Efectos del tratamiento ultrasónico sobre las microalgas y algunos parámetros relacionados con la calidad del agua en una balsa de riego

Ramoni Sánchez Carmona doctora en Ciencias Biológicas, responsable de I+D+i Agua y Medioambiente de Toscano Línea Electrónica
Isabel Martín García doctora en Ciencias Biológicas, técnica de proyectos de la Fundación Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua (CENTA)
Khalid Fahd Draissi doctor en Ciencias Biológicas, técnico de proyectos de la Fundación Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua (CENTA)

El ultrasonido constituye una alternativa viable y eficiente para combatir los problemas derivados de la proliferación masiva de algas. Hay numerosos estudios científicos que han demostrado su efecto antialgas, pero son escasos los realizados en condiciones naturales y a escala real. En este trabajo se muestran los efectos de un tratamiento ultrasónico en presencia de un *bloom* de *Microcystis aeruginosa* en una balsa de riego: reducción de la biomasa algal y mejora de algunos parámetros relacionados con la calidad del agua. El ultrasonido se presenta como un tratamiento antialgas efectivo y de bajo coste, con un gran potencial respecto a sus aplicaciones sobre la calidad del agua de regadío.

Palabras clave
Bloom de algas, tratamiento ultrasónico, *Microcystis aeruginosa*, calidad del agua.

Effects of ultrasonic treatment on microalgae and some parameters of water quality in a pond used for irrigation

Ultrasound is an alternative method against problems caused by massive proliferation of algae. There are extensive researches about antialgae effects of ultrasound in laboratory; however studies carrying on environmental conditions and full scale are scarce. Here we show the effects of an ultrasonic treatment in an irrigation pond with a Microcystis aeruginosa *bloom: algal biomass reduction and improvement of some parameters related with water quality. Ultrasound is an effective and low cost antialgae treatment, with great potential regarding their application on the quality of irrigation water.*

Keywords
Algae bloom, ultrasonic treatment, Microcystis aeruginosa, *water quality.*

1. Introducción

La aparición de proliferaciones masivas o *blooms* de organismos del fitoplancton, y entre ellos de las cianobacterias, se relaciona con los procesos de eutrofización, es decir, con un enriquecimiento de nutrientes del sistema acuático. Este es un proceso natural, que se produce muy lentamente (durante siglos) y que, finalmente, lleva a la colmatación de los sistemas lénticos. Sin embargo, las actividades humanas están acelerando la velocidad y grado de eutrofización, debido a que se están alterando los ciclos biogeoquímicos. Actualmente, se está produciendo una contínua descarga de nutrientes al medio natural a través de vertidos de fertilizantes, detergentes, aguas residuales, etc., que incrementan los niveles de eutrofización de los ecosistemas acuáticos.

Normalmente los *blooms* de algas suelen ocurrir en los meses de verano, cuando la temperatura del agua favorece su crecimiento. No obstante, determinados grupos de algas, como las cianobacterias, tienen su máximo crecimiento a temperaturas en torno y por encima de los 25 ºC, por lo que los problemas con las algas en los países cálidos no están restringidos a los meses de verano, sino que pueden ocurrir durante todo el año. Esto es lo que ocurre en España, donde puede haber problemas con las algas desde finales de febrero hasta finales de noviembre.

Cuando se forman *blooms* de algas en instalaciones de tratamiento de agua se produce una gran variedad de problemas. Son muy frecuentes los problemas mecánicos derivados de la obstrucción de los filtros, lo que requiere un lavado a contracorriente para la retirada de las algas. Además, en general, se produce una serie de cambios químicos que conducen a una pérdida de la calidad del agua: aumenta la concentración de clorofila a, se produce un aumento de la turbidez y disminuyen los niveles de oxígeno, lo que favorecen los procesos anaeróbicos que producen gases malolientes. Finalmente, se produce la acumulación de sustancias reducidas (sulfuros, amonio, Fe, Mg...). En definitiva, la proliferación masiva de algas conduce al incremento de los costes en el tratamiento del agua.

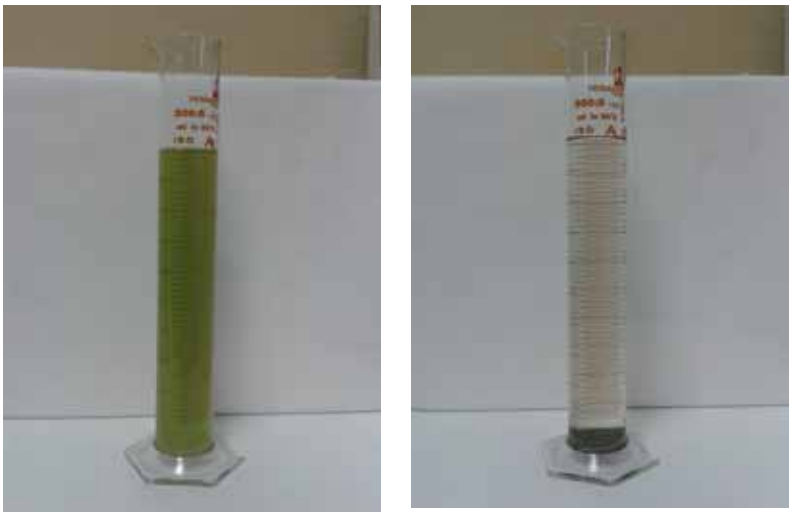
Hay una gran variedad de métodos que ya han sido desarrollados y aplicados para resolver los problemas con las algas. Entre ellos se encuentran: minimizar la carga de nutrientes (principalmente del fósforo) a través de su precipitación; el desarrollo de técnicas que limiten la luz, eliminación del sedimento o la aireación del hipolimnión; y la aplicación de alguicidas.

El antialgas químico más utilizado es el sulfato de cobre ($CuSO_4$). Este tratamiento es bastante efectivo contra las algas, pero también afecta a otras formas de vida como pueden ser los peces. Además, deja un resíduo de metales pesados que puede producir daños por bioacumulación o por biomagnificación en otros organismos, contribuyendo así a un aumento de una contaminación secundaria. Así mismo, el efecto de este tipo de alguicidas es temporal, por lo que se requiere de la adición continua de esta sustancia química. De esta manera, a largo plazo resulta un tratamiento bastante costoso tanto desde el punto de vista económico como medioambiental. Así pues, comparado con este tipo de tratamientos, el ultrasonido se presenta como una alternativa respetuosa con el medio ambiente puesto que no requiere la adición de sustancias químicas ni un elevado consumo energético.

1.1. El ultrasonido como tratamiento antialgas

El ultrasonido (ondas sonoras con una frecuencia por encima de los 20 kHz) se transmite en el agua produciendo una serie de ciclos de compresión y rarefección que conducen a la generación de burbujas de cavitación. Este fenómeno es conocido como cavitación acústica. Millones de estas burbujas implosionan causando puntos localizados de alta presión y temperatura (100 MPa y 5.000 ºC, respectivamente). Este fenómeno,

Figura 1. Agua no tratada con ultrasonido (izquierda) y agua tratada (derecha): el ultrasonido provoca la sedimentación de las algas.



además, favorece la actividad química debido a la formación de radicales hidroxilo, altamente reactivos.

De esta manera, las variaciones de presión producidas por el efecto de la cavitación acústica afecta a las algas de diferentes maneras: produce la ruptura de las vacuolas de gas en cianobacterias, alterando así su capacidad de flotación y provocando su sedimentación (**Figura 1**); tiene efectos sobre la membrana y la pared celular; produce la liberación de radicales libres; tiene efectos sobre la fotosíntesis; y, finalmente, tiene efectos sobre el ciclo celular (Rajasekhar *et al.*, 2012).

Numerosos estudios científicos han demostrado el efecto antialgas del ultrasonido. Entre los más recientes se encuentran los trabajos de Jachlewski *et al*. (2013), Wu *et al.* (2011) y Joyce *et al*. (2010). No obstante, la mayoría de ellos se han realizado en condiciones de laboratorio y con cultivos puros (especialmente de la cianobacteria *Microcystis aeruginosa*). En escasas ocasiones se han realizado estudios sobre comunidades naturales (Kieffer *et al*., 2015) y, es bien conocido, que las características de algunas algas (especialmente *M. aeruginosa*) cultivadas en condiciones de laboratorio difieren de las que se encuentran en condiciones naturales (Yu *et al*., 2013).

Además del efecto antialgas, otros estudios recientes han dirigido sus investigaciones a la aplicación del ultrasonido para la desinfección en procesos de reutilización del agua (Gómez-López *et al*., 2014; Villanueva *et al*., 2015) y a los efectos que el tratamiento ultrasónico tiene sobre la calidad del agua (Li *et al*., 2014; Wang *et al*., 2008). Así pues, la aplicación de un tratamiento ultrasónico de baja potencia podría tener otro tipo de efectos beneficiosos relacionados con la calidad del agua.

Figura 2. Equipo Dumo AC-180 instalado en la balsa.

Ante la necesidad de realizar estudios en condiciones naturales y a escala real sobre estos efectos surge el presente trabajo. Este proporciona nuevas evidencias de la aplicación de la tecnología ultrasónica como una alternativa efectiva en el tratamiento antialgas en condiciones reales. De esta manera, en el presente trabajo se analiza el efecto regulador del ultrasonido en un *bloom* de *Microcystis aeruginosa* que se desarrolla en una comunidad fitoplantónica natural en una balsa de riego. Adicionalmente, con este estudio, se aportan nuevos indicios sobre otra perspectiva de un tratamiento ultrasónico antialgas: el efecto del ultrasonido sobre otros parámetros indicadores de la calidad del agua cuando se está tratando una comunidad fitoplanctónica.

2. Metodología

Este estudio se ha realizado en una balsa de riego, alimentada por aguas residuales urbanas, previamente tratadas mediante un sistema de humedales artificiales. Dicha balsa se encuentra ubicada en la Planta Experimental de Carrión de los Céspedes (Sevilla), propiedad de la Fundación Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua (CENTA, www.centa.es). La balsa de riego objeto de estudio tiene un volumen efectivo de 800 m^3, una superficie de 700 m^2 y una profundidad máxima de 1,5 m, contando con un tiempo de retención hidráulica de 17-18 días aproximadamente.

Para la realización de este trabajo se utilizó el equipo ultrasónico Dumo algacleaner AC-180 (www.toscano.es) con emisor multifrecuencia (20 kHz-60 kHz) y 180 W (**Figura 2**). Este equipo, de fácil instalación, está constituido por: un emisor ultrasónico colocado debajo de la superficie del agua, sujetado con un flotador; un módulo de control para activar el emisor, instalado en un área seca o no inundable alimentado por una red de 230 V; y un cable que conecta el emisor con el módulo central. Dicho equipo fue instalado en la balsa de riego ubicada en la Planta Experimental del CENTA (**Figura 3**).

La potencia específica o intensidad (I) y la energía específica (Es) fueron calculadas de la siguiene manera:

$$I = \text{Potencia (W)}/\text{Volumen (l)}$$

$$Es\ (J/l) = I\ (W/l) \times \text{tiempo (seg)}$$

En este caso se aplicó una energía de 63,504 J/l. Durante el seguimiento del tratamiento ultrasónico

Figura 3. **En la imagen pequeña,** vista general de la Planta Experimental de Carrión de los Céspedes (Sevilla) y localización de la balsa de riego estudiada (círculo rojo); en la imagen grande, equipo de ultrasonidos instalado en la balsa (Debajo).

se realizó la caracterización fisicoquímica y biológica del agua que descarga en la balsa (influente) y del cuerpo de agua próximo a la zona de salida (efluente) de la balsa. El tratamiento ultrasónico se realizó en presencia de un *bloom* de *Microcystis aeruginosa*. Así pues, con la finalidad de conocer las condiciones iniciales del sistema, el primer muestreo se realizó el día 2 de octubre de 2014, antes de iniciar el tratamiento ultrasónico. A partir de ese momento se realizaron 6 muestreos semanales bajo tratamiento ultrasónico, de manera que se ha observado el efecto del ultrasonido en el agua de salida de la balsa a los 7, 14, 21, 28, 35 y 42 días de tratamiento.

Se realizaron, por tanto, un total de 7 muestreos durante un mes y medio con el fin de observar la reacción más inmediata de la masa de agua frente al tratamiento ultrasónico, por lo que este estudio no registrará la evolución estacional de la balsa de riego. Se tomaron 42 muestras para la realización de los análisis fisicoquímicos y biológicos

Tabla 1. Parámetros analizados y métodos–técnicas analíticas usados durante el periodo de seguimiento. Nota: * Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 17th Edition

Parámetros	Métodos
Temperatura (ºC)	SM 2550 B.*
pH	SM 4500-H+ B.*
Conductividad (µS/cm)	SM 2510 B * y UNE EN 27888.
Oxígeno disuelto (mg/L)	SM 4500-O G*
Turbidez (UNT)	SM 2130 B* y UNE-EN 27027:1995
Sólidos disueltos totales (mg/L)	SM 2540 C*
Sólidos en suspensión totales (mg/L)	SM 2540 B* y UNE-EN 872:2005
DQO (mg/L)	SM 5220 C.* y UNE- EN77004:2002
DBO_5 (mg/L)	SM 5210-D*
Transparencia del agua (cm)	Disco de Secchi
Fosfatos (mg P/L)	SM 4500 PC Y PE * AutoAnalyzer Applications
Nitrógeno total (mg N/L)	SM 4500 P B5 Y SM 4500 NO3-H*. AutoAnalyzer Applications
Nitratos (mg N/L)	SM 4500 NO3-H*. AutoAnalyzer Applications
Amonio (mg N/L)	AutoAnalyzer Applications. Method No. G-102-93 Rev.4 (multitest MT7/MT8). Bran+Luebbe.
Clorofila a (µg/L)	Tailling and Driver (1963)
Fitoplancton (Nº cs./ml)	Utermöhl
Zooplancton (Nº ind./L)	Cámara sedimentación/microscopio invertido

(concentración de clorofila a y fitoplancton cualitativo y cuantitativo). Los parámetros analizados durante el periodo de seguimiento, así como los métodos analíticos utilizados, se muestran en la **Tabla 1**. Se calculó el coeficiente de correlación de Spearman para examinar las relaciones entre los diferentes parámetros estudiados. Para ello se utilizó el paquete estadístico SPSS 13.0.

3. Resultados y discusión

3.1. Cambios en los parámetros fisicoquímicos

En la **Figura 4** se muestra la evolución de los siguientes parámetros tomados *in situ*: temperatura, pH, conductividad y oxígeno disuelto en el agua de entrada y de salida de la balsa. Durante el transcurso del estudio no se ha observado una tendencia clara en la evolución del pH ni del oxígeno disuelto en el agua tratada. Estos valores también se presentan bastante fluctuantes en el agua influente a la balsa objeto de estudio. Respecto a la temperatura y a la conductividad, se observa un ligero descenso al final del estudio respecto a las condiciones iniciales, tanto en el agua influente como efluente a la balsa. Las condiciones ambientales de la balsa han condicionado la profiferación masiva de algas, concretamentete de la cianobacteria *Microcystis aeruginosa*.

La evolución de la transparencia del agua, turbidez y sólidos (disueltos y en suspensión) se muestra en la **Figura 5**. Se observa una fuerte correlación significativa para todos estos parámetros análizados en la balsa de estudio excepto para los sólidos disueltos (**Tabla 2**). De esta manera, existe una tendencia a la disminución de la turbidez y de los sólidos en suspensión, así como al aumento de la transparencia, principalmente a partir de los 14 días de tratamiento del agua de la balsa.

La turbidez es causada por sustancias suspendidas o disueltas en el agua tales como arcilla, limo, materia orgánica e inorgánica finamente dividida, plancton y otros organismos microscópicos (USEPA, 1999). A los 7 días de tratamiento se produce un aumento en la turbidez. Esto se debe a las fuertes precipitaciones que se registraron el día anterior al muestreo y que causaron un aumento de los sólidos en suspensión.

Después de 42 días de tratamiento ultrasónico en la balsa, la turbidez se reduce desde 148 UNT hasta 14,3 UNT, variando este parámetro hasta alcanzar valores ligeramente por encima de los valores admitidos para el riego en agricultura (10 UNT) (Real Decreto 1620/2007). Algunos autores (Doosti *et al.*, 2012) ya han demostrado la capacidad del ultrasonido de reducir la turbidez del agua, consiguiendo una efectividad de hasta el 75% en estudios realizados en laboratorio. En este estudio

Figura 4. Evolución de la temperatura, el pH, la conductividad y el oxígeno disuelto de las muestras de agua analizadas durante el periodo de seguimiento.

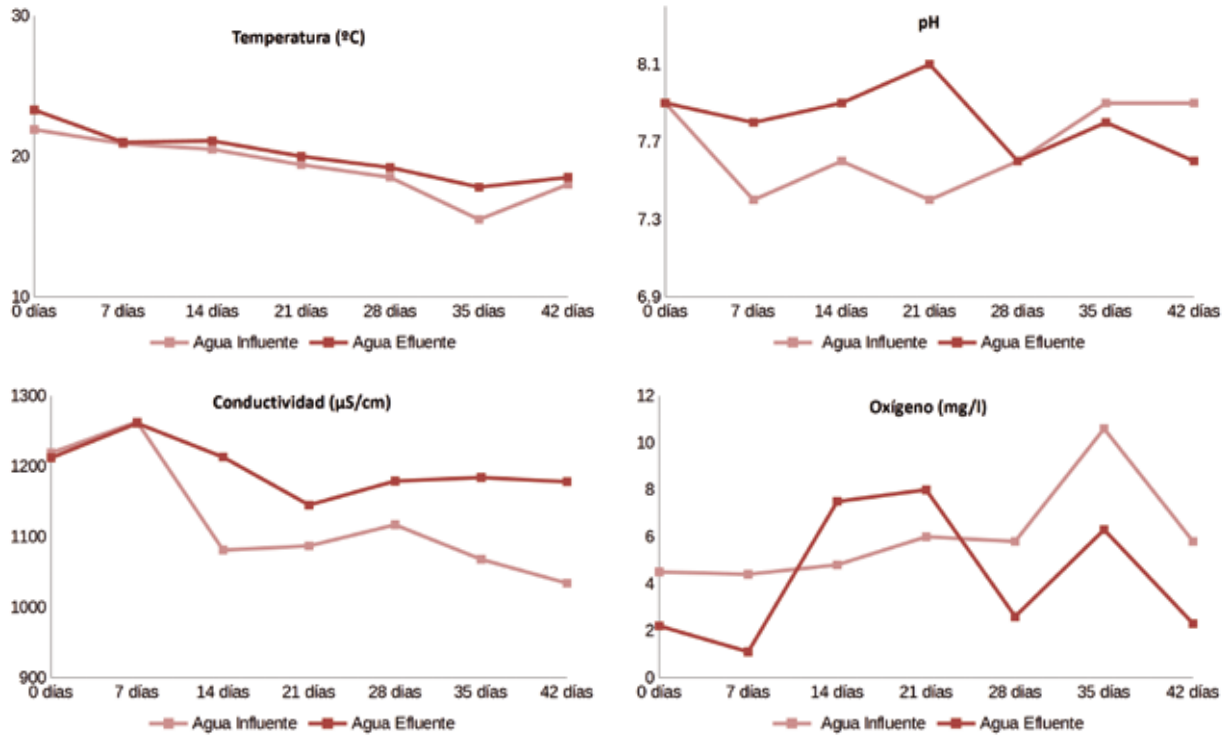
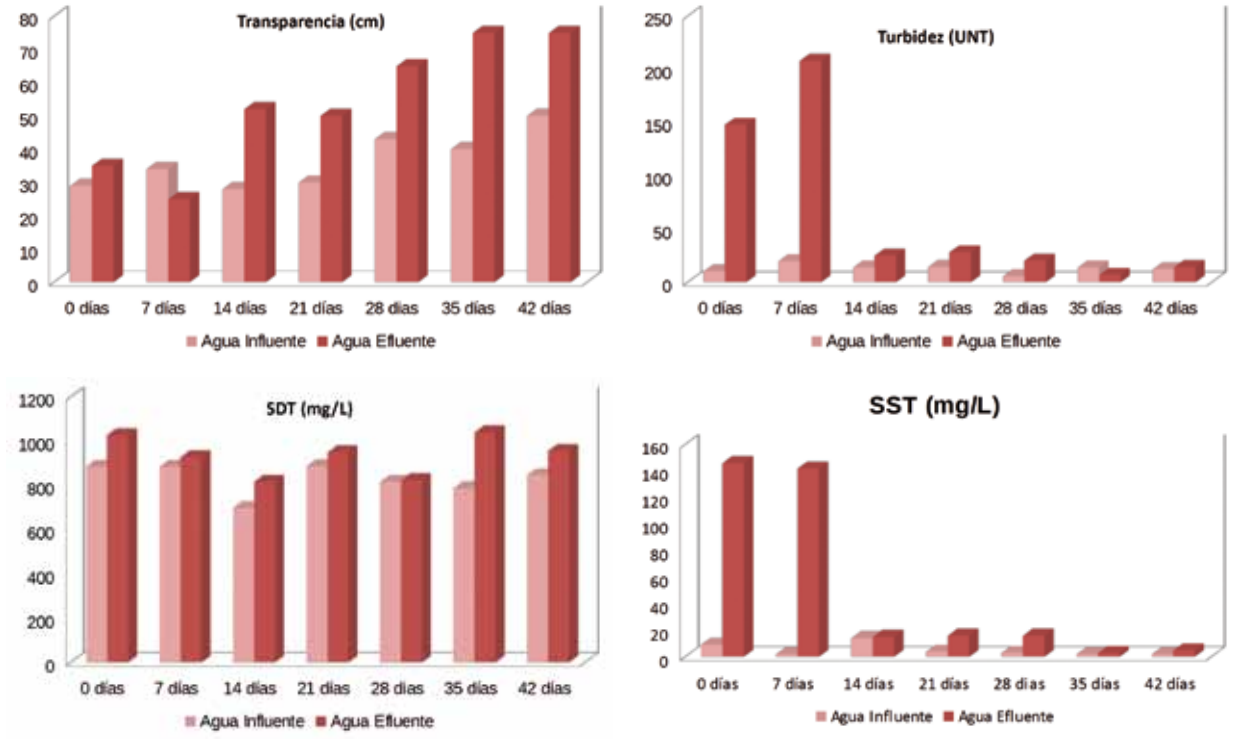


Figura 5. Evolución de la transparencia, la turbidez, los sólidos disueltos y en suspensión durante el periodo de seguimiento.



se superan estos porcentajes, consiguiendo una reducción del 90,3% durante el tiempo que duró el tratamiento.

3.2. Cambios en la concentración de clorofila a

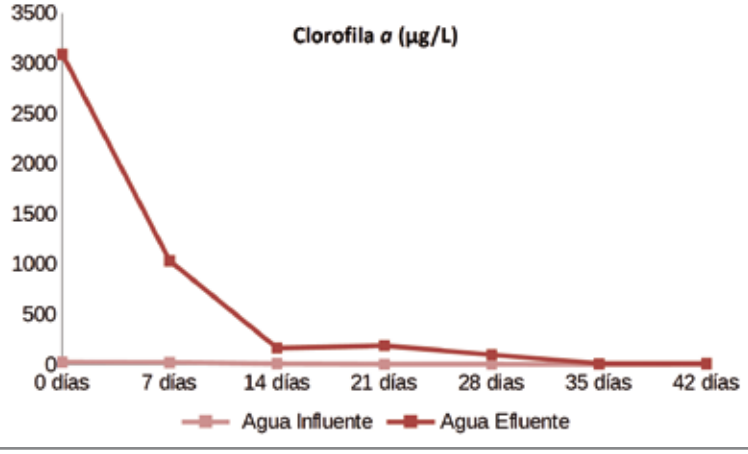
El parámetro más representativo a la hora de evaluar la biomasa fitoplanctónica presente en la balsa de riego es la concentración de la clorofila a. La evolución de este parámetro durante el periodo de seguimiento se muestra en la **Figura 6**. Se observa un descenso muy significativo de estos valores en la balsa de regadío durante las dos primeras semanas del estudio, de manera que en los primeros 7 y 14 días de tratamiento la concentración de clorofila a se reduce en un 66,5% y un 94,768% respectivamente.

Esta importante reducción de la concentración de clorofila a se mantiene durante todo el tratamiento ultrasónico, de manera que en los

Tabla 2. Matriz de coeficientes de correlación de Spearman para los parámetros: transparencia, turbidez, sólidos en suspensión (SST) y sólidos disueltos (SDT). Nota: ** p < 0,01.

Parámetro	Transparencia (cm)	Turbidez (UNT)	SST (mg/L)	SDT (mg/L)
Transparencia (cm)	-	-	-	-
Turbidez (UNT)	-0,991**	-	-	-
SST (mg/L)	-0,891**	0,901**	-	-
SDT(mg/L)	0,252	-0,286	-0,180	-

Figura 6. Evolución de la concentración de la clorofila a (µg/L) en las muestras de agua analizadas durante el periodo de seguimiento.



42 días que duró el tratamiento se consiguió una reducción del 99,7%. Así pues, se observó una reducción del grado de eutrofización de la balsa, de manera que se ha pasado de tener valores propios de ecosistemas hipereutróficos antes del tratamiento con ultrasonido a tener valores característicos de sistemas eutróficos, respecto a la biomasa algal.

Según algunos autores (Li *et al*., 2014) la eficiencia obtenida por el tratamiento ultrasónico también podría estar condicionada por las concentraciones iniciales de clorofila a, es decir, por la cantidad de algas presentes en el momento de inicio del tratamiento. Así pues, en pruebas realizadas en laboratorio, el menor porcentaje de eficiencia en la eliminación de algas fue de 14,6% para concentraciones iniciales de 2.500 µg/l. En el estudio que aquí se presenta se ha partido de concentraciones iniciales superiores, propias de la presencia de un *bloom* (3.089,6 µg/l), obteniéndose un porcentaje de eliminación de algas superior al 60% durante la primera semana de tratamiento. Así pues, a pesar de que los resultados podrían verse afectados por condicionantes como las concentraciones iniciales y las variaciones ambientales, se han obtenido porcentajes de eliminación de algas bastante significativos.

Finalmente, los resultados obtenidos para este parámetro están correlacionados significativamente con los analizados anteriormente (turbidez: Rho de Spearman = 0,964, p < 0,001; SST: 0,937, p = 0,002 y transparencia: Rho de Spearman = -0,955, p = 0,001). Se observa, por tanto, que una reducción de la biomasa fitoplanctónica en la balsa estudiada tiene efectos directos sobre estos parámetros.

3.3. Cambios en la DBO_5 y DQO

Los parámetros más importantes a la hora de medir la cantidad de materia orgánica presente en el agua son la demanda bioquímica de oxígeno a los cinco días (DBO_5) y la demanda química de oxígeno (DQO). En este sentido, la DBO_5 se define como la cantidad de oxígeno necesaria para la descomposición biológica aerobia (mediante microorganismos) de la materia orgánica biodegradable del agua. La DQO mide la cantidad de materia orgánica total susceptible de oxidación química.

En la **Figura 7** se representa la evolución de los valores obtenidos para estos parámetros durante el periodo de seguimiento. En el caso de la DBO_5 se observa un patrón de disminución que muestra una correlación significativa con el patrón de disminución presentado por la concentración de la clorofila a (Rho de Spearman = 0,855, p = 0,014). Al igual que ocurría con la concentración de clorofila a, en las dos primeras semanas de tratamiento se produce un descenso bastante significativo de este parámetro. De esta manera, los valores de DBO_5 se reducen en un 87% y un 94% a los 7 y 14 días de tratamiento respectivamente.

Respecto a la DQO, también se produce un notable descenso en los valores, aunque de forma más gradual que en el caso de la DBO_5. Así pues, a los primeros 7 días de tratamiento se produce un descenso del 32,8% y a los 14 días la disminución del 76%. Aunque este parámetro siga la misma tendencia a la reducción que la concentración de clorofila a no se ha encontrado una correlación significativa entre estos dos parámetros (Rho de Spearman = 0,714, p = 0,071). Ante la notable reducción de la biomasa algal, se produce una disminución inmediata de los compuestos orgánicos biodegradables en el medio, y una disminución de compuestos orgánicos totales a un mayor largo plazo.

Respecto al efecto del ultrasonido en estos parámetros, a nivel de laboratorio se ha encontrado que un tratamiento ultrasónico puede reducir

Figura 7. Evolución de la DBO_5 y DQO en las muestras analizadas durante el periodo de seguimiento.

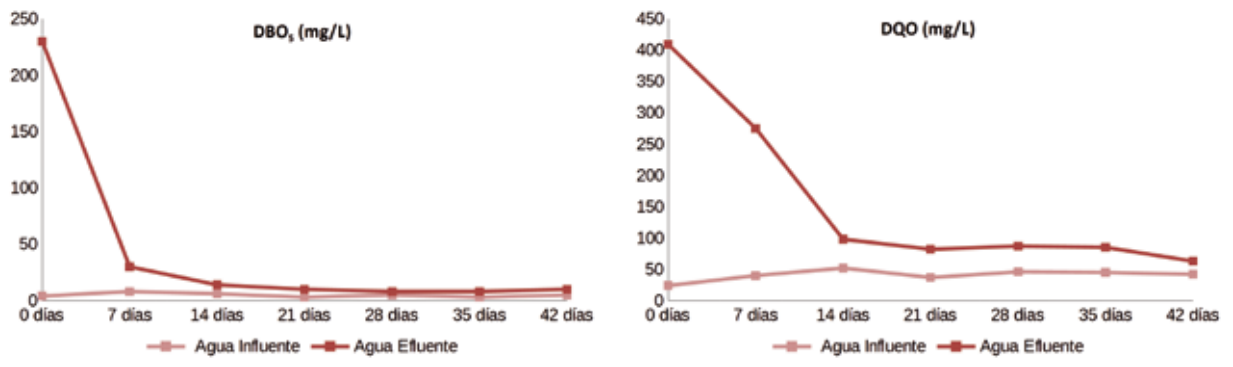
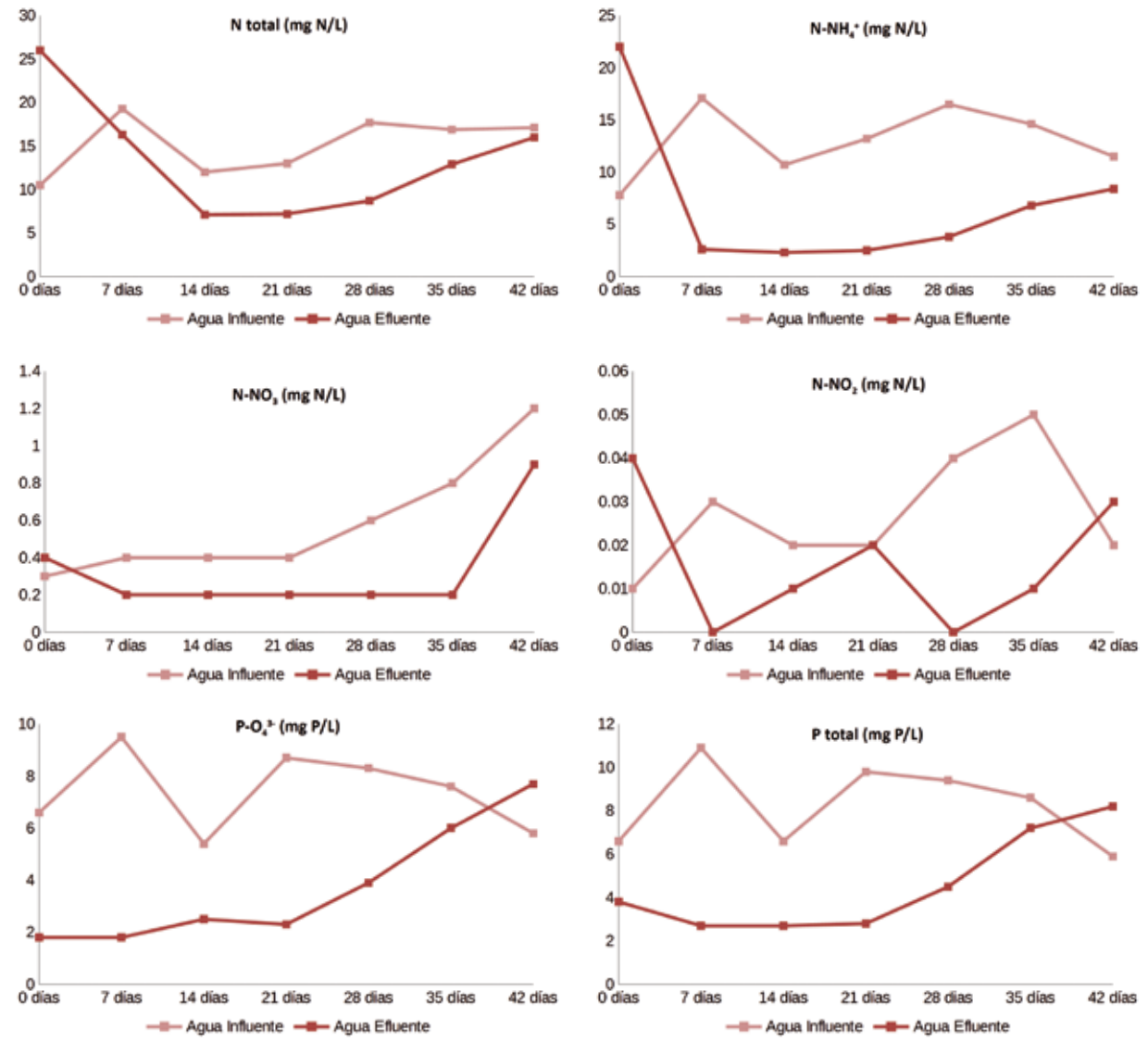


Figura 8. Evolución de los nutrientes en las muestras de agua analizadas durante el seguimiento: N total, amonio, nitrato, nitrito, ortofosfato y fósforo total.



en torno al 5% la DQO después de 60 min de tratamiento en aguas de lixiviados de vertederos con unos altos valores iniciales (4.479 mg O_2/L) (Wang *et al*., 2008). Esta capacidad del tratamiento ultrasónico de disolver la materia orgánica presente en el agua también se ha estudiado en balsas de regadío a gran escala, confirmándose el efecto reductor de este parámetro (Villanueva *et al*., 2015). Así mismo, hay otros autores que sostienen que la efectividad del ultrasonido en la reducción de niveles de DQO depende del tipo de materia orgánica presente en el agua (Gómez-López *et al*., 2014).

Los valores de DQO considerados aptos para el agua de riego en agricultura oscilan entre los 15 y 107 mg O_2/L (Gemmell y Schmidt, 2012). Después de 14 días de tratamiento ultrasónico, los valores de DQO en la balsa estudiada se encuentran dentro de ese rango, partiéndo de valores iniciales de 500 mg/L (definido como alto para el uso de riego en agricultura). Después de 42 días de tratamiento, parámetros como la DBO_5, la DQO y la turbidez pasan de ser valores no aptos para el riego en agricultura a valores aptos que se comprenden entre los establecidos como valores de calidad del agua de riego.

La reducción de estos parámetros en este estudio probablemente esté relacionada con la precipitación de las células afectadas por el ultrasonido. En cualquier caso, los resultados obtenidos en este trabajo avalan la idea propuesta anteriormente por varios autores de que el ultrasonido no solo podría ser considerado como un método de eliminación y

de inhibición de algas, sino que también se puede utilizar para mejorar la calidad del agua contaminada

3.4. Cambios en los nutrientes (nitrógeno y fósforo)

Los nutrientes analizados en este estudio han sido el nitrógeno (nitrógeno total, nitratos, nitritos y amonio) y el fósforo (ortofosfatos y fósfoto total) (**Figura 8**). La balsa objeto de estudio recibe un elevado aporte de nitrógeno y de fósforo, sobre todo en forma de amonio y ortofosfato, procedente de las aguas residuales tratadas mediante humedales artificiales. Así pues, se trata de una balsa donde las concentraciones iniciales de amonio son elevadas (22 mg/L). Así mismo, el aporte de ortofosfatos a la balsa de riego es elevado, lo que ha condicionado el crecimiento masivo de cianobacterias, concretamente del género *Microcystis*.

Las diferentes formas de nitrógeno muestran correlaciones positivas significativas entre sí (NO_3-NO_2: Rho de Spearman = 0,771, p = 0,042; NO_3-NH_4: 0,757, p = 0,049). Esto podría estar relacionado con el proceso de nitrificación que se produce en la balsa (oxidación biológica del amonio con oxígeno en nitrito, seguido de la oxidación de esos nitritos a nitratos).

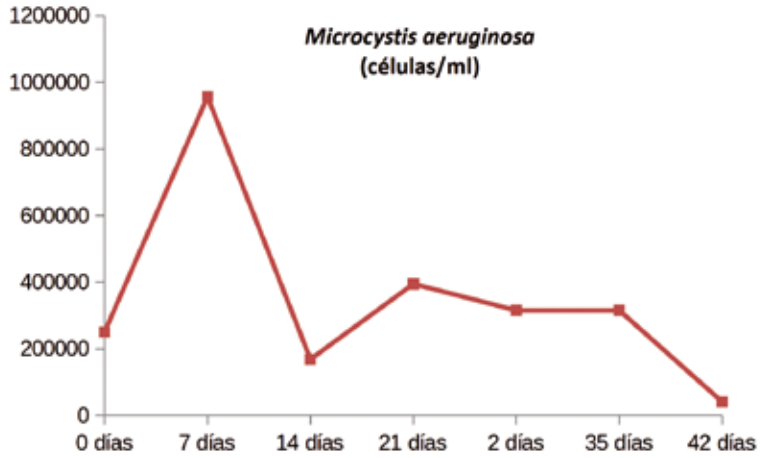
Cabe señalar una reducción bastante notable en el amonio al iniciar el tratamiento ultrasónico (entre los 7 y 21 días de tratamiento) a pesar de la elevada carga de esta forma de nitrógeno en el agua influente de la balsa. No obstante, la evolución de las diferentes formas del nitrógeno y ortofosfatos no se puede interpretar de manera clara respecto a la evolución del tratamiento ultrasónico.

En estudios anteriores se ha demostrado que la radiación ultrasónica es un método efectivo para la eliminación del nitrógeno amonio de aguas de lixiviado de vertederos, con altos contenido en materia orgánica (Wang *et al.*, 2008). No obstante estos estudios se realizaron en laboratorio sobre volúmenes muy reducidos (1.000 mL de agua). De esta manera, se determinó que el mecanismo de eliminación de nitrógeno en forma de amonio por irradiación ultrasónica se debe en gran medida a que las moléculas de amonio libre entran en las burbujas de cavitación y se transforman en moléculas de nitrógeno libre y moléculas de hidrógeno, a través de la pirólisis que se produce a las altas temperaturas y presiones alcanzadas en las burbujas de cavitación. No sería acertado atribuir este mismo proceso a escala real, ya que es sumamente difícil conseguir que la cavitación acústica se produzca en toda la masa de agua de una balsa.

Otros estudios realizados sobre los procesos de muerte y descomposición de las cianobacterias han mostrado que estas producen un elevado número de partículas o coloides en su proceso de descomposición que tienen una gran capacidad de absorción de nutrientes. Así pues, la reducción de las concentraciones de nitrógeno y fósforo se vería justificada por los procesos de descomposición de las cianobacterias.

Son muchos los factores físicos, químicos y biológicos los que intervienen en los ciclos biogeoquímicos del nitrógeno y del fósforo a escala real, por lo que resulta muy difícil establecer una relación directa con la reducción de biomasa algal causada por el tratamiento ultrasónico, en estudios a corto plazo. Aunque se desconocen los procesos por los que se produce una reducción de los nutrientes, la fuerte disminución de los iones amonio al inicio del tratamiento muestra indicios de que el ultrasonido contribuye de alguna manera a disminuir las concentraciones de nutrientes. Esto podría sugerir, por tanto, efectos directos que deberían seguir siendo estudiados a escala real y durante periodos más prolongados.

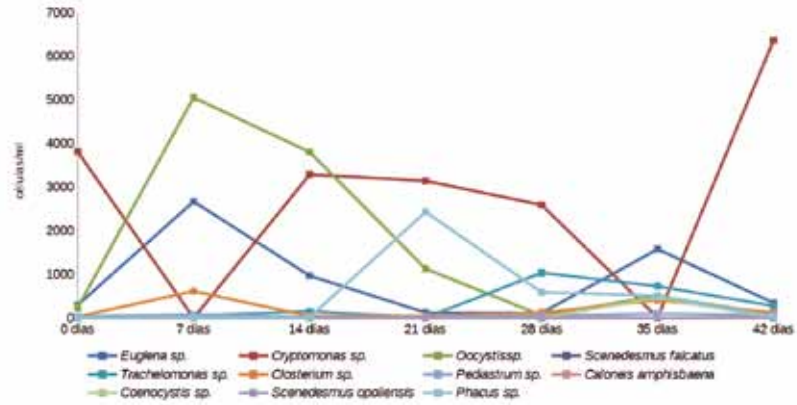
Figura 9. Evolución de la concentración de *Microcystis aeruginosa* en el efluente de la balsa de riego durante el periodo de seguimiento.



3.5. Cambios en la comunidad fitoplanctónica

La composición taxonómica inicial de la comunidad fitoplanctónica de la balsa en la que se realizó el tratamiento ultrasónico fue la siguiente: Cianobacterias (*Mycrocystis aeruginosa*): 98,25%; Criptofíceas (*Cryptomonas sp.*): 1,49%; Euglenofitas (*Euglena sp., Trachelomonas sp.* y

Figura 10. Evolución de las concentraciones de las especies del fitoplancton en el efluente de la balsa de riego durante el periodo de seguimiento.



Phacus sp.): 0,14%; Clorofitas (*Pediastrum sp., Scenedesmus falcatus* y *Oocystis sp.*): 0,109%; Desmidiáceas (*Closterium sp.*):0,01%; y Diatomeas (*Caloneis amphisbaena*): 0,001%.

Se observa un predominio claro de las cianobacterias, concretamente de la especie *Microcystis aeruginosa*, que constituye el 98,25% de la comunidad fitoplanctónica alcanzando valores de 250.300 cél /mL, característicos de un episodio de proliferación masiva.

En la **Figura 9** se representa la evolución de la concentración de *Microcystis aeruginosa* en la balsa de riego objeto de seguimiento. A la semana de comenzar el tratamiento se detecta un aumento en la concentración de esta especie. Posteriormente se detecta una disminución en dicha concentración a los 14 días de tratamiento. A partir de ese momento se observa una disminución en el transcurso del estudio de manera que, finalmente, a los 42 días de tratamiento se ha reducido la población en un 83,73% respecto a las condiciones iniciales.

El resto de las especies que constituyen la comunidad fitoplantónica no muestran patrones de evolución con una tendencia clara (**Figura 10**). De forma general, se detecta una dominancia de *Oocystis sp., Euglena sp., Cryptomonas sp.* y *Phacus sp.*, aunque de forma puntual se ha registrado un aumento de otras especies como *Trachelomonas sp.* y *Closterium sp.*, así como la aparición, al final del estudio, de la clorofita *Oenocystis sp*. Cabe señalar, que todas estas especies constituyen solo el 1,74% de la comunidad fitoplanctónica, por lo que cualquier tendencia a la posible reducción o aumento de estas poblaciones no va a reflejar un cambio importante de la composición taxonómica de la comunidad estudiada.

La notable reducción de los valores de concentración de clorofila a se corresponde con una reducción de la biomasa algal en el sistema durante el tratamiento ultrasónico. No obstante, estos resultados no se corresponden con el número de algas unicelulares contabilizadas al principio del tratamiento. Probablemente el efecto que tiene el ultrasonido sobre la disgregación de las colonias esté interfiriendo en que se pueda detectar una relación clara entre estos dos parámetros. Bajo condiciones naturales, las células de *M. aeruginosa* se agregan secretando material intracelular, formando colonias amorfas (Yu *et al*., 2013), ya que esta agregación favorece su supervivencia ante depredadores (Yang *et al*., 2008). Estas colonias se van disgregando al principio del tratamiento, lo que produce un aumento temporal de las células aisladas. No obstante, después de las fluctuaciones del número de cél/mL que se registra al principio del tratamiento (durante las dos primeras semanas), se observa una disminución en el número de individuos/mL de la comunidad fitoplanctónica, principalmente de la especie *Microcystis aeruginosa*. Este proceso de disgregación de las microalgas coloniales podría ser el responsable de que, en ocasiones, al iniciar el tratamiento en una balsa se aprecie una mayor coloración del agua dando una sensación visual errónea de que ha aumentado el número de algas, a pesar de que la biomasa algal del medio ha disminuido.

Como señalan algunos autores (Kieffer *et al*., 2015), el aumento del número de células aisladas de cianobacterias en los primeros tiempos de sonicación podría ser contraproducente para la disminución del desarrollo de estas algas si no se continúa con el tratamiento ultrasónico durante el tiempo adecuado, ya que las células aisladas de *Microcystis aeruginosa* pueden actuar como propágulos e, incluso, pueden permanecer durante mucho tiempo depositadas en el sedimento de un sistema acuático. Por ello es muy importante que no se interrumpa el tratamiento ultrasónico en el inicio del tratamiento, sobre todo durante las dos o tres primeras semanas.

Los niveles de microalgas son muy importantes en los sistemas de riego, ya que producen el colapso de diferentes partes de las instalaciones. De acuerdo con Nakayama y Bucks (1991), hay una relación simple entre los niveles de microalgas y el taponamiento del riego, siendo el riesgo de colapso bajo, medio y

alto para los valores de < 10.000; 10.000-50.000 y > 50.000 unidades/mL, respectivamente. A pesar de que los resultados cuantitativos de las algas han resultado muy variables en el transcurso del estudio, después de los 42 días de tratamiento el número de células/mL ha disminuido hasta el valor de 48.010,reduciéndose el riesgo de atasco.

A la hora de considerar el riesgo de atasco hay que tener en cuenta el tipo de algas, además del número, ya que el mismo número de células puede producir atascos si forman colonias y no producirlos si la colonia está disgregada. En este trabajo, las variaciones que se producen sobre el número de microalgas por efecto del ultrasonido no muestran una tendencia clara. Lo que parece más evidente es que se produce una significativa reducción de biomasa algal y una disgregación de las colonias. Ambos efectos van a contribuir considerablemente a solucionar los problemas de bloqueos de los filtros en sistemas de regadío.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos en este trabajo, en condiciones naturales y a escala real, podrían confirmar el efecto antialgas del ultrasonido en una balsa de regadío. Se observó una reducción significativa de la concentración de clorofila a, de manera que en los primeros 7 y 14 días de tratamiento este parámetro se redujo en un 66,5% y en un 94,7% respectivamente. En este estudio se ha observado que el tratamiento ultrasónico produce una significativa reducción de biomasa algal y una disgregación de las colonias, lo que puede contribuir enormemente a solucionar los problemas de bloqueos de los filtros en sistemas de regadío.

El ultrasonido no solo puede ser considerado como un método efectivo para eliminar e inhibir el crecimiento de las algas, sino que además produce mejoras significativas en la calidad del agua a tratar. En este trabajo se muestra una reducción importante de parámetros relacionados con la calidad del agua como la turbidez, la DBO_5 y la DQO, de manera que en dos semanas de tratamiento estos valores han registrado reducciones del 90,3%, 93,91% y 76%, respectivamente. Además, el ultrasonido podría tener efectos sobre la reducción de nutrientes, principalmente de los iones amonio. De esta manera, esta tecnología podría contribuir a regular los niveles de nutrientes de las balsas de riego y, por tanto, a reducir el grado de eutrofización en las mismas.

Estos resultados justifican la necesidad de seguir estudiando el efecto del ultrasonido sobre la comunidad fitoplanctónica a escala real y en condiciones naturales, ya que el tratamiento ultrasónico de baja potencia se presenta como una alternativa viable y eficiente para combatir los problemas derivados de la proliferación masiva de algas. Este tipo de tratamiento presenta una serie de características que le proporcionan ciertas ventajas respecto a otros tratamientos convencionales: por una parte, el ultrasonido no requiere de la adición de sustancias químicas, por lo que no genera ningún tipo de residuo; y, por la otra, se puede aplicar fácilmente a grandes volúmenes de agua. En definitiva, se trata de un tratamiento efectivo y de bajo coste que, además, presenta un enorme potencial respecto a sus aplicaciones sobre la calidad del agua de riego.

5. Agradecimientos

Parte de este trabajo se ha realizado gracias a la financiación del Ministerio de Economía y Competitividad a través de la concesión de una ayuda para contrato Torres Quevedo (PTQ 2013).

Bibliografía

[1] Doosti, M.R.; Kargar, R.; Sayadi, M.H. (2012). Water treatment using ultrasonic assistance. Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences, núm. 2, págs. 96-110.

[2] Gemmell, M.E.; Schmidt, S. (2012). Microbiological assesment of river water used for the irrigation of fresh produce in a sub-urban community in Sobantu, South Africa. Food Research International, núm. 47, págs. 300-305.

[3] Gómez-López, V.M.; Gil, M.I.; Allende, A.; Blancke, L.; Schouteten, L.; Selma, M.V. (2014). Desinfection capacity of high-power ultrasound against *E.Coli* O157:H7 in process water of fresh-cut industry. Food and Bioprocess Technology, núm. 7, págs. 2.251-2.273.

[4] Jachlewski, S.; Botes, M.; Cloete, T.E. (2013). The effects of ultrasound at 256 KhZ on *Microcystis aeruginosa*, with and without gas vacuoles. Water SA, núm. 39 (1), págs. 171-174.

[5] Joyce,M.J.; Wu, X.; Mason, T.J. (2010). Effects of ultrasonic frequency and power on algae suspensions. Journal of Environmental Science and Health. Part A, Toxic/hazardous substances & envitonmental engineering, núm. 45 (7), págs. 863-866.

[6] Kieffer, L.A.; De la Sierra, P.M.; Devercelli, M.; Luna, J.A.; Claret, M.; Leiz, E. (2015). Ensayos de laboratorio para el control de afloraciones algales mediante ultrasonidos. Ciencia, Docencia y Tecnología, núm. 25 (50), págs. 224-243.

[7] Li, J.; Long, H.; Song, C.; Wu, W.; Yeabah, T.O.; Qiu, Y. (2014). Study on the removal of algae from lake water and its attendant water quality changes using ultrasound. Desalination and Water Treat-, núm. 52, págs. 4.762-4.771.

[8] Nakayama, F.S.; Bucks, D.A. (1991). Water quality in drip/trickle.

[9] Rajasekhar, P.; Fan, L.; Nguyen, T.; Roddick, F.A. (2012). A review of the use of sonication to control cyanobacterial bloom. Water Research, núm. 46(14), págs. 4.319-4.329.

[10] Real Decreto 1620/2007 (2007). Real Decreto por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. Ministerio de la Presidencia.

[11] U.S. Environmental Protection agency (1999). Guidance manual for compliance with the interim enhanced surface water treatment rule: Turbidity provisions. Office of water. Document # EPA 815-R-99-010 USEPA.

[12] Villanueva, M.V.; Luna, M.C.; Gil, M.I.; Allende, A. (2015). Ultrasound treatments improve the microbiological quality of water reservoirs used for the irrigation of fresh produce. Food Research Int., núm. 75, págs. 140-147.

[13] Wang, S.; Wu, X.; Wang, Y.; Li, Q.; Tao, M. (2008). Removal of organic matter and ammonia nitrogen from landfill leachate by ultrasound. Ultrasonics Sonochem., núm. 15, págs. 933-937.

[14] Wu, X.; Joyce, E.M.; Mason, T.J. (2011). The effects of ultrasound on cyanobacteria. Harmful Algae, núm.10 (6), págs. 738-743.

[15] Yang, Z.; Kong, F.X.; Shi, X.L.; Zhang, M.; Cao, H.S. (2008). Grazing effect of *Ochromonas sp.* on morphological and physiological characteristics of *Microcystis aeruginosa.* Journal of Lake Science, núm. 20 (4), págs. 403-408

[16] Yu, G.; Zhao, C.; Liu, B.; Li, Q.; Gao, H. (2013). Removal of algae from raw water by ultrasonic irradiation and flocculation: a pilot scale experiment. Journal of Environmental Biology, núm. 34 (2), págs. 331-335.