

Fotocatálisis con dióxido de titanio nanoparticulado como método alternativo para depurar agua de mar destinada a la acuicultura Photocatalysis with nanoparticulated titanium dioxide as an alternative method for purifying seawater for aquaculture

José Bernal^{1*}, Miguel Guevara², Francisco Pérez³, Edgar Zapata-Vívenes⁴

¹Departamento de Biología, Núcleo de Sucre, Universidad de Oriente, Núcleo de Sucre, Cumaná, Venezuela.

²Instituto Superior de Formación Docente "Salomé Ureña". ISFODOSU-FEM. Santo Domingo, República Dominicana.

³Departamento de Física, Núcleo de Sucre, Universidad de Oriente, Núcleo de Sucre, Cumaná, Venezuela.

⁴Grupo de Investigación en Biología y Cultivo de Moluscos, Departamento de Acuicultura, Pesca y Recursos Naturales Renovables, Facultad de Ciencias Veterinarias, Universidad Técnica de Manabí, Manabí, Ecuador.

Correspondencia: José Bernal, **E-mail:** josefelix.bernal@gmail.com

Artículo original | Original article

Palabras clave

Fotólisis
Fotocatálisis
Bacterias
Hongos
Microalga
Nanopartícula
Rotífero

Keywords

Photolysis
Photocatalysis
Bacteria
Fungi
Nanoparticle
Rotifer

RESUMEN | El agua utilizada en acuicultura debe presentar excelente calidad microbiológica, de manera que garantice el éxito de la producción. En esta industria se utilizan frecuentemente algunos métodos de tratamientos microbicidas tales como filtración, cloración, luz UV, etc., que además de ser costosos, pueden generar compuestos tóxicos. En orden de buscar métodos alternativos para el tratamiento de agua para uso acuícola, la presente investigación evaluó las bondades de la fotólisis directa y la fotocatalisis heterogénea con nanopartículas de dióxido de titanio (FH-NPTiO₂) con la finalidad de cultivar microalgas y rotíferos a baja escala. Una reducción significativa fue observada en el crecimiento de mesófilos aerobios totales y hongos en el agua de mar tratada con FH-NPTiO₂, en comparación a la fotólisis directa. La calidad del agua tratada con FH-TiO₂ permitió crecimiento de la microalga *Tetraselmis chuii* y del rotífero *Brachionus plicatilis* (alimentados con *T. chuii*), similar al cultivo en agua filtrada y esterilizada con UV. Cuarenta y ocho horas fue el tiempo de desinfección efectivo (TDE) para el agua tratada con FH-NPTiO₂. Los resultados demuestran que la FH-NPTiO₂ es una tecnología que puede aportar soluciones innovadoras en el tratamiento del agua para la acuicultura.

ABSTRACT | The water used in aquaculture requires an excellent microbiological quality, in order to guarantee a successful production. Some methods of treatment such as filtration, chlorination, UV- light among others, are frequently used in the aquaculture industry, which are expensive and may generate toxic compounds. In order to search for alternative methods to treat water for aquaculture purpose, this study evaluated the benefits of direct photolysis and heterogeneous photocatalysis with nanoparticles of titanium dioxide (HP-NPTiO₂) in order to cultivate microalgae and rotifers on a low scale. A significant reduction in total aerobic mesophiles and fungi growth was observed in HP-NPTiO₂ treated seawater, in comparison with direct photolysis. The quality of seawater treated with HP-NPTiO₂ allowed the growth of *Tetraselmis chuii* (microalgae) and *B. plicatilis* (rotifer) fed with *T. chuii*, similar to the culture in filtered and UV-sterilized water (control). Forty-eight hours was the effective disinfection time (EDT) for the water treated with FH-NPTiO₂. The results showed that HP-NPTiO₂ is a technology which may provide innovative solutions in water treatment for aquaculture.

INTRODUCCIÓN

La acuicultura es una actividad con un componente técnico-científico que se encuentra asociada a disciplinas como biología, ingeniería y economía, con el fin de maximizar la producción de organismos acuáticos cultivados (FAO, 2006; Merino & Sal, 2007). Según la FAO (2020), la producción acuícola mundial alcanzó otro récord histórico de 114,5 millones de toneladas de peso vivo (en 2018) y para lograr su sustentabilidad es necesario intensificar los cultivos valiéndose de tecnologías que permitan el óptimo tratamiento del agua (Castelló, 1993; Merino & Sal, 2007). Recientemente, para el tratamiento de agua se ha hecho común la fusión del accionar de componentes microbicidas de características amigables al ambiente a fotoreactores (Yin & Atsushi, 2020). El uso de fotocatalizadores vincula procesos tanto

químicos como ecológicos para el tratamiento de aguas residuales (Gázquez *et al.* 2021). Es por ello que, aparte de los métodos convencionales, se ha propuesto la aplicación de métodos alternativos para la desinfección de agua, que sean menos costosos y más eficientes, como la fotocatalisis directa y heterogénea con nanopartículas de dióxido de titanio (FH-NPTiO₂).

La FH-NPTiO₂ exhibe propiedades fotocatalíticas y antibacteriales en un proceso promovido por energía ultravioleta (UV), capaz de excitar a un semiconductor, lo cual desarrolla en su superficie reacciones de óxido-reducción en la que participan la producción de especies reactivas del oxígeno (ROS del inglés). Las ROS son radicales libres altamente oxidantes ($\cdot\text{OH}$, y $\cdot\text{O}_2$) que dañan irreversiblemente estructuras moleculares de importancia en los microorganismos, impiden su recuperación celular y degradan la materia orgánica (Fujishima *et al.*, 2000; Ibáñez *et al.*, 2003; Gelover *et al.*, 2004). En los últimos años, se han realizado diversas investigaciones en referencia al uso de FH-NPTiO₂ (Cho *et al.* 2004, Rincón *et al.* 2005, Gogniat & Dukan 2007, Ubomba-Jaswa *et al.* 2008 y Pantoja-Espinoza *et al.* 2015). La FH-NPTiO₂ es una metodología que podría, a concentraciones adecuadas, aportar soluciones innovadoras para el tratamiento de agua destinada a las labores acuícolas. Esta investigación planteó evaluar la efectividad de la FH-NPTiO₂ en el tratamiento en agua de mar cruda destinada a cultivos (a baja escala) de la microalga *Tetraselmis chuii* y el rotífero *Brachionus plicatilis*.

METODOLOGÍA

Reactor solar

El concentrador solar estuvo conformado por dos tubos de vidrio de 5 mm de espesor, 3,6 cm de diámetro, 60 cm de largo y una reducción de 1,14 cm en cada extremo, conectados a la vez con mangueras plásticas en sus extremos (Fig. 1). Uno de los tubos drenaba el agua hacia un reservorio y el otro tubo se conectó a una bomba sumergible de ½ pulgada (HP/450 de 110 voltios y 8w de potencia). El reactor se colocó de tal manera que recibiera luz solar, realizándose los foto-tratamientos en las horas de mayor intensidad (10:00 – 15:00 h). El agua fue impulsada (33 mL/s) en un circuito cerrado.



Figura 1. Reactor solar conformado por dos tubos de vidrio (T) conectados a mangueras plásticas. Reservorio (R); bomba sumergible de ½ pulgada (B).

El dióxido de titanio nanoparticulado (NP-TiO₂; Sigma P-25) utilizado presentó un tamaño de 25 nm y un área superficial entre 51 y 55 m²/g. Se contrastaron tres concentraciones de NP-TiO₂ de manera ascendente acoplado a la fotocatalisis: 0, 0,25; 1,0 y 2,5 g/L, de manera separada. Adicionalmente, 4 L de agua de mar con salinidad de 37 ups fueron filtrada a través de un cartucho de 10 µm de tamaño de poro, siguiendo las recomendaciones de Fernández-Ibañez *et al.*, (1999); Malato *et al.* (2004) y Rincón *et al.* (2005). Para cada concentración de NP-TiO₂ se realizaron pruebas por cuadruplicado. Las muestras de agua, debidamente protegida de la luz solar, se hicieron recircular durante 15 min para asegurar la homogeneidad en la suspensión de NP-TiO₂. Transcurrido este tiempo, se expuso el sistema a la luz solar para iniciar así el proceso de fotocatalisis heterogénea durante 120, 150 y 180 min. El tratamiento sin NP-TiO₂ representó a la fotocatalisis directa (FD). Se tomaron tres muestras de 50 mL del agua de mar contenida en el reservorio cada 60 min. Se determinó la temperatura, pH y la salinidad mediante un termómetro manual, pHmetro (marca AP 10) y un refractómetro manual (Atago) de precisión de 0,1ups, respectivamente. Un análisis microbiológico fue llevado a cabo para determinar el número de unidades formadoras de colonias (UFC/mL) de bacterias aerobias y hongos, siguiendo las recomendaciones de la APHA (1998). Se realizaron tres diluciones seriadas según recomendaciones de Madigan *et al.* (2000). El agua de mar previamente tratada con la concentración de NP-TiO₂/L donde se obtuvo la mayor capacidad microbicida, fue seleccionada para iniciar los cultivos de *Tetraselmis chuii* y *Brachionus plicatilis*.

Cultivo *Tetraselmis chuii*

Se cultivó una cepa de *T. chuii*, perteneciente al Banco de Germoplasma de Algas de la Universidad de Oriente, en agua de mar previamente tratada con 0,25 g NP-TiO₂/L. Esta concentración fue usada de acuerdo a su efectividad para inhibir el crecimiento microbiano. Al mismo tiempo, se realizó un cultivo la misma especie de microalga usando agua de mar filtrada y esterilizada con UV, la cual sirvió como control. Esta agua fue pasada a través de filtros de cartucho de 10 µm de tamaño de poro y esterilizada en una autoclave. Los cultivos de microalgas fueron realizados por triplicado, durante 8 días, en matraces de 250 mL de capacidad que contenían 150 mL de agua de mar proveniente del fototratamiento y enriquecida con el medio f/2 (Guillard & Ryther, 1962). Los cultivos se iniciaron con un inóculo de 1x10⁵ cel/mL mantenidos bajo una aireación de 100 mL/min, irradiancia continua (100 µmoles/m²/s) y 23 ±1 °C. Cada 48 h, la densidad celular fue estimada a través de una cámara de Neubauer. Estos datos se utilizaron para determinar las tasas instantáneas de crecimiento (Madigan *et al.* 2000).

Cultivo *Brachionus plicatilis*

La cepa de *B. plicatilis* fue aislada desde las lagunas hipersalinas de Araya, Venezuela (10°30'-10°40'N y 63°32'-64°21'W) y conservada en la colección de cultivos planctónicos del Laboratorio de Acuicultura, Instituto Oceanográfico de Venezuela. Los cultivos de *B. plicatilis* fueron realizados durante 8 días en matraces de 500 mL que contenían agua de mar proveniente del fototratamiento seleccionado (0,25 g NP-TiO₂ /L). Todos los tratamientos fueron realizados por cuadruplicado. Los cultivos se iniciaron con una densidad de 100 rotíferos/mL, con aireación continua (50 mL/min) y se alimentaron al inicio del ensayo con una dieta simple de la microalga *T. chuii* (900.000 cel/mL). Paralelamente se colocó un cultivo control, alimentados con la misma microalga, cultivada con agua de mar filtrada y esterilizada como se indicó previamente. Cada 48 horas se tomaron alícuotas de los cultivos para determinar densidad poblacional, tasa de crecimiento instantáneo, fecundidad y productividad (rotífero/L/día) usando una cámara de Bogorov bajo una lupa estereoscópica (Navarro & Yufera, 1998).

Análisis estadísticos

Se emplearon las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene para evaluar las suposiciones de normalidad y homocedasticidad, respectivamente (Sokal & Rohlf, 2012). Se utilizó un análisis de varianza de una vía (ANOVA) y la prueba *a posteriori* de Tukey para verificar si existían diferencias significativas en el crecimiento de la microalga *T. chuii* y el rotífero *B. plicatilis* cultivados con los diferentes tratamientos de agua. Las diferencias estadísticas entre las medias de los tratamientos fueron probadas con un alfa de 0,05.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los ensayos de la fotocatalisis heterogénea solo la concentración de 0,25 g/L de NPTiO₂ produjo inhibición significativa del crecimiento microbiano ($p < 0,001$), con mayor efecto sobre las bacterias mesófilas (Fig. 2). La efectividad microbicida fue evidenciada mayoritariamente a los 180 min. En análisis previos donde se aplicó 1,0 y 2,5 g/L no se observó inhibición del crecimiento bacteriano ni fúngico (datos que no se muestran). En estas dos últimas concentraciones, la solución de NPTiO₂ se tornó heterogénea, lo cual disminuye la penetración efectiva de la luz solar, causando un fenómeno de dispersión de la misma y disminuyendo así la fotoexcitación (Sakkas *et al.* 2007). Según Fernández *et al.* (1999), Malato *et al.* (2004) y Rincón *et al.* (2005) la concentración óptima de NPTiO₂, tanto para la degradación fotocatalítica de compuestos orgánicos como para la fotodesinfección, puede oscilar entre 0,1 y 5,0 g/L. Estos autores consideran que la concentración óptima de TiO₂ depende principalmente de la naturaleza del compuesto y la geometría del reactor.

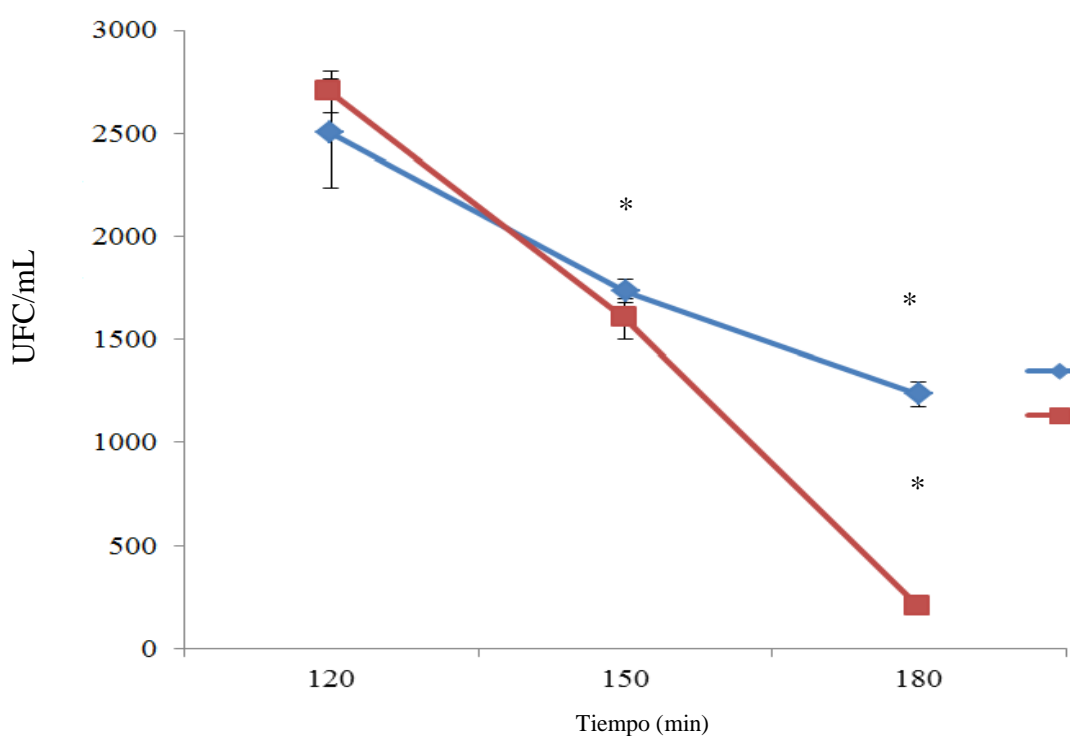


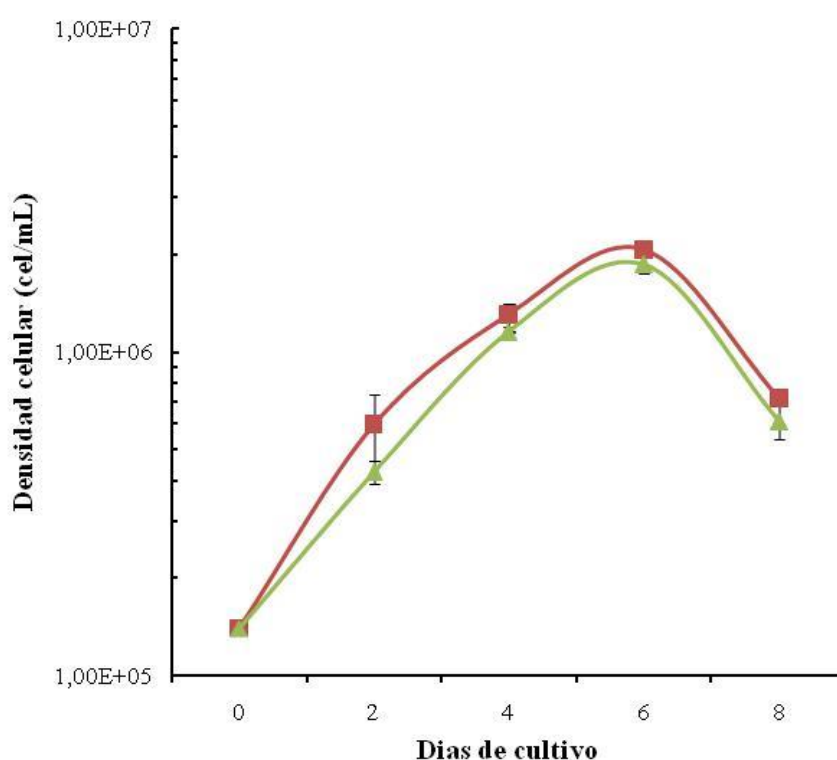
Figura 2. Unidades formadoras de colonias (UFC/mL) de bacterias mesófilas (cuadrados) y de hongos (rombos) en el agua de mar sometida a FH-TiO₂ (0,25 g/L) durante diferentes intervalos de tiempo. (*) muestran diferencias significativas ($p < 0,001$)

Análisis físico-químico

En la Tabla 1, se muestra una disminución del pH del agua sometida a FH-NPTiO₂, desde 7,09 (tiempo inicial) hasta 6,02 (tiempo final). Bajo estas condiciones, se hace evidente el consumo de iones OH⁻ que tiene lugar en la interfase sólido-líquido de las partículas del semiconductor y a su vez, a la acumulación de ácidos alifáticos producto de degradación bacteriana (Fernández-Ibañez *et al.*, 2000). Concomitantemente, un aumento de temperatura fue observada desde 30,6 °C hasta 35,6 °C asociada a la incidencia solar (Fig. 3). Existe una relación directa entre las partículas suspendidas, la incidencia solar y la temperatura del agua, ya que las partículas suspendidas de NPTiO₂ pueden absorber la radiación infrarroja (Gómez-Couso *et al.*, 2009 & Mandal, 2014).

Tabla 1. Valores de pH y temperatura del agua de mar sometida a FH-NPTiO₂ (0,25 g/L) durante diferentes intervalos de tiempos.

| Tiempo (min) | pH | Temperatura (°C) |
|--------------|------|------------------|
| 0 | 7,09 | 30,6 |
| 30 | 7,04 | 31,9 |
| 60 | 7,00 | 32,4 |
| 90 | 6,96 | 33,2 |
| 120 | 6,94 | 33,9 |
| 150 | 6,93 | 34,5 |
| 180 | 6,92 | 35,6 |

**Figura 3.** Crecimiento poblacional de *Tetraselmis chuii* cultivada en agua de mar tratada con FH-NPTiO₂ (triángulos) y por luz UV (cuadrados) durante 180 min.

Análisis microbiológicos

Las bacterias mesófilas (UFC/mL) para las concentraciones 1,0 y 2,5 g/L de NPTiO₂ fueron incontables durante los primeros 90 min de exposición solar. Sin embargo, con la concentración de 0,25 g/L a partir de los 120 min, se produjo un decrecimiento significativo de 2700 UFC/mL (120 min) hasta 207 UFC/mL (180 min). La disminución del crecimiento bacteriano obtenido con FH-TiO₂ concuerda con los resultados obtenidos por Maness *et al.* (1999) y Rodríguez *et al.* (2007), quienes lograron entre 98-100% de mortalidad de *E. coli* en muestras de agua tratadas con FH- NPTiO₂ durante 30-120 min. En la disminución del crecimiento fúngico obtenido con FH- NPTiO₂, también fue efectiva la concentración de 0,25 g/L a partir de los 120 min, descartándose las otras dos concentraciones (1,0 y 2,5 g/L). Los resultados de la disminución del crecimiento fúngico obtenidos en la FH-TiO₂ se asemejan con los reportados por otros investigadores, resultando efectivo para inhibir el crecimiento de hongos. De esta manera, Matsunaga *et al.*

(1985) lograron eliminar al hongo unicelular *Saccharomyces cerevisiae* de muestras de agua, después de 120 min de exposición a FH-TiO₂. Caballero (2012) demostró la inactivación de hongos fitopatógenos, presentes en muestras de suelo, al exponerlos durante 6 horas a la FH-TiO₂. De igual manera, Polo (2012) logró reducir significativamente el crecimiento de los hongos *Fusarium* y *Phytophthora*, presentes en muestras de agua, al exponerlos durante 5 horas a FH-TiO₂.

Cultivo de *Tetraselmis chuii* y *Brachionus plicatilis*

El tratamiento del agua a la concentración de 0,25 g/L NPTiO₂ no afectó el crecimiento de la microalga *T. chuii*, al compararlo con el cultivo con solo agua de mar filtrada y esterilizada por UV (control). Los parámetros poblacionales en ambos cultivos no mostraron diferencias significativas ($F=1,23$; $p > 0,05$; Fig. 3), no presentaron fase de adaptación y la fase de crecimiento exponencial se prolongó hasta el sexto día, para luego entrar en fase de descenso el octavo día. La densidad poblacional máxima fue de 2×10^6 cel/mL, la tasa de crecimiento instantáneo (K) 0,6 div/día y tiempo de duplicación (TD) 1,67 días.

En el cultivo de *B. plicatilis*, tanto el grupo alimentado con *T. chuii* cultivada en agua de mar filtrada y esterilizada en autoclave (control) como en los alimentados con *T. chuii* cultivada agua de mar tratada con FH-NPTiO₂ (0,25 g/L NPTiO₂) durante 180 min, no mostraron diferencias significativas ($F=0,99$; $p > 0,05$) en sus parámetros de crecimiento, y no presentaron fase de adaptación (Fig. 4). La fase de crecimiento exponencial se prolongó hasta el cuarto día, obteniéndose una densidad máxima de 160 rot/mL. La tasa de crecimiento instantáneo, tiempo de duplicación, fecundidad y productividad alcanzaron valores de 0,2 rot/día; 5 días, 1 huevo/hembra y 25000 rot/L/día, respectivamente.

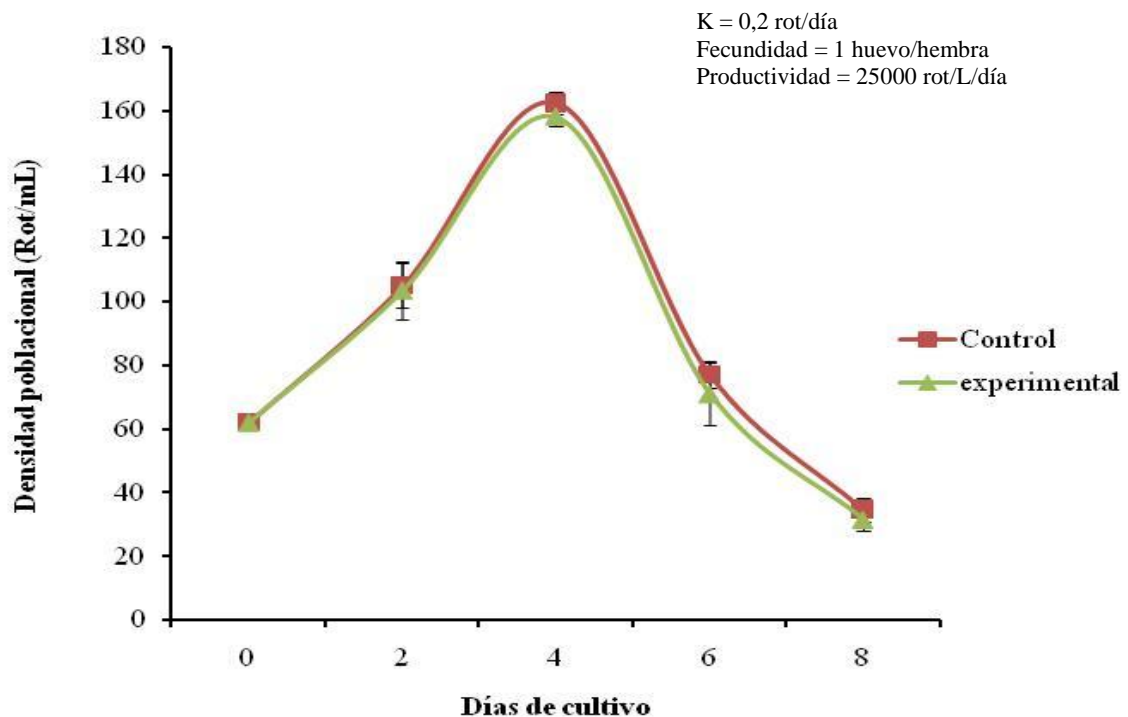


Figura 4. Crecimiento poblacional del rotífero *Brachionus plicatilis* alimentado con la microalga *Tetraselmis chuii*, cultivada en agua de mar tratada con FH-NPTiO₂ (0,25 g/L) (triángulos) y por luz UV (cuadrados) durante 180 min.

La carga bacteriana del agua de mar, posterior a la aplicación de FH-NPTiO₂ durante 180 min, puede compararse a los valores permisibles oficiales establecidos para aguas destinadas a la cría, explotación y mantenimiento de la vida acuática en la Norma Oficial Mexicana, NOM-027-SSA1-1993, la cual establece que el límite máximo de mesófilos aerobios en el agua de uso acuícola es de 10.000.000 UFC/mL. Sin embargo, las normativas venezolanas de calidad de agua destinadas a la cría, explotación y mantenimiento

de la vida acuática utilizan los coliformes totales y fecales como indicadores de calidad. La ventaja que presenta la FH-NPTiO₂, a diferencia de los tratamientos usados tradicionalmente, es que no origina productos subletales en comparación con el cloro (en forma de hipoclorito). Además, la Agencia de Drogas y Alimentos de los Estados Unidos (FDA-USA) ha permitido la inclusión del NPTiO₂ como ingrediente para cremas dentales, cápsulas y suspensiones orales y preparaciones dermatológicas; también es usado en pinturas, papeles y jugos (Skocaj et al. 2011).

A pesar del amplio uso del NPTiO₂, su implementación para el tratamiento de aguas es un tema polémico, ya que muchos investigadores reportan que el NPTiO₂ pudiera ser tóxico en los ecosistemas y en los seres humanos, dado que pueden originar inhibición en el crecimiento de la microalgas p.e. *Chlorella vulgaris* (Xia et al., 2018; Adochite et al., 2021), y en algunos microinvertebrados puede inducir una condición de estrés oxidativo en presencia de luz UV-A, lo cual conlleva a daños celulares, genotoxicidad, inflamación, alteraciones en las respuestas inmunológicas, entre otros perjuicios moleculares y fisiológicos (Skocaj et al., 2011; Pérez-Arizti et al., 2020; Santana et al., 2021). Sin embargo, nuestro estudio demuestra la inocuidad del NPTiO₂ para la microalga *T. chuii* y el rotífero *B. plicatilis*, garantizando así su crecimiento. Estos hallazgos coinciden con los reportados para otros organismos modelos tales como *Daphnia magna* (Zhu et al. 2010), embriones del pez zebra *Danio rerio* (0,5 g NPTiO₂/L; Zhu et al. 2008), *Artemia salina* (0.01-0,1 g NPTiO₂/L; Ates et al., 2013) y la abulón *Haliotis diversicolor* (0.001- 0.01 mg/L; Zhu et al. 2010). Este último planteamiento permite sugerir que las investigaciones relacionadas con el uso de FH-NPTiO₂ para la depuración de agua con fines acuícolas deben continuar a fin de asegurar su inocuidad.

CONCLUSIONES

La fotocatálisis con NPTiO₂ demostró ser efectiva en la inhibición del crecimiento de bacterias y hongos, no afectando el crecimiento y desarrollo de *T. chuii* y *B. plicatilis*. La aplicación de la FH-TiO₂ pareciera ser una alternativa prometedora en el tratamiento de aguas destinadas para las actividades acuícolas, debido principalmente a las ventajas de orden económico y ambiental.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del Grupo de Investigaciones en Microalgas, Postgrado en Ciencias Marinas del Instituto Oceanográfico de Venezuela, a la Universidad de Oriente, al haber apoyado esta investigación mediante la aprobación del proyecto No CI 02-030601-1903-14.

REFERENCIAS

- Adochite C., Andronic L. (2021). Aquatic toxicity of photocatalyst nanoparticles to green microalgae *Chlorella vulgaris*. *Water*, 13: 77. <https://doi.org/10.3390/w13010077>
- American Public Health Association (APHA). (1998). American Water works Association & Water Environment Federation. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20th Edition. American Public Health Association (APHA). Washington, DC. USA.
- Ates M., Daniels J., Arslan Z., Farah I.O. (2012). Effects of aqueous suspensions of titanium dioxide nanoparticles on *Artemia salina*: assessment of nanoparticle aggregation, accumulation, and toxicity. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185(4): 3339–3348. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2794-7>
- Castelló F. (1993). Acuicultura marina. 1ra edición, Ediciones Universidad de Barcelona, España. 739 pp.

- Cho M., Chung H., Choi W., Yoon J. (2004). Linear correlation between inactivation of *E. coli* and OH radical concentration in TiO₂ photocatalytic disinfection. *Water Research*, 38: 1069–1077.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). (2006). State of world aquaculture 2006. Fisheries Technical Papers 500. <https://www.fao.org/3/a0874e/a0874e00.htm>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). (2020). El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2020. Roma. 231 pp. <https://doi.org/10.4060/ca9231es>
- Fernández-Ibañez P., Malato S., De las Nieves F. J. (1999). Relationship between TiO₂ particle size and reactor diameter in solar photoreactors efficiency. *Catalysis Today*, 54: 195-204.
- Fernández-Ibañez, P., de las Nieves F. J., Malato S. (2000). Titanium dioxide/electrolyte solution interface: Electron transfer phenomena. *Journal of Colloid and Interface Science*, 227: 510-516.
- Fujishima A., Rao T., Tryk D. (2000). Titanium dioxide photocatalysis. *Journal of Photochemistry and Photobiology*, 1: 1-21.
- Gázquez M.J., Pérez Moreno S.M., Bolívar J.P. (2021). TiO₂ as white pigment and valorization of the waste coming from its production, Editor(s): Parrino F., Palmisano L., En: Metal Oxides, Titanium Dioxide (TiO₂) and its applications, Elsevier, Pp. 311-335, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819960-2.00011-0>.
- Gelover, S., Leal M., Reyes K., Gómez L. (2004). Desinfección de agua mediante fotocátalisis solar. *Anuario Imta*, 77-82.
- Gogniat, G., Dukan S. (2007). TiO₂ photocatalysis causes DNA damage via Fenton reaction-generated hydroxyl radicals during the recovery period. *Applied and Environmental Microbiology*, 73(23): 7740–7743.
- Gómez-Couso H., Fontan-Sainz M., Sichel C., Fernández-Ibañez P., Ares-Mazas E. (2009). Efficacy of the solar water disinfection method in turbid waters experimentally contaminated with *Cryptosporidium parvum* oocysts under real field conditions. *Tropical Medical and International Health*, 14: 620–627.
- Guillard R., Ryther J. (1962). Studies of marine planktonic diatoms, I. *Cyclotella* Hustedt and *Detonula confervacea* (Cleve) Gran. *Canadian Journal of Microbiology*, 8: 229-325. <https://doi.org/10.1139/m62-029>
- Juhua H., Ashutosh K., Musharib K., Irene M.C. Lo. (2021). Critical review of photocatalytic disinfection of bacteria: from noble metals- and carbon nanomaterials-TiO₂ composites to challenges of water characteristics and strategic solutions, *Science of The Total Environment*, 758: 143953. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143953>.
- Ibañez J. A., Litter M., Pizarro M. (2003). “Photocatalytic Bactericidal Effect of TiO₂ on *Enterobacter cloacae* Comparative Study with other Gram (-) bacteria”. *Journal of Photochemistry and Photobiology Chemistry*, 157: 81-85.
- Madigan M., Martinko J., Parker J. (2000). *Biología de los Microorganismos*. 9na edición. Prentice Hall. Inc. New Jersey. 1089 pp.
- Malato S., Blanco J., Maldonado M., Fernández P., Alarcón D., Collares M., Farinha J., Correia J. (2004). Engineering of solar photocatalytic collectors. *Solar Energy*, 77: 513-524.
- Mandal, H. K. (2014). Assessment of wastewater temperature and its relationship with turbidity. *Science and Technology*, 6(1): 258-262.

- Maness P., Smolinski S., Blake D., Huang Z., Wolfrum E., Jacoby W. (1999). Bactericidal activity of photocatalytic TiO₂ reaction: toward an understanding of its killing mechanism. *Applied and Environmental Microbiology*, 65 (9): 4094–4094.
- Merino, O., Sal F. (2007). *Sistemas de Recirculación y Tratamiento de agua*. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos. Argentina. 37 pp.
- Matsunaga T., Tomoda R., Nakajima T., Wake H. (1985). Photoelectrochemical sterilization of microbial cells by semiconductor powders. *FEMS Microbiology Letters*, 29: 211-214
- Navarro N., Yúfera M. (1998). Influence of the food ration and individual density on production efficiency of semicontinuous cultures of *Brachionus* fed microalgae dry powder. *Hydrobiologia*, 387/388:483-487.
- NOM-027-SSA1-1993. (1993). Norma Oficial Mexicana *Bienes y Servicios*. Productos de la pesca. Pescados frescos-refrigerados y congelados. Especificaciones sanitarias.
- Pantoja-Espinoza J. C., Proal-Nájera J. B., García-Roig M., Cháirez-Hernández I. Osorio-Revilla G. I. (2015). Eficiencias comparativas de inactivación de bacterias coliformes en efluentes municipales por fotólisis (UV) y por fotocátalisis (UV/TiO₂/SiO₂). Caso: depuradora de aguas de Salamanca, España. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 14(1): 119-135.
- Pérez-Arizti J. A., Ventura-Gallegos J. L., Galván Juárez R. E., Ramos-Godinez M. del P., Colín-Val Z., López-Marure R. (2020). Titanium dioxide nanoparticles promote oxidative stress, autophagy and reduce NLRP3 in primary rat astrocytes. *Chemico-Biological Interactions*, 108966. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2020.108966>
- Polo M. (2012). Inactivación de Fitopatógenos presentes en Agua mediante fotocátalisis Solar. Tesis doctoral. Universidad de Almería, España. pp 335.
- Rincón A. G., Pulgarín C. (2004). Effect of pH, inorganic ions, organic matter and H₂O₂ on *E. coli* K12 photocatalytic inactivation by TiO₂: implications in solar water disinfection. *Applied Catalysis B: Environmental*. 51: 283–302
- Rincón, A., Giraldo S., Pulgarín C. (2005). Desinfección de agua por fotocátalisis. Aspectos básicos En: *Solar Safe Water*. Capítulo 13. San Martin, Argentina. 203-226.
- Rodrigues C., Ziulli R., Guimarães J. (2007). Inactivation of *Escherichia coli* in Water by TiO₂-assisted disinfection using Solar Light. *Journal Brazilian Chemistry Society*, 18(1): 126-134.
- Sakkas V., Calza P., Medana C., Villioti A., Baiocchi C., Pelizzetti E., Albanis T. (2007). Heterogeneous photocatalytic degradation of the pharmaceutical agent salbutamol in aqueous titanium dioxide suspensions. *Applied Catalysis B: Environmental*. 77: 135–144.
- Santana T. Dos S., dos Santos M.B., Winkaler E.U. (2021). Enzyme activity of the tilapia (*Oreochromis niloticus*) antioxidant defense system as a model of exposure to the titanium dioxide (TiO₂) nanoparticle. *Research, Society and Development*. 10(5): e46810512829, <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i5.12829>.
- Skocaj M., Petkovic F. J., Novak S. (2011). Titanium dioxide in our everyday life; is it safe?. *Radiology and Oncology*, 45(4): 227-247.
- Sokal R., Rohlf J. (2012). *Biometry: the principles and practice of statistics in biological research*, Fourth edition. WH Freeman and Company. San Francisco.

- Shu Y., Atsushi M. (2020). Environmental-friendly synthesis of high-efficient composite-type photocatalysts. In: Wang X., Anpo M., Fu X. (Eds), *Current Developments in Photocatalysis and Photocatalytic Materials*, Elsevier, Pages 159-177, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819000-5.00011-4>.
- Soltani T., Byeong-Kyu L. (2020). 17-Photocatalytic and photo-fenton catalytic degradation of organic pollutants by non-TiO₂ photocatalysts under visible light irradiation, Editor(s): Xinchun Wang, Masakazu Anpo, Xianzhi Fu, *Current Developments in Photocatalysis and Photocatalytic Materials*, Elsevier, Pp. 267-284. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819000-5.00017-5>.
- Vignesh T., Sruthi A. A., Seenivasan R., Chandrasekaran N., Mukherjee A. (2021). Toxicity evaluation of nano-TiO₂ in the presence of functionalized microplastics at two trophic levels: Algae and crustaceans, *Science of the Total Environment*, 784: 147262. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147262>.
- Ubomba-Jaswa E., Boyle M., McGuigan K. (2008). Inactivation of enteropathogenic *E. coli* by solar disinfection (SODIS) under simulated sunlight conditions. *Journal of Physics*, 10: 1742-6596.
- Xia B., Sui Q., Sun X., Han Q., Chen B., Zhu L., Qu K. (2018). Ocean acidification increases the toxic effects of TiO₂ nanoparticles on the marine microalga *Chlorella vulgaris*. *Journal of Hazardous Materials*, 346, 1–9.
- Zhu X., Zhu L., Li Y., Qi R., Duan Z., Lang Y. P. (2008). Comparative toxicity of several metal oxide nano-particle aqueous suspensions to zebrafish (*Danio rerio*) early developmental stage. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 43: 278–284.
- Zhu X., Chang Y., Chen, Y. (2010). Toxicity and bioaccumulation of TiO₂ nanoparticle aggregates in *Daphnia magna*. *Chemosphere*, 78: 209–215.
- Zhu X., Zhou J., Cai, Z. (2011). The toxicity and oxidative stress of TiO₂ nanoparticles in marine abalone (*Haliotis diversicolor supertexta*). *Marine Pollution Bulletin*, 63, 334–338.

Recibido: 13-12-2021
Aprobado: 23-02-2022
Versión final: 12-03-2022

