descrito en la literatura, ya que parecen atenuar los efectos visibles del envejecimiento de la piel como manchas y arrugas, basándose en la inhibición de la metaloproteinasa, que es inducida por la radiación UVB, y de la tirosinasa, reduciendo la pigmentación de la piel, además de la eliminación de radicales libres, reducción de la inflamación, arrugas, alergias, y la reacción sensible de la piel. El fucoidano también es capaz de aumentar la proliferación de fibroblastos y colágeno y la deposición de otros factores de la matriz extracelular.

- El **agar,** conjuntamente con los carragenanos, son los polisacáridos estructurales más abundantes en algas rojas, y se identifican principalmente en especies de *Gracilaria* y *Gelidium*, que tienen amplias aplicaciones en la industria alimentaria principalmente como gelificante, espesante y aditivos alimentarios estabilizadores (E406), y también es utilizado por las industrias farmacéuticas médicas (por ejemplo, en la producción de cápsulas y como medio para culturas celulares y bacterianas). Como otros polisacáridos extraídos de las algas, el agar también exhibe interesantes actividades biológicas. Por ejemplo, puede actuar como agente citotóxico, hipoglucémico y anticoagulante, mientras que su hidrólisis produce agaro-oligosacáridos con actividad antioxidante, antiinflamatoria y anti-glucosasidasa. Además es usado en cremas com emulsificante y establizador en distintos productos cosméticos.
- **Los carragenanos** son polisacáridos sulfatados no asimilables en el tracto digestivo humano y obtenidos principalmente de algas rojas, la mayoría de ellas comestibles, que tienen un alto valor comercial, principalmente porque pueden formar geles termorreversibles con aplicaciones en el desarrollo de cosméticos (por ejemplo, como estabilizadores de emulsión, películas, pasta de dientes, lociones, filtros solares, agentes acondicionadores capilares, etc.), farmacéuticos (por ejemplo, en la administración de medicamentos, ingeniería de tejidos y antivirales) e industrias alimentarias (por ejemplo, como E407 o E407a, principalmente en productos lácteos). Los carragenanos también mostraron interesantes actividades citotóxicas *in vitro* e *in vivo*, como anticoagulantes, anti-hipercolesterolémicas, antioxidantes y neuroprotectoras. A pesar de las actividades anteriores, el uso de carragenanos como ingrediente activo en la industria farmacéutica todavía no es una realidad significativa. No obstante, los carragenanos ya han sido incluidos en las farmacopeas de Britannica, Europea y Americana, y por lo tanto, pronto se utilizarán como excipientes farmacéuticos.
- Los **ulvanos** son la familia principal de heteropolisacáridos sulfatados solubles en agua con propiedades gelificantes extraídas de algas verdes, y cuyos enlaces glucosídicos no se degradan por las enzimas humanas y bacterianas. La estructura regular que contiene ácidos urónicos, grupos de sulfato y azúcares raros (rhamnosa, ácido idurónico) está relacionada con sus propiedades

funcionales. Estos polisacaridos exhiben diversas actividades biológicas tales como inmunomoduladores, antioxidantes y anticoagulantes, aunque su actividad depende del grado de sulfatación, la estructura tridimensional, y la proporción de componentes del azúcar.

- Los **alginato**s están constituidos por unidades de ácidos manurónicos y gulurónicos y son responsables, al menos parcialmente, de la flexibilidad de las algas marinas. La presencia de un grupo carboxilo en cada monómero confiere un carácter aniónico a los alginatos que es variable con pH, y debido a esto, se puede extraer en forma de sal (llamados alginatos) o ácido (ácidos algínicos). Las porciones de polímero compuestas de ácido gulurónico (α-1→4) exhiben una estructura enrollada, formando cavidades donde se pueden alojar iones Ca^{2+} o otros iones como Fe^{3+} y Al^{3+}, que estabilizan la estructura y confieren las propiedades gelificantes a los alginatos por los que son tan comercialmente conocidos y ampliamente utilizados en la industria farmacéutica y cosmética. Una aplicación interesante es en la formulación de mascarillas de belleza protectoras para la piel para las que los alginatos producen una película flexible con una mejor adherencia a la piel. Los alginatos son hidrogeles no tóxicos con excelentes propiedades que promueven su aplicación en la industria farmacéutica como auxiliares en la administración de medicamentos, ingeniería de tejidos, y alivio de la esofagitis y síntomas de acidez estomacal; en la industria cosmética como agentes gelificantes; y en la industria alimentaria como aditivos (E400–405).
- El **laminarano** es un homopolímero de almacenamiento producido después de una fase de mayor crecimiento de algas marinas, lo que significa que su contenido es específico de la temporada y es más alto al inicio del invierno. Aunque carece de la capacidad de gelificación o de incremento de la viscosidad de una solución acuosa, su uso con fines médicos y farmacéuticos es de gran interés. De hecho, algunos estudios han demostrado su acción antitumoral, su potencial como polvo quirúrgico, y acción anticoagulante de su forma sulfatada.

De entre los polisacáridos derivados de algas ampliamente utilizados para aplicaciones biológicas y biomédicas, los polisacáridos sulfatados característicos de las algas pardas y rojas, presentan características únicas para su aplicación clínica, considerando que se asemejan a de los glucosaminoglicanos derivados de mamíferos, aunque que puedan presentar efectos adicionales o ligeramente distintos, explotables en el desarrollo de nuevos materiales y dispositivos biomédicos (Muhamad et al., 2019).

Los avances recientes en el área de la cicatrización de heridas sugieren que la prevención de potencial infección, el incremento del flujo sanguíneo y la disponibilidad de factores de crecimiento y nutrientes son los parámetros determinantes para una cicatrización rápida y efectiva de la herida. La búsqueda de nuevos materiales con actividades y funcionalidades mejoradas sustenta la investigación sobre nuevos recursos como

fuentes de biomateriales para el área de la regeneración de la piel. Una revisión de Kumar y Berthiaume (2019) destaca la amplia gama de propiedades mecánicas además de la excelente biocompatibilidad y biodegradabilidad de los polisacáridos de algas, en que se muestran como potenciales candidatos de fuentes naturales de biomateriales que sustenten el desarrollo de nuevos sistemas para la administración de fármacos y para la cicatrización de heridas. Otras propiedades que incluyen la actividad antiviral, antibacteriana y antifúngica; capacidad para modular la coagulación, antioxidante, immunomoduladora son igualmente determinantes para su aplicación la cicatrización de la piel. El alginato es uno de los polisacáridos de algas con más aplicaciones en el área biomédica, con varios productos ya disponibles en el mercado (Tabla 6).

Tabla 6. Ejemplos de revestimientos de piel basados en alginato disponibles en el mercado (adaptado de Aderigbide y Buyana, 2018).

Apósitos comerciales a base de alginato	Composición	Referencias
Algicell™	Alginato sódico, 1,4% plata	Lee y Mooney, 2011. http://www.woundsource.com/product/algicell-ag-antimicrobial-alginate-dressing
AlgiSite™	Alginato cálcico	http://www.smith-nephew.com/professional/products/advanced-woundmanagement/algisite-m/
Confell Plus™	Alginato cálcico y carboximetilcelulosa sódica	http://www.dressings.org/Dressings/comfeel-plus.html
Kaltostat™	Alginato sódico	https://fsastore.com/KALTOSTATCalcium-Sodium-Alginate-Dressing-3-x-4-34-Box-of-10-P23356.aspx (
Sorbsan™	Alginato cálcico	http://www.aspenmedicaleurope.com/specialist_wound_car/sorbsan-flat/
Tegagen™	Alginato sódico	O'Meara et al., 2015
Guardix-SG®	Alginato sódico y poloxámero	Szekalska et al., 2016.
SeaSorb®	Alginato cálcico	Szekalska et al., 2016.
Alginov®	Alginato cálcico y miel de manuka	http://www.advancis.co.uk/products/activon-manuka-honey/algivon (

Hyalogram®	Alginato sódico y ácido hialurónico	http://www.anikatherapeutics.com/ products/dermal/hyalogran/
Tromboguard®	Sodium alginate, calcium alginate, chitosan, polyruethane and silver cations Alginato sódico, alginato cálcico, quitosano, poliuretano y cationes de plata	http://matopat.ro/wp-content/uploads/sites/2/2013/12/tromboguardleaflet.pdf
Fibracol™Plus	Alginato cálcico y colágeno	http://www.woundsource.com/product/fibracol-plus-collagen-wound-dressing-alginate

4.2.4. Sector alimentación animal y acuicultura

Tradicionalmente las algas han sido utilizadas como alimento de ovejas, ganado y caballos en zonas costeras, especialmente en países europeos donde existen arribazones de grandes algas pardas. La aparición de la harina de algas incrementó masivamente su uso como alimentación en animales. Noruega fue uno de los primeros productores de harina de algas utilizando *Ascophyllum nodosum* como base.

A. nodosum es generalmente la principal materia prima utilizada en la producción de harina de algas y la mayor parte de los trabajos experimentales para medir la efectividad de la harina de algas se ha realizado utilizando esta alga. Los análisis muestran que contiene suficientes cantidades de minerales (potasio, sodio, magnesio, calcio, sodio, cloro y fósforo) elementos traza, esenciales para los humanos y otros mamíferos en pequeñas cantidades, y vitaminas.

La harina de algas pardas ha sido también utilizada en la piscicultura como aglutinante del alimento proporcionado a los peces. El alginato presente en las algas actúa como un aglutinador del alimento o evitando que este se disuelva una vez entra en contacto con el medio acuoso. Sin embargo debido a que la tendencia es el uso de alimento seco, este mercado no se espera que crezca en los próximos años.

Existe también un mercado de uso de algas frescas como alimento para el abalón u oreja de mar. En Australia, se ha utilizado tanto el alga parda *Macrocystis pyrifera* como el alga roja *Gracilaria edulis* para este fin. En Sudáfrica debido a la alta demanda de *Porphyra* como alimento para el abalón se han realizado distintas recomendaciones para gestionar las poblaciones salvajes de esta especie de forma sostenible. El alga *Palmaria mollis* es también un recurso alimenticio de mucho valor para el abalón rojo, *Haliotis rufescens*, lo que ha llevado al desarrollo de cultivos en tierra de esta alga con el objetivo de producir cantidades comerciales. *Ulva lactuca* por su parte se utiliza como alimento de *Haliotis tuberculata* y *H. discus*.

5. GLOSARIO

- **Alternancia de generaciones:** forma alternativa de llamar al ciclo de vida espórico, donde interactúan dos fases somáticas adultas con diferente carga genética, una haploide y otra diploide.
- **Anisogamia:** tipo de reproducción sexual en la que el gameto femenino es de tamaño considerablemente mayor al del gameto masculino, ambos móviles.
- **Aplanospora:** espora sin flagelos.
- **Bispora:** cada una de las esporas pareadas dentro de un esporangio.
- **Carpogonio:** (en Rhodophyceae): oogonio que consiste en una porción basal hinchada (que contiene el núcleo femenino) y un extremo alargado incoloro (el tricógeno) el cual atrapa al gameto masculino que es disparado del espermatangio. Es sinónimo de arquegonio para este grupo.
- **Carpospora:** (en Rhodophyceae) espora diploide que se forma en el esporangio y que al germinar produce el tetrasporófito.
- **Carposporangio:** esporangio producido directa o indirectamente por la división del núcleo del cigoto.
- **Carpospora:** (en Rhodophyceae): células diploides producidas por el carposporangio.
- **Carposporófito:** talo gametofítico que presenta carposporangios y es parásito del gametofito femenino.
- **Célula axial:** célula del eje central del talo.
- **Ciclo de vida:** secuencia recurrente de fases somáticas y nucleares, de acuerdo al número de organismos adultos (fases somáticas), de vida libre o parásita, con diferente carga genética (haploide o diploide) que interactúan en el ciclo, se denominan a) Monofásico: una forma adulto de vida libre (haploide), b) Difásico: dos adultos de vida libre, uno haploide y otro diploide y c) Trifásico: dos adultos de vida libre, uno haploide y otro diploide y una fase parásita diploide.
- **Cistocarpo:** (en Rhodophyceae) gonimocarpo cuando presenta una cubierta de células (pericarpo) procedente del gametófito y de dotación haploide. Puede presentar una apertura (carpostoma u ostiolo) a través del cual salen los carposporocistes.
- **Espermacio:** (en Rhodophyceae) célula sexual masculina sin flagelos.
- **Espermatangio:** (en Rhodophyceae) sinónimo de anteridio.

- **Espora:** estructura reproductora unicelular, haploide o diploide, que al germinar desarrolla un individuo.
- **Esporangio:** estructura especializada donde se forman las esporas resultado de la división celular.
- **Esporófito:** fase diploide que por meiosis forman esporas.
- **Gametangio:** estructura donde se diferencian y albergan los gametos. Generalmente se le denomina: Anteridio: donde se producen los gametos masculinos. Arquegonio: donde se producen los gametos femeninos.
- **Gameto:** célula reproductora sexual, haploide, flagelada o no.
- **Gametófito:** se denomina así a la fase vital productora de gametos. En la mayoría de las algas, el gametófito es haploide y produce gametos por mitosis, pero en algunos casos (ej. *Codium*) los gametófitos son diploides y producen gametos mediante meiosis.
- **Gonimoblasto:** filamento que surge después de la singamia y que origina al carposporangio.
- **Gonimocarpo:** cuerpo compacto formado por el gonimoblasto inicial, en el que la mayoría de las células pueden convertirse en carposporocistes. Suele utilizarse como sinónimo de gonimoblasto. Después de la fecundación y la cariogamia, el carpogonio, el cual es ahora diploide, se divide y da lugar a un sistema compacto de filamentos diploides los cuales producen esporas. Los cortos filamentos esporógenos son denominados gonimoblastos y la totalidad del sistema del gonimoblasto es denominado gonimocarpo.
- **Isogamia:** tipo de reproducción sexual en que los gametos femenino y masculino presentan la misma morfología y tamaño, ambos móviles.
- **Monospora:** espora única formada dentro de un esporangio.
- **Nodo:** (en Charophyceae y plantas vasculares): parte de un eje que lleva una o más hojas o ramas laterales
- **Oogamia:** fusión de un gameto masculino de tamaño reducido con un gameto femenino de mayor tamaño respecto del masculino, no móvil.
- **Oogonio:** gameto femenino, de forma esférica, sésil
- **Pericarpo:** (en Rhodophyceae) cubierta de origen gametofítico que rodea al gonimoblasto y que junto con aquél constituye la fructificación llamada cistocarpo.
- **Prototricógina:** porción alargada y emergente de una célula del talo que funciona como carpogonio, en Bangiophycidae.

- **Soro:** área en la superficie del talo donde se encuentran reunidas las estructuras reproductoras
- **Tetraspora:** cada una de las esporas que se encuentran en grupos de cuatro dentro del esporangio.
- **Tetrasporófito:** (en Rhodophyceae) talo esporofítico que produce tetrasporas haploides que originarán la generación gametofítica.
- **Zoospora:** espora flagelada.

6. BIBLIOGRAFÍA

Abrantes J.L., Barbosa J., Cavalcanti D., Pereira R.C., Frederico Fontes C.L., Teixeira V.L., Moreno Souza T.L., Paixão I.C.P. 2010. The effects of the diterpenes isolated from the Brazilian brown algae *Dictyota pfaffii* and *Dictyota menstrualis* against the herpes simplex type-1 replicative cycle. Planta Med. York,76(4):339–44

Abreu, M. H., Sousa, P., Pereira, R. P. 2005. Cultivo integrado de *Gracilaria* nas aquaculturas da Ria de Aveiro. Relatório Técnico Final-Resumo. ALGAplus. https://www.algaplus.pt/pdf/rel_final_CIGArRA.pdf

Aderibigbe, B.A. Buyana, B. 2018. Alginate in Wound Dressings. Pharmaceutics 10, 42. doi.org/10.3390/pharmaceutics10020042

Aguilera, J., Figueroa, F.L., Niell, F.X. 1997. Photocontrol of short-term growth in *Porphyra leucosticta* (Rhodophyta). European Journal of Phycology 32: 417-424.

Ahmadi, A., Moghadamtousi, S. Z., Abubakar, S., Zandi, K. 2015. Antiviral potential of algae polysaccharides isolated from marine sources. A review. BioMed Research International, pages 1–10.

Ahsan, H. 2019. The significance of complex polysaccharides in personal care formulations. Journal of Carbohydrate Chemistry, doi.org/10.1080/07328303.2019. 1615498

Ainis, A.F., Vellanoweth, R.L., Lapeña, Q.G., Thornber, C.S. 2014. Using non-dietary gastropods in coastal shell middens to infer kelp and seagrass harvesting and paleoenvironmental conditions. Journal of Archaeological Science 49, 343-360.

Akbarzadeh, S., Gholampour, H., Farzadinia, P., Daneshi, A., Ramavandi, B., Moazzeni, A., Keshavarz, M., Bargahi, A. 2018. Anti-diabetic effects of Sargassum oligocystum on Streptozotocin-induced diabetic rat. Iran. J. Basic Med. Sci., doi:10.22038/ijbms.2018.25654.6329.

Alam, S., Katiyar, D., Goel, R., Vats, A., Mittal, A. 2013. Role of herbals in cancer management. The Journal of Phytopharmacology 2(6): 46-51.

AlgaeBase, 2020. https://www.algaebase.org/browse/taxonomy/?id=97240. Acceso 13-04-2020.

Alghazwi, M., S. Smid, S., Karpiniec, Zhang, W. 2019. Comparative study on neuroprotective activities of fucoidans from *Fucus vesiculosus* and *Undaria pinnatifida*. International Journal of Biological Macromolecules 122:255–64. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2018.10.168.

Andersen, R. A. (Ed.) 2005. Algal culturing techniques. Elsevier Academic Press, Londes, Reino Unido, 589 pp.

APROMAR, 2014. Evaluación del estado de explotación y propuestas de gestión sostenible y cultivo de macroalgas en Andalucía, Asturias y Galicia. http://www.apromar.es/content/proyecto-sobre-la-gesti%C3%B3n-sostenible-y-cultivo-de-macroalgas. Acceso el 10-12-2019.

APROMAR, 2019. La Acuicultura en España 2019. 91 pp. apromar.es/sites/default/files/2019/InformeAcui/APROMAR%20Informe%20ACUICULTURA%202019%20v-1-2.pdf

Ara, J., Sultana, V., Qasim, R., Ahmad, V.U. 2002. Hypolipidaemic activity of seaweed from Karachi coast. Phytotherapy Research, 16, 479-483. http://dx.doi.org/10.1002/ptr.909

Ashkenazi, D. Y., Israel, A., Abelson, A. 2019. A novel two-stage seaweed integrated multi-trophic aquaculture. Reviews in Aquaculture, 11(1), 246-262.

AtseaNova. 2019. Online in: https://atseanova.com/proyectos/?lang=es

Baba, M., Snoeck, R., Pauwels, R. De Clercq, E. 1988. Sulfated polysaccharides are potent and selective inhibitors of various enveloped viruses, including herpes simplex virus, cytomegalovirus, vesicular stromatitis virus, and human immunodeficiency virus. Antimicrobial Agents and Chemotherapy, 32, 1742-1145. http://dx.doi.org/10.1128/AAC.32.11.1742

Balasundram N., Sundram K., Samman S. 2006. Phenolic compounds in plants and agri-industrial by-products: Antioxidant activity, occurrence, and potential uses. Food Chem. 99(1):191–203.

Balboa, E.M., Conde, E., Moure, A., Falqué, E., Domínguez, H., 2013. In vitro antioxidant properties of crude extracts and compounds from brown algae. Food Chem. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.11.026

Bárbara, I. 2017. Biología de las algas cultivables (material de docencia). Máster en acuicultura. Universidad de Vigo.

Bartsch, I., Wiencke, C., Bischof, K., Buchholz, C.M., Buck, B.H., Eggert, A., Feuerpfeill, P., Hanelt, D., Jacobsen, S., Karez, R., Karsten, U., Molis, M., Roleda, M.Y., Schubert, H., Schumann, R., Valentin, K., Weinberger, F., Wiese, J. 2008. The genus *Laminaria* sensulato: recent insights and developments. European Journal of Phycology 43, 1-86.

Batista González, A.E., Charles, M., Mancini-Filho, J., Vidal Novoa, A. 2009. Las algas marinas como fuentes de fitofármacos antioxidantes: [revisión]. Rev. Cuba. Plantas Med 14(2).

Baweja, P., Kumar, S., Sahoo, D., Levine, I. 2016. Biology of Seaweeds. En: Seaweed in Health and Disease Prevention (1st ed.). Fleurence J., Levine, I. (Eds.). Academic Press, Cambridge, Massachusetts, EE UU. 476 pp. 10.1016/B978-0-12-802772-1.00003-8.

Berecibar, E. 2011. Long-term changes in the phytogeography of the Portuguese continental coast. PhD thesis, Universidade do Algarve, Faro, Portugal

Blumenthal, P.D. 1988. Prospect comparison of dilapan and *Laminaria* for pretreatment of the cervix in second trimester induction of abortion. Obstetrics Gynecology, 72, 243-246.

Bouzon, Z.L., Simioni, C., Schmidt, E.C. 2014. The Structure and Morphology of Red Algae Chloroplasts. En: Hohmann-Marriott M. F. (ed.) The Structural Basis of Biological Energy Generation. Advances in Photosynthesis and Respiration (Including Bioenergy and Related Processes), vol 39. Springer, Dordrecht. 483 pp.

Bowman, J. L., Sakakibara, K., Furumizu, C., Dierschke T. 2016. Evolution in the cycles of life. Annu. Rev. Genet. 50 133–154. 10.1146/annurev-genet-120215-035227.

Braune, W., Guiry, M.D. 2011. Seaweeds. A colour guide to common benthic green, brown and red algae of the world's oceans. Koeltz Botanical Books (Ed.), Oberreifenberg, Alemania, 601 pp.

Brodie, J., Irvine, L. M. 1997. A comparison of *Porphyra dioica* sp. nov. and *P. purpurea* (Roth) C. Ag. (Rhodophyta: Bangiophycidae) in Europe. Cryptogame: Algologie. 18: 283-297.

Brodie, J., Irvine, L.M. 2003. Seaweeds of the British Isles. Volume 1. Rhodophyta. Part 3B. Bangiophycidae. pp. i-xiii, 1-167.

Brodie, J., Irvine, L., Neefus, C.D., Russell, S. 2008. *Ulva umbilicalis* Linnaeus and *Porphyra umbilicalis* Kützing (Rhodophyta, Bangiaceae): a molecular and morphological redescription of the species, with a typification update. Taxon 57: 1328-1331

Brown, J.W., Sorhannus, U. 2010. A molecular genetic timescale for the diversification of autotrophic stramenopiles (Ochrophyta): substantive underestimation of putative fossil ages. PLoS One 5(9). doi: 10.1371/journal.pone.0012759.

Buck, B. H., Krause, G., Pogoda, P., Grote, B., Wever, L., Goseberg, N., 2017. Case study German Bight: pioneer projects of aquaculture-wind farm multi-uses. En: Aquaculture Perspective of Multi-Use Sites in the Open Ocean: The Untapped Potential for Marine Resources in the Anthropocene. Buck B. H. y Langan R. (Eds.) Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51159-7

Buck, B. H., Troell, M. F., Krause, G., Angel, D., Grote, B., Chopin, T. 2018. State of the art and challenges for offshore integrated multi-trophic aquaculture (IMTA). Frontiers in Marine Science, 5:165.

Bunker, F.StP.D., Brodie, J.A., Maggs, C.A., Bunker, A.R. 2010. Sea search guide to seaweeds of Britain and Ireland. Wild Nature Press (Ed.), Oxford, Reino Unido, 312 pp.

Buschmann, A., Camus, C., Infante, J., Neori, A., Israel, A., Hernández-González, M., Pereda, S., Gomez-Pinchetti, J. L., Golberg, A., Tadmor-Shalev, M., Critchley, A. 2017. Seaweed production: overview of the global state of exploitation, farming and emerging research activity. European Journal of Phycology, 52:4, pp. 391-406, DOI: 10.1080/09670262.2017.1365175

Cardoso, S., Carvalho, L.G., Silva, P.J., Rodrigues, M.S., Pereira, L. 2014. Bioproducts from Seaweeds: A review with special focus on the Iberian Peninsula. Current Organic Chemistry, 18(7), 896–917.

Castelar, B., Pontes, M. D., de Melo Costa, W., Fontes, L. C. 2015. Biofiltering efficiency and productive performance of macroalgae with potential for integrated multi-trophic aquaculture (IMTA). Boletim do Instituto de Pesca, 41, 763-770.

Charrier, B., Le Bail, A., de Reviers, B. 2012. Plant Proteus: Brown algal morphological plasticity and underlying developmental mechanisms. Trends in Plant Science 17, 468-477. DOI: 10.1016/j.tplants.2012.03.003

Chemat, F., Abert Vian, M., Fabiano-Tixier, A.S., Nutrizio, M., Režek Jambrak, A., Munekata, P.E.S., Lorenzo, J.M., Barba, F.J., Binello, A., Cravotto, G. 2020. A review of sustainable and intensified techniques for extraction of food and natural products. Green Chem. 2020, https://doi.org/10.1039/C9GC03878G

Chemodanov, A., Robin, A., Golberg, A. 2017. Design of marine macroalgae photobioreactor integrated into building to support seagriculture for biorefinery and bioeconomy. Bioresource technology, 241, pp. 1084-1093.

Cherry, P., Yadav, S., Strain, C.R., Allsopp, P.J., Mcsorley, E.M., Ross, R.P., Stanton, C., 2019. Prebiotics from seaweeds: An ocean of opportunity? Mar. Drugs. https://doi.org/10.3390/md17060327

Chung, H., Kim, N. G., Choi, K. J., Woo, H. C. 2015. Novel ocean system for high density mass production of seaweed biomass in Korea. In 2015 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM15).

Church, F.C., Meade, J.B., Treanor, R.E. and Whinna, H.C. (1989) Antithrombin Activity of Fucoidan. The Interaction of Fucoidan with Heparin Cofactor II, Antithrombin III, and Thrombin. Journal of Biological Chemistry, 264, 3618-3623

Cock, J., Sterck, L., Rouzé, P. et al. 2010. The *Ectocarpus* genome and the independent evolution of multicellularity in brown algae. Nature 465, 617–621. https://doi.org/10.1038/nature09016

Coelho S. M., Godfroy O., Arun A., Le Corguillé G., Peters A. F., Cock J. M. (2011a). Genetic regulation of life cycle transitions in the brown alga *Ectocarpus*. Plant Signal. Behav. 6 1858–1860. 10.4161/psb.6.11.17737

Colliec, S., Fischer, A.M., Tapon-Bretaudiere, J., Boisson, C., Durand, P. and Jozefonvicz, J. (1991) Anticoagulant Properties of a Fucoidan Fraction. Thrombosis Research, 64, 143-154 http://dx.doi.org/10.1016/0049-3848(91)90114-

Comparini. C., Lesueur M., Lucas, S., Gouin, S. (eds.). 2015. Les algues alimentaires: aujourd'hui – demain. Actes de la 3e édition des journées professionnelles de Rennes. Programme IDEALG. Les publications du Pôle halieutique AGROCAMPUS OUEST n°39. https://ideas.repec.org/p/hal/journl/hal-01344325.html

Cordero Jr., P.A. 2003. Marine foods production and uses of marine algae. Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition. Elsevier, Oxford, 3726-3728.

Cornish, M.L., Garbary, D.J. 2010. Antioxidants from macroalgae: potential applications in human health and nutrition. Algae, doi:10.4490/algae.2010.25.4.155.

Cremades, J. U., Freire, Ó. G., Peteiro, C. G. 2006. Biología, distribución e integración del alga alóctona *Undaria pinnatifida* (Laminariales, Phaeophyta) en las comunidades bentónicas de las costas de Galicia (NW de la Península Ibérica). Anales del Jardín Botánico de Madrid 63: 2, pp. 169-187.

Cunha, L., Grenha, A. 2016. Sulfated seaweed polysaccharides as multifunctional materials in drug delivery applications. Mar. Drugs 14(3), 42; https://doi.org/10.3390/md14030042

Damonte, E., Neyts, J., Pujol, C.A., Snoeck, R., Andrei, G., Ikeda, S., Witvrouw, M., Reymen, D., Haines, H., Matulewicz, M.C., Cerezo, A., Coto, C.E., De Clercq, E., 1994. Antiviral activity of a sulphated polysaccharide from the red seaweed *Nothogenia fastigiata*. Biochem. Pharmacol. https://doi.org/10.1016/0006-2952(94)90254-2

Damonte, E.B., Matulewicz, M.C., Cerezo, A.S., Coto, C.E. 1996. Sulfated xylogalactans from the red seaweed *Nothogenia fastigiata*. Chemotherapy 42, 57–64 https://doi.org/10.1159/000239422

Damonte, E., Matulewicz, M., Cerezo, A., 2012. Sulfated seaweed polysaccharides as antiviral agents. Curr. Med. Chem. https://doi.org/10.2174/092986704336450

Daskalaki, M. G., Vyrla, D., Harizani, M., Doxak, C., Eliopoulos, A.G., Roussis, V., Ioannou, E., Tsatsanis, C., Kampranis, S.C. 2019. Neorogioltriol and related diterpenes from the red alga *Laurencia* inhibit inflammatory bowel disease in mice by suppressing M1 and promoting M2-like macrophage responses. Marine Drugs 17 (2) 10.3390/md17020097

Déléris, P.; Nazih, H.; Bard, J.M. 2016. Seaweeds in Human Health. In: Seaweed in Health and Disease Prevention; ISBN 9780128027936.

Des Abbayes, H., Chadefaud, H., Feldman, J., de Ferré, Y., Gausen, H., Grassé, P.P., Prévot, A.R. 1989. Botánica. Vegetales inferiores. Ed. Reverté. 768 pp.

Dhargalkar, V.K., Kavlekar D. 2004. Seaweeds – A field manual. En: Varlecar, X.N., Rathod, V. (Eds.) Dona Paula, Goa, India. 42 pp.

Dillehay, T.D., Ramírez, C., Pino, M., Collins, M.B., Rossen, J., Pino-Navarro, J.D. 2008. Monte Verde: Seaweed, Food, Medicine, and the Peopling of South America. Science 320 (5877), 784-786. DOI: 10.1126/science.1156533

Diplock, A.T., Aggett, P.J., Ashwell, M., Bornet, F., Fern, EB, Roberfroid, M.B. 1999. Scientific concepts of functional foods in Europe: consensus document. British Journal of Nutrition 81: 1- 27.

Dixon, P.S.; Irvine, L.M. 1995. Seaweeds of the British Isles: Rhodophyta, Part 1. Introduction, Nemaliales, Gigartinales. Seaweeds of the British Isles, 1. Natural History Museum: London, UK. ISBN 0-11-31000-0. 252 pp.

Dodds, W., Whiles, M. 2020. Freshwater ecology. Concepts and environmental applications of limnology (3ª ed.). Academic Press, Cambridge, Massachusetts, EE UU. 998 pp.

Drew, K.M. 1949). Conchocelis-phase in the life-history of *Porphyra umbilicalis* (L.) Kütz. Nature 164 (4174): 748–749.

El-Refaey, H. and Templeton, A. 1995. Pregnancy: Induction of Abortion in the Second Trimester by a Combination of Misoprostol and Mifepristone: A Randomized Comparison between Two Misoprostol Regimens. Human Reproduction, 10, 475-478.

Erlandson, J.M., Braje, T.J., Graham, M.H. 2008. How old is MVII?—Seaweeds, shorelines, and the Pre-Clovis Chronology at Monte Verde, Chile. The Journal of Island and Coastal Archaeology 3 (2), 277-281. https://doi.org/10.1080/15564890802412098

Escribano, A. 2019. Influencia del sistema de cultivo en la morfología y productividad de *Ulva ohnoi*: Cultivo de fragmentos de talo en tanques, bioreactores y cuerdas de cultivo (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).

Evans L. V., Holligan, M. S. 1972. Correlated light and electron microscope studies on brown algae. New Phytologist 71, 1173-1180. doi.org/10.1111/j.1469-8137.1972.tb01995.x

Fang, J., Zhang, J., Xiao, T., Huang, D., Liu, S. 2016. Integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) in Sanggou Bay, China. Aquaculture Environmentl nteractions, 8, 201-205.

Fan, K.-C. 1961. Morphological studies of the Gelidiales. University of California Publications in Botany 32, 315-368. University of California Press (ed.), Berkeley, California, EE UU, 57 pp.

FAO, 2002. Perspectivas para la producción de algas marinas en los países en desarrollo. Report No. 986 FIIU/C986 (Es.)

FAO, 2004. El estado mundial de la pesca y acuicultura. FAO, Roma (ed.). http://www.fao.org/3/y5600e/y5600e00.htm#TopOfPage

FAO. 2009. *Porphyra* spp. Cultured aquatic species fact sheets. http://www.fao.org/fishery/culturedspecies/Porphyra_spp/fr. Acceso el 19-11-2019.

FAO, 2014. The State of World Fisheries and Aquaculture. Opportunities and challenges. FAO, Roma (ed.). 243 pp.

FAO. 2018a. El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2018. Cumplir los objetivos de desarrollo sostenible. FAO, Roma (ed.). 227 pp.

FAO, 2018b. The global status of seaweed production, trade and utilization. Globefish Research Programme Volume 124. FAO, Roma (ed.). 120 pp.

Feldman, S.C., Reynaldi, S., Stortz, C.A., Cerezo, A.S. and Damonte, E.B. 1999. Antiviral Properties of Fucoidan Phytomedicine 6, 335-340.

Fjeld, A., Løvlie, A. 1976. Genetics of multicellular marine algae. En: The Genetics of Algae. Botanical Monographs, 219–235. Lewin, R.A. (Ed.). University California Press, Berkeley, CA, EE UU, 360 pp.

Fletcher, R.L., Manfredi, C. 1995. The occurrence of *Undaria pinnatifida* (Phaeophyceae, Laminariales) on the south coast of England. Botanica Marina 38: 355-358

Foscarini, R., Prakash, J. 1990. Handbook on *Eucheuma* cultivation in Fiji. Ministry of Primary Industries, Fisheries Division, and FAO (Eds.). Suva, Fiji.

Freitas, A.C., Pereira, L., Rodrigues, D., Carvalho, A.P., Panteleitchouk, T., Gomes, A.M., Duarte, A.C. 2015. Marine functional foods. En: Kim S-K (ed) Springer handbook of marine biotechnology. Springer, Berlin, pp 969–994

Freitas, J. R., Morrondo, J. M. S., Ugarte, J. C. 2016. *Saccharina latissima* (Laminariales, Ochrophyta) farming in an industrial IMTA system in Galicia (Spain). Journal of Applied Phycology, 28:1, 377-385.

Gabbia, D., Dall'Acqua, S., Di Gangi, I.M., Bogialli, S., Caputi, V., Albertoni, L., Marsilio, I., Paccagnella, N., Carrara, M., Giron, M.C. et al. 2017The Phytocomplex from *Fucus vesiculosus* and *Ascophyllum nodosum* controls postprandial plasma glucose levels: an in vitro and in vivo study in a mouse model of NASH. Mar. Drugs, doi:10.3390/md15020041.

Gaspar, R., Pereira, L., Sousa-Pinto, I. 2019. The seaweed resources of Portugal. Botanica Marina. DOI: 10.1515/bot-2019-0012

Gervasoni, E., Ritter, L. 2012. Etude des potentialités de cultures de macro-algues alimentaires en Languedoc-Roussillon. https://www.cepralmar.org/filieres-maritimes/etude-des-potentialites-de-culture-de-macro-algues-alimentaires-en-languedoc-roussillon.html. Acceso 05-12-2019.

Gerwick, W.H., Proteau, P.J., Nagle, D.G., Wise, M.L., Jiang, Z.D., Bernart, M.W. and Hamberg, M. 1993. Biologically Active Oxylipins from Seaweeds. Hydrobiologia, 260-261, 653-665. http://dx.doi.org/10.1007/BF00049085

Gobierno de España. 2014. Documento de Planificaciones Estratégicas Autonómicas. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

Gómez-Ordoñez, E., Jiménez-Escrig, A., Rupérez, P. 2010. Dietary fibre physicochemical properties of several edible seaweeds from the northwestern Spanish coast. Food Research International 43: 2289-2294.

Gómez-Ordóñez, E. Evaluación nutricional y propiedades biológicas de algas marinas comestibles. Estudios in vitro e in vivo. Tesis Dr. 2013.

Gomez-Zavaglia, A., Prieto Lage, M.A., Jimenez-Lopez, C., Mejuto, J.C., Simal-Gandara, J., 2019. The potential of seaweeds as a source of functional ingredients of prebiotic and antioxidant value. Antioxidants. https://doi.org/10.3390/antiox8090406

Gordon, A. 2017. Case study: Improving the quality and viability of a traditional beverage—Irish Moss. Food Safety and Quality in Developing Countries, 47–79.doi:10.1016/b978-0-12-801226-0.00003-7

Graham, L.E., Graham, J. M., Wilcox, L. W. 2009. Algae (2ª ed.). Pearson Education, Inc., San Francisco, EE UU. 616 pp.

Gregson, R.P., Marwood, J.F.,Quinn, R.J. 1979. The occurrence of prostaglandins PGE2 and PGF2α in a plant—the red alga *Gracilaria lichenoides*. Tetrahedron Letters, 20, 4505-4506. http://dx.doi.org/10.1016/S0040-4039(01)86633-8.

Guiry, M.D. 2001. Macroalgae of Rhodophycota, Phaeophycota, Chlorophycota, and two genera of Xanthophycota. En: Costello, M.J. et al. (Ed.). European register of marine species: a check-list of the marine species in Europe and a bibliography of guides to their identification. Collection Patrimoines Naturels, 50: pp. 20-38.

Guiry M.D., Guiry, G.M. 2020a. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. http://www.algaebase.org; searched on 31 March 2020. https://www.algaebase.org/search/species/detail/?species_id=102

Guiry, M.D., Guiry, G.M. 2020b. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. http://www.algaebase.org; searched on 15 April 2020. https://www.algaebase.org/search/species/detail/?species_id=99

Guiry, M.D., Guiry, G.M. 2020c. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. http://www.algaebase.org; searched on 15 April 2020. https://www.algaebase.org/search/species/detail/?species_id=18864

Guiry, M.D., Guiry, G.M. 2020d. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. http://www.algaebase.org; searched on 15 April 2020. https://www.algaebase.org/search/species/detail/?species_id=101

Guiry, M.D., Guiry, G.M. 2020e. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. http://www.algaebase.org; searched on 16 April 2020.

https://www.algaebase.org/search/species/detail/?species_id=19519&sk=0&from=results

Guiry, M.D., Guiry, G.M. 2020f. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. http://www.algaebase.org; searched on 31 March 2020. https://www.algaebase.org/search/genus/detail/?genus_id=35125&-session=abv4:AC1F22F01156c112AFHNC7A2B125

Guiry, M.D., Guiry, G.M. 2020g. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. http://www.algaebase.org; searched on 9 April 2020. https://www.algaebase.org/search/species/detail/?species_id=129141

Guiry, M.D., Guiry, G.M. 2020h. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. http://www.algaebase.org; searched on 15 April 2020. https://www.algaebase.org/search/species/detail/?species_id=12546&sk=40&from=results

Gupta, V., Trivedi, N., Simoni, S., Reddy, C.R.K. 2018. Marine macroalgal nursery: A model for sustainable production of seedlings for large scale farming. Algal Research 31, 463-468.

Gutierrez Cuesta, R., González García, K., Valdéz Iglesias, O., Hernández Rivera, Y., & Acosta Suárez, Y. 2016. Algas marinas como fuente de compuestos bioactivos en beneficio de la salud humana: Un artículo de revisión. Revista de Ciencias Biológicas y de La Salud. https://doi.org/10.18633/biotecnia.v18i3.331

Hafting, J.T., Critchley, A.T., Scott, M.L.C., Hubley, A., Archibald, A.F. 2012. On-land cultivation of functional seaweed products for human usage. J. Appl. Phycol. 24, 385–392.

Hallsson, S.V., 1992. Drying of seaweeds by geothermal heat in Iceland. Geothermics 21, (5–6), 717-731. doi.org/10.1016/0375-6505(92)90025-5

Harvey WH, 1849. Phycologia Brittanica. pls. 217-252. London, UK: L Reeve & Co.

Hassan, S., El-Twab, S.A., Hetta, M., Mahmoud, B. 2011. Improvement of lipid profile and antioxidant of hypercholesterolemic albino rats by polysaccharides extracted from the green alga *Ulva lactuca* Linnaeus. Saudi J. Biol. Sci., doi:10.1016/j.sjbs.2011.01.005.

Herath, K.H.I.N.M.; Cho, J.; Kim, A.; Kim, H.S.; Han, E.J.; Kim, H.J.; Kim, M.S.; Ahn, G.; Jeon, Y.J.; Jee, Y. 2019. Differential modulation of immune response and cytokine profiles of *Sargassum horneri* ethanol extract in murine spleen with or without Concanavalin A stimulation. *Biomed. Pharmacother.*, doi:10.1016/j.biopha.2018.12.001.

Hernández-Carmona, G., Freile-Pelegrín, Y., Hernández-Garibay, E. 2013. 14 - Conventional and alternative technologies for the extraction of algal polysaccharides. En: Functional Ingredients from Algae for Foods and Nutraceuticals. Woodhead

Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition, 475-516. Woodhead Publishing Limited (Ed.), Cambridge, Reino Unido. 768 pp.

Holdt, S.L., Kraan, S. 2011. Bioactive compounds in seaweed: functional food applications and legislation. J Appl Phycol.,23(3):543–97.

Horst N.A., Reski R. 2016. Alternation of generations - unravelling the underlying molecular mechanism of a 165-year-old botanical observation. Plant Biol. 18 549–551. 10.1111/plb.12468

Hoxmark, R.C. 1975. Experimental analysis of life cycle of *Ulva mutabilis*. Bot. Mar. 18, 123–129. doi: 10.1515/botm.1975.18.2.123

Hurtado, A.Q., Neish, I.C., Critchley, A.T. 2019. Phyconomy: the extensive cultivation of seaweeds, their sustainability and economic value, with particular reference to important lessons to be learned and transferred from the practice of eucheumatoid farming. Phycologia 58, 472-483. https://doi.org/10.1080/00318884.2019.1625632

Imbs, A.B., Vologodskaya, A.V., Nevshupova, N.V., Khotimchenko, S.V. and Titlyanov, E.A. (2001) Response of Prostaglandin Content in the Red Alga Gracilaria verrucosa to Season and Solar Irradiance. Phytochemistry, 58,1067-1072. http://dx.doi.org/10.1016/S0031-9422(01)00321-1

Irvine, L.M., 1983. Seaweeds of the British Isles vol. 1. Rhodophyta Part 2A. Cryptonemiales (sensu stricto), Palmariales, Rhodymeniales. London: British Museum (Natural History).

John, D. M., Rindi, F. 2015. Filamentous (non conjugating) and plantlike green algae. Freshwater Algae of North America, 375–427. doi:10.1016/b978-0-12-385876-4.00008-6

Jönsson, M.; Allahgholi, L.; Sardari, R.R.; Hreggviðsson, G.O.; Nordberg Karlsson, E. Extraction and Modification of Macroalgal Polysaccharides for Current and Next-Generation Applications. Molecules 2020, 25, 930. https://doi.org/10.3390/molecules25040930

Kain, J.M., Destombe, C., 1995. A review of the life history, reproduction and phenology of *Gracilaria*. J. Appl. Phycol. 7, 269–281.

Kain, J.M. 1979. A view of the genus *Laminaria*. Ann. Rev. Oceanogr. Mar. Biol., 17: 101–161.

Kammoun, I.; Ben Salah, H.; Ben Saad, H.; Cherif, B.; Droguet, M.; Magné, C.; Kallel, C.; Boudawara, O.; Hakim, A.; Gharsallah, N.; et al. 2018. Hypolipidemic and cardioprotective effects of Ulva lactuca ethanolic extract in hypercholesterolemic mice. *Arch. Physiol. Biochem.* doi:10.1080/13813455.2017.1401641.

Karimi, A., Rafieian-Kopaei, M., Moradi, M.-T., Alidadi, S., 2016. Anti–Herpes Simplex Virus Type-1 Activity and Phenolic Content of Crude Ethanol Extract and Four Corresponding Fractions of Quercus brantii L Acorn. J. Evid. Based. Complementary Altern. Med. 22, 455–461. https://doi.org/10.1177/2156587216676421

Kidgell, J. T., Magnusson, M., de Nys, R., Glasson, C. R. K. 2019. Ulvan: A systematic review of extraction, composition and function. Algal Research 39, doi.org/10.1016/j.algal.2019.101422.

Kim, K.H., Kim, Y.W., Kim, H.B., Lee, B.J., Lee, D.S. 2006. Anti-apoptotic activity of laminarin polysaccharides and their enzymatically hydrolyzed oligosaccharides from *Laminaria japonica*. Biotechnol. Lett. doi:10.1007/s10529-005-6177-9.

Kim, S.-K., Bhatnagar, I. 2011. Physical, chemical, and biological properties of wonder kelp — *Laminaria*. Advances in Food and Nutrition Research 64, 85–96. doi:10.1016/b978-0-12-387669-0.00007-7

Kim, J. K., Yarish, C., Hwang, E. K., Park, M., Kim, Y. 2017. Seaweed aquaculture: cultivation technologies, challenges and its ecosystem services. Algae, 32(1), 1-13.

Kladi, M., Xenaki, H., Vagias, C., Papazafiri, P., Roussis, V. 2006. New cytotoxic sesquiterpenes from the red algae *Laurencia obtusa* and *Laurencia microcladia*. Chem Inform. https://doi.org/10.1002/chin.200621178

Kleinig, H. 1969. Carotenoids of siphonous green algae: a chemotaxonomical study. Journal of Phycology 5, 281-284. https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.1969.tb02615.x

Kloareg, B., Quatrano, R.S. 1988. Structure of the cell walls of marine algae and ecophysiological functions of the matrix polysaccharides. Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev. 26, 259-315.

Korivi, M., Chen, C.T., Yu, S.H., Ye, W., Cheng, I.S., Chang, J.S., Kuo, C.H., Hou, C.W., 2019. Seaweed Supplementation Enhances Maximal Muscular Strength and Attenuates Resistance Exercise-Induced Oxidative Stress in Rats. Evidence-based Complement. Altern. Med. https://doi.org/10.1155/2019/3528932

Kraft, G.T.1969. *Eucheuma procrusteanum*, a new red algal species from the Philippines. Phycologia 8, 215–219.

Kumar S, Berthiaume F. 2019. Recent advances in the use of algal polysaccharides for skin wound healing. Curr Pharm Des. 25(11): 1236-48.

Lamela, M., Anca, J., Villar, R., Otero, J. and Calleja, J.M. 1989. Hypoglycemic Activity op Several Seaweed Extracts. Journal of Ethnopharmacology, 27, 35-43. http://dx.doi.org/10.1016/0378-8741(89)90075-5

Largo, D. B., Diola, A. G., Marababol, M. S. 2016. Development of an integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) system for tropical marine species in southern Cebu, Central Philippines. Aquaculture Reports, 3, 67-76.

Le Gal, L., Pien, S., Rusig. A.M. 2004. Cultivation of *Palmaria palmata* (Palmariales, Rhodophyta) from isolated spores in semi- controlled conditions. Aquaculture 229:181–191.

Ledesma-Hernandez, B., Herrero, M. (eds). 2014. Bioactive Compounds from Marine Foods: Plant and Animal Sources. John Wiley & Sons, Chichester, Reino Unido, 566 pp.

Lee, C.N., Cheng, W.F., Lai, H.L., Shyu, M.K., Chen, T.M., Wu, R.T., Shih, J.C. Hsieh, F.J. 1998. Comparison between Intravenous Prostaglandin E2 and Extraamniotic Prostaglandin F2α Instillation for Termination in Second-Trimester Pregnancy. Journal of Maternal-Fetal Investigation, 8, 134-138.

Lee, S., Yeon, S.L., Sang, H.J., Sam, S.K., Kuk, H.S., 2003. Anti-oxidant activities of fucosterol from the marine algae *Pelvetia siliquosa*. Arch. Pharm. Res. https://doi.org/10.1007/BF02976680

Lee, Y.S., Jung, S.H., Lee, S., Shin, K.H., 2004a. Effects of the extracts from the marine algae *Pelvetia siliquosa* on hyperlipidemia in rats. Korean J. Pharmacogn. 35(2), 143-146.

Lee, Y.S., Shin, K.H., Kim, B. et al. 2004b. Anti-Diabetic activities of fucosterol from *Pelvetia siliquosa*. Arch Pharm Res 27, 1120–1122. https://doi.org/10.1007/BF02975115

Lee, R.E. 2008. Rhodophyta. En: Phycology, 4ª ed. Lee, R. E. (Ed.). Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, 547 pp.

Lee, K.Y., Mooney, D.J. 2011. Alginate: Properties and biomedical applications. Progress in Polymer Science 37, 106-126. doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.06.003

Lee, S.-H., Jeon, Y.-J. 2015. Efficacy and safety of a dieckol-rich extract (AG-dieckol) of brown algae, *Ecklonia cava*, in pre-diabetic individuals: a double-blind, randomized, placebo-controlled clinical trial. Food Funct., 6, 853.

Lee, Y., Kim, H., Seo, C. et al. 2017. Marine polysaccharides: therapeutic efficacy and biomedical applications. Arch. Pharm. Res. 40, 1006–1020, https://doi.org/10.1007/

s12272-017-0958-2

Lee, S., Youn, K., Kim, D.H., Ahn, M.R., Yoon, E., Kim, O.Y., Jun, M. 2019. Anti-neuroinflammatory property of phlorotannins from *Ecklonia cava* on Ab 25-35 -induced damage in PC12 cells. Marine Drugs 17 (1):1–16. doi: 10.3390/md17010007.

Leliaert, F., Boedeker, C., 2007. Cladophorales Haeckel. En: Brodie, J., Maggs, C.A., John, D.M. (Eds.), Green Seaweeds of Britain and Ireland. British Phycological Society, UK, pp. 131–183.

Lemieux, C., Otis, C., Turmel, M., 2007. A clade uniting the green algae *Mesostigma viride* and *Chlorokybus atmophyticus* represents the deepest branch of the Streptophyta in chloroplast genome-based phylogenies. BMC Biol. 5, 2. doi.org/10.1186/1741-7007-5-2

Lesueur, M., Comparini, C. 2015. La filière des algues dans le monde, en Europe, en France. Synthèse de résultats. Cellule études et transfert, AGROCAMPUS OUEST, 4 pp. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01343425/document

Li, P., Ying, J., Chang, Q., Zhu, W., Yang, G., Xu, T., Yi, H., Pan, R., Zhan, E., Zeng, X., Yan, C., Bao, Q., Li, S. 2016. Effects of phycoerythrin from *Gracilaria lemaneiformis* in proliferation and apoptosis of SW480 cells. Oncology Reports https://doi.org/10.3892/or.2016.5162

Lin, S. M., Chang, S. Y., Kuo, C. M. 2005. Two marine brown algae (Phaeophyceae) new to Pratas Island. Taiwania, 50(2), 101-108.

Liu, B.H., Lee, Y.-K. 2000. Secondary carotenoids formation by the green alga *Chlorococcum* sp. Journal of Applied Phycology 12, 301–307.

Liu, M., Wang, G., Xiao, L., Xu, A., Liu, X., Xu, P., Lin, X., 2014. Bis(2,3-dibromo-4,5-dihydroxybenzyl) ether, a marine algae derived bromophenol, inhibits the growth of *Botrytis cinerea* and interacts with DNA molecules. Mar. Drugs. https://doi.org/10.3390/md12073838

Liu, Z., Gao, T., Yang, Y., Meng, F., Zhan, F., Jiang, Q., Sun, X. 2019. Anti-cancer activity of porphyran and carrageenan from red seaweeds. Molecules 24(23), 4286; https://doi.org/10.3390/molecules24234286

Lüning, K. 1981. Egg release in gametophytes of *Laminaria saccharina*: induction by darkness and inhibition by blue light and UV. Br. I. Phycol., 16, 579-593.

Mac Monagail, M., Cornish, L., Morrison, L., Araújo R., Critchley A.T. 2017. Sustainable harvesting of wild seaweed resources. European Journal of Phycology 52, 371-390 https://doi.org/10.1080/09670262.2017.1365273

Machado Moreno, S. 2015. Producción de *Ulva* a partir de un sistema de recirculación acuícola. Condiciones hidrodinámicas y eliminación de nutrientes. Tesis de Licenciatura. Universitat Politècnica de Catalunya. https://upcommons.upc.edu/handle/2117/78244.

Majczak, G.A.H., Richartz, R.R.T.B., Duarte, M.E.R., Noseda, M.D. 2003. Antiherpetic activity of heterofucans isolated from *Sargassum stenophyllum* (Fucales, Phaeophyta). En: Chapman, A.R.O., Anderson, R.J., Vreeland, V.J., Davison, I.R. (eds). Proceedings of the 17th International seaweed symposium. Oxford University Press, Oxford, pp 169–174.

Madhusudan C., Manoj S., Rahul K., Rishi C.M. Seaweeds: A diet with nutritional, medicinal and industrial value. Res J Med Plant. 2011,5:153–7.

Marinho, G.S., Sørensen, A.D.M., Safafar, H., Pedersen, A.H., Holdt, S.L., 2019. Antioxidant content and activity of the seaweed *Saccharina latissima*: a seasonal perspective. J. Appl. Phycol. https://doi.org/10.1007/s10811-018-1650-8

Martínez, B., Viejo, R.M., Rico, J.M., Rødde, R.H., Faes, V.A., Oliveros, J. Álvarez, D. 2006. Open sea cultivation of *Palmaria palmata* (Rhodophyta) on the northern Spanish coast. Aquaculture 254, 376-387.

Martínez, B., Afonso-Carrillo, J., Anadón, R., Araújo, R., Arenas, F., Arrontes, J., Bárbara, I., Borja, A., Díez, I., Duarte, L., Fernández, M., García Tasende, M., Gorostiaga, J.M., Juanes, J.A., Peteiro, C., Puente, A., Rico, J.M., Sangil, C., Sanson, M., Tuya, T., Viejo, R.M. 2015. Regresión de las algas marinas en las Islas Canarias y en la costa atlántica de la Península Ibérica por efecto del cambio climático. Algas 49, 5-12.

Mayer, A.M.S., Paul, V.J., Fenical, W., Norris, J.M., de Carvalho, M.S., Jacobs, R.S. 1993. Phospholipase A2 inhibitors from marine algae. Hydrobiologia, 260-261, 521-529. http://dx.doi.org/10.1007/BF00049065

Mazumdar, S., Ghosal, P.K., Pujol, C.A., Carlucci, M.J., Damonte, E.B. Ray, B. 2002. Isolation, chemical investigation and antiviral activity of polysaccharides from *Gracilaria corticata* (Gracilariaceae, Rhodophyta). Int. J. biol. Macromol., 31: 87-95.

McHugh, D.J. 2003. A guide to the seaweed industry. FAO Fisheries Technical Paper: 441, Rome, Italy. ISBN 92-5-104958-0.

Melo, R.A. 2002. Exploração dos Recursos Algológicosem Portugal. En: Martins-Loução, M. A. (coord.), Fragmentos em Ecologia, FCUL-Livraria Escolar Editora, pp. 45-65 (ISBN 972-592-150-X).

Mendes, M, Pereira, R, Sousa Pinto, I, Carvalho, AP, Gomes, AM. 2013. Antimicrobial activity and lipid profile of seaweed extracts from the North Portuguese Coast. International Food Research Journal, 20(6), 3337-3345.

Mendoza, W., Mendola, D., Kim .J, Yarish, C., Velloze, A., Mitchel, B.. 2018. Correction: Land-based drip-irrigated culture of *Ulva compressa*: the effect of culture platform design and nutrient concentration on biomass production and protein content. PLOS ONE 13:7. doi.org/10.1371/journal.pone.0201675

Mesnildrey, L., Jacob, C., Frangoudes, K., Reunavot, M., Lesueur, M., 2012. Seaweed industry in France. Report. Interreg program NETALGAE, Les publications du Pôle halieutique AGROCAMPUS OUEST, pp. 1–34

Michetti, M.K. 2015. Cultivo in vitro de *Gracilaria gracilis* (rhodophyta), un alga roja agarófita de importancia económica. Boletín electrónico CERZOS. (28), 18-22. http://www.boletin.cerzos-conicet.gob.ar/images/numero28/BoletinCERZOS-Nro28-Dic2015.pdf

Mikami, K. 2014a. Structural divergence and loss of phosphoinositide-specific phospholipase C signaling components during the evolution of the green plant lineage: implications from structural characteristics of algal components. Front. Plant Sci. 5:380.

Mikami, K. 2014b. A technical breakthrough close at hand: feasible approaches toward establishing a gene-targeting genetic transformation system in seaweeds. Frontiers in Plant Science, 5: 498.

Minetti, M., Bernardini, G., Biazzo, M., Gutierrez, G., Geminiani, M., Petrucci, T., Santucci, A., 2019. *Padina pavonica* extract promotes in vitro differentiation and functionality of human primary osteoblasts. Mar. Drugs. https://doi.org/10.3390/md17080473

Miyashita K., Mikami N., Hosokawa M. Chemical and nutritional characteristics of brown seaweed lipids: A review. J Funct Foods. 2013,5(4), 1507–17.

Mohamed S., Hashim S.N., Rahman H.A. 2012. Seaweeds: A sustainable functional food for complementary and alternative therapy. Trends Food Sci Technol.,23(2):83–96.

Mouritsen, O.G., Dawczynski, C., Duelund, L. et al. 2013. On the human consumption of the red seaweed dulse (*Palmaria palmata* (L.) Weber & Mohr). J Appl. Phycol. 25, 1777–1791 (2013). https://doi.org/10.1007/s10811-013-0014-7

Muhamad, I.I., Zulkifli, N., Selvakumaran S.A./P. Lazim N.A.M. 2019. Bioactive algal-derived polysaccharides: multi-functionalization, therapeutic potential and biomedical applications. Review Curr. Pharm. Des. 25(11): 1147-1162. doi: 10.2174/1381612825666190618152133.

Neori, A., Shpigel, M., Guttman, L., Israel, A. 2017. Development of polyculture and integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) in Israel: a review. The Israeli Journal of Aquaculture = Bamidgeh 69, 1-19.

North, W., 1971. Introduction and background. In: North, W. Ed. The Biology of Giant Kelp Beds (*Macrocystis*) in California. J. Creamer, Leher, pp. 1-97.

Notario-Pérez, F., Ruiz-Caro, R., Veiga-Ochoa, M.-D. 2017. Historical development of vaginal microbicides to prevent sexual transmission of HIV in women: from past failures to future hopes. Drug Des Devel Ther. 11: 1767–1787. doi: 10.2147/DDDT.S133170

Nova, P., Pimenta-Martins, A., Laranjeira Silva, J., Silva, A.M., Gomes, A.M., Freitas, A.C., 2020. Health benefits and bioavailability of marine resources components that contribute to health–what's new? Crit. Rev. Food Sci. Nutr. https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1704681

O'Meara, S., Martyn-St James, M., Adderley, U.J. 2015. Alginate dressings for venous leg ulcers. Cochrane Database Syst Rev doi: 10.1002/14651858.CD010182.pub3.

Oh, K.-B., Lee, J.H., Chung, S.-C., Shin, J., Shin, H.J., Kim, H.-K., Lee, H.-S., 2008. Antimicrobial activities of the bromophenols from the red alga *Odonthalia corymbifera* and some synthetic derivatives. Bioorg. Med. Chem. Lett. 18, 104–108. https://doi.org/10.1016/j.bmcl.2007.11.003

Oirschot, R., Thomas, J. B. E., Gröndahl, F., Fortuin, K. P., Brandenburg, W., Potting, J. 2017. Explorative environmental life cycle assessment for system design of seaweed cultivation and drying. Algal Research, 27, 43-54.

Pal, A., Kamthania, M. and Kumar, A. 2014. Bioactive compounds and properties of seaweeds—a review. Open Access Library Journal 1, 1-17. doi: 10.4236/oalib.1100752.

Pan, Q., Chen, M., Li, J., Wu, Y., Zhen, C., Liang, B. 2013. Antitumor function and mechanism of phycoerythrin from *Porphyra haitanensis*. Biological Research http://dx.doi.org/10.4067/S0716-97602013000100013

Pang S., Lüning, K. 2004. Tank cultivation of the red alga *Palmaria palmata*: effects of intermittent light on growth rate, yield and growth kinetics. J Appl. Phycol 16:93–99.

Panlasigui, L.N., Baello, O.Q., Dimatangal, J.M. and Dumelod, B.D. (2003) Blood Cholesterol and Lipid-LoweringEffects of Carrageenan on Human Volunteers. Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition, 12, 209-214.

Park N.-H., Choi J.-S., Hwang S.-Y., Kim Y.-C., Hong Y.-K., Cho K., Choi I. 2013. Antimicrobial activities of stearidonic and gamma-linolenic acids from the green seaweed *Enteromorpha linza* against several oral pathogenic bacteria. Bot Stud.,54(1), 39.

Parker, B. C., 1970. Significance of cell wall chemistry to phylogeny in the algae. Ann. New York Ac. Sci., 175, 417-428.

Payghami, N., Jamili, S., Rustaiyan, A., Saeidnia, S., Nikan, M., Gohari, A.R., 2015. Alpha-amylase inhibitory activity and sterol composition of the marine algae, *Sargassum glaucescens*. Pharmacognosy Res. https://doi.org/10.4103/0974-8490.167893

Peng, Y., Hu, J., Yang, B., Lin, X.P., Zhou, X.F., Yang, X.W., Liu, Y., 2015. Chemical composition of seaweeds, in: Seaweed Sustainability: Food and Non-Food Applications. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-418697-2.00005-2

Pereira, M.G.; Benevides, N.M.B.; Melo, M.R.S.; Valente, A.P.; Melo, F.R.; Mourão, P.A.S. Structure and anticoagulant activity of a sulfated galactan from the red alga, *Gelidium crinale*. Is there a specific structural requirement for the anticoagulant action? Carbohydr. Res. 2005, doi:10.1016/j.carres.2005.05.018.

Pereira, R., Yarish, C. 2008. Mass production of marine macroalgae. Encyclopedia of Ecology, 2236–2247. doi:10.1016/b978-008045405-4.00066-5

Pereira, L. 2012. A review of the nutrient composition of selected edible seaweeds. In: Pomin VH (eds). Seaweed: ecology, nutrient composition, and medicinal uses. Nova Science: New York, Chap 2, pp. 15–47.

Pereira, L., Neto, J.M., 2014. Marine algae: Biodiversity, taxonomy, environmental assessment, and biotechnology, Marine Algae: Biodiversity, Taxonomy, Environmental Assessment, and Biotechnology. https://doi.org/10.1201/b17540

Pereira L. MACOI - Portuguese Seaweeds Website. World-wide Electronic Publication. IMAR, Department of Life Sciences, University of Coimbra. http://macoi.ci.uc.pt/ (October 20, 2015).

Pereira, L. 2018. Seaweeds as source of bioactive substances and skin care therapy-Cosmeceuticals, algotheraphy, and thalassotherapy. Cosmetics 5(4), 68; https://doi.org/10.3390/cosmetics5040068

Pielesz, A., Machnicka, A. & Sarna, E., 2011. Antibacterial Activity and Scanning Electron Microscopy (Sem) Examination of Alginate-Based Films and Wound Ekologiczna S, 18(2), pp.197–210. Dressings. Ecological Chemistry and Engineering S-Chemia I Inzynieria

Plaza M., Cifuentes A., Ibanez E. 2008. In the search of new functional food ingredients from algae. Trends Food Sci Technol. 19(1):31–9.

Ponce, N.M.A., Pujol, C.A., Damonte, E.B., Flores, M.L., Stortz, C.A. 2003. Fucoidans from the brown seaweed *Adenocystis sutricularis*: extraction methods, antiviral activity and structural studies. Carbohydrate Research, 338, 153-165. http://dx.doi.org/10.1016/S0008-6215(02)00403-2

Praeger, C., de Nys, R. 2017. Seeding filamentous *Ulva tepida* on free-floating surfaces: A novel cultivation method. Algal Research, 24, 81-88.

Pueschel, C.M., K.M. Cole. 1982. Rhodophycean pit plugs: an ultrastructural survey with taxonomic implications. Am. J. Bot. 69:703-720.

Qin, Y. 2018. Seaweed bioresources. En: Qin, Y. (ed.) Bioactive seaweeds for food applications. Natural ingredients for healthy diets, 3–24. Academic Press (Ed.), Londres, Reino Unido, 322 pp. doi:10.1016/b978-0-12-813312-5.00001-7

Raveendran, S., Yoshida Y., Maekawa, T., Kumar, S. 2013. Pharmaceutically versatile sulfated polysaccharide based bionano platforms. Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine 9, 605-626, doi.org/10.1016/j.nano.2012.12.006

Rojas Pérez, L., Álvarez Vera, M., Morier Díaz, L.F., Valdés Iglesias, O., del Barrio Alonso, G., 2016. Evaluación preliminar de la actividad antiviral del extracto de Laurencia obtusa frente a herpesvirus y virus dengue. Rev. Cuba. Farm.

Rosa, G.P., Tavares, W.R., Sousa, P.M.C., Pagès, A.K., Seca, A.M.L., Pinto, D.C.G.A., 2020. Seaweed secondary metabolites with beneficial health effects: An overview of successes in in vivo studies and clinical trials. Mar. Drugs. https://doi.org/10.3390/md18010008

Ruocco, N., Costantini, S., Guariniello, S., Costantini, M. 2016. Polysaccharides from the marine environment with pharmacological, cosmeceutical and nutraceutical potential. Molecules 2016, 21, 551. 10.3390/molecules21050551

Sahoo, D.B., Sahu, N., Sahoo, D., 2001. Seaweeds of Indian Coast. APH Publishing Corporation, New Delhi, p. 283.

Sahoo, D. 2010. Common seaweeds of India. IK International Publishing House Pvt Ltd (ed.). New Delhi, India, 196 pp.

Saidani K. 2012. Antifungal activity of methanolic extracts of four Algerian marine algae species. African J. Biotechnol. 2012, doi:10.5897/ajb11.1537.

Salehi, B.; Sharifi-Rad, J.; Seca, A.M.L.; Pinto, D.C.G.A.; Michalak, I.; Trincone, A.; Mishra, A.P.; Nigam, M.; Zam, W.; Martins, N. 2019. Current trends on seaweeds: looking at chemical composition, phytopharmacology, and cosmetic applications. Molecules 24, 4182. https://doi.org/10.3390/molecules24224182

Salvador-Soler, N., Macaya, E.C., Rull-Lluch, J., Gómez-Garreta, A. 2016. Nuclear DNA content in *Gelidium chilense* (Gelidiales, Rhodophyta) from the Chilean coast. Contenido de ADN nuclear en *Gelidium chilense* (Gelidiales, Rhodophyta) de la costa chilena. Revista de Biología Marina y Oceanografía 51, http://dx.doi.org/10.4067/S0718-19572016000100011

Sánchez, N., Vergés, A., Peteiro, C., Sutherland, J.E., Brodie, J. 2014. Diversity of bladed Bangiales (Rhodophyta) in western Mediterranean: recognition of the genus *Themis* and descriptions of *T. ballesterosii* sp. nov., *T. iberica* sp. nov., and *Pyropia parva* sp. nov. Journal of Phycology 50 (5), 908-929. https://doi.org/10.1111/jpy.12223

Sánchez-Machado D.I., López-Cervantes J., López-Hernández J., Paseiro-Losada P. Fatty acids, total lipid, protein and ash contents of processed edible seaweeds. Food Chem. 2004a,85(3):439–44.

Sánchez-Machado D.I., López-Hernández J., Paseiro-Losada P., López-Cervantes J. An HPLC method for the quantification of sterols in edible seaweeds. Biomed Chromatogr. 2004b,18(3):183–90.

Santos, G. A., 1989. Carrageenans of species of *Eucheuma* J. Agardh and *Kappaphycus* Doty (Solieriaceae, Rhodophyta). Aquatic Botany 36, 55-67.

Santos, F. D. J. C. 2017. Macroalgas verdes produzidas em aquacultura na região Algarvia: potencial terapêutico/propriedades biológicas. Tesis Doctoral.

Sato, Y., Yamaguchi, M., Hirano, T., Fukunishi, N., Abe, T., Kawano, S. 2016. Effect of water velocity on *Undaria pinnatifida* and *Saccharina japonica* growth in a novel tank system designed for macroalgae cultivation. Journal of Applied Phycology, 29:3, pp. 1429–1436.

Saunders, G. W., Hommersand, M. H. 2004. Assessing red algal supraordinal diversity and taxonomy in the context of contemporary systematic data. American Journal of Botany 91, 1494–1507. doi:10.3732/ajb.91.10.1494.

Sebök, S., Herppich, W. B., Hanelt, D. 2017. Development of an innovative ring-shaped cultivation system for a land-based cultivation of marine macroalgae. Aquacultural Engineering, 77, pp.33–41.

Seoane Camba, J.A. 1967. Las especies españolas de *Gigartina* y *Chondrus*: el carragén. Publ. Técn. Junta Estud. Pesca, 6:291-302.

Seong, S.H.; Paudel, P.; Jung, H.A.; Choi, J.S. 2019. Identifying phlorofucofuroeckol-A as a dual inhibitor of amyloid-β25-35 self-aggregation and insulin glycation: Elucidation of the molecular mechanism of action. Mar. Drugs doi:10.3390/md17110600.

Sheath, R.G., Hambrook, J.A., 1990. Freshwater ecology. In: Cole, K.M., Sheath, R.G. (Eds.), Biology of the Red Algae. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido. 528 pp.

Sheath, R. G., Wehr, J. D. 2015. Introduction to the Freshwater Algae. En: Sheath, R. G., Wehr, J. D. Kociolek, J.P. (Eds.), Freshwater Algae of North America, 2ª ed. Academic Press, San Diego, California, EE UU. 918 pp.

Silva, A.F.R., Abreu, H., Silva, A.M.S., Cardoso, S.M., 2019. Effect of oven-drying on the recovery of baluable compounds from *Ulva rigida*, *Gracilaria* sp. and *Fucus vesiculosus*. Mar. Drugs. https://doi.org/10.3390/md17020090

Smit, A.J. Medicinal and pharmaceutical uses of seaweed natural products: A review. Journal of Applied Phycology 16, 245–262 (2004). https://doi.org/10.1023/B:JAPH.0000047783.36600.ef

Soares, C., Machado, S., Vieira, E. F., Morais, S., Teles, M. T., Correia, M., Carvalho, A., Domingues, V. F., Ramalhosa, M. J., Delerue-Matos, C., Antunes, F. 2017. Seaweeds from the Portuguese coast: A potential food resource?. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 231 012126.

Spieler, R. Seaweed compound's anti-HIV efficacy will be tested in southern Africa. Lancet 2002, doi:10.1016/S0140-6736(02)08605-1.

SPOKe. Standardized production of kelp. 2019. SINTEF-MACROSEA. Online in: https://www.sintef.no/globalassets/sintef-ocean/macrosea-prosjektweb/annual-meeting/wp5-iii-the-spoke-concept-by-torfinn-solvang.pdf

Stengel, D.B. & Walker, J.M., (Ed.), 2015. Natural Products From Marine Algae.Methods and Protocols. Methods in Molecular Biology, Springer. ISBN 978-1-4939-2684-8.

Stiger-Pouvreau, V., Bourgougnon, N., Deslandes, E. 2016. Carbohydrates from seaweeds. Seaweed in Health and Disease Prevention, 223–274. doi:10.1016/b978-0-12-802772-1.00008-7

Sugawara, I., Itoh, W., Kimura, S., Mori, S. and Shimada, K. (1989) Further Characterization of Sulfated Homopolysaccharides as Anti-HIV Agents. Experientia, 45, 996-998. http://dx.doi.org/10.1007/BF01953060

Sutherland, J.E., Lindstrom, S. C., Nelson, W.A et al. 2011. A new look at an ancient order: Generic revision of the bangiales (Rhodophyta). Journal of Phycology 47(5):1131-1151. DOI: 10.1111/j.1529-8817.2011.01052.x

Szekalska, M., Puciłowska, A., Szymańska, E., Patrycja Ciosek, P., Winnicka, K. 2016. Alginate: current use and future perspectives in pharmaceutical and biomedical applications. International Journal of Polymer Science, doi.org/10.1155/2016/7697031

Tasende, M.G., Rodríguez González, L.M.2003. Economic seaweeds in Galicia (NW Spain). Thalassas, 19(1): 17-25.

Tasende, M. G., Peteiro, C. 2015. Explotación de las macroalgas marinas: Galicia como caso de estudio hacia una gestión sostenible de los recursos. Revista Ambienta 111, 116-132.

Teixeira, A., Baenas, N., Dominguez-Perles, R., Barros, A., Rosa, E., Moreno, D.A., Garcia-Viguera, C. 2014. Natural bioactive compounds from winery by-products as health promoters: a review. Int. J. Mol. Sci., 15, 15638–15678, doi:10.3390/ijms150915638

Thomas N.V., Kim S.-K. 2011. Potential pharmacological applications of polyphenolic derivatives from marine brown algae. Environ Toxicol Pharmacol.,32(3):325–35.

Titlyanov, E.A., Titlyanova, T.V. 2010. Seaweed cultivation: Methods and problems Russian Journal of Marine Biology 36, 227–242.

Torres, M.D.; Flórez-Fernández, N.; Domínguez, H. 2019. Integral utilization of red seaweed for bioactive production. *Mar. Drugs* 10.3390/md17060314

Trinchero J., Ponce N.M.A., Córdoba O.L., Flores M.L., Pampuro S., Stortz C.A., Salomón H., Turk G. 2009. Antiretroviral activity of fucoidans extracted from the brown seaweed *Adenocystis utricularis*. Phytother Res. 23(5):707–12.

Tsukamoto, S., Yamashita, Y., Ohta, T., 2005. New cytotoxic and antibacterial compounds isolated from the sea hare, *Aplysia kurodai*. Mar. Drugs. https://doi.org/10.3390/md302022

Ugarte, R.A., Sharp, G. 2001. A new approach to seaweed management in Eastern Canada: the case of *Ascophyllum nodosum*. Cahiers de Biologie Marine 42, 63-70.

Ugarte, R.A., Sharp, G. 2012. Management and production of the brown algae *Ascophyllum nodosum* in the Canadian maritimes. Journal of Applied Phycology 24, 409–416.

Vairappan, C.S., Kawamoto, T., Miwa, H., Suzuki, M., 2004. Potent antibacterial activity of halogenated compounds against antibiotic-resistant bacteria. Planta Med. https://doi.org/10.1055/s-2004-832653

Vairappan, C.S., Suzuki, M., Abe, T., Masuda, M., 2001. Halogenated metabolites with antibacterial activity from the Okinawan *Laurencia* species. Phytochemistry. https://doi.org/10.1016/S0031-9422(01)00260-6

Vea J., Ask, E. 2011. Creating a sustainable commercial harvest of *Laminaria hyperborea*, in Norway. Journal of Applied Phycology 23, 489–494.

Viera, M. D. P., Courtois de Viçose, G., Fernández-Palacios, H., Izquierdo, M. 2016. Grow-out culture of abalone *Haliotis tuberculata coccinea* Reeve, fed land-based IMTA produced macroalgae, in a combined fish/abalone offshore mariculture system: effect of stocking density. Aquaculture Research, 47(1), 71-81.

Vishchuk, O.S., Ermakova, S.P., Zvyagintseva, T.N. 2011. Sulfated polysaccharides from brown seaweeds *Saccharina japonica* and *Undaria pinnatifida*: Isolation, structural characteristics, and antitumor activity. Carbohydr. Res., doi:10.1016/j.carres.2011.09.034.

Vreeland, V. 1972. Immunocytochemical lcoalization of th extracellular polysaccharide alginic acid in the brown seaweed *Fucus distichus*. J. Histochem. Cytochem 20, 358-367.

Wang S., Li Y., White W., Lu J. 2014. Extracts from New Zealand *Undaria pinnatifida* containing fucoxanthin as potential functional biomaterials against cancer in vitro. J Funct Biomater. 5(2), 29–42.

Wang, F., Guo, X.Y., Zhang, D.N., Wu, Y., Wu, T., Chen, Z.G., 2015a. Ultrasound-assisted extraction and purification of taurine from the red algae *Porphyra yezoensis*. Ultrason. Sonochem. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.12.009

Wang, H.M.D. Chen, C.C. Huynh, P. Chang, J.S. 2015b. Exploring the potential of using algae in cosmetics. Bioresour. Technol. 184, 355-362.

Wang, H.M.D., Li, X.C., Lee, D.J., Chang, J.S. 2017. Potential biomedical applications of marine algae. Bioresour Technol. 244, 1407-1415. doi: 10.1016/j.biortech.2017.05.198.

Wehr, J.D. 2015. Brown Algae. En: Wehr J.D., Sheath, R.J., Kociolek, J.P. (Eds.) Freshwater Algae of North America, 851–871. Academic Press, San Diego, EE UU, 1066 pp. doi:10.1016/b978-0-12-385876-4.00019-0

Wei, H., Gao, Z., Zheng, L., Zhang, C., Liu, Z., Yang, Y., Teng, H., Hou, L., Yin, Y., Zou, X. 2017. Protective effects of fucoidan on Aβ25–35 and d-Gal-induced neurotoxicity in PC12 cells and d-Gal-induced cognitive dysfunction in mice. Marine Drugs 15(3), 10.3390/md15030077

Wichard, T., Charrier, B., Mineur, F., Bothwell, J. H., Clerck, O. D., & Coates, J. C. 2015. The green seaweed *Ulva*: a model system to study morphogenesis. Frontiers in Plant Science, 6.doi:10.3389/fpls.2015.00072

Witvrouw, M., Este, J.A., M. Mateu, Q., Reymen, O., Andrel, G., Snoeck, R., lkeda, S., Pauwels, R., Bianchini, N. V., Desmyter, J., De Clercq, E. 1994. Activity of a sulfated polysaccharide extracted from the red seaweed *Aghardhiella tenera* against human immunodeficiency virus and other enveloped viruses. Antiviral Chemistry & Chemotherapy 5(5), 297-303.

Wu, S.C., Kang, S.K., Kazlowski, B., Wu, C.J. and Pan, C.L. 2012. Antivirus and prebiotic properties of seaweed- oligosaccharide-lysates derived from agarase AS-II. Journal of the Fisheries Society of Taiwan, 39, 11-21

Xu, F.; Wang, F.; Wang, Z.; Lv, W.; Wang, W.; Wang, Y. 2016. Glucose uptake activities of bis (2, 3-dibromo-4, 5-dihydroxybenzyl) ether, a novel marine natural product from red alga *Odonthalia corymbifera* with protein tyrosine phosphatase 1b inhibition, in vitro and in vivo. PLoS One, doi:10.1371/journal.pone.0147748.

Yan, X.; Yang, C.; Lin, G.; Chen, Y.; Miao, S.; Liu, B.; Zhao, C. 2019. Antidiabetic potential of green seaweed *Enteromorpha prolifera* flavonoids regulating insulin signaling pathway and gut microbiota in type 2 diabetic mice. J. Food Sci. doi:10.1111/1750-3841.14415.

Yoon, H.S., Müller, K.M., Sheath, R.G., Ott, F. D., Bhattacharya D. 2006. Defining the major lineages of red algae (Rhodophyta). Journal of Phycology. 42(2): 482–492. doi:10.1111/j.1529-8817.2006.00210.x

Zemke-White, W.L., Smith, J.E. 2006. Environmental impacts of seaweed farming in the tropics. In: Critchley AT, Ohno M, Largo DB (eds) World seaweed resources — an authorative reference system. ETI BioInformatics, Wokingham, DVD-Rom.

Zhang, Y., Zhou, D., Chen, J., Zhang, X., Li, X., Zhao, W., Xu, T. 2019. Biomaterials Based on Marine Resources for 3D Bioprinting Applications. Mar. Drugs 17, 555. https://doi.org/10.3390/md17100555

Zollmann, M., Traugott, H., Chemodanov, A., Liberzon, A., Golberg, A. 2019. Deep water nutrient supply for an offshore *Ulva* sp. cultivation project in the eastern Mediterranean sea: experimental simulation and modelling. BioEnergy Research 12, 1113–1126.

Zuccarello, G.C., Critchley, A.T., Smith, J. et al. 2006. Systematics and genetic variation in commercial shape *Kappaphycus* and shape *Eucheuma* (Solieriaceae, Rhodophyta). J. Appl. Phycol. 18, 643–651. https://doi.org/10.1007/s10811-006-9066-2