

ENERGÍAS RENOVABLES, BIOCOMBUSTIBLES Y MICROALGAS MARINAS

Palabras clave: Biocombustibles, microalgas, diatomeas marinas.
Key words: Biofuels, microalgae, marine diatoms.

Ante la realidad del Cambio Climático y el posible agotamiento de las reservas de combustibles fósiles, el desarrollo científico y tecnológico de fuentes de energía renovables ha cobrado una singular relevancia. En este contexto, se realiza una síntesis de la situación actual vinculada con las emisiones de CO₂, la relación entre el petróleo y el biodiesel derivado de microalgas y las ventajas de estas últimas sobre las plantas terrestres. Particularmente, se destacan los atributos de las diatomeas marinas, uno de los grupos de microalgas más exitosos evolutiva y ecológicamente, y su importancia como fuente de desarrollo de biocombustibles y nanotecnología.

■ Viviana A. Alder

Instituto Antártico Argentino (DNA-MRECIC) e IEGEBA (UBA-CONICET).
Departamento de Ecología, Genética y Evolución. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.

E-mail: viviana.alder@gmail.com

In the face of Climate Change and the likely depletion of fossil fuel reserves, the scientific and technological development of renewable energy sources has become particularly important. In this context, a summary of the current situation as to CO₂ emissions, relationships between oil and microalgae-derived biodiesel, and the benefits of the latter over terrestrial plants is presented. Particular emphasis is given to the features of marine diatoms, one of the most evolutionary and ecologically successful groups of microalgae and to their significance as a source of both biofuel and nanotechnology development.

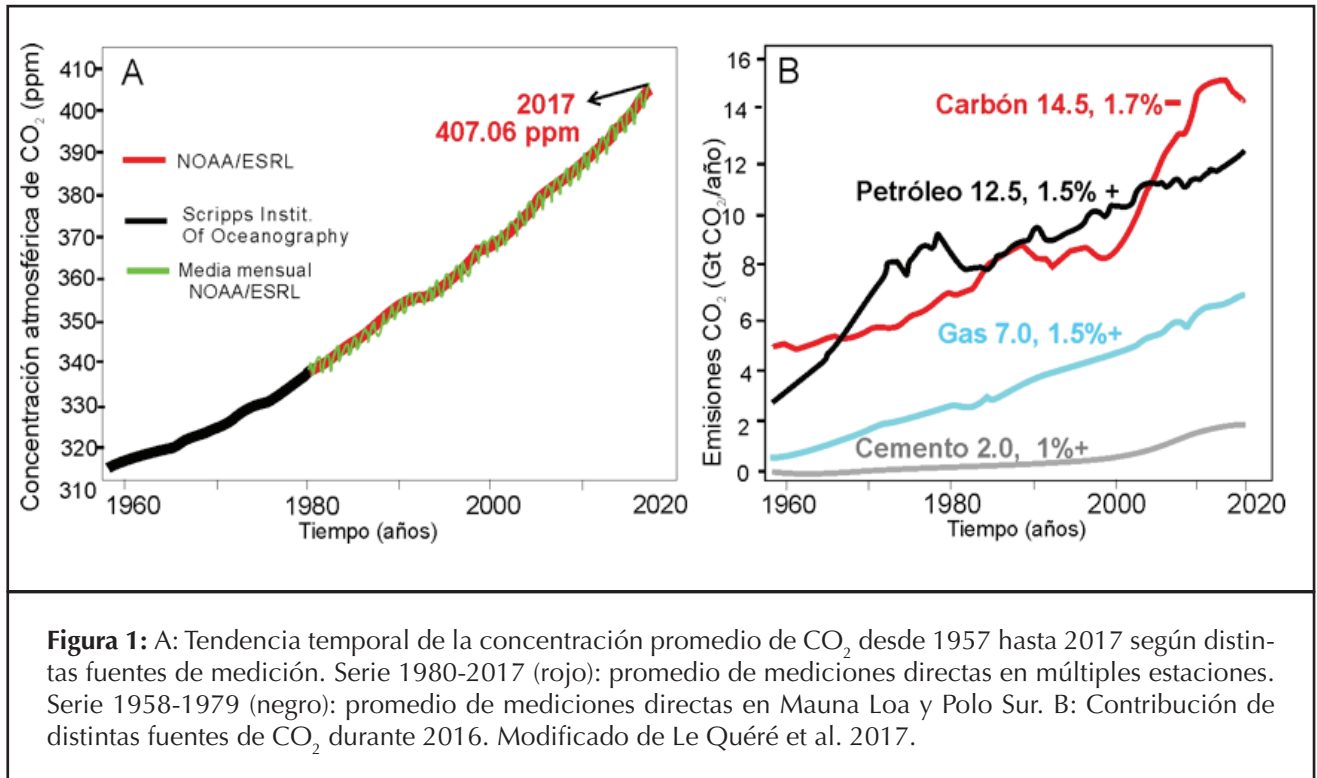
■ EL ESTADO DE LA “CASA”.

¿Gastamos más de lo que tenemos o gastamos mal lo que tenemos? Tal sería el concepto que trata de expresar la organización Global Footprint Network, definiendo además el “Día del Exceso de la Tierra”, vale decir la fecha en que la humanidad agota el presupuesto anual del planeta. Lamentablemente, ese día no es fijo: en 2017 fue el 2 de agosto, pero cada año se celebra varios días antes. Es evidente que hemos superado los límites de consumo y de generación de residuos. Por ende, enfrentamos una crisis con centros de acción múltiples, complejos y entrelazados: la disminución acelerada de los recursos naturales asociada a un incremento de la contaminación por dióxido de carbono (persistente a largo pla-

zo), la disminución de la diversidad biológica y funcional, la pérdida de hábitat y de calidad de los suelos, del agua y del aire. Y sumado a todo esto, el Cambio Climático. Preservar el clima global frenando el incremento de la temperatura media es uno de los mayores desafíos colectivos que enfrenta la humanidad, y que sólo puede solucionarse en forma coordinada (Tavoni et al. 2011). Los beneficios de la reducción de emisiones son compartidos por todos, independientemente de las contribuciones individuales.

No obstante su incertidumbre, las proyecciones climáticas sugieren que el incremento de la temperatura podría acelerarse aún más si todo sigue como hasta ahora (Cox et al. 2000; Friedlingstein 2015). El reciente estudio de Le Quéré et al.

(2017) concluye que la concentración promedio global de CO₂ sigue aumentando (de ~277 ppm en 1750 a 403 ppm en 2016, Figura 1A). La tasa de incremento de CO₂ durante la última década (2007–2016) se atribuye a dos fuentes principales: la actividad industrial y la quema de combustibles fósiles (88%: 34,4 Gt CO₂/año), y los cambios en el uso del suelo (12%: 4,8 Gt CO₂/año). Los sumideros de estas emisiones son la atmósfera (44%), la tierra (28%) y el océano (22%). Considerando la serie histórica de datos, la primera vez que los valores se sostuvieron por encima de 400 ppm fue durante todo el año 2016 (Le Quéré et al. 2017), lo cual fue atribuido mayormente a emisiones derivadas del carbón (40%), petróleo (34%), gas (19%), la industria del cemento (6%) (Figura 1B), y a los efectos residua-



les del evento El Niño 2015/2016 (1%: incendios, no ilustrado). Para el 2017, todo indica un incremento de un 2% respecto de 2016.

Significativamente, las palabras “economía” y “ecología” tienen la misma raíz etimológica (*oikos* = casa). Después de varias idas y venidas dentro de la misma “casa”, hemos comenzado a entender cómo funciona y a aprender a administrarla. El escenario general implica inversiones muy costosas para mantener en funcionamiento a ecosistemas alterados de los cuales tenemos estricta dependencia. Requerimos de energía para restaurar lo que ya es disfuncional, aunque en muchos casos no contamos con líneas de base para poder devolver el equilibrio original a los ecosistemas, si es que esto aún es posible. Las distintas fuentes de energía derivan de recursos naturales considerados inagotables o renovables (viento, sol, biomasa, agua en movimiento, calor) o aparentemente finitos y no renovables (petróleo, gas, carbón, uranio).

Y esas mismas fuentes o los productos de su transformación se clasifican en formas de energía: primarias (hidráulica, nuclear, eólica, solar, gas, petróleo carbón mineral, leña y residuos de materia orgánica, aceites y alcoholes vegetales) o secundarias (energía eléctrica, gas licuado, naftas, gasoil, diesel oil, carbón de leña, biodiesel, bioetanol, etc.).

No hay cielo sin nubes. Cualquier mecanismo de producción de energía genera un impacto en el ambiente. De hecho, y aunque las energías renovables sean percibidas como una alternativa más segura y menos contaminante que las derivadas de combustibles fósiles, aún están lejos de ser una panacea (Abbasi y Abbasi 2000). El caso más emblemático son las mega-represas asociadas a proyectos hidroeléctricos, con conocidos impactos sociales, culturales, paisajísticos y ambientales (Deemer et al. 2016). La energía derivada de la biomasa implica, entre otros aspectos, cambios en el uso del suelo, quizás el recurso no

renovable más precioso por estar estrechamente vinculado a la seguridad alimentaria global. Tal como lo indica la FAO (2015), los sistemas alimentarios y energéticos del futuro deberán ser más eficientes, debiendo debatirse los asuntos relacionados a combustibles y alimentos en forma conjunta.

Debido a esto y a otras causas que exceden el alcance de este artículo, todos los caminos parecen conducir a Roma: debemos investigar y desarrollar fuentes de energía alternativas renovables, minimizando los impactos ambientales y maximizando los beneficios para la sociedad (seguridad climática, energética, alimentaria y sanitaria), la conservación de las especies y los valores culturales. En ningún caso estos procesos son mutuamente excluyentes. El desarrollo, la operación y el mantenimiento de estos emprendimientos implicará, en distintos grados, la fragmentación del hábitat, la aparición de barreras que alteran el desplazamiento de las es-

pecies y los flujos génicos, el debilitamiento de los ecosistemas ante los disturbios (incendios, sequías, inundaciones, invasiones de otras especies), el incremento del ruido, y la generación de microclimas y campos electromagnéticos, entre otros efectos. Por lo tanto, es imperativo contemplar su beneficio y su costo en distintas escalas y esferas de acción, enfatizando en los cambios asociados al complejo funcionamiento de los ecosistemas.

Afortunadamente, cada vez son más los países que parecen estar tomando conciencia sobre este tema.

■ LOS AVATARES DEL CARBONO

El carbono es el elemento dominante de la materia orgánica. El ciclo del carbono es un proceso biogeoquímico que implica su intercambio entre distintos reservorios interconectados (Rackley 2017). El movimiento o intercambio entre reservorios ocurre mediante una gran variedad de procesos biológicos, geológicos, físicos y químicos, en escalas temporales que van desde segundos (fotosíntesis de los vegetales, respiración de vegetales y animales) a miles o millones de años (formación de hidrocarburos fósiles). Estas diferencias definen, por un lado, un “ciclo rápido” vinculado con el intercambio entre la superficie del océano, la atmósfera (el reservorio más pequeño y vulnerable), la capa superficial del suelo y la biósfera terrestre, y por otro lado un “ciclo lento” relacionado con la circulación en el océano profundo, la conversión del CO₂ oceánico disuelto en carbonatos y luego en rocas, los movimientos tectónicos y la liberación de CO₂ a la atmósfera mediante actividad volcánica. Alteraciones tales como la deforestación, el uso excesivo del suelo, los incendios y la contaminación (ciclo rápido) o la extracción y quema del carbono

almacenado en los combustibles fósiles (ciclo lento), alteran los flujos y el estado de equilibrio natural, con una influencia significativa en la dinámica del ciclo global del carbono, potenciando así el aumento de las concentraciones de CO₂ en la atmósfera y océanos, y afectando al sistema climático global.

El petróleo, entonces, pertenece a la dinámica del ciclo lento del carbono. Pese a que se trata del recurso más transformador y revolucionario a nivel global, es llamativo que no exista certeza sobre su origen. Mientras que la escuela occidental (con mayor número de seguidores) sugiere para el petróleo un origen biogénico a partir de la materia orgánica que ha quedado enterrada en los sedimentos a lo largo de tiempos geológicos, la escuela ruso-ucraniana propone que se trata de un recurso abiogénico con origen en rocas básicas y ultrabásicas de la astenósfera (Romanova y Romanov 2015). Estamos pues ante una muy importante disyuntiva sobre la finitud o infinidad del recurso. Más allá de esto, e independientemente de su origen, está comprobado que continuar con la dependencia del petróleo limita fuertemente la diversificación de las fuentes de energía e implica continuar con el calentamiento global, el cual es atribuido mayormente al incremento de CO₂ derivado de la quema de hidrocarburos.

Asumiendo que el petróleo es un recurso de origen biogénico, para el desarrollo de fuentes alternativas de energía es interesante considerar la estrecha relación que guardan sus componentes principales (carbono e hidrógeno) con la materia viva. En líneas generales, el origen del petróleo estaría ligado a la acumulación de organismos autótrofos y heterótrofos, principalmente marinos (y de aguas salobres), y su posterior soterramiento en un medio anaeróbico,

sufriendo luego diversos procesos geológicos en los que intervienen altas presiones y temperaturas.

La formación de petróleo a partir de materia orgánica requiere inicialmente de la creación de un estrato madre caracterizado por un alto contenido de carbono orgánico rico en compuestos con alta proporción H/C, tales como los **lípidos**. Esto fue posible gracias a la elevada productividad del plancton que habitaba en las aguas superficiales y, más específicamente, a los organismos planctónicos unicelulares (microalgas) que constituyen el fitoplancton, ya que su abundancia y composición determinan la cantidad y calidad de la materia orgánica que será exportada hacia las grandes profundidades.

A lo largo del tiempo geológico, los organismos muertos y la materia orgánica producto de su degradación y metabolismo fueron acumulándose en los fondos oceánicos, proceso que fue más significativo en aguas ricas en nutrientes y/o poco profundas, ya que son las que aseguran una sedimentación más rápida y una menor tasa de mineralización de la materia orgánica durante la caída. Esto explica por qué los principales yacimientos de petróleo generalmente se encuentran en zonas que han sido (o aún son) áreas marinas someras, proximidades a deltas o zonas lacustres.

■ BIOCMBUSTIBLES Y MICROALGAS: UNA OPCIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE EN DESARROLLO

Las plantas y animales almacenan lípidos en forma de aceites y grasas, respectivamente. Como ya ha sido mencionado, la búsqueda de una alternativa al uso del petróleo ha llevado a investigar y desarrollar la industria de los biocombustibles, vale decir de combustibles

producidos por el hombre a partir de biomasa. Tanto la biomasa de ciertos vegetales (principalmente plantas oleaginosas y microalgas) como las grasas animales pueden proporcionar materia prima para su producción.

Según el nivel de procesamiento y origen de la fuente de biomasa, los biocombustibles se clasifican como de primera, segunda, tercera o cuarta generación (Cuadro 1). Según su estado, pueden ser líquidos (bioetanol y biodiesel), gaseosos (biogás) o sólidos (briquetas, pellets de madera, leña, carbón vegetal, etc.).

Entre los biocombustibles líquidos, el biodiesel (compuesto por una mezcla de ésteres alquílicos de ácidos grasos de cadena larga), se obtiene por el proceso de transesterificación de triglicéridos. El bioetanol (alcohol etílico) se obtiene a partir de la fermentación alcohólica de azúcares. Actualmente, para el biodiesel se utilizan plantas oleaginosas (soja, girasol, maní, algodón, palma), grasa animal o residuos de

aceite, mientras que para el bioetanol (el biocombustible con mayor producción global) se utiliza maíz, remolacha, caña de azúcar y también residuos derivados de biomasa.

Particularmente los biocombustibles líquidos, tales como el biodiesel y el bioetanol, mezclados en diferentes grados con gasoil y nafta respectivamente, son una importante alternativa para cubrir parte de la demanda energética de combustibles derivados de petróleo destinados al transporte y con ventajas ambientales de importancia respecto de este último (Chisti y Yan 2011). Actualmente, el biodiesel y el bioetanol derivados de la biomasa terrestre no alcanzan a cubrir la demanda de diesel fósil (Chisti 2008, Demirbas 2010, Cheng y Timilsina 2011). Además, sumado a los aspectos tratados previamente, la "economía de carbono ambiental" depende de cómo estos biocombustibles sean producidos. Si generar biomasa implica pérdida de bosques, pastizales y sabanas en pos de cultivos, su producción implica una deuda ambien-

tal, dado que se liberan de 17 a 420 veces más de CO₂ que la disminución anual de gases de efecto invernadero que produciría el reemplazo de los combustibles fósiles por biocombustible (Fargione et al. 2008). En contraste, si los biocombustibles provienen de residuos de biomasa o del desarrollo de determinados cultivos en suelos marginales, éstos pueden ofrecer ventajas (Fargione et al. *op cit*). Hace casi una década ya se afirmaba que la cantidad de carbono secuestrado por la restauración de bosques es mayor que la reducción de las emisiones por el uso de biocombustibles (Righelato y Spracklen 2007).

Una opción promisoriosa en este contexto son los resultados de las investigaciones sobre microalgas (o biocombustibles de tercera generación, Cuadro 1) en virtud de su alto contenido de lípidos y porque serían una fuente de biodiesel capaz de sostener en un futuro la demanda de combustibles y de mitigar las emisiones de CO₂ (Chisti y Yan 2011).

Cuadro 1:

Clasificación de los biocombustibles según la fuente de origen de la biomasa y el nivel de procesamiento.

Primera generación (1G): Biomasa derivada de materias primas aptas para alimentación. El etanol y el biodiesel se producen y comercializan actualmente en base a especies de plantas terrestres. Presentan controversias vinculadas con la seguridad alimentaria y el uso de los suelos, pérdida de la biodiversidad natural y cambios en la calidad del agua y suelos.

Segunda generación (2G): Biomasa lignocelulósica derivada de residuos de la industria agrícola y maderera, desechos de animales, etc. Mayor complejidad en la producción que los biocombustibles de 1G. Aún no se producen en gran escala.

Tercera generación (3G): Biomasa derivada de cultivos específicos, como microalgas. Implican menor presión sobre la materia prima y liberación de suelos para el cultivo, entre otras ventajas (ver Cuadro 2). Actualmente no disponibles debido al costo elevado y la baja producción de biodiesel, parcialmente atribuido al hecho de que la producción de lípidos (que ocurre bajo condiciones de estrés de nutrientes) se asocia con una reducción del crecimiento y producción de biomasa. Requieren de desarrollo científico-tecnológico.

Cuarta generación (4G): Basados en ingeniería metabólica de microorganismos. Requiere del desarrollo de biología sintética (Aro 2016). La bioingeniería (principalmente de bacterias) para uso industrial conlleva a consideraciones éticas al tratar a organismos vivos como máquinas o herramientas (McLeod et al. 2017).

Las microalgas son un conjunto de organismos unicelulares procariontas y eucariontas muy heterogéneo, que habitan en ambientes acuáticos como células libres en la columna de agua y/o adheridas a un sustrato. Su rol en la producción de oxígeno y la fijación de carbono global equipara al de las plantas terrestres. Pueden acumular entre 20% y 50% de su peso seco como lípidos. Sus aplicaciones tanto para la generación de productos como en procesos de biorremediación derivados de residuos domésticos, agropecuarios e industriales son innumerables (Spolaore et al. 2006). Entre los productos, las microalgas con capacidad de acumular lípidos en una cantidad superior al 20% de su masa celular son consideradas como una fuente alternativa de lípidos para biocombustibles. Algunas especies son potencialmente capaces de producir hasta un 60% de lípidos neutros (**triacilglicerol** o TAG) por gramo de peso

seco, convirtiéndolas en el sistema natural más eficiente para la producción de biodiesel (Sayre 2010, Yi et al. 2017). Esta concentración puede incrementarse hasta lograr un 90% de su peso seco, si las algas se someten a un estrés fisiológico mediante la limitación de nutrientes o de luz (Khozin-Goldberg y Cohen 2011, Scott et al. 2010).

La acumulación de lípidos en microalgas se produce cuando un nutriente (por ejemplo, nitrógeno) se convierte en el factor limitante del crecimiento. La limitación de nitrógeno no sólo genera la acumulación de lípidos, sino que también da lugar a un cambio gradual de la composición lipídica al facilitar la conversión de ácidos grasos libres a triglicéridos, siendo estos últimos más útiles para la conversión a biodiesel (Hu et al. 2008). Por otra parte, es posible aumentar la concentración en biomasa mediante la optimiza-

ción de los factores determinantes del crecimiento (intensidad de luz, temperatura, pH, salinidad, concentración de dióxido de carbono) y del proceso de cosecha.

El biodiesel derivado de lípidos de microalgas cobra un especial interés por ser el más parecido al petróleo. Si cumple con las especificaciones de calidad internacionales puede: a) incorporarse fácilmente a la actual infraestructura mundial de transporte; b) utilizarse en forma directa como combustible sólido para generar electricidad, calor y vapor; c) convertirse en biocombustibles gaseosos como el biogás y el biohidrógeno; d) proveer almidón que al ser fermentado produce biocombustibles líquidos como el bioetanol y el biobutanol.

El Cuadro 2 resume las múltiples ventajas de las microalgas, en su mayoría ambientalmente superado-

Cuadro 2:

Cualidades de las microalgas por sobre las plantas terrestres en relación con la producción de biocombustibles

Tasa de crecimiento más elevada (en condiciones ideales). Gran parte de la energía se invierte en división celular (6 a 12 hs) permitiendo acumulación de biomasa y aceites en menos de un día. El rendimiento por unidad de superficie es mucho mayor que en cualquier planta oleaginosa.

Mayor eficiencia fotosintética. Convierten de 3 a 8 % de la energía solar en biomasa. (En plantas: 0,5 %).

Más eficientes en la asimilación de CO₂. Reducen el efecto invernadero.

No requieren de suelos aptos para el cultivo. Se cultivan en laboratorio, en fotobiorreactores u otras instalaciones cerradas o abiertas.

Los períodos de cosecha son cortos y continuos. Muchas especies de plantas dependen de la estacionalidad.

Pueden cultivarse en aguas residuales o salobres. Los principales requerimientos para el cultivo son distintas condiciones de luz y nutrientes. El CO₂ y el agua residual se reutilizan en el cultivo.

La biomasa residual es aplicable en industria. Luego de la extracción de aceites, la biomasa es apta para la industria farmacéutica, alimentaria y agropecuaria.

(Fuentes: Demirbas 2009, Sayre 2010, Rodolfi et al. 2009, Lardon et al. 2009, Arias Peñaranda et al. 2013).

ras comparadas con los beneficios derivados de los biocombustibles de las plantas superiores. Además, si se compara el rendimiento en aceite derivado de plantas y de microalgas, el maíz, la soja, la jatropha y la palma aceitera brindan 170, 446, 1.892 y 5.950 litros/hectárea, mientras que el rendimiento de las microalgas oscila entre 58.700 y 136.900 litros/hectárea, dependiendo de que el aceite represente el 30% o 70% del peso seco, respectivamente (Chisti 2008).

El desarrollo de biocombustibles a partir de microalgas es un proceso de cuatro etapas básicas (Figura 2): cultivo, cosecha, procesamiento/extracción y refinamiento (para biodiesel o bioetanol). Cada etapa implica distintos grados de complejidad y la tecnología asociada está en constante innovación. Durante la etapa de producción de biomasa, se incorporan al cultivo el agua, los nutrientes y el dióxido de carbono.

En la etapa de recuperación o cosecha, las células suspendidas en el cultivo se separan del agua y de los nutrientes residuales. La biomasa recuperada se utiliza para extraer el aceite que se convertirá en biodiesel en un proceso independiente. Parte de la biomasa puede ser utilizada como alimento de animales y para otros productos derivados de alto valor. Bajo un proceso de digestión anaeróbica, gran parte de la biomasa produce biogas que permite generar electricidad y sostener la propia producción de microalgas. Las emisiones de CO₂, por su parte, también se utilizan para la producción de biomasa (Chisti 2008).

En líneas generales, las microalgas pueden cultivarse en sistemas abiertos, cerrados o mixtos (Chisti 2008, Brennan y Owende 2010, Narala et al. 2016).

- **Sistemas abiertos:** son los más frecuentemente utilizados. Se

trata de estanques (cemento, polietileno o PVC) con un flujo de agua en constante circulación por la acción de paletas giratorias. En estos sistemas el cultivo depende de las condiciones ambientales del lugar donde se encuentre la refinería. Tienen la ventaja de ser económicos y de construcción sencilla, pero la productividad que pueden alcanzar es baja.

- **Sistemas cerrados o fotobiorreactores.** se desarrollaron para solucionar los problemas de contaminación con otras especies y/o pérdida de algas por condiciones inapropiadas. Los fotobiorreactores pueden ser segmentos tubulares, columnas o paneles planos, dispuestos en diferentes configuraciones. Permiten controlar factores ambientales para optimizar el crecimiento y evitar los procesos de fotorrespiración. Debe proporcionarse la energía

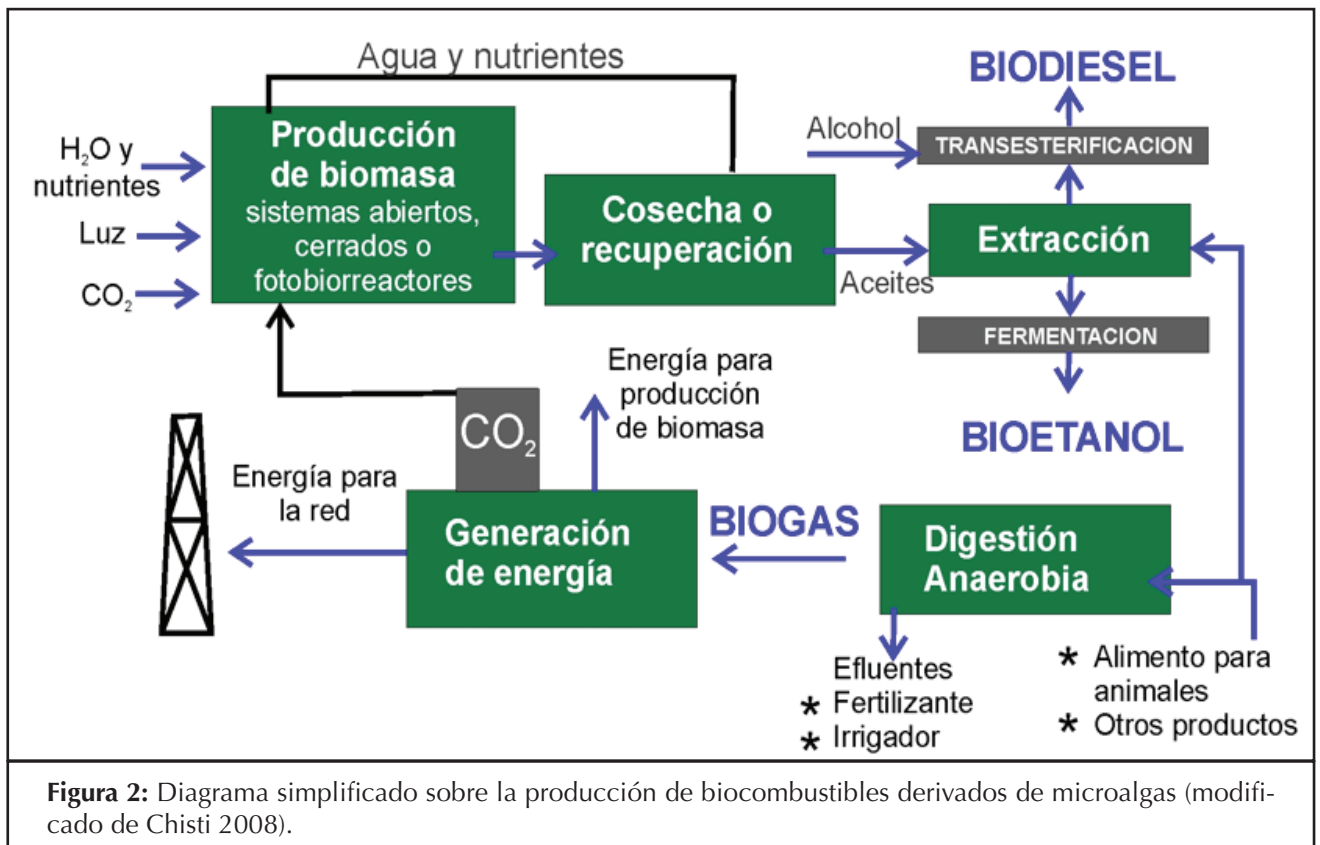


Figura 2: Diagrama simplificado sobre la producción de biocombustibles derivados de microalgas (modificado de Chisti 2008).

mecánica necesaria para evitar la sedimentación de las algas y favorecer la transferencia de gases. Tienen un mayor costo en materiales por el uso de tecnologías más sofisticadas y algunos problemas vinculados con el calentamiento, el crecimiento de algas que se adhieren al sustrato, y el exceso de oxígeno (que limita el crecimiento). En base a información acumulada durante 25 años, Lee (2001) concluye que la productividad de los fotobiorreactores no es muy superior a la que se obtiene en sistemas abiertos.

- **Sistemas mixtos:** consisten en invernaderos dentro de los cuales se instalan estanques de menores dimensiones que los sistemas abiertos. La estructura del invernadero soluciona algunos de los problemas de los sistemas abiertos, como minimizar la probabilidad de contaminación con otras especies y mejorar ciertos factores como la temperatura y la luz.

Cabe recalcar, en este punto, que el uso de las microalgas para la producción de biocombustibles

está aún en etapa de investigación y desarrollo. Dado que no todas las especies son igualmente aptas para la producción de biodiesel, se requiere aún de investigación adicional vinculada con la adecuada selección de taxones. Además, debe contemplarse que el rendimiento en biomasa y la concentración de lípidos dependen del clima, la calidad del agua, la composición del medio de cultivo y las condiciones generales asociadas a los métodos de extracción. Por último, el principal obstáculo para producir biocombustibles microalgales en gran escala y a través de procesos de máxima eficiencia es su costo, asociado principalmente a los requerimientos de nutrientes y los procesos de separación de aceites y recuperación del agua, entre otros (Chisti 2008, 2013, Wesoff 2017).

Más allá del biodiesel, el desarrollo científico-tecnológico vinculado con las microalgas como fuente de energía renovable permitió la construcción del primer edificio del mundo cuya energía de mantenimiento es producida exclusivamente por sus propios paneles de microalgas (Figura 3). Si proyectos como éste llegaran a prosperar, estaríamos

hablando de emprendimientos en escalas mucho más reducidas y concretas, aunque aquí también la mayor dificultad estaría centrada en la reducción de costos (estimados en € 5 millones, Smart Material House BIQ, 2013).

■ ENTRE LAS MICROALGAS: LAS DIATOMEAS MARINAS

Las diatomeas son algas unicelulares eucariotas que viven en ambientes acuáticos (continentales o marinos), tanto en la columna de agua como en la interfase agua-sedimentos, y pueden ser solitarias o coloniales. En general su tamaño oscila entre 5 y 200 micrones, aunque se han registrado células de hasta casi medio milímetro. Las especies planctónicas desarrollan adaptaciones morfológicas (espinas, cadenas de individuos, etc.) para resistir al hundimiento. Se caracterizan por presentar una estructura de sílice (dióxido de silicio) muy resistente, conocida como frústulo (Figura 4). El frústulo consiste de dos piezas complementarias, una externa o epiteta y una interna o hipoteca, ambas con nanoestructuras altamente ordenadas y características de cada especie. La sílice es sintetizada en



Figura 3: Primer edificio cuya energía se basa en microalgas (izquierda). Detalles de los fotorreactores de microalgas (derecha). Tomado de: <http://phytoplanktonsource.com/worlds-first-algae-powered-in-germany/>

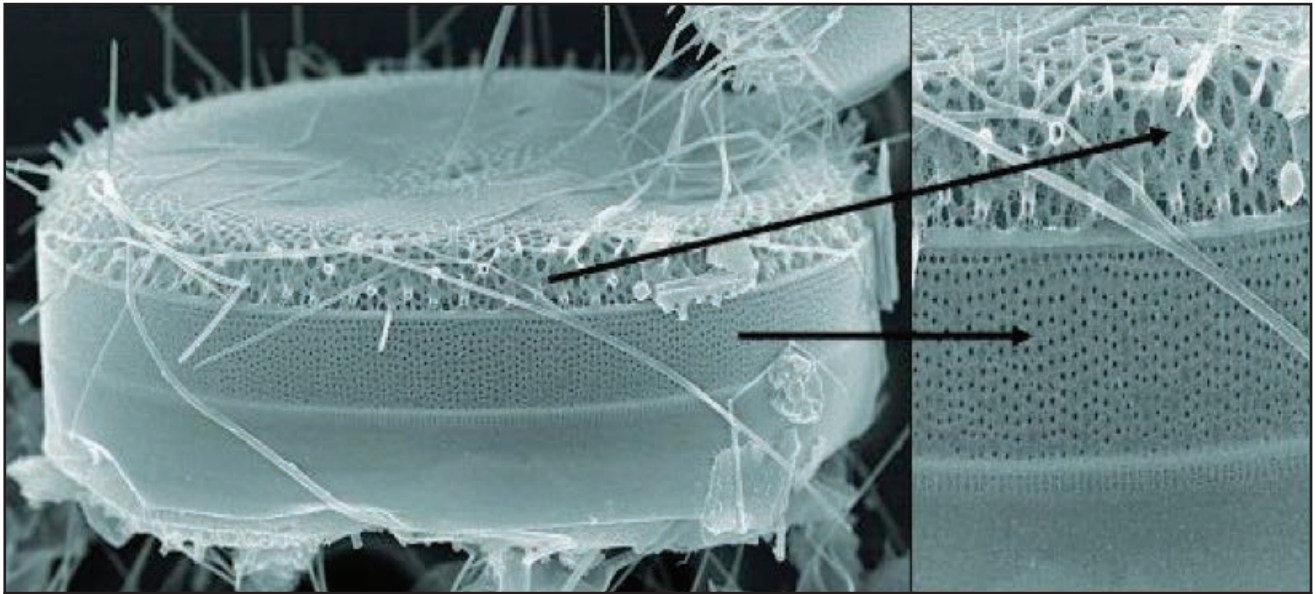


Figura 4: Frústulo de diatomea (izquierda) y detalles del patrón de poros o aréolas (derecha). Foto: Clara Iachetti.

vesículas especiales a través de procesos que aún son poco conocidos.

Estas microalgas tienen un ciclo de vida particular caracterizado por una progresiva reducción del tamaño durante la etapa de reproducción asexual. El tamaño se restituye durante la división sexual, mediante la formación de gametas y conjugación. Cabe destacar, sin embargo, que lo poco que se conoce sobre la reproducción sexual en diatomeas proviene casi exclusivamente de experimentos de laboratorio llevados a cabo sobre un número reducido de especies (Montresor et al. 2016).

En comparación con otras microalgas, las diatomeas se destacan por: a) ser ambientalmente flexibles; b) desempeñar roles vitales en los ciclos del carbono, nitrógeno, fósforo y sílice; c) su elevada contribución a la productividad biológica; d) desempeñar un papel primordial en la regulación del clima global; e) ser indicadoras de depósitos de petróleo, de circulación de masas de agua y corrientes marinas, y de variabilidad paleoclimática y paleoecológica (Falkowski et al. 2008, Shukla y

Mohan 2012, Cermeño 2016).

Desde el punto de vista evolutivo y ecológico, representan uno de los grupos taxonómicos más exitosos. Se cree que las diatomeas aparecieron hace aproximadamente 250 millones de años, luego de las extinciones masivas del Pérmico-Triásico. La expansión y diversificación del grupo habría tenido lugar 30 millones de años atrás, en el límite entre el Eoceno y el Oligoceno. No se conoce a ciencia cierta la razón del éxito evolutivo y ecológico de las diatomeas. Sin embargo, las investigaciones del genoma de ciertas especies (Armbrust et al. 2004, Bowler et al. 2008) permiten hipotetizar sobre cómo pudieron haber evolucionado y cuál es su potencial bioquímico.

Tanto las plantas terrestres como las algas verdes (clorofíceas) y rojas (rodofíceas) parecen haberse originado por un proceso de endosimbiosis primaria en el que un organismo unicelular eucariota no fotosintético incorporó en su interior a una cianobacteria (organismo procarionta autótrofo), adquiriendo de esta manera un sistema fotosintético que

permaneció alojado como un plástido rodeado por dos membranas (una propia y otra del hospedador). Este evento explicaría el origen monofilético de todos los plástidos de células eucariotas (Keeling 2010). El proceso endosimbiótico implicó la transferencia de un alto número de genes de la cianobacteria hacia el núcleo de la célula hospedadora, por lo que la dotación génica del cloroplasto (plástido especializado en fotosíntesis) se vio notablemente reducida.

La evolución de las diatomeas, sin embargo, parece haber sido distinta. Se postula que las diatomeas (y otros grupos menores relacionados a éstas) se originaron cuando un organismo unicelular eucariota no fotosintético incorporó en su interior no a un procarionta, sino a un eucariota fotosintético. Este proceso evolutivo, conocido como endosimbiosis secundaria, puede evidenciarse por la presencia de cuatro membranas (en lugar de dos) rodeando a los plástidos de las diatomeas. También se pone de manifiesto por la presencia de cloroplastos aparentemente derivados de un alga roja, proteínas

similares a las de algas verdes, y mitocondrias (organelas especializadas en la respiración) derivadas del hospedador no fotosintético original. La inusual combinación de organelas de diverso origen evolutivo sería el factor clave que, a través de vías metabólicas peculiares y altamente eficientes, ha permitido el enorme éxito ecológico de las diatomeas (Prihoda et al. 2012).

Han colonizado y están presentes en una amplia diversidad de hábitats, incluyendo ambientes extremos como la zona intertidal (sometida al régimen de mareas), donde soportan condiciones de estrés de nutrientes (e.g., reducción de carbono inorgánico disuelto), desecación y exposición a elevadas intensidades de luz, temperatura y salinidad, entre otros factores (Morin et al. 2016, Marques da Silva et al. 2017). La aclimatación a condiciones de estrés depende de la capacidad de reorganizar su metabolismo del carbono hacia una producción de moléculas con mayor energía que los carbohidratos, como por ejemplo lípidos y **carotenoides** (Schoefs et al. 2017).

Algunas especies marinas (cuyo genoma ha sido descifrado; e.g., *Phaeodactylum tricornutum*; Bowler et al. 2008) pueden crecer y acumular biomasa mediante la mixotrofia, estrategia alimenticia basada en la combinación de una fuente de luz y una de carbono (Villanova et al. 2017). Como ocurre con otras microalgas, cuando se encuentran en condiciones limitantes de nutrientes (nitrógeno o sílice), acumulan triacilglicéridos (Maeda et al. 2017). Recientemente se ha demostrado que en condiciones de mayor turbulencia (y sin limitación de nutrientes) generan cadenas más cortas y activan la biosíntesis de ácidos grasos (Amato et al. 2017).

Su alta eficiencia fotosintética

se debe a que concentran el CO_2 en cercanías de la enzima RuBisCO (ribulosa-1,5-bisfosfato carboxilasa/oxigenasa) y reducen su nivel de fotorrespiración, aunque este mecanismo aún no se conoce plenamente. Las diatomeas han sido tradicionalmente consideradas como fotosintetizadoras del tipo C_3 , pero investigaciones más recientes sugieren que realizan una fotosíntesis de tipo C_4 (Riebesell 2000, Schoefs et al. 2017).

Las diatomeas son el grupo taxonómico dominante del fitoplancton marino, principalmente en mares templados y fríos y en zonas donde ocurren procesos de surgencia (ascenso) de aguas profundas, ricas en nutrientes. A las diatomeas marinas se les atribuye hasta un 20% de la fijación global de CO_2 (Treguer et al. 1995, Field et al. 1998). Generan por fotosíntesis casi un 40% de los 45-50 billones de toneladas de carbono orgánico que se producen anualmente en los océanos. Parte de esta biomasa es consumida por herbívoros y parte se hunde directamente al fondo marino, pero de una u otra manera termina sedimentando. A este proceso se lo conoce como "bombeo biológico del carbono". Cuanto mayor es el tamaño de las células, mayor es la eficiencia en el transporte de carbono hacia los fondos oceánicos (por la tendencia natural de las células a sedimentar). Se predice que el rol de las diatomeas marinas en el ciclo global del carbono es comparable al de una combinación de todos los bosques tropicales terrestres (Field et al. 1998). Representan la base de una cadena trófica corta y lineal, energéticamente eficiente, y sostén de importantes pesquerías. Al igual que otras microalgas y protozoos, producen floraciones (incrementos súbitos de la densidad) como parte de su ciclo estacional o bien en respuesta a determinados factores ambientales

naturales o antrópicos (e.g., incremento de nutrientes).

Los productos derivados de las diatomeas marinas tienen múltiples aplicaciones en diferentes industrias. Dos aspectos principales pueden ser destacados en el contexto de energías renovables:

1. De un proyecto basado en el estudio de 3000 especies de microalgas con el fin de conocer su potencial para la generación de biocombustibles, se seleccionaron tan sólo 50 especies, de las cuales el 60% fueron diatomeas (Hildebrand et al. 2012). El criterio de selección se fundamentó en: a) sus altas tasas de crecimiento, b) concentración sustancial de lípidos (principalmente en condiciones de limitación de Si y N), c) gran tolerancia a condiciones ambientales adversas, y d) su rendimiento en cultivos de gran escala. En relación con la concentración de lípidos, otro estudio más reciente (D'Ippolito et al. 2015) resume el perfil lipídico de 17 cepas de diatomeas marinas. Del total analizado, dos especies (*Thalassiosira weissflogii* y *Cyclotella cryptica*) resultaron ser excelentes candidatas para la producción de biocombustibles debido a su elevada producción de lípidos (> 80%) en condiciones de limitación de nitrógeno. Estos valores son comparables al potencial que ofrecen las especies de dos géneros de algas verdes (*Nannochloropsis* y *Dunaliella*) propuestas reiteradamente como fuentes de biocombustibles y para otras aplicaciones industriales.

2. El proceso de síntesis de sílice en diatomeas cobra gran importancia en bionanotecnología por la dificultad que implica la producción controlada de nanoestructuras de sílice (SiO_2), vidrio que tiene aplicaciones tecnológicas potenciales en celdas solares y en la fabricación de materiales cerámicos de alto ren-

dimiento, entre otras (Heredia et al. 2013). Su importancia en la generación de materiales nanoestructurados está comenzando a ser investigada. Los estudios disponibles hasta el presente indican un incremento del 30% en la eficiencia de los paneles solares (Toster et al. 2013) aun basándose en diatomeas fósiles (Mc-Millon-Brown et al. 2017).

A pesar de sus singulares atributos, la importancia de las diatomeas marinas y su potencial en el desarrollo de biocombustibles está subrepresentada en la literatura (Hildebrand et al. 2012). Los principales desafíos en este campo son entender y mejorar los factores que favorecen la alta productividad de algunas especies o cepas, y desarrollar sistemas de cultivo en gran escala que permitan producir un biocombustible económicamente rentable. De los dos desafíos, resulta prioritario entender la biología de las especies y su respuesta a los factores ambientales, y el metabolismo de los lípidos celulares y sus funciones (lipidómica). Ésta y otras disciplinas "ómicas" (genómica, proteómica, transcriptómica y metabolómica), junto con la bioinformática, representan herramientas fundamentales para avanzar en el conocimiento general de las diatomeas y sus posibles aplicaciones.

■ GLOSARIO.

Huella de carbono: medida del impacto de las actividades humanas en el ambiente. Estimador de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) emitidos a la atmósfera, medidos en unidades de dióxido de carbono equivalente.

Lípidos: sustancias insolubles en agua (y solubles en solventes orgánicos). Sus moléculas poseen átomos de carbono, hidrógeno y oxígeno. Según sus propiedades se reconocen ácidos grasos, triglicéridos, es-

teroles, fosfolípidos y ceras.

Transesterificación: reacción reversible entre triglicéridos y un alcohol en presencia de un catalizador (ácido o básico) para producir alquil ésteres de ácidos grasos (biodiesel) y glicerol como subproducto.

Triacilgliceroles (o tri-acil-glicéridos, TAG): lípidos (o grasas neutras) carentes de carga eléctrica. Se forman debido a la unión de tres ácidos grasos con una molécula de glicerol.

Carotenoides: pigmentos orgánicos naturales presentes en los organismos fotosintéticos (plantas, algas, bacterias). Participan en el proceso de transferencia de energía y tienen propiedades antioxidantes.

■ REFERENCIAS.

Abbasi S.A., Abbasi N. (2000). The likely adverse environmental impacts of renewable energy sources. *Applied Energy* 65, 121-144.

Amato A., Dell'Aquila G., Musacchia F., Annunziata R. et al. (2017). Marine diatoms change their gene expression profile when exposed to microscale turbulence under nutrient replete conditions. doi.10.1038/s41598-017-03741-6.

Arias Peñaranda M.T., Martínez Roldán A.J., Cañizares Villanueva R.O. (2013). Producción de biodiesel a partir de microalgas: parámetros del cultivo que afectan la producción de lípidos. *Acta Biológica Colombiana* 18, 43-68.

Armbrust E.V., Berges J.A., Bowler C. et al. (2004). The genome of the diatom *Thalassiosira pseudonana*: ecology, evolution, and metabolism. *Science* 306, 79-86.

Aro E.M. (2016). From first generation biofuels to advanced solar biofuels. *Ambio* 45, 24-31.

Bowler C., Allen A.E., Badger J.H., Grimwood J. et al. (2008). The *Phaeodactylum* genome reveals the evolutionary history of diatom genomes. *Nature* 456, 239-44.

Brennan L., Owende P. (2010). Biofuels from microalgae. A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 557-577.

Cermeño P. (2016). The geological story of marine diatoms and the last generation of fossil fuels. *Perspectives in Phycology* 3, 53-60.

Cheng J.J., Timilsina G.R. (2011). Status and barriers of advanced biofuel technologies: A review. *Renewable Energy* 36, 3541-3549.

Chisti Y. (2008). Biodiesel from microalgae beats bioethanol. *Trends in Biotechnology* 26, 126-131.

Chisti Y. (2013). Constraints to commercialization of algal fuels. *Journal of Biotechnology* 10, 201-214.

Chisti Y., Yan J. (2011). Energy from algae: Current status and future trends. *Algal biofuels. A status report. Applied Energy* 88, 3541-3547.

Cox P.M., Betts R.A., Jones C.D., Spall S.A., Totterdell I.J. (2000). Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature* 408, 184-187.

- D'Ippolito G., Sardo A., Paris D., Vella F.M., Adelfi M.G., Botte P., Gallo C., Fontana A. (2015). Potential of lipid metabolism in marine diatoms for biofuel production. *Biotechnology for Biofuels*. doi.10.1186/s13068-015-0212-4.
- Deemer B.R., Harrison J.A., Li S. et al. (2016). Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis. *BioScience* 66, 949-964.
- Demirbas A. (2009). Progress and recent trends in biodiesel fuels. *Energy Conversion Management* 50, 14-34.
- Demirbas A. (2010). Use of algae as biofuel sources. *Energy Conversion and Management* 51, 2738-2749.
- Falkowski P.G., Fenchel T., Delong E.F. (2008). The microbial engines that drive Earth's biogeochemical cycles. *Science* 320, 1034-1039.
- Fargione J., Hill J., Tilman D., Polasky S., Hawthorne P. (2008). Land clearing and the biofuel carbon debt. *Science* 29, 1235-1238.
- Field C.B., Behrenfeld M.J., Randerson J.T. et al. (1998). Primary production of the biosphere, integrating terrestrial and oceanic components. *Science* 281, 237-240.
- Friedlingstein P. (2015). Carbon cycle feedbacks and future climate change. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. A. doi.10.1098/rsta.2014.0421.
- Heredia A., Colín-García M., Dos Santos-Rodríguez C. et al. (2013). Sílice de las algas diatómeas como material complejo y su importancia nanotecnológica. doi.10.17163/lgr.n17.2013.01.
- Hildebrand M., Davis A.K., Smith S.R., Traller J.C., Abbriano R. (2012). The place of diatoms in the biofuels industry. *Biofuels* 3, 221-240.
- Hu Q., Sommerfeld M., Jarvis E., Ghirardi M., Posewitz M., Seibert M., Darzins A. (2008). Microalgal triacylglycerols as feedstocks for biofuel production: perspectives and advances. *Plant Journal* 54, 621-639.
- Keeling P.J. (2010). The endosymbiotic origin, diversification and fate of plastids. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. B. 365, 729-748.
- Khozin-Goldberg I., Cohen Z. (2011). Unraveling algal lipid metabolism: Recent advances in gene identification. *Biochimie* 93, 91-100.
- Lardon L., Hélias A., Sialve B., Steyer J-P., Bernard O. (2009). Life-Cycle Assessment of Biodiesel Production from Microalgae. *Sci-Technol* 43, 6475-6481.
- Le Quéré C., Andrew R. M., Friedlingstein P. et al. (2017). Global Carbon Budget. *Earth System Science Data (ESSD) Discuss*. doi.org/10.5194/essd-2017-123.
- Lee Y-K. (2001). Microalgal mass culture systems and methods: Their limitation and potential. *Journal of Applied Phycology* 13, 307-315.
- McMillon-Brown L., Mariano M., Lin Y.H.L. et al. (2017). Light-trapping in polymer solar cells by processing with nanostructured diatomaceous earth. *Organic Electronics* 51, 422-427.
- Maeda Y., Nojima D., Yoshino T., Tanaka T. (2017). Structure and properties of oil bodies in diatoms. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. B. doi.10.1098/rstb.2016.0408.
- Marques da Silva J., Cruz S., Cartaxana P. (2017). Inorganic carbon availability in benthic diatom communities: photosynthesis and migration. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. B. doi.10.1098/rstb.2016.0398.
- McLeod C., Nerlich B., Mohr A. (2017). Working with bacteria and putting bacteria to work: The biopolitics of synthetic biology for energy in the United Kingdom. *Energy Research and Social Science* 30, 35-42.
- Montresor M., Vitale L., D'Alelio D., Ferrante M.I. (2016). Sex in marine planktonic diatoms: insights and challenges. *Perspectives in Phycology* 3, 61-75.
- Morin S., Rosberry J., Van de Vijver B., Schoefs B. (2016). Advances in diatom biodiversity and ecology. *Botany Letters* 163, 69-70.
- Narala R.R., Garg S., Sharma K.K., Thomas-Hall S.R. et al. (2016). Comparison of Microalgae Cultivation in Photobioreactor, Open Raceway Pond, and a Two-Stage Hybrid System. *Frontiers in Energy Research*. doi.org/10.3389/fenrg.2016.00029.
- Prihoda J., Tanaka A., de Paula W.M., Allen J.F., Tirichine L., Bowler C. (2012). Chloroplast-mitochondria cross-talk in diatoms. *Journal of Experimental Botany* 63, 1543-1557.
- Rackley S. (2017). *Carbon Capture and Storage*. 2da. Edición, 698 pp.

- Riebesell U. (2000). Photosynthesis. Carbon fix for a diatom. *Nature* 407, 959-960.
- Righelato R., Spracklen D.V. (2007). Carbon Mitigation by Biofuels or by Saving and Restoring Forests?. *Science* 317, 902.
- Rodolfi L., Zittelli G. C., Bassi N., Padovani G., Biondi N. et al. (2009). Microalgae for oil: strain selection, induction of lipid synthesis and outdoor mass cultivation in a low-cost photobioreactor. *Biotechnology and Bioengineering* 102, 100-112.
- Romanova U.G., Romanov G.V. (2015). The Origin of Petroleum: The Mystery Remains. *GeoConvention 2015*, 4 pp.
- Sayre R. (2010). Microalgae: The Potential for Carbon Capture. *BioScience* 60, 722-727.
- Schoefs B., Hu H., Kroth P. G. (2017). The peculiar carbon metabolism in diatoms. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. B. doi.10.1098/rstb.2016.0405.
- Scott S.A., Davey M.P., Dennis J.S., Horst I., Howe J., Lea-Smith D.J., Smith A. (2010). Biodiesel from algae: challenges and prospects. *Current Opinion in Biotechnology* 27, 958-1669.
- Shukla S.K., Mohan R. (2012). The Contribution of Diatoms to Worldwide Crude Oil Deposits. Gordon y Seckbach (Eds). En: *The Science of Algal Fuels: Phycology, Geology, Biophotonics, Genomics and Nanotechnology*, 355-382.
- Song M., Pham H.D., Seon J., Woo H.C. (2015). Marine brown algae: a conundrum answer for sustainable biofuels production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 50, 782-792.
- Spolaore P., Joannis-Cassan C., Duran E., Isambert A. (2006). Commercial applications of microalgae. *Journal of Bioscience and Bioengineering* 101, 87-96.
- Tavoni A., Dannenberg A., Kallis G., Löschel (2011). Inequality, communication, and the avoidance of disastrous climate change in a public goods game. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108, 11825-11829.
- Toster J., Iyer K.S., Xiang W., Rosei F., Spicciac L., Raston C.L. (2013). Diatom frustules as light traps enhance DSSC efficiency. *Nanoscale* 5, 873-876.
- Treguer P., Nelson D.M., Van Bennekom A.J., DeMaster D.J., Leynaert A., Queguiner B. (1995). The silica balance in the world ocean: a reestimate. *Science* 268, 375-379.
- Villanova V., Fortunato A.E., Singh D., Dal Bo D., Conte M., Obata T. et al. (2017). Investigating mixotrophic metabolism in the model diatom *Phaeodactylum tricornutum*. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. B. 372. doi.10.1098/rstb.2016.0404.
- Wesoff E. (2017). <https://www.greentechmedia.com/articles/read/lessons-from-the-great-algae-biofuel-bubble#gs.C8=961E>.
- Yi Z., Xu M., Di X., Brynjolfsson S., Fu W. (2017). Exploring Valuable Lipids in Diatoms. *Frontiers in Marine Science* 4, 17. doi.org/10.3389/fmars.2017.00017

Recuperación de tecnologías ancestrales y sustentables en Jujuy

La vicuña como modelo de producción sustentable

Ciencia e historia se unen para preservar a la vicuña

*Cazando vicuñas anduve en los cerros
Heridas de bala se escaparon dos.*

*- No caces vicuñas con armas de fuego;
Coquena se enoja, - me dijo un pastor.*

*- ¿Por qué no pillarlas a la usanza vieja,
cercando la hoyada con hilo punzó ?*

*- ¿Para qué matarlas, si sólo codicias
para tus vestidos el fino vellón ?*

Juan Carlos Dávalos, Coquena

Lo primero es pedir permiso a la Pachamama. Porque a ella, en la cosmovisión andina, pertenecen las vicuñas que se extienden por el altiplano de Perú, Bolivia, Chile y Argentina. Una ceremonia ancestral, unida a la ciencia moderna, permite que comunidades y científicos argentinos exploten de manera sustentable un recurso de alto valor económico y social.

La vicuña es una especie silvestre de camélido sudamericano que habita en la puna. Hasta 1950-1960 estuvo en serio riesgo de extinción debido a la ausencia de planes de manejo y conservación. Desde la llegada de los españoles se comenzó con la caza y exportación de los cueros para la obtención de la fibra, que puede llegar a valer U\$S600 por kilo, lo que llevo a la casi desaparición de estos animales. Por ese entonces, la población de vicuñas en América era cercana a los 4 millones de ejemplares, en 1950 no eran más de 10.000.

A fines de la década del 70 Argentina, Bolivia, Chile, Perú y Ecuador firmaron un Convenio para la conservación y manejo de la vicuña que permitió recuperar su población hasta contar en la actualidad con más de 76 mil ejemplares en nuestro país.

En Santa Catalina, Jujuy, a 3.800 metros sobre el nivel del mar, investigadores de CONICET, junto a comunidades y productores locales, han logrado recuperar una tecnología prehispánica sustentable para la obtención de la fibra de vicuña. Se trata de una ceremonia ancestral y captura mediante la cual se arrean y esquilan las vicuñas silvestres para obtener su fibra. Se denomina chaku y se realizaba en la región antes de la llegada de los conquistadores españoles. Según Bibiana Vilá, investigadora independiente de CONICET y directora del grupo Vicuñas, Camélidos y Ambiente (VICAM) *"Hoy podemos pensar en volver a hacer ese chaku prehispánico sumado a técnicas que los científicos aportamos para que las vicuñas pasen por toda esa situación sufriendo el menor stress posible. Las vicuñas vuelven a la naturaleza, la fibra queda en la comunidad, y nosotros tomamos un montón de datos científicos."*

El chaku

El chaku es una práctica ritual y productiva para la esquila de las vicuñas. Durante el imperio inca, las cacerías reales o chaku eran planificadas por el inca en persona. En esta ceremonia se esquilaba a las vicuñas y se las liberaba nuevamente a la vida silvestre. La fibra obtenida era utilizada para la confección de prendas de la elite y su obtención estaba regulada por mecanismos políticos, sociales, religiosos y culturales. Se trata de un claro ejemplo de uso sustentable de un recurso natural. Hugo Yacobaccio, zooarqueólogo e investigador principal de CONICET, explica que *"actualmente el chaku concentra hasta 80 personas, pero durante el imperio inca participaban de a miles. Hoy las comunidades venden esa fibra a acopiadores textiles y obtienen un ingreso que complementa su actividad económica principal, el pastoreo de llamas y ovejas"*.

El proceso comienza con la reunión de todos los participantes, luego toman una sogas con cintas de colores reunidos en semicírculo y arrean lentamente a las vicuñas guiándolas hacia un embudo de red de 1 km de largo que desemboca en un corral. Cuando los animales están calmados se los esquila manipulándolos con sumo cuidado para reducir el stress y se los libera. Hoy, 1500 años después del primer registro que se tiene de esta ceremonia, la ciencia argentina suma como valor agregado: el bienestar animal y la investigación científica. En tiempo del imperio Inca, el chaku se realizaba cada cuatro años, actualmente se realiza anualmente sin esquilas a los mismos animales *"se van rotando las zonas de captura para que los animales renueven la fibra"* explica Yacobaccio. Según Vilá *"es un proyecto que requiere mucho trabajo pero que demuestra que la sustentabilidad es posible, tenemos un animal vivo al cual esquilamos y al cual devolvemos vivo a la naturaleza. Tiene una cuestión asociada que es la sustentabilidad social ya que la fibra queda en la comunidad para el desarrollo económico de los pobladores locales."*

Yanina Arzamendia, bióloga, investigadora asistente de CONICET y miembro del equipo de VICAM, explica que se

esquilan sólo ejemplares adultos, se las revisa, se toman datos científicos y se las devuelve a su hábitat natural. Además destaca la importancia de que el chaku se realice como una actividad comunitaria *“en este caso fue impulsada por una cooperativa de productores locales que tenían vicuñas en sus campos y querían comercializar la fibra. Además participaron miembros del pueblo originario, estudiantes universitarios y científicos de distintas disciplinas. Lo ideal es que estas experiencias con orientación productiva tengan una base científica.”*

Paradojas del éxito.

La recuperación de la población de vicuñas produjo cierto malestar entre productores ganaderos de la zona. Muchos empezaron a percibir a la vicuña como competencia para su ganado en un lugar donde las pasturas no son tan abundantes. En este aspecto el trabajo de los investigadores de CONICET fue fundamental, según Arzamendia *“el chaku trae un cambio de percepción que es ventajoso para las personas y para la conservación de la especie. Generalmente el productor ve a las vicuñas como otro herbívoro que compite con su ganado por el alimento y esto causa prejuicios. Hoy comienzan a ver que es un recurso valioso y ya evalúan tener más vicuñas que ovejas y llamas. Nuestro objetivo es desterrar esos mitos”,* concluye.

Pedro Navarro es el director de la Cooperativa Agroganadera de Santa Catalina y reconoce los temores que les produjo la recuperación de la especie: *“Hace 20 años nosotros teníamos diez, veinte vicuñas y era una fiesta verlas porque habían prácticamente desaparecido. En los últimos años se empezó a notar un incremento y más próximamente en el último tiempo ya ese incremento nos empezó a asustar porque en estas fincas tenemos ovejas y tenemos llamas”. Navarro identifica la resolución de estos problemas con el trabajo del grupo VICAM: “Yo creo que como me ha tocado a mí tener que ceder en parte y aprender de la vicuña y de VICAM, se puede contagiar al resto de la gente y que deje de ser el bicho malo que nos perjudica y poder ser una fuente más productiva.”*

La fibra de camélido

Además de camélidos silvestres como la vicuña o el guanaco, existen otros domesticados como la llama cuyo manejo es similar al ganado, para impulsar la producción de estos animales y su fibra, el Estado ha desarrollado dos instrumentos de fomento. En la actualidad se encuentran en evaluación varios proyectos para generar mejoras en el sector productor de fibra fina de camélidos que serán financiados por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva. Se trata de dos Fondos de Innovación Tecnológica Sectorial destinados a la agroindustria y al desarrollo social que otorgarán hasta \$35.000.000 y \$8.000.000 respectivamente. Los proyectos destinados a la Agroindustria son asociaciones entre empresas y organismos del sector público con el objetivo de mejorar la calidad de la fibra de camélido doméstico a partir del desarrollo de técnicas reproductivas, mejoramiento genético e innovaciones en el manejo de rebaños; incorporar valor a las fibras a partir de mejoras en la materia prima o el producto final; permitir la trazabilidad de los productos para lograr su ingreso en los mercados internacionales y fortalecer la cadena de proveedores y generar empleos calificados.

La convocatoria Desarrollo Social tiene como fin atender problemas sociales mediante la incorporación de innovación en acciones productivas, en organización social, en el desarrollo de tecnologías para mejorar la calidad de vida de manera sostenible y fomentar la inclusión social de todos los sectores. Otorgará hasta \$8.000.000 por proyecto que mejore las actividades del ciclo productivo de los camélidos domésticos, la obtención y/o el procesamiento de la fibra, el acopio, el diseño y el tejido, el fieltro y la confección de productos.

