

A close-up photograph of a microalgae cultivation system. It features several green, cylindrical tubes filled with a green liquid, likely containing microalgae. The tubes are mounted on a green metal frame. A black circular component is visible on the left side. The word "ALGAE" is printed in white on the green frame. The background is slightly blurred, showing a white wall and a yellow trash bin.

**Unidad de Vigilancia
Tecnológica e
Inteligencia
Competitiva**

Sector Microalgas

1° Informe Territorial

An aerial photograph of a large-scale microalgae cultivation facility. The facility consists of several long, narrow, parallel ponds or channels filled with a vibrant green liquid. The ponds are separated by concrete or metal walls. A dirt path runs along the center of the ponds. The overall scene is a vast, organized agricultural or industrial site.

Octubre 2015

Contenido

INTRODUCCIÓN	3
ANÁLISIS DE PUBLICACIONES CIENTÍFICAS	4
Conclusión	9
ANÁLISIS DE PATENTES DE INVENCIÓN.....	10
Conclusión	15
ANÁLISIS DEL MERCADO DE LAS MICROALGAS	17
1) Biomasa completa de microalgas.	17
2) Ácidos grasos omega-3.	18
3) Pigmentos antioxidantes.....	19
a) Betacaroteno.....	19
b) Astaxantina	20
d) Ficocianina	20
4) Aceite para la producción de biodiesel.....	20
5) Biorremediación de efluentes.....	21
6) Compuestos especiales.....	21
7) Otros usos generales.....	22
8) Productos de alto valor	22
9) Conclusiones	23
10) Referencias.....	23
ANEXO ÁRBOL DE CATEGORÍAS	24

INTRODUCCIÓN

En este primer Informe Territorial el foco estuvo centrado principalmente en el estado del arte de la tecnología del cultivo de microalgas.

Se realizó un análisis de publicaciones científicas, patentes de invención y de la situación del mercado de productos derivados del cultivo de microalgas como ser: aceites, moléculas de alto valor y usos de las distintas microalgas en remediación de pasivos ambientales.

Este y los sucesivos Informes estarán a disposición de las Autoridades gubernamentales como material de apoyo y/o consulta para sustentar la mejor toma de decisiones posible en la temática de la tecnología del cultivo de microalgas.

ANÁLISIS DE PUBLICACIONES CIENTÍFICAS

Al observar el Árbol de Categorías (Ver Anexo "ÁRBOL DE CATEGORÍAS"), podemos notar que la temática es extensa. A lo largo de los diferentes boletines se irá analizando una a una cada rama del árbol de categorías (ejes temáticos de interés), refrescando siempre aquellas de mayor impacto y/o crecimiento relativo. En este primer Informe territorial se opta por mostrar la situación actual en la temática.

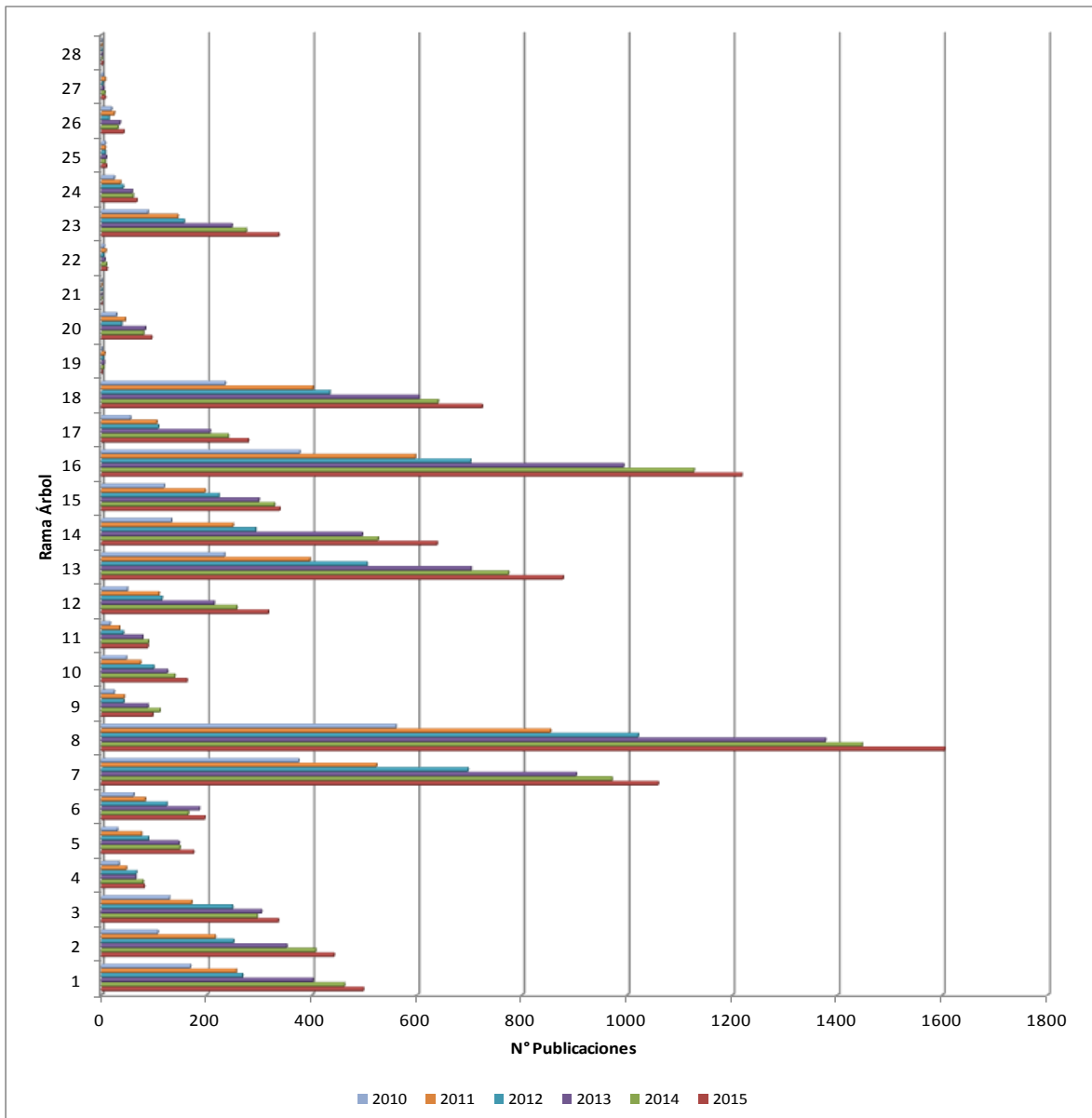
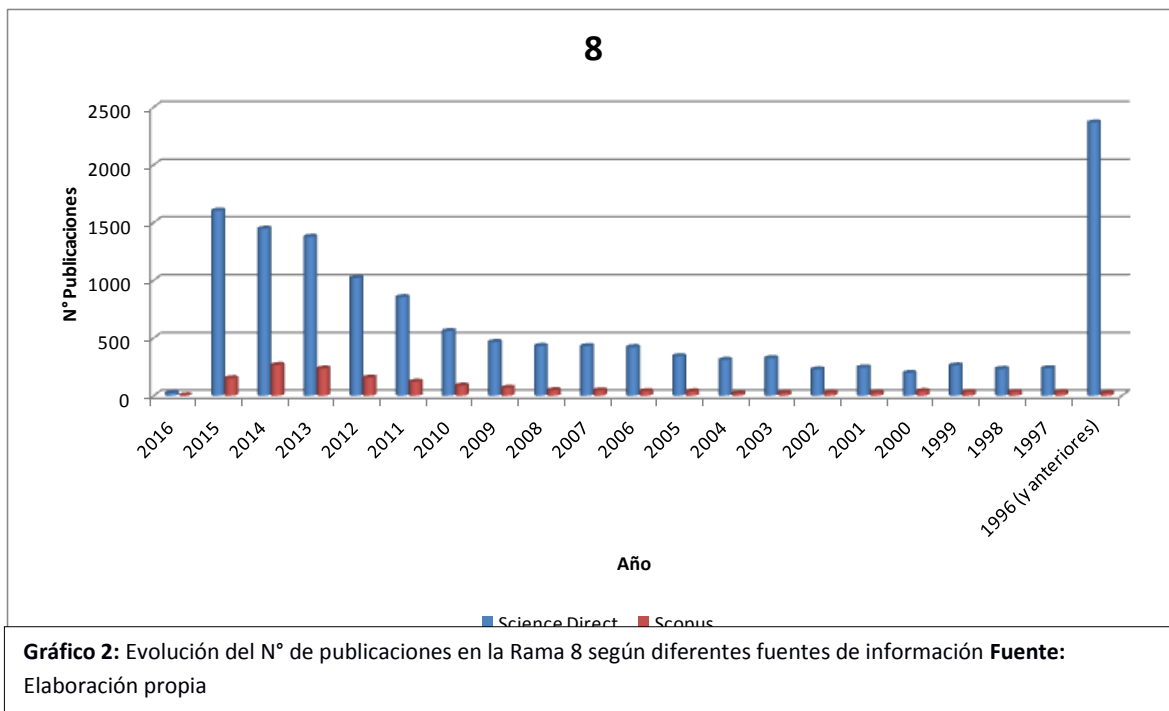


Gráfico 1: N° de publicaciones según Rama en los últimos 5 años. **Fuente:** elaboración propia en base a datos de sciencedirect y scopus

El primer gráfico muestra la incidencia de cada eje de interés en la temática, durante los últimos cinco años. En todos los casos podremos notar una tendencia al aumento en las investigaciones. Lo primero que resalta es que los cinco ejes de mayor estudio son: 8, 16, 7, 13 y 18 (los números corresponden a aquellos entre paréntesis que fueran mostrados en el árbol). Donde dos de ellos corresponden a Bioprocesos (7 y 8) y los tres restantes a Bioproductos.

La secuencia observada tiene lógica ya que los diferentes bioproductos, de mayor o menor valor agregado, se ven afectados por los métodos de extracción y secado. Por otro lado, las temáticas son más de carácter académico, donde no hay interferencia de convenios de confidencialidad.

Al extender el período de tiempo en análisis a 20 años, se destaca que en casi todos los casos comienza un aumento marcado en las investigaciones entre los años 2010 y 2011. En el siguiente gráfico se muestra el caso del eje con mayor participación en la temática de microalgas, aunque en las 27 restantes es similar. Otro aspecto que resulta destacable es que reviste mucha importancia la elección de la fuente de información, ya que cada motor de búsqueda posee diferente cantidad de revistas en su haber, como puede observarse en el gráfico 2.



Al analizar las áreas de interés, en los últimos 20 años, sin diferenciar entre los ejes se obtienen los resultados observados en el gráfico 3. Donde los tres principales corresponden a la Ingeniería Química, Ciencias Ambientales y Ciencias Agrícolas y Biológicas respectivamente.

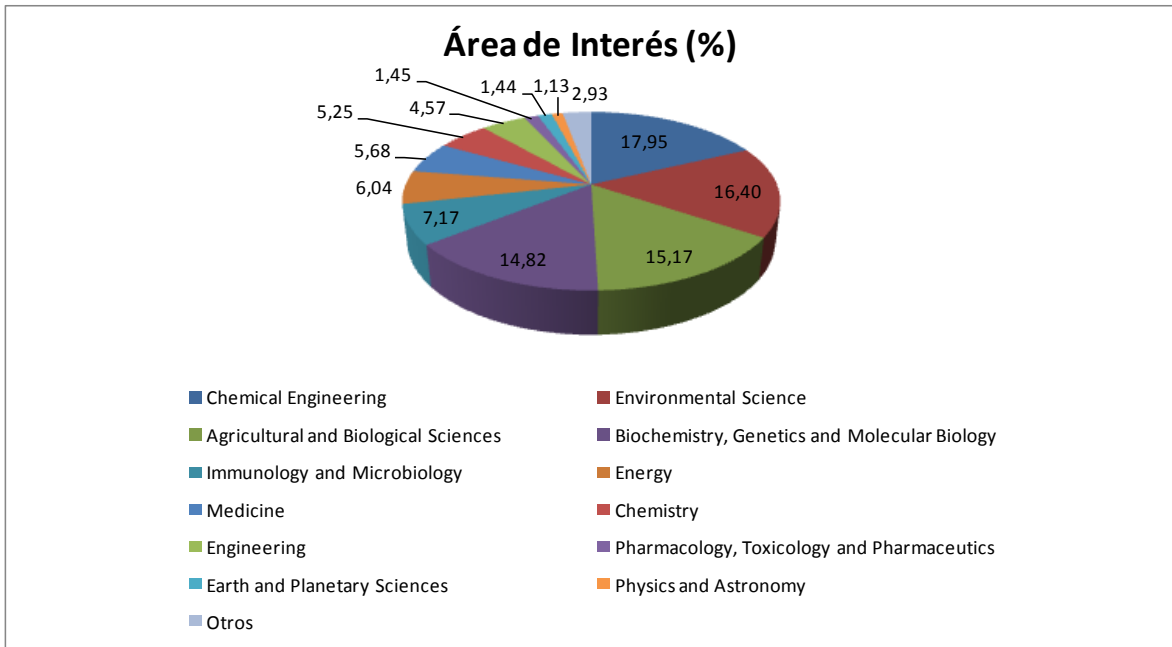


Gráfico 3: Principales áreas de interés de los últimos 20 años en porcentaje **Fuente:** Elaboración propia

De las revistas que publican sobre la temática de microalgas, sobre el mismo período de tiempo (1996-2015), más del 90 % de las publicaciones se encuentran en las 22 revistas que se muestran en el cuadro N°1.

Revista	N° Publicaciones	%
Bioresource Technology	8561	25,22
Aquaculture	3190	9,40
Algal Research	1802	5,31
Renewable and Sustainable Energy Reviews	1780	5,24
Journal of Experimental Marine Biology and Ecol	1680	4,95
Organic Geochemistry	1575	4,64
Fuel and Energy Abstracts	1463	4,31
Deep Sea Research Part B	1157	3,41
Applied Energy	1082	3,19
Water Research	961	2,83
Process Biochemistry	892	2,63
Biomass and Bioenergy	865	2,55
Aquatic Toxicology	683	2,01
Estuarine, Coastal and Shelf Science	644	1,90
Biotechnology Advances	634	1,87
Marine Pollution Bulletin	631	1,86

Journal of Biotechnology	623	1,84
Chemosphere	603	1,78
Harmful Algae	554	1,63
Phytochemistry	482	1,42
International Journal of Hydrogen Energy	456	1,34
Fuel	360	1,06

Cuadro 1: Principales revistas de publicación de los últimos 20 años.
Fuente: Elaboración propia

En el cuadro N° 2 se muestran las 20 palabras clave más utilizadas en las publicaciones de las revistas antes mencionadas

Palabra Clave	N° Publicaciones
fatty acid	2754
biomass	2415
energy	2370
chlorella	2154
alga	1934
lipid	1594
algal	1573
cell	1329
light	1227
water	1125
marine	1077
dha	805
growth	708
fish	691
hydrogen	674
fuel	655
production	642
epa	565
hydrogen production	563
organic matter	480
specie	443

Cuadro 2: Principales palabras clave utilizadas. **Fuente:**
Elaboración propia

Según la información recopilada en Scopus, son 349 Instituciones que han publicado en referencia a las microalgas, las 20 principales se muestran en el cuadro N° 3, representando el 43,43% de las publicaciones.

Institución	N° Publicaciones	%
Chinese Academy of Sciences	244	5,76
Universidad de Almeria	182	4,30
National Cheng Kung University	175	4,13
Korea Advanced Institute of Science & Technology	142	3,35
Wageningen University and Research Centre	126	2,97
Tsinghua University	88	2,08
Universite de Nantes	87	2,05
Korea Institute of Energy Research	73	1,72
The University of Hong Kong	73	1,72
University of Minnesota Twin Cities	70	1,65
Ocean University of China	67	1,58
Ben-Gurion University of the Negev	62	1,46
National Renewable Energy Laboratory	58	1,37
CNRS Centre National de la Recherche Scientifique	56	1,32
Zhejiang University	55	1,30
CSIRO Marine and Atmospheric Research	54	1,27
Jinan University	47	1,11
Universidade do Porto	47	1,11
Centro de Investigaciones Biologicas Del Noroeste	45	1,06
Universidad de Santiago de Compostela	45	1,06
New Mexico State University Las Cruces	44	1,04

Cuadro 3: Principales Instituciones. **Fuente:** Elaboración propia en base a datos provistos por Scopus

Respecto de los países que mayor número de publicaciones ha realizado, en el cuadro N° 4 se presentan los 20 primeros. La Argentina ocupa el puesto n° 40 con 33 publicaciones.

Posición	País	N° Publicaciones	%
1	Estados Unidos	1636	14,93
2	China	1454	13,27
3	España	739	6,74
4	India	592	5,40
5	Corea del Sur	569	5,19
6	Francia	476	4,34
7	Australia	447	4,08

8	Brasil	350	3,19
9	Reino Unido	330	3,01
10	Japón	318	2,90
11	Italia	310	2,83
12	Alemania	301	2,75
13	Taiwan	292	2,66
14	Canadá	264	2,41
15	Portugal	232	2,12
16	México	227	2,07
17	Holanda	200	1,83
18	Malasia	191	1,74
19	Bélgica	164	1,50
20	Egipto	125	1,14

Cuadro 4: Principales Países. **Fuente:** Elaboración propia en base a datos provistos por Scopus

Conclusión

Cuando se analizan los gráficos 1 y 2 en conjunto se puede notar que, claramente en los últimos cinco años existió un marcado aumento en el interés por la temática, ya que desde el 2010 al 2015 se triplicó el número de publicaciones en referencia al tema en análisis.

Según lo visto en el gráfico 1, podemos dilucidar que el eje de mayor crecimiento fue el referido a la temática del secado de la biomasa, seguido por los lípidos (producción, extracción, uso, etc...), posteriormente el método de filtración como aquel de separación de las microalgas del medio, seguido por otros dos bioproductos de interés como son el hidrógeno y las proteínas.

Al observar todos los datos obtenidos en su conjunto (gráfico 2 y cuadros 1-3-4) podemos notar que la Argentina pareciera no publicar en la temática. Esta sería una afirmación falsa, ya que es muy importante ver los motores de búsqueda utilizados para realizar éste primer boletín. Si se observa el gráfico 2 podremos notar la gran diferencia existente entre dos motores de búsqueda usuales ScienceDirect y Scopus, donde se observa un orden de magnitud en el número de publicaciones ante la misma búsqueda. Estas diferencias se deben a las revistas en las cuales se ejecutan las búsquedas, evidentemente no son estas las revistas donde publican los científicos argentinos, pero permiten ver el panorama mundial.

En los futuros boletines se tomará en cuenta, no sólo lo que indican los principales motores de búsqueda, sino también lo que hace más específico a las investigaciones en Argentina y

Sudamérica. Dicho análisis pondrá en evidencia las principales líneas de interés en el país y se podrá comparar la relevancia y tendencia frente al resto del mundo.

ANÁLISIS DE PATENTES DE INVENCION

El aprovechamiento de las microalgas para obtener productos comerciales, requiere desarrollos tanto en las fases de cultivo como en las de procesamiento de la biomasa.

Al vigilar el registro de patentes de procesos o productos, en general se ve que, desde el año 2010 hasta el 2014, en casi todos los ejes temáticos (ramas) de desarrollo de esta tecnología (Gráfico 1), ha habido un número creciente de registro de innovaciones mediante patentes.

Las áreas con mayor desarrollo son, por el lado de cultivo de microalgas, la de secado de la biomasa (8) y filtración (7), es decir, en ambos casos, la deshidratación de la biomasa, que constituye un cuello de botella para el posterior procesamiento de la misma. En el área de procesamiento de la biomasa con fines específicos, el mayor registro de nuevas tecnologías se da en extracción de lípidos (18) y obtención de hidrógeno (16), es decir, materia prima para la elaboración de combustibles alternativos y de menor huella de carbono que los fósiles. En segundo orden de registro, vienen los relacionados con antioxidantes (15), proteínas (13) e hidratos de carbono (14), que son utilizados tanto para desarrollo de nutraceuticos, alimento humano y animal como de aditivos de cosméticos, y en el caso de los hidratos de carbono, también para fermentaciones con objeto de producir gases combustibles.

El año 2014, fue particularmente productivo en cuanto a cantidad de registros, muy probablemente la culminación de procesos de patentamiento iniciados alrededor del año 2011, en el que hubo un auge de desarrollos, que también se refleja en el número de publicaciones (ver apartado Publicaciones).

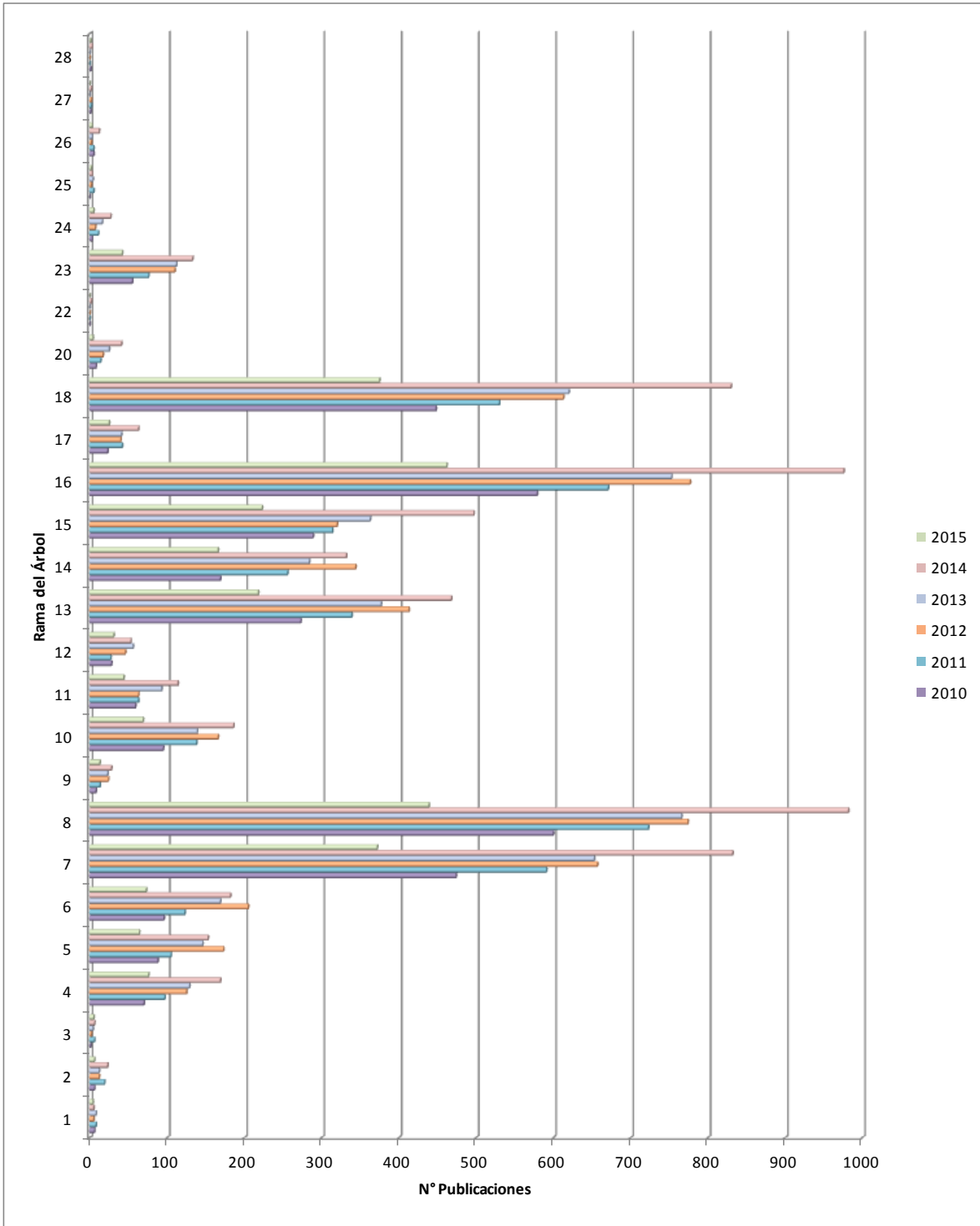


Gráfico 1: N° de publicaciones, según Rama del Árbol en los últimos 5 años. **Fuente:** elaboración propia en base a datos de Patent Inspiration

Solicitante	N° Patentes	%
SOLAZYME INC	1495	9,72
MARTEK BIOSCIENCES CORP	1442	9,37
CELGENE CORP	1094	7,11
HELIAE DEV LLC	866	5,63
PHARMACYCLICS INC	852	5,54
SYNTA PHARMACEUTICALS CORP	642	4,17
KALE ANIKET	641	4,17
EXXONMOBIL RES & ENG CO	620	4,03
FRANKLIN SCOTT	603	3,92
SAPPHIRE ENERGY INC	533	3,46
OREAL	441	2,87
DU PONT	415	2,70
MULLER GEORGE W	316	2,05
DSM IP ASSETS BV	310	2,01
UNIV CALIFORNIA	310	2,01
EURO CELTIQUE SA	266	1,73
MAITI SUBARNA	265	1,72
MASSACHUSETTS INST TECHNOLOGY	248	1,61
MEDIMMUNE LLC	226	1,47
MACROGENICS INC	224	1,46

Cuadro 1: 20 Principales solicitantes de patentes de los últimos 20 años. **Fuente:** Elaboración propia en base datos Patent Inspiration

La mayor parte de los solicitantes pertenecen a firmas de los Estados Unidos, lo que también es consistente con el país de mayores publicaciones y desarrollos en materia de cultivo y uso de microalgas. Incluso desde las estrategias políticas y económicas, en Estados Unidos hubo un gran incentivo en los años 90 para el desarrollo de tecnologías alternativas de obtención de materia prima para la elaboración de biodiesel y/o, combustibles alternativos. Más aún, son pioneros en el uso de microalgas para el tratamiento de efluentes, desde los años '60.

Ello se puede observar gráficamente en la imagen 1.

Inventor	N° Patentes	%
FRANKLIN SCOTT	1134	8,68
KALE ANIKET	809	6,19
SOMANCHI ARAVIND	572	4,38
VERNER ERIK	553	4,23
MULLER GEORGE W	547	4,19
HONIGBERG LEE	516	3,95
BARCLAY WILLIAM R	480	3,67
MAN HON-WAH	475	3,63
ZELDIS JEROME B	401	3,07

YING WEIWEN	365	2,79
RUDENKO GEORGE	317	2,43
PAN ZHENGYING	312	2,39
METZ JAMES G	310	2,37
DAY ANTHONY G	292	2,23
SUN QUN	287	2,20
DILLON HARRISON F	254	1,94
LOCKWOOD SAMUEL F	239	1,83
KYLE DONALD	228	1,74
KYLE DAVID J	218	1,67
SUN LIJUN	206	1,58

Cuadro 2: 20 Principales Inventores de patentes de los últimos 20 años. **Fuente:** Elaboración propia en base datos Patent Inspiration



Imagen 1: Países que presentaron patentes de los últimos 20 años. **Fuente:** Elaboración propia en base datos Patent Inspiration

Los países que siguen en número de patentamientos a la extensa producción de Estados Unidos, son China, Francia y Japón, como se observa en el Cuadro N° 3.

País	N° Patentes	País	N° Patentes	País	N° Patentes
Estados Unidos	5531	Brasil	68	Cuba	11
China	1248	Noruega	56	Tailandia	10
Francia	776	Nueva Zelanda	56	Hong Kong	9
Japón	570	Unión Soviética (Rusia desde 1992)	53	Argentina	9
República de Corea	524	Chile	53	Antillas Holandesas	8
Alemania	393	Dinamarca	52	Liechtenstein	8
Canadá	271	Suecia	33	Grecia	8
Holanda	236	Malasia	33	Polonia	7
Reino Unido	227	Ucrania	32	Bermuda	6
España	212	México	30	Austria	5
Italia	170	Irlanda	23		
Israel	169	República de Moldova	21		
Australia	153	Singapur	19		
Suiza	143	Sudáfrica	18		
Taiwan, Provincia de China	118	Portugal	18		
Luxemburgo	98	Hungría	18		
India	85	República Checa	14		
Bélgica	75	Mónaco	13		
Federación Rusa	69	Rumania	12		
Finlandia	69	Islandia	11		

Cuadro 3: N° de Patentes de los diferentes países de los últimos 20 años. **Fuente:** Elaboración propia en base datos Patent Inspiration

Argentina no ocupa un lugar privilegiado en el ranking mundial, si bien ocupa la posición 40 con algunas patentes realizadas, sobre todo, en lo relacionado a cultivos de microalgas para obtención de lípidos o para el cultivo de Spirulina.

N° Publicación	Fecha Publicación	Título	Solicitante
US9074191B2	07 jul 2015	Methods and systems for producing lipids from microalgae using cultured multi-species microalgae	MACHIN MARCELO GONZALEZ [AR]

BRPI1013474A2	24 feb 2015	Métodos e sistemas para a produção de lipídios a partir de microalgas	MACHIN MARCELO GONZALEZ [AR]
BRPI0903826A2	07 jun 2011	Procedimento para obtenção de uma graxa e/ou óleo a partir de resíduos industriais para sua utilização como matéria prima de combustíveis	PIWKO JORGE ALEJANDRO [AR]
EP2283734A1	16 feb 2011	Process to obtain fat and/or oil from industrial waste to use them as raw materials for the production of fuels	BIODIESEL DEL PLATA S A [AR]
AR070504A1	14 abr 2010	Sistema integral para el cultivo extensivo e intensivo de microalgas en invernaderos de diseno especial	OIL FOX S A [AR]

Cuadro 4: Patentes Argentinas de los últimos 20 años. **Fuente:** Elaboración propia en base datos Patent Inspiration

Conclusión

Al igual que ocurre con las publicaciones, en los últimos 5 años se destacó un marcado aumento en la producción de patentes en la temática.

Lo primero que se puede observar es que hay varios ejes temáticos del árbol que registran muy pocas patentes, y entre ellas están los diferentes tipos de cultivo. Claramente el sistema de cultivo es muy plástico en cuanto a la forma de los equipos y los materiales a utilizar, por lo que no es difícil modificar esa parte del proceso si existe una patente.

En cambio en otros ejes, podemos detectar los cuellos de botella tecnológicos del proceso, donde tiene mayor sentido generar una patente. En primera instancia, el método de secado determina un cambio en las estructuras químicas dentro de las células por lo que rige, en parte, el destino de la producción. A su vez, el método de separación de las microalgas del medio de crecimiento puede afectar tanto costos productivos como eficiencia general.

En una segunda línea de volumen de patentamiento, aunque muy cercana a la anterior, se encuentran las energías renovables. Si bien se continúa con el enfoque más tradicional del uso de los lípidos, en los últimos dos años tiene una mayor incidencia el uso del Hidrógeno.

El tercer gran rasgo que se destaca en cuanto a las patentes es referido a los compuestos de alto valor agregado. Estos están tomando cada vez mayor importancia ya que el acoplamiento de servicios torna atractiva económicamente, a la tecnología en estudio.

En este punto surgen las siguientes preguntas ¿qué relevancia posee el eje de biorremediación?, ¿tiene sentido monitorearla?.

Ambas preguntas se deben contestar en conjunto. Tiene mucho sentido seguir el monitoreo de este eje ya que en los últimos años ha aumentado la conciencia social, a nivel mundial, en cuanto a la protección del medio ambiente. Por lo tanto, en la última década aumentó el estudio de las tecnologías que reducen y/o minimizan el impacto de los desperdicios de las actividades humanas. Estos estudios comprenden diversos tipos de microorganismos, entre ellos las microalgas, que una vez probadas terminarán en patentes que deben ser monitoreadas.

ANÁLISIS DEL MERCADO DE LAS MICROALGAS

La biotecnología de microalgas ha adquirido una considerable importancia en las últimas décadas. Pese a no saberse con precisión el número real de especies de microalgas existentes en todo el planeta, su número se presume en un rango entre 300.000 y 1.000.000 de especies. Esta cifra incluye a las diatomeas y a varios géneros considerados “de frontera” entre las algas y otros grupos taxonómicos (hongos, bacterias, etc.). De estas, sólo algunas decenas de miles de especies han sido identificadas a la fecha. A nivel de su industrialización con fines comerciales, el número se reduce a unas 15-20 especies empleadas en la actualidad, con otras 15 o 20 en estudio para determinar su potencial a mediano-largo plazo.

De esto, se desprende que el éxito de los proyectos productivos en biotecnología de microalgas radica en elegir la correcta especie con relevantes propiedades para que, en condiciones específicas de cultivo, produzca los compuestos de interés.

En este primer Informe se va a presentar un breve resumen general de la actualidad del mercado mundial de las microalgas. En Informes posteriores, se profundizará con mayor grado de detalle los vaivenes de la producción y comercialización de las distintas familias de productos obtenidos a partir de las microalgas.

El mercado mundial de las microalgas (como producción primaria) tiene un volumen de aproximadamente 35.000 toneladas/año de materia seca de microalgas, y genera una facturación total de origen de aproximadamente 1.200-1.700 millones de dólares estadounidenses al año (MUSD/año).

Este mercado se puede dividir en distintas familias, en función de los productos finales obtenidos. Los montos se van a dar siempre en MUSD como el valor de origen de los “productos a granel sin procesamiento adicional”, por lo que en sus volúmenes y facturaciones no se va a tener en cuenta el posterior agregado de valor a lo largo de la cadena productiva ni la participación de intermediarios a lo largo de la cadena de distribución:

1) Biomasa completa de microalgas.

La biomasa de microalgas es el producto predominante (medido en peso) en la biotecnología microalgal. Esta biomasa es cosechada de aguas naturales, de lagos artificiales o de fotobiorreactores, con la correspondiente separación del medio de cultivo y posterior secado. Se emplea principalmente como suplemento dietético en alimentación humana, debido a su alto contenido en proteína (incluyendo aminoácidos esenciales) y vitaminas. Se comercializa en forma

de polvo, capsulas, pastillas o tabletas. Estas suelen ser incorporadas en alimentos tales como pasta, galletas, pan, caramelos, yogures o refrescos.

Los géneros más empleados para este fin son *Spirulina (Arthrospira)* y *Chlorella*, debido a que presentan un excelente balance de nutrientes, y fundamentalmente a que su cultivo a escala industrial es más sencillo que de las otras especies de similar valor nutricional.

Los principales países productores de estas especies de microalgas son los países del sudeste asiático (liderados por China), India, Estados Unidos, Japón e Israel.

En términos cuantitativos, el mercado de *Spirulina* se estima en más de 12.000 ton/año, con un valor a granel de 8.000 USD/ton. El de *Chlorella* se estima en 5.000 ton/año, a valores de 10.000 USD/ton. Esto da un total (previo al agregado de valor adicional) de ~150 MUSD.

2) Ácidos grasos omega-3.

Desde hace tres décadas se viene acumulando evidencia científica que demuestra que el consumo de ácidos grasos poliinsaturados de cadena larga omega-3, en particular los ácidos eicosapentaenoico (EPA) y docosahexaenoico (DHA), previene enfermedades cardiovasculares, neurológicas y cognitivas, algunos tipos de cáncer, diabetes, y enfermedades inflamatorias.

Todas las variantes comercializadas de omega-3 derivan de procesos naturales, aunque las mejores fuentes de omega-3 son los alimentos de origen marino. El DHA se obtiene industrialmente a partir de aceite de pescado, aceite de krill, algunas semillas de plantas, o aceite de microalgas.

Actualmente, la fuente de obtención del 70% de todo el omega-3 mundial es el aceite de pescado. En particular, el aceite de anchoas provenientes de los bancos que crecen en las costas peruanas. Los peces no producen su propio omega-3, sino que lo obtienen de su dieta de fitoplancton marino, que sí lo sintetiza. Sin embargo, las caídas en los volúmenes de pesca sumados al aumento en la demanda de omega-3 están empujando al alza a su producción industrial a partir del aceite de microalgas, en particular el de las especies *Crypthecodinium cohnii* o *Schizochytrium limacinum*. Para su comercialización a granel, el aceite se vende, por ejemplo, como “aceite de microalgas conteniendo un 40% de DHA”, que es la concentración aproximada a la que se lo puede extraer de estas especies de microalgas. Hay empresas que lo procesan aún más, llegando a formulaciones concentradas al 90% o más, o microencapsuladas para su uso en matrices sólidas, como por ejemplo la fórmula de reemplazo para la leche materna, con el consiguiente agregado de valor.

Los principales países productores de omega-3 a partir de microalgas son Estados Unidos, China, Portugal y Australia. El volumen del mercado del omega-3 obtenido a partir de microalgas es

actualmente de unas 3.000 ton/año, con una sensible alza interanual. El precio de venta a granel del “aceite de microalga con DHA (40%)” es de 140 USD/kg. A partir de estos datos, se puede estimar una valuación de mercado (previo al agregado de valor) de 420 MUSD.

3) Pigmentos antioxidantes.

Como organismos fotosintéticos, las microalgas contienen una serie de pigmentos accesorios captadores de la luz que cumplen funciones antioxidantes, y que suelen encontrarse en bajas concentraciones respecto a la clorofila. Sin embargo, bajo ciertas condiciones fisiológicas relacionadas al stress, se puede gatillar en algunas especies una superproducción de estos pigmentos antioxidantes, alcanzando concentraciones considerables desde el punto de vista productivo.

Desde este punto de vista, los pigmentos más relevantes son los carotenoides. Principalmente el betacaroteno (naranja) y la astaxantina (rosada), y en menor medida, la luteína (amarilla). También está ganando protagonismo la ficocianina, que es un pigmento verde-azulado de la familia de las ficobilinas, muy abundante en la *Spirulina*.

a) Betacaroteno

Se obtiene a partir de la microalga *Dunaliella salina*. Esta especie es halotolerante, lo cual quiere decir que es capaz de crecer en medios con concentraciones de sal 7 veces mayor a la del mar. Estas condiciones extremas de cultivo le evitan la competencia con otras algas por los nutrientes, mientras que a su vez impiden el avance de sus depredadores naturales, posibilitando así su cultivo extensivo en estanques abiertos para su aprovechamiento industrial. Estas condiciones de cultivo bajo stress son además las que le permiten a algunas cepas de esta alga acumular betacaroteno hasta alcanzar un 10% de su peso seco.

Comercialmente, el betacaroteno es empleado como colorante alimentario natural, como fuente de vitamina A (ya que se trata del precursor de esta vitamina) y como antioxidante en la industria nutracéutica. Los principales países productores son Australia, China, Israel e India.

Su volumen de mercado es de unas 60-70 ton/año, con un precio de venta a granel de 1.500 USD/kg si se comercializa en polvo, totalizando una valuación de mercado (previo al agregado de valor) de 105 MUSD. También se lo puede conseguir como oleorresina, y con un mayor valor como “polvo dispersable en agua”, luego de su microencapsulado con moléculas anfífilicas.

b) Astaxantina

La astaxantina es un carotenoide estructuralmente relacionado al betacaroteno. Es obtenido principalmente a partir de *Haematococcus pluvialis*, que es la única especie de microalga conocida hasta la fecha que puede acumular en su interior, dadas las adecuadas condiciones de stress, hasta un 4% en peso seco de este pigmento.

A diferencia de *D. salina*, *H. pluvialis* no puede ser cultivada en medios selectivos, por lo que su cultivo a escala industrial requiere el montaje de grandes fotobioreactores para retrasar lo más que se pueda la contaminación de los medios y prevenir la aparición de especies depredadoras. Los altos costos asociados al cultivo de esta especie se justifican a partir del elevado valor de mercado de la astaxantina obtenida.

Esta, en su variante natural, se emplea en la industria alimenticia, cosmética y nutracéutica. Estudios recientes demostraron que este pigmento tiene la capacidad para cruzar la barrera hemato-encefálica, y también la barrera hemato-retiniana. Esto le permite acceder al cerebro, al sistema nervioso central y al interior de la retina. Esta propiedad es exclusiva de la astaxantina natural, ya que, ni siquiera el β -caroteno puede hacerlo, lo que da protección antioxidante y anti-inflamatoria a los ojos, al cerebro y al sistema nervioso central, reduciendo el riesgo de sufrir cataratas, y degeneración macular relacionada con la edad (DMAE), entre otras enfermedades.

Su volumen de mercado es de unas 40 ton/año, con un gran aumento interanual que no muestra signos de detenerse en el mediano plazo, y su precio a granel es de los más altos: >7.000 USD/kg. Esto da una valuación de mercado (previo al agregado de valor) superior a 280 MUSD.

d) Ficocianina

La ficocianina es el principal pigmento antioxidante producido por *Spirulina*, siendo el responsable del característico color verde-azulado de esta especie. Posee un amplio espectro de aplicaciones en la industria cosmética, en la alimenticia como colorante natural soluble en agua, sumado a sus características nutracéuticas (como antioxidante).

Su valor de mercado a granel supera los 300 USD/kg. No se obtuvieron datos sobre el volumen de mercado, aunque distintas fuentes proponen que este está en alza, en respuesta a los estudios que confirman las propiedades beneficiosas de este pigmento.

4) Aceite para la producción de biodiesel.

El empleo de microalgas como fuente de producción de combustibles se comenzó a investigar con fuerza a fines de los años '70 en los EEUU, durante la 1ª crisis del petróleo. Desde hace 8 años, más de 50 empresas y *startups* se sumaron en la puesta a punto de cepas y sistemas de cultivo para la producción a gran escala de aceites de microalgas con destino a la producción de biodiesel. Esto trajo aparejado un nivel de inversión Pública de más de 2.500 MUSD (sólo en EEUU), sumado a diversas contrapartes privadas por más de 1.000 MUSD.

Los grandes esfuerzos de I+D Pública y Privada canalizados hacia este objetivo resultaron en importantes avances científicos y tecnológicos, la producción de cientos de Patentes de Invención, y la creación de numerosas fuentes de empleo calificado. Pese a esto, a la fecha, ninguna de ellas ha logrado el éxito en su escalado a nivel económico-financiero. En futuros boletines se analizarán con mayor detalle las causas de esta demora en la implementación a escala productiva.

5) Biorremediación de efluentes

Por su inherente capacidad para extraer fósforo y nitrógeno del medio donde se las cultiva, las microalgas se pueden emplear como agentes de tratamiento de efluentes, en especial para la última etapa (afinado) en el tratamiento de los residuos sólidos urbanos. Luego del tratamiento, la biomasa resultante se podría emplear para alimentación animal e incluso, tomando los recaudos necesarios, alimentación humana. Entre los recaudos necesarios se encuentra la realización de análisis exhaustivos que descarten la presencia de metales pesados, restos de solventes orgánicos, microorganismos patógenos, etc.

En futuros informes se ampliará sobre las tecnologías y potencialidades de este uso de las microalgas.

6) Compuestos especiales.

En esta categoría se incluyen compuestos o productos obtenidos del procesamiento de las microalgas para usos alternativos a los tradicionales previamente mencionados, incluyendo algunos provenientes de microalgas genéticamente modificadas. A continuación, se presenta un breve listado con algunos ejemplos de esta categoría que se encuentran en fase de desarrollo avanzado, o en las primeras etapas de su comercialización.

- a) Polihidroxialcanoatos (PHA) y otros biopolímeros
- b) aceites modificados para uso industrial – Química Verde (lubricantes, aislantes térmicos y dieléctricos, refrigerantes, solventes, etc.)

- c) Producción de compuestos relacionados a la industria biomédica (anticuerpos, vacunas, coadyuvantes, enzimas, etc.)
- d) Otros compuestos con actividades de interés cosmético o nutracéutico (luteína, fucoxantina, terpenoides, ficoeritrina, betaglucanos, polisacáridos extracelulares, ceras, resinas, etc.

En futuros informes se ampliará sobre las tecnologías y potencialidades de estos usos de las microalgas.

7) Otros usos generales

Bajo esta categoría se enumerará una serie de empleos minoritarios de las microalgas que se encuentran en fase de desarrollo avanzado, o en las primeras etapas de su comercialización. Aún no tienen gran influencia en el plano económico, pero algunos de estos usos presentan un buen potencial a futuro (ej.: alimentación para acuicultura)

- a) Alimentación humana (harina de algas para uso en confitería y panificación)
- b) Alimentación animal (ganadería, acuicultura, etc.)
- c) Cosméticos (jabones, máscaras faciales, aceites cosméticos, shampoo, etc.?)

En futuros informes se ampliará sobre las tecnologías y potencialidades de estos usos de las microalgas.

8) Productos de alto valor

Tal como se menciona en puntos anteriores se presenta un resumen con algunos de los productos de alto valor derivados de las microalgas.

Item		Valor	Unidades
Biomasa por Especie			
Spirulina		8000	USD/ton
Chlorella		10000	USD/ton
Aceites Omega 3		140	USD/kg
Pigmentos			
	β-Caroteno	1500	USD/kg
	Astaxantina	>7000	USD/kg
	Ficocianina	300	USD/kg

9) Conclusiones

En las Secciones previas se hizo un repaso del estado del arte y la actualidad del mercado mundial de las microalgas y sus productos derivados. A partir de este repaso, y en línea con las prioridades y las posibilidades actuales de nuestro país, se recomienda priorizar en un eventual cronograma de investigación/adopción/implementación a las tecnologías de microalgas tendientes a la obtención de productos de alto valor agregado (alto retorno de la inversión), como así también de las tecnologías económicas aplicables a biorremediación.

En este último eje (biorremediación), el agregado de valor está dado por el acoplamiento a procesos preexistentes, asociados a la solución de una demanda ambiental y social.

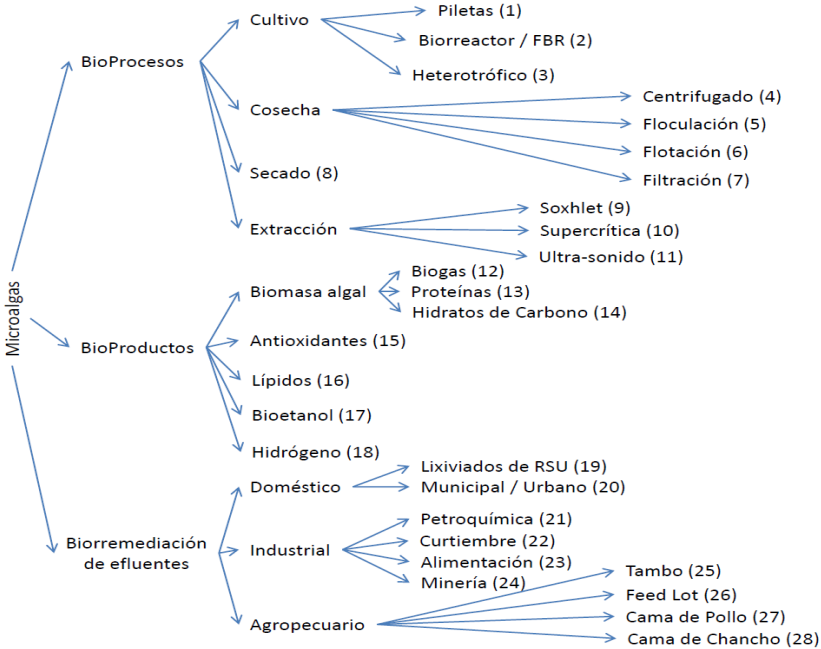
Los resultados positivos de esta eventual primera ola de adopción de tecnología de microalgas abrirían el camino a la profundización de la I+D en tecnologías experimentales promisorias, pero que actualmente no cuentan con antecedentes exitosos de aplicación, tal como es el caso del biodiesel de microalgas.

10) Referencias

- 1) *María del Carmen Cerón García*. PRODUCCIÓN DE MICROALGAS CON APLICACIONES NUTRICIONALES PARA HUMANOS Y ANIMALES. CUADERNOS DE ESTUDIOS AGROALIMENTARIOS | ISSN 2173-7568 | 87-105 |. Almería, septiembre de 2013
- 2) <http://www.algaeindustrymagazine.com/boom-in-astaxanthin-boosts-carotenoid-market/>
- 3) Vigani, M., Parisi, C., Rodriguez-Cerezo, E., Barbosa, M.J., Sijtsma, L., Ploeg, M., Enzing, C., (2015) Food and feed products from micro-algae: Market opportunities and challenges for the EU, *Trends in Food Science & Technology*, doi: 10.1016/j.tifs.2014.12.004.
- 4) Enzing et al. (2014). Microalgae-based products for the food and feed sector: an outlook for Europe. J R C S C I E N T I F I C A N D P O L I C Y R E P O R T S.
- 5) http://www.oilgae.com/non_fuel_products/non_fuel_products_from_algae.html
- 6) <http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2014/06/29/are-we-there-yet-the-positioning-and-repositioning-of-the-algae-industry/>
- 7) <https://www.biooekonomie-bw.de/en/articles/current-articles/microalgae-can-produce-more-than-just-fuel/>

ANEXO ÁRBOL DE CATEGORÍAS

Árbol de categorías (español)



Árbol de categorías (inglés)

