

Uso de microalgas en depuración de aguas

Apellidos, nombre	Pachés Giner Maria (mapacgi@upvnet.upv.es) González Camejo, Josué (jogonca4@upvnet.upv.es)
Departamento	Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente
Centro	Universitat Politècnica de València

1 Resumen de las ideas clave

En este artículo vamos a estudiar que son las microalgas y las principales características biológicas de estos organismos. Posteriormente analizaremos las distintas capacidades que presentan para eliminar los compuestos del agua y su aplicación en los tratamientos de depuración de agua residual. También se analizarán las ventajas del uso de las microalgas frente a los tratamientos convencionales de depuración.

2 Objetivos

Una vez que el estudiante lea con detenimiento este documento, será capaz de:

- Definir que son las microalgas y describir las principales características biológicas de estos organismos.
- Enumerar las principales características de los métodos convencionales de tratamiento de aguas.
- Explicar las ventajas que supone el uso de las microalgas en los tratamientos de depuración de aguas.

3 ¿Qué son las microalgas?

El término microalga no constituye una categoría taxonómica. Sin embargo, es ampliamente utilizado para englobar a todas células eucariotas microscópicas en sentido estricto, y a las bacterias, que realizan la fotosíntesis oxigénica, es decir, aquellas que utilizan el agua como donante de electrones y, por lo tanto, liberan oxígeno como subproducto.

Por lo general, las microalgas son organismos fotoautótrofos (fotolitotrofos), es decir, obtienen la energía de la luz solar mediante el proceso de fotosíntesis y se desarrollan a partir de materia inorgánica. Algunas microalgas pueden presentar rutas metabólicas distintas y emplear compuestos orgánicos como fuente de carbono (fotoorganotrofos) o modificar estas fuentes en función de las necesidades ambientales (mixótrofos).

En los sistemas acuáticos las microalgas representan a los productores primarios más importantes y constituyen la base de la cadena trófica. Las clases más importantes de microalgas son: diatomeas (Bacillariophyceae), microalgas verdes (Chlorophyceae) y cianobacterias.

A continuación, se muestra la clasificación general de los organismos en función de la fuente de energía y carbono que utilicen.

		FUENTE DE ENERGÍA	
		Luz solar	Reacciones Redox
FUENTE DE CARBONO	Inorgánica	Fotolitotrofo	Quimiolitotrofo
		Bacterias fotosintéticas Cianobacterias Algas Plantas	Bacterias quimiolitótroficas
	Orgánica	Fotoorganotrofo	Quimioorganotrofo
		Bacterias Algas	Bacterias heterótrofas Protistas Hongos Animales

Tabla 1. Clasificación de los organismos en función de la fuente de energía y carbono que utilicen

3.1 Características generales de las microalgas

Las microalgas son organismos capaces de colonizar y sobrevivir en una gran variedad de medios acuáticos con diversas condiciones ambientales de salinidad (dulce, salobres y marinos), pH, temperatura, intensidad lumínica, nivel de nutrientes, competencia interespecífica, etc.

De todos los factores, los nutrientes son esenciales para la producción de biomasa microalgar. El carbono es el elemento más importante para su crecimiento, ya que constituye más del 50% de la biomasa y su consumo depende de las distintas especies. Respecto al nitrógeno, la principal fuente es el amonio ($N-NH_4$), puesto que es la forma más fácilmente asimilable (más reducida), pero en ausencia de éste, otras fuentes como los nitratos ($N-NO_3$) y nitritos ($N-NO_2$) pueden ser utilizadas. Y, por último, el fósforo (en forma de ortofosfato ($P-PO_4$)) es esencial para la síntesis de ácidos nucleicos y fosfolípidos. Se debe tener en cuenta que no solo la concentración de estos nutrientes es importante sino también la forma en que estos aparecen y la relación de los mismos.

Estos organismos, con excepción de las cianobacterias, presentan orgánulos celulares envueltos por membranas. Entre dichos orgánulos se encuentran los cloroplastos que albergan los pigmentos responsables de la fotosíntesis. Estos pigmentos absorben la radiación fotosintéticamente activa (PAR Photosynthetically Active Radiation) mediante el pigmento de clorofila a (que aparece en todas las microalgas) y pigmentos accesorios como carotenos, xantofilas, ficocianinas, ficoeritrinas, etc. (que constituye un carácter para la clasificación taxonómica).

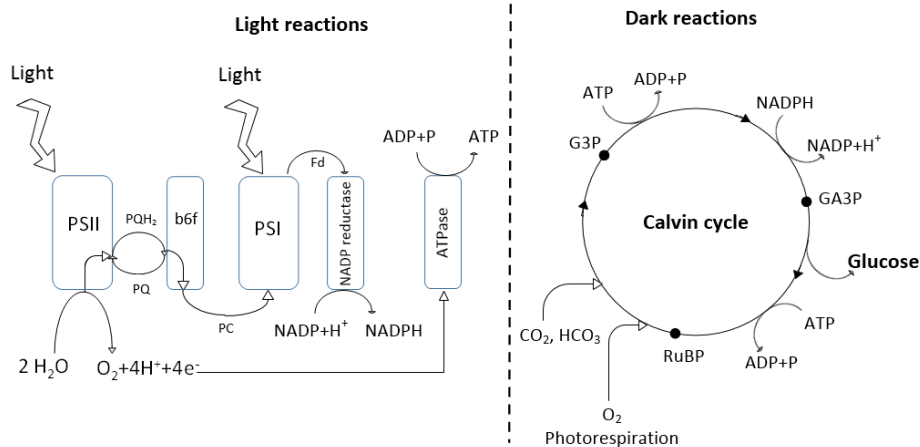


Imagen 1. Fase luminosa y fase oscura en la fotosíntesis (Gonzalez-Camejo, 2019).

Las microalgas presentan gran diversidad desde el punto de vista morfológico (pueden aparecer aisladas o formando estructuras multicelulares simples, formas móviles flageladas, cocoides, filamentosas ramificadas o no, etc.), y reproductivo dado su origen polifilético. Además, bajo condiciones ambientales adversas presentan diferentes estrategias adaptativas, por ejemplo, la formación de colonias o la síntesis y secreción de sustancias poliméricas.

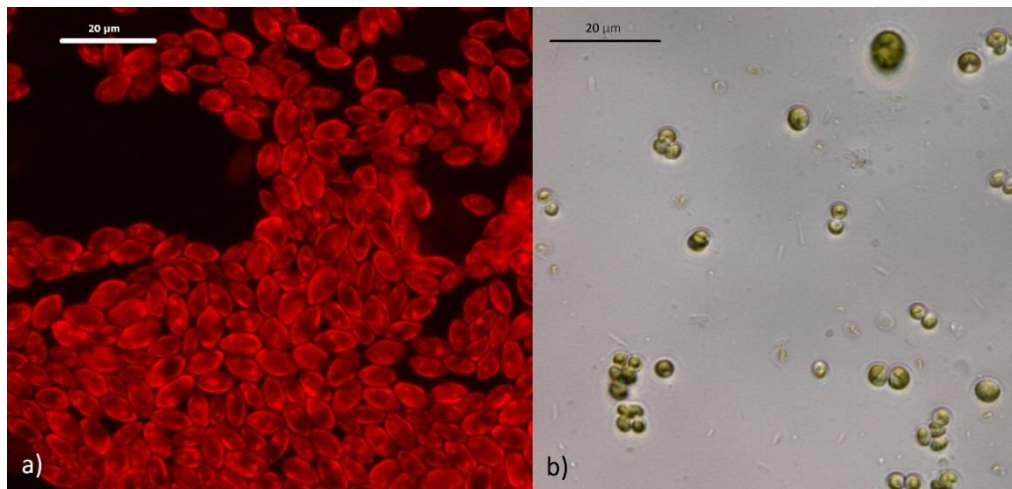


Imagen 2. Imágenes al microscopio de microalgas (Elaboración propia).

3.2 Métodos convencionales de depuración de aguas

Los países industrializados generan una gran cantidad de agua residual tanto urbana (ARU) como industrial (ARI), de modo que tratar estas aguas antes de su vertido final es necesario y obligatorio para la protección del medio ambiente.

Entre los distintos elementos contaminantes que contiene el agua residual cabe destacar la materia orgánica que pueden estar presentes de forma coloidal o disuelta, elementos de naturaleza inorgánica, que pueden ser de muy distinta composición, desde nutrientes, hasta sustancias tóxicas y peligrosas y/o microorganismos patógenos.

Actualmente, el tratamiento de ARU en la mayoría de los países desarrollados está basado en la implementación de sistemas de Fangos Activados (FA) aerobios como tratamiento principal. Este es un proceso de depuración aerobio basado en el consumo de materia orgánica (y nutrientes) por parte de microorganismos, obteniendo como resultado un efluente clarificado por sedimentación. La depuración biológica la llevan a cabo microorganismos que constituyen lo que se denomina fangos activos. En estos se encuentran bacterias, hongos, algas y protozoos, aunque son las bacterias las que constituyen la población mayoritaria y más importante en los sistemas de FA.

A continuación en la siguiente imagen se representa un diagrama de tratamiento convencional de ARU (tanto la línea de agua como la de fangos) basado en FA.

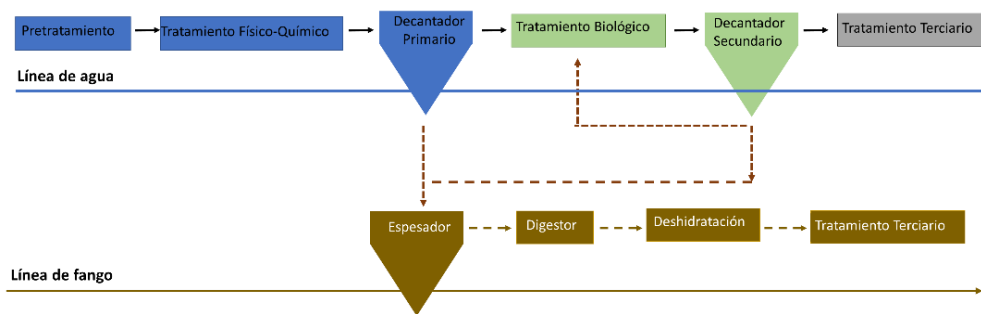


Imagen 3. Diagrama de tratamiento convencional basado en FA (Elaboración propia)

De forma general, los tratamientos primarios, corresponden a procesos físicos y físico-químicos que eliminan la materia insoluble y rebajan moderadamente la DBO. Los tratamientos secundarios, son procesos biológicos orientados principalmente para rebajar la DBO y DQO. Por último, los tratamientos terciarios, son procesos físicos, biológicos o químicos que se utilizan para eliminar los contaminantes disueltos o en suspensión que quedan después del tratamiento secundario.

El interés por los cultivos de microalgas se deriva del hecho de que los procesos de tratamiento convencionales sufren algunas desventajas importantes. Estas son principalmente: (a) elevado consumo energético, (b) eficacia variable dependiendo del nutriente a eliminar; (c) funcionamiento costoso; (d) procesos químicos que a menudo conducen a la contaminación secundaria; (e) pérdida de nutrientes potenciales valiosos (N, P), (f) elevada inversión en infraestructuras, mantenimiento, (g) generación de elevadas cantidades de fango biológico, el cual ha de ser sometido posteriormente a algún tratamiento de estabilización en la línea de fangos previo a su reutilización/eliminación.

4 Aplicaciones de las microalgas

El uso comercial de los cultivos de microalgas para el tratamiento de las aguas residuales se describió por primera vez en 1957 (Oswald y Gootas, 1957) y fue en sistemas de lagunaje. En la actualidad el interés significativo que se desarrolla en algunos países avanzados del mundo se debe principalmente a los siguientes aspectos:

4.1 Capacidad para eliminar materia orgánica

La eliminación de la materia orgánica es primordial en el tratamiento de las aguas puesto que un exceso de esta puede acabar con el oxígeno disuelto en el agua y crear condiciones anaerobias en el medio receptor que pueden ser letales para el desarrollo de las especies.

Las microalgas tienen capacidad para la eliminación de la DBO o DQO, en ARU puesto que utilizan esta materia orgánica como fuente de carbono y disminuyen la carga contaminante. Además, esta eliminación se ve favorecida en los sistemas en que existe consorcios bacterias-microalgas. En estos sistemas las microalgas como consecuencia de su actividad fotosintética, aumentan la concentración de oxígeno disuelto en el agua favoreciendo la actividad de las bacterias. Se ha comprobado que el oxígeno generado por las microalgas pueden reducir considerablemente los gastos asociados a la aireación de los tanques aerobios en los sistemas de tratamiento de aguas convencionales. Por otra parte, las bacterias generan CO₂ que toman las microalgas y otras sustancias como factores de crecimiento, fitohormonas (auxinas) y/o vitaminas (biotina, tiamina o B12) que favorece la comunidad de microalgas.

4.2 Capacidad para eliminar nutrientes

El ARU es tratada mediante procesos biológicos aerobios o anaerobios que degradan la materia orgánica, pero los nutrientes no son eliminados de forma significativa mediante tratamientos convencionales. Estos aparecen principalmente en forma de N-NH₄, N-NO₂, y N-NO₃ para los compuestos del nitrógeno y en P-PO₄ para el fósforo. Si estos compuestos no son eliminados del agua pueden generar interferencia en los procesos de desinfección posteriores y, en los medios receptores pueden ocasionar eutrofización y/o toxicidad para peces y otros organismos acuáticos.

Las microalgas poseen una elevada capacidad para asimilar nutrientes y crecer de forma eficiente que deriva en elevados rendimientos de eliminación de nitrógeno y fósforo. Las microalgas utilizan en su crecimiento diferentes compuestos de nitrógeno, tales como amonio, nitrato o urea y toleran medios altamente concentrados en este nutriente. Por otra parte, estos organismos están adaptados a la eliminación rápida del fósforo por ser un elemento escaso de forma natural (fenómeno conocido como *luxury uptake*).

Algunas de los géneros más utilizados y conocidos para el tratamiento de ARU son *Scenedesmus*, *Spirulina*, *Monoraphidium* y *Chlorella*. Se han realizado estudios con *Scenedesmus* donde el porcentaje de eliminación de amonio fue del 100% y la eliminación del fósforo resultó tan eficiente como el tratamiento químico convencional (adición de reactivos químicos).

Sin embargo, hay que tener en cuenta que tras la eliminación de los nutrientes por parte de las microalgas es necesario separar las microalgas del agua limpia (esto puede realizarse mediante filtrado). Una vez separado, las microalgas pueden volver a ser cultivadas y utilizadas para la depuración de las aguas o pueden tener otras salidas comerciales que se comentan en los siguientes apartados.



...Las microalgas del género Scenedesmus presenta una de las mayores tasas de eliminación de nitrógeno en el agua residual urbana!!!

4.3 Capacidad para eliminar CO₂

Las microalgas toman para su crecimiento el CO₂ como fuente de carbono. Además, el mecanismo fotosintético que presentan, aunque similar al de algunas plantas terrestres, es mucho más eficiente en la conversión de energía lumínica en biomasa y por tanto en la función sumidero de CO₂ (del orden de 10-50 veces mayor). Todo esto hace que ayude a combatir el efecto invernadero, mitigue las emisiones de CO₂ y mejore la calidad del aire en general.

4.4 Capacidad para eliminar metales pesados

La descarga de contaminantes tóxicos como los metales pesados en las aguas residuales ha aumentado considerablemente en las últimas décadas y es necesario aplicar tratamiento de eliminación de estos contaminantes en las aguas antes de su vertido. Las microalgas poseen mecanismos para convertir los metales tóxicos en formas inocuas mediante adsorción de los iones a los materiales asociados a la célula y/o a los componentes de la pared celular o la secreción de compuestos orgánicos que se unen a los metales en el entorno. En ambos casos la especificidad es bastante baja y cualquier catión metálico puede interactuar con residuos cargados negativamente de los compuestos orgánicos para formar complejos. Una vez en la célula, la desintoxicación de los metales pesados puede lograrse mediante la unión a compuestos intracelulares específicos y/o el transporte de los metales a compartimentos celulares específicos como vacuolas con el fin de controlar la concentración de estos elementos en el citoplasma. Los metales más comunes que las microalgas pueden acumular son: Co, Mo, Ca, Mg, Cu, Zn, Cr, Pb y Se.

La bioacumulación de metales que realizan las microalgas supone un método factible para la remediación de aguas residuales contaminadas con metales pesados. Esta característica hace que las microalgas supongan un tratamiento factible, eficaz y sostenible para la biorremediación de las aguas residuales (Pachés et al., 2022).

4.5 Capacidad para eliminar patógenos de las aguas residuales

La contaminación por patógenos (bacterias, virus, protozoos y helmintos) está relacionada con los vertidos de origen doméstico. Los tratamientos de depuración deben eliminar este tipo de microorganismos mediante distintos procesos convencionales como la aplicación de ozono, radiaciones ultravioletas (UV), etc. Los cultivos de microalgas son una alternativa a estos tratamientos convencionales puesto que se ha observado que aquellos factores ambientales que favorecen el crecimiento de las microalgas (radiación solar, pH, oxígeno

disuelto) son perjudiciales para la supervivencia de microorganismos patógenos como *E. coli*, *Salmonella*, *Legionella*, *Shigella*, *Yersinia*, *Leptospira*, *Vibrio* o *Klebsiella*.

Solo con el aumento del pH que se produce en el medio debido a la actividad fotosintética y al efecto de sustancias antibacterianas que excretan, el número de bacterias fecales se ve reducido considerablemente. Además, se ha observado que en medios naturales se alcanzan rendimientos de eliminación superiores utilizando cultivos de microalgas que utilizando tratamientos convencionales para la depuración de las aguas.

4.6 Capacidad para eliminar contaminantes emergentes

Los contaminantes emergentes son compuestos de naturaleza muy diversas (pesticidas, plaguicidas, productos farmacéuticos, retardantes de llama, etc.) cuya presencia en el medio ambiente no se considera significativa en términos de concentración pero con alto potencial de generar un impacto ecológico negativo y efectos adversos sobre la salud pública (Paches, 2020). Los procesos de tratamiento convencionales del agua residual no eliminan todos estos contaminantes y, por eso en las últimas décadas existe una presión por encontrar tratamientos alternativos que reduzcan la carga de estos contaminantes.

Las microalgas suponen una alternativa porque son capaces de biodegradar estos compuestos mediante reacciones de descomposición que reducen la toxicidad del compuesto por hidrólisis, oxidación etc. Además, esta biodegradación puede darse o bien en el interior celular o en el exterior, por acción de compuestos excretados. Otros procesos que intervienen en la eliminación de contaminantes emergentes son la bioacumulación en el interior celular y la bioadsorción (fijación por las fuerzas electrostáticas a la superficie celular). Diversos géneros como *Chlamydomonas*, *Scenedesmus* y/o *Chlorella* han resultado ser muy eficientes cuando están en monocultivos pero cuando existen cultivos mixtos (diversas especies) se ha comprobado que se produce una sinergia que amplía el espectro de degradación de contaminantes así como la tolerancia a mayores concentraciones (bioaumentación).

4.7 Obtención de productos de valor añadido

El tratamiento con algas permite la obtención de bioproductos de interés industrial durante el proceso que generan valor añadido puesto que la biomasa microalgal es rica en lípidos, proteínas, polisacáridos, compuestos fenólicos y carotenoides.

Dado que una de las principales preocupaciones actuales es la búsqueda de fuentes de energía complementarias al petróleo (pronóstico del agotamiento de las reservas del planeta y los problemas derivados de su uso: emisiones de efecto invernadero, subida de los precios, inestabilidad de los mercados) la investigación actual en microalgas está centrada en la obtención de cultivos con alto contenido en estas sustancias para recuperarlos mediante procesos de extracción y/o transformación de compuestos, lo que se conoce como bio-refinerías.

A modo de ejemplo, los lípidos que contiene la biomasa microalgal pueden usarse para la producción de biodiesel. El biodiesel es un combustible líquido obtenido a partir de lípidos mediante procesos de esterificación y transesterificación. Numerosas especies de microalgas pueden ser inducidas, manipulando las características fisicoquímicas del medio de cultivo (variación de la salinidad, temperatura, pH o disponibilidad de micronutrientes), a producir elevadas cantidades de lípidos o ácidos grasos, que pueden ser posteriormente

empleados para la producción de biodiesel. Las ventajas del empleo de algas para la obtención de biodiesel son principalmente la no estacionalidad en la producción, el menor consumo de agua, menor necesidad de superficie para su cultivo, alta velocidad de crecimiento y la eliminación del empleo de herbicidas y pesticidas. Sin embargo, existen problemas técnicos para la obtención de biodiesel a partir de las microalgas dada la dificultad de extracción de los lípidos celulares.

5 Cierre

Todos los procesos de depuración de las aguas requieren una gran cantidad de energía y generan residuos que deben ser tratados posteriormente. Si bien es cierto que en las últimas décadas se ha mejorado mucho en el uso de las energías renovables y la valorización de los residuos, en el ámbito del saneamiento de las aguas residuales aún se debe avanzar más y lograr sistemas de depuración mucho más sostenibles, minimizando los residuos y la huella de carbono del proceso.

En todo el mundo se están realizando estudios de aplicación de las microalgas para la depuración de las aguas como alternativa a los sistemas de depuración convencionales porque su uso permite en términos generales ahorrar energía, mayor tasa de captación de CO₂, eliminación de contaminantes del agua y generación de productos de valor añadido acercando el proceso a la estrategia de la economía circular.

6 Bibliografía

Gonzalez-Camejo J. (2019). Assessment of the flat-panel membrane photobioreactor technology for wastewater treatment: outdoor application to treat the effluent of an anaerobic membrane bioreactor. Ph.D. Universitat Politècnica de Valencia.

Hernandez JP., de-Bashan LE., Bashan Y. (2006). Starvation enhances phosphorus removal from wastewater by the microalgae *Chlorella* spp. co-immobilized with *Azospirillum brasilense*. *Enzyme Microb. Technol.* 38, 190-198.

Lodi A., Binaghi L., Solisio C., Converti A., Del Borghi M. (2003). Nitrate and phosphate removal by *Spirulina platensis*. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology* 30, 656-660.

Oswald, W.J., Gootas, HB. (1957). Photosynthesis in sewage treatment. *Transactions American Society of Civil Engineers*, 122, 73-105

Pachés Giner, MAV. (2020). Contaminantes emergentes. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/142675>

Pachés Giner, MAV; Martínez-Guijarro, R; Tratamientos biológicos para la eliminación de metales (2022). Uso de licencias abiertas CC en Riunet. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/17458>

Park J., Jin HF., Lim BR., Park KY., Lee K. (2010). Ammonia removal from anaerobic digestion effluent of livestock waste using green alga *Scenedesmus* sp. *Bioresource Technology*, 101, 8649-8657.