

# Luz solar y TiO<sub>2</sub> para eliminar patógenos contenidos en agua de pozo: comportamiento de la fotocatalisis.

Dulce Diana Cabañas Vargas\*, Valeria Mota Poot, Juan Enrique Ruiz Espinoza

Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Autónoma de Yucatán. Periférico Norte km 33.5, Tablaje Catastral 13615, Colonia Chuburná de Hidalgo Inn, CP 97203

Fecha de recepción: 15 de mayo de 2018 — Fecha de aceptación: 09 de enero de 2019

## Resumen

Se utilizaron muestras de agua de 5 diferentes pozos someros localizados en la comisaría de Candel, municipio de Mérida en el estado de Yucatán. A cada muestra se le midió in situ la temperatura y el pH, posteriormente cada muestra se analizó para verificar la existencia de Coliformes Totales y Fecales. Las muestras fueron sometidas a tratamiento mediante fotocatalisis con TiO<sub>2</sub> y fotólisis conservando las condiciones de temperatura y pH a las cuales fueron extraídas, es decir, sin acondicionamiento previo. El objetivo del presente trabajo fue observar la capacidad desinfectante de la fotocatalisis con TiO<sub>2</sub> aplicada a muestras de agua de pozo. Para las condiciones y tipo de agua utilizados en el presente trabajo, se alcanzó un porcentaje de remoción de Coliformes de 53.7% con una concentración de 1 mg/ml de TiO<sub>2</sub> y un tiempo de reacción de 60 minutos.

**Palabras clave:** Fotocatalisis, Fotólisis, TiO<sub>2</sub>, Desinfección, Patógenos

## Solar light and TiO<sub>2</sub> to eliminate pathogens contained in well water: behavior of photocatalysis

### Abstract

Water samples from five different shallow wells located in a rural town near to Merida in the state of Yucatán, were used. Temperature and pH were measured in situ for each sample, then Total and Faecal Coliforms were tested at the laboratory for each sample. Samples were treated by photocatalysis with TiO<sub>2</sub> and photolysis, preserving the temperature and pH conditions at which they were extracted, that is, without prior conditioning. The objective of the present work was to observe the disinfectant capacity of photocatalysis with TiO<sub>2</sub> applied to well water samples. For the conditions and type of water used in the present work, a percentage of Coliform removal of 53.7% with a concentration of 1 mg/ml of TiO<sub>2</sub> and a reaction time of 60 minutes was reached.

**Keywords:** Photocatalysis, Photolysis, TiO<sub>2</sub>, disinfection, Pathogens

---

\*[cvargas@orreo.uady.mx](mailto:cvargas@orreo.uady.mx)

Nota: Este artículo de investigación es parte de Ingeniería-Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 23, No. 1, 2019, ISSN: 2448-8364

## Introducción

El crecimiento económico y demográfico está generando problemas en los sistemas de abastecimiento de aguas en todo el mundo. En muchas regiones, el acceso insuficiente al agua de calidad adecuada para satisfacer el consumo doméstico, industrial, de riego y de otras necesidades de la población es ya un problema cotidiano, agravado también por el cambio climático (Hagemann *et al.* 2013).

El agua potable es un requisito esencial para los pobladores de cualquier sitio, la eficacia de las técnicas de desinfección es imprescindible para la inactivación adecuada de los microorganismos y la protección de la salud pública. Las técnicas de desinfección más populares hoy en día implican compuestos químicos, filtración o radiación (por ejemplo, cloración, ozonización, radiación UV, etc.), que pueden actuar por diferentes medios como la inhibición de la actividad enzimática o la destrucción de los componentes celulares. Sin embargo, estas técnicas pueden presentar desventajas, como los subproductos tóxicos generados durante la cloración, el alto costo de la ozonización, la falta de tecnología, personal técnico calificado, etc.; por lo que las investigaciones se han enfocado al desarrollo de métodos alternativos, algunos de ellos económicos y de fácil ejecución. Entre estos, la fotocatalisis ha surgido como una técnica prometedora para la inactivación microbiana en diversas matrices acuosas, que incluyen diversos tipos de bacterias, hongos, virus y esporas. El Dióxido de Titanio ( $\text{TiO}_2$ ) es ampliamente utilizado como fotocatalizador en estos procesos debido a su alta eficiencia, baja toxicidad, estabilidad físico-química y bajo costo (Venieri *et al.*, 2014; Solsona y Méndez, 2002).

La creciente divergencia entre la demanda de agua y el abastecimiento de la misma, exacerbada por la contaminación del agua y la subinversión en la infraestructura hídrica, ha llevado a una reconsideración de los sistemas

tradicionales centralizados de tratamiento y distribución del agua. Una propuesta emergente para mejorar la calidad del agua de abastecimiento sugiere el tratamiento descentralizado y la reutilización aguas pluviales para complementar el suministro de agua convencional (Mukheibir *et al.* 2015). Este enfoque propone la instalación de varios sistemas descentralizados que puedan formar una red integrada, los sistemas pueden estar cercanos a los usuarios y con esto reducir en costos de energía para la distribución. Una opción para tratamientos sencillos modulares y descentralizados podrían ser los procesos avanzados de oxidación que permiten la degradación de compuestos recalcitrantes y la inactivación de patógenos mediante la producción de especies reactivas de oxígeno y la exposición a la luz ultravioleta (Qu *et al.* 2013). La nanotecnología permite el uso de catalizadores de bajo costo, por ejemplo el  $\text{TiO}_2$  activado por luz ultravioleta (McCullagh *et al.* 2007), que pueden utilizarse para la eliminación de patógenos y la degradación de otro tipo de compuestos (por ejemplo los hidrocarburos). De acuerdo con Binas *et al.* (2017), la fotocatalisis con  $\text{TiO}_2$  es una técnica versátil que ha probado ser efectiva para la eliminación de patógenos y contaminantes químicos en agua.

### Uso del $\text{TiO}_2$

El Dióxido de Titanio ( $\text{TiO}_2$ ) presenta una elevada estabilidad química y es apto para trabajar en un amplio rango de pH. Además, su costo es bajo ya que el titanio es el noveno compuesto más abundante en la corteza terrestre. Se utiliza para numerosas aplicaciones y productos como pinturas, protectores solares, medicamentos, pasta de dientes, etc. Puede encontrarse en estado oxidado como tres formas cristalinas distintas: brookita, rutilo y anatasa, siendo esta última la más activa desde el punto de vista fotocatalítico.

La oxidación fotocatalítica consiste en el empleo de radiación ultravioleta (UV) y catalizadores con el objeto de formar radicales hidroxilo, los cuales posteriormente tendrán un efecto oxidante sobre ciertos elementos. En este proceso la oxidación tiene lugar directamente en la superficie de la partícula que se utiliza como catalizador o semiconductor ( $\text{TiO}_2$ ) siendo la radiación UV la única fuente de energía (Garcés, *et al.* 2004). En el proceso de fotocatalisis luz y catalizador son necesarios para alcanzar o acelerar una reacción química. Existen múltiples fotosensibilizadores tales como:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , y  $\text{TiO}_2$ . Sin embargo, el más usado en aplicaciones fotocatalíticas es el dióxido de titanio en forma de anatasa 99% y rutilo 1%, ya que presenta una mayor actividad fotocatalítica, no es tóxico, es estable en soluciones acuosas y no es costoso (Brame, *et al.* 2011 y Lijuan, *et al.* 2012).

El proceso fotocatalítico tiene lugar a partir de la irradiación del  $\text{TiO}_2$  con luz de una energía suficiente como para igualar o superar el band-gap del semiconductor, produciendo la excitación de un electrón de la banda de valencia (BV) a la banda de conducción (BC). De este modo se crean pares electrón-hueco ( $e^-/h^+$ ), que pueden migrar a la superficie del catalizador, quedando atrapadas en sitios superficiales y capaces de reaccionar con las especies adsorbidas. Los huecos (estados vacíos) que se forman en la banda de valencia del sólido, reaccionan con especies donadoras de electrones, como moléculas de agua o iones hidroxilos unidos a la superficie del catalizador, generando los radicales hidroxilos ( $\text{OH}^\cdot$ ), principales responsables de la degradación de la materia orgánica. A su vez, los electrones que llegan a la banda de conducción pueden reaccionar con una especie aceptora como el  $\text{O}_2$ , dando lugar a radicales  $\text{O}_2^\cdot$ , que participan adicionalmente en la oxidación de la materia orgánica. La eficiencia final de la reacción fotocatalítica depende de muy diversos factores que determinan en

definitiva el grado de oxidación total de la materia orgánica (Prieto, *et al.*, 2013).

Otros parámetros importantes relacionados con el grado total de mineralización son la masa de catalizador, la concentración inicial de contaminante, el pH del medio, la longitud de onda de la radiación, el flujo de radiación y el tipo de agente oxidante y su concentración. Por otro lado, la posibilidad de utilizar la radiación solar como fuente primaria de energía, añade un alto valor de sostenibilidad al proceso (Schneider, *et al.*, 2014).

La fotólisis (luz ultravioleta) tiene un efecto bactericida que no es suficiente con especies resistentes. Al adicionar un catalizador (fotocatalisis) se produce un efecto que se basa en la generación de radicales hidroxilo que atacan a los componentes de la pared celular de los organismos, alterando su funcionalidad y conduciendo hacia la muerte celular, dando como resultado un tratamiento efectivo para la inactivación de microorganismos resistentes. El efecto bactericida de la fotocatalisis con  $\text{TiO}_2$  consiste en la generación de un flujo de fotones, no sólo para un ataque directo a los microorganismos sino también para inducir la generación de las especies oxidantes sobre la superficie del  $\text{TiO}_2$  que subsecuentemente atacan a las bacterias (Rincón y Pulgarín, 2003).

Existen varios parámetros que influyen cualitativa y cuantitativamente en el proceso de óxido-reducción fotocatalítico, los más comunes son las características del agua a tratar y los que se describen a continuación:

- **Catalizador:** cuanto mayor sea la dosis del catalizador, mayor será la velocidad de la reacción y se cree que mayor será la eficiencia obtenida. El aumento en la eficiencia no resulta siempre cierto ya que el efecto de la turbidez ocasionada por sus partículas también aumenta, dificultando la difusión de la luz ultravioleta y disminuyendo la eficiencia de la

fotocatálisis. Por lo tanto, es necesario encontrar la dosis del catalizador óptima en cada caso para no producir un efecto adverso.

- **Oxígeno:** es el oxidante más empleado ya que es el más barato y no compite con el sustrato en proceso de adsorción. Se ha comprobado que cuando desaparece el oxígeno disuelto en el agua y no existe ninguna otra especie oxidante el proceso fotocatalítico se detiene totalmente (Garcés, *et al.* 2004 y Schneider, *et al.* 2014).
- **Temperatura y pH:** la variación de temperatura no afecta significativamente la velocidad de las reacciones fotocatalíticas. Aparentemente el pH no afecta notablemente este tratamiento ya que se han obtenido buenos resultados empleando TiO<sub>2</sub> a diferentes rangos de pH, pero también se ha comprobado que éste afecta el tamaño de las partículas, la carga superficial y las posiciones de los máximos y mínimos de las bandas del TiO<sub>2</sub> debido a su carácter anfotérico. Debe trabajarse a un pH diferente del punto isoeléctrico para el TiO<sub>2</sub> (pH 7), donde la superficie no esté cargada (Shatkhande, *et al.* 2001).

La fotocatalisis con TiO<sub>2</sub>, es un proceso que destruye sustancias tóxicas y las complejas o recalcitrantes las convierte hasta compuestos generalmente inocuos ó mas fáciles de tratar. En el caso de sustancias orgánicas, los subproductos que se obtienen son agua, CO<sub>2</sub> y ácidos inorgánicos. Es capaz de descomponer incluso sustancias complejas por otros métodos. Las necesidades de energía son pequeñas, pues el proceso tiene lugar a temperaturas que oscilan entre 30°C y 80 °C, sin que su variación apenas afecte. Es común utilizar la energía del sol, una fuente limpia y abundante (Garcés, *et al.* 2004).

### Agua de abastecimiento de Yucatán

En Yucatán, aunque existe abundancia del recurso hídrico, la distribución de agua de

calidad a todas las localidades del Estado no se hace en forma segura. Las plantas potabilizadoras de agua solo están ubicadas en las ciudades y el resto de la población generalmente carece de agua de calidad para consumo humano. En muchas poblaciones se extrae el agua de pozos, cenotes o norias y se distribuye a la población sin tratamiento (o con un mínimo de tratamiento).

Yucatán no es un estado con fuerte actividad industrial. Las principales amenazas para el acuífero se derivan del manejo inadecuado de los residuos (líquidos y sólidos) generados por la población (urbana y rural) así como del desarrollo de actividades basadas en la producción animal, en especial la porcícola, la cual se ha incrementado en la región en los últimos años (Méndez, *et al.* 2009; 2015). Consecuentemente los principales contaminantes de las aguas de abastecimiento son los patógenos y la materia orgánica.

En el estado de Yucatán, México, las fuentes de abastecimiento son pozos que acceden al acuífero y generalmente se sitúan en el centro de poblaciones urbanas o en los límites, por lo que están expuestos a contaminación biológica de origen humano y animal.

La presencia de patógenos bacterianos y contaminación fecal en aguas de abastecimiento natural (por ejemplo, el manto freático en Yucatán) puede presentar altos riesgos para la salud, ya que se les considera como los principales agentes de enfermedades transmitidas por el agua. Dado que el agua potable es un requisito esencial para la población, la eficacia de las técnicas de desinfección es imprescindible para la inactivación adecuada de los microorganismos y la protección de la salud pública

El objetivo del presente trabajo es analizar la capacidad de la fotocatalisis con TiO<sub>2</sub> como una opción económica y de fácil aplicación en la eliminación de microorganismos patógenos

presentes en aguas de mantos acuíferos del estado de Yucatán.

## Materiales y métodos

Se utilizaron muestras de agua de 5 pozos someros de la comisaría de Caucel, municipio de Mérida en el estado de Yucatán. Las muestras fueron colectadas directamente de los pozos luego de 2 minutos de bombeo. Se tomaron muestras de dos litros en recipientes de cristal previamente esterilizados. Para evitar una contaminación adicional, antes y durante la toma de muestra, se sometió a esterilización la zona de muestreo con ayuda de un mechero. Los pozos muestreados tuvieron profundidades de 8 metros aproximadamente. Durante el proceso de recolección de muestras se determinó el pH y la temperatura *in situ* e inmediatamente las muestras se almacenaron en neveras para su posterior análisis en laboratorio.

**Cuadro 1.** Experimentos a concentración de TiO<sub>2</sub> constante (1 mg/ml) y diferentes tiempos de reacción

| Combinación                             | Tiempo (h)            |
|---|-----------------------|
| Luz + TiO <sub>2</sub> ( Fotocatálisis) | 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6 |
| Luz (Fotólisis)                         | 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6 |
| TiO <sub>2</sub>                        | 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6 |

Con los resultados de la primera etapa se repitieron los experimentos aumentando la concentración de TiO<sub>2</sub> y modificando el tiempo de reacción.

Para evaluar la capacidad de la eliminación de patógenos se procedió a cuantificar coliformes totales y fecales a las muestras en cuanto llegaban al laboratorio y después de ser sometidas al tratamiento.

### Cuantificación de microorganismos patógenos.

## Tratamiento

Muestras de 20 ml de agua de pozo contenidas en recipientes abiertos de cristal transparente fueron utilizadas. Los recipientes conteniendo los 20 ml de agua se situaron sobre una placa de agitación y se añadieron 20 mg de nanopartículas de TiO<sub>2</sub>. Se hicieron tres combinaciones diferentes para cada muestra de agua y se tomaron muestras a diferentes tiempos de reacción (Cuadro1). En una segunda parte se seleccionó el mejor tiempo y se hicieron experimentos con diferentes concentraciones de TiO<sub>2</sub>. En todos los casos, para realizar la fotocatalisis, las muestras se sometieron a la irradiación de lámparas que simulaban la luz solar. Se utilizaron cuatro lámparas tipo tubo lineal fluorescente marca MAGG modelo T5 de luz blanca fría de 6500 K y 14 W de potencia.

Para cuantificar los microorganismos presentes en el agua se realizó el análisis microbiológico con el método de siembra por diseminación en superficie utilizando Agar Bilis Rojo Violeta (ABRV) y Agar Eosina-Azul de metileno (EMB) (Negroni, 2009).

En un matraz Erlenmeyer de 1 litro se preparó la cantidad de 450 ml de ABRV y EMB, a un pH de 7.42 y 7.22 respectivamente, seguidamente se esterilizó en la autoclave a 121 ° C por 15 minutos. Una vez finalizada la esterilización, los medios se dejaron enfriar a

una temperatura de 45°C aproximadamente para llevar a cabo el vaciado en cajas Petri en la campana de flujo laminar para mantener el ambiente aséptico. Finalmente se incubaron durante 1 día a 37 °C (adaptación de NOM-092-SSA1-1994).

Se tomó la cantidad de 100 µL de la muestra, se realizó la siembra en los agares ABRV y EMB y se encubó a 37 y 45 °C, durante 24 y 48 horas respectivamente. Se analizaron muestras de los 5 pozos, los experimentos se hicieron por duplicado.

### Cinética de inactivación de microorganismos patógenos

Para la obtención de los parámetros cinéticos de la inactivación de patógenos por efecto de la fotocatalisis con TiO<sub>2</sub> se utilizó Múltiple Target, el cual ha sido utilizado con éxito para describir la cinética de inactivación de *Pseudomona aureoginosa* y *Legionella neumophila* por luz UV (Rattanakul and Oguma 2018).

$$\text{Log} \frac{N}{N_0} = 1 - (1 - \exp^{kt})^{nc}$$

Donde: N= número de UFC final,

No= número de UFC inicial,

k= constante de velocidad de inactivación,

t = tiempo de exposición

nc= constante empírica

Se utilizó el software Graphpad Prism 6.0 para la aplicación del modelo y obtención de los parámetros cinéticos.

### Resultados y discusión

Los resultados de las determinaciones de temperatura y pH realizadas in situ mostraron una variación de temperatura de entre 22 y 24 °C y un pH en promedio de 6.9 (Cuadro 2). Se puede observar que los valores de temperatura y pH en aguas de cinco diferentes pozos someros no tuvieron una variación significativa (se encuentran en la misma localidad). Debido a que estos parámetros permanecieron constantes, los tratamientos en las muestras de agua se realizaron sin determinar los efectos a

diferentes valores de temperatura y pH. De acuerdo a lo establecido por Garcés *et al.*, (2004), lo ideal sería trabajar a un pH diferente al punto isoeléctrico para el TiO<sub>2</sub> (pH 7), donde la superficie del óxido no esté cargada. Sin embargo, en el presente trabajo el pH de las muestras no se modificó, ya que el objetivo principal fue probar un método sencillo y económico para eliminar patógenos presentes en el agua con las características que tiene en la fuente de abastecimiento natural (manto freático).

**Cuadro 2.** Temperatura y pH in situ

| Pozo | pH  | Temperatura <sup>0</sup> C |
|------|-----|----------------------------|
| 1    | 7.0 | 24                         |
| 2    | 6.5 | 22                         |

|                 |            |           |
|-----------------|------------|-----------|
| 3               | 6.8        | 22        |
| 4               | 7.5        | 23        |
| 5               | 6.8        | 22        |
| <b>Promedio</b> | <b>6.9</b> | <b>23</b> |

Los resultados de las muestras extraídas de los pozos someros presentaron en promedio un contenido de Coliformes Totales de 620 UFC/ml y de Coliformes Fecales de 580 UFC/ml. La NOM-127-SSA1-1994 establece que los Coliformes Totales y Fecales deben ser no detectables en aguas de consumo humano, por lo que las cantidades detectadas en las muestras de agua de pozo sobrepasan los límites máximos permisibles. Por tanto, se confirma la necesidad de un tratamiento para

eliminar Coliformes previo a su distribución hacia la población. La Figura 1 muestra el proceso de eliminación de los patógenos durante la fotocatalisis de  $TiO_2$  a diferentes tiempos de reacción. Los valores que se presentan son un promedio de las 5 muestras utilizadas. Para esta etapa, se utilizaron tres combinaciones de condiciones en el experimento: Fotocatalisis, Fotólisis y adición de  $TiO_2$  (Cuadro 1) y el tratamiento se aplicó durante 6 horas (360 min).

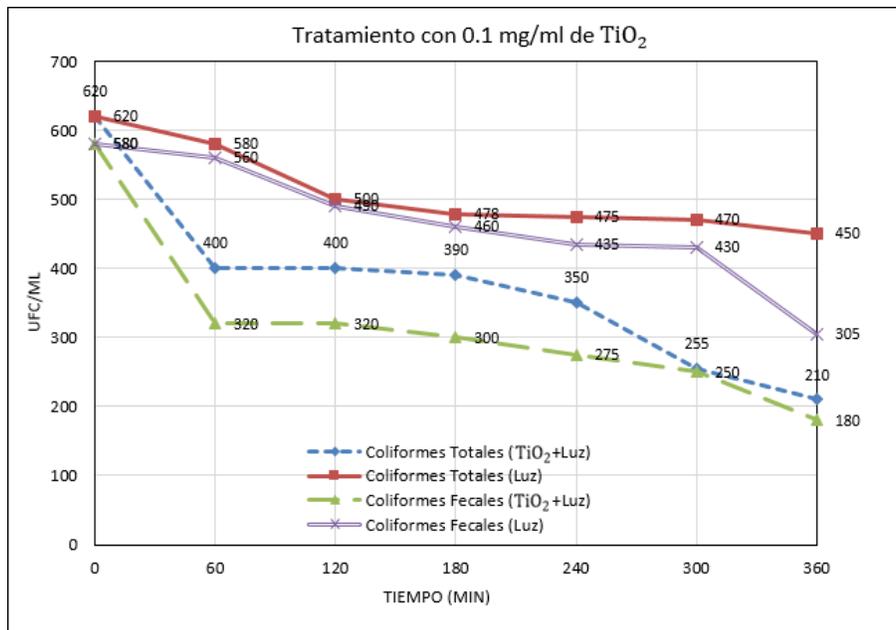


Figura 1. Eliminación de Coliformes utilizando una concentración de  $TiO_2 = 0.10$  mg/ml, con diferentes tiempos de contacto.

De las tres combinaciones, el experimento realizado con el  $TiO_2$  en ausencia de luz dio como resultado incontables Unidades Formadoras de Colonias de Coliformes (Totales y Fecales), por esta razón los valores

no se incluyen en la Figura 1. Se observó que los microorganismos se desactivaron en dos de las combinaciones: Fotólisis (solo presencia de luz) y Fotocatalisis ( $TiO_2$  + luz). Se pudo observar que las muestras de agua sometidas a

Fotocatálisis tuvieron una mayor remoción de Coliformes, es decir, la Fotocatálisis con  $TiO_2$  aumentó la acción desinfectante de la luz. Se observó que después de una hora de reacción la remoción de los Coliformes se desarrolló en menor porcentaje o en algunos momentos se detuvo. El comportamiento en el proceso de eliminación de Coliformes muestra que los mecanismos de auto-recuperación y autodefensa por parte de los microorganismos fueron insuficientes para protegerse. Con la presencia de la luz se genera un flujo de fotones, no sólo para un ataque directo a los microorganismos sino también para inducir la generación de las especies oxidantes sobre la superficie del  $TiO_2$  que subsecuentemente atacan a las bacterias (Rincón y Pulgarín, 2003). Se puede observar que la fotólisis, es decir, el efecto de los rayos UV, puede provocar la muerte de los microorganismos. Este efecto se ha estudiado en numerosos microorganismos de origen bacteriano, tales como la *E.coli*, *Yersinia pestis*, *Salmonella spp.*, etc., en los cuales se observa una elevada susceptibilidad a este proceso (Boyle *et al.*, 2008). Los daños producidos por el efecto de la radiación solar varían en función del tipo de microorganismo presente en el sistema.

Cuando el microorganismo objeto de inactivación es muy resistente, los daños son menores y, por lo tanto, el efecto es menos agresivo. Sin embargo, la adición del fotocatalizador genera un efecto bactericida y germicida que se basa en la generación de radicales hidroxilo que atacan a los componentes de la pared celular de los organismos, alterando su funcionalidad y conduciendo hacia la muerte celular, dando como resultado un tratamiento efectivo para la inactivación de microorganismos resistentes. Se pudo observar también que, durante las 6 horas del tiempo de reacción, el proceso de eliminación de coliformes continuó desarrollándose, sin embargo, el porcentaje de eliminación más significativo bajo las condiciones descritas en esta etapa se presentó durante la primera hora del experimento. Con base en los resultados obtenidos, se procedió a analizar el comportamiento de la fotocatálisis y la fotólisis nuevamente, con muestras de agua procedentes de las mismas fuentes a las utilizadas en el primer experimento, pero aumentando la concentración de  $TiO_2$  y analizando tiempos de reacción a intervalos de 15 minutos durante 60 minutos. Los resultados se presentan en las Figuras 2 y 3

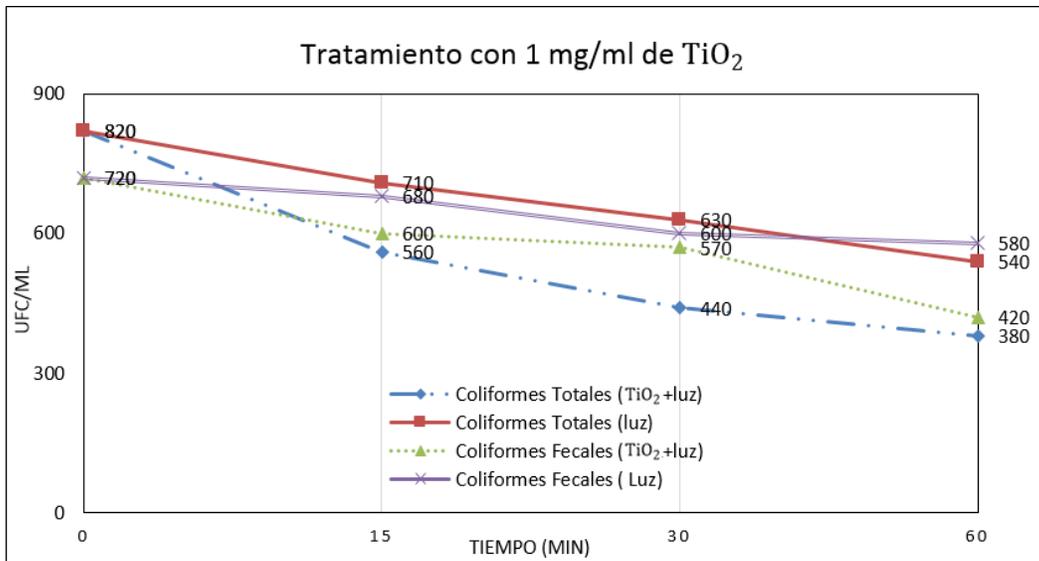


Figura 2. Eliminación de Coliformes utilizando fotólisis y fotocatálisis a una concentración de  $TiO_2 = 1$  mg/ml y tiempo de reacción de 60 minutos.

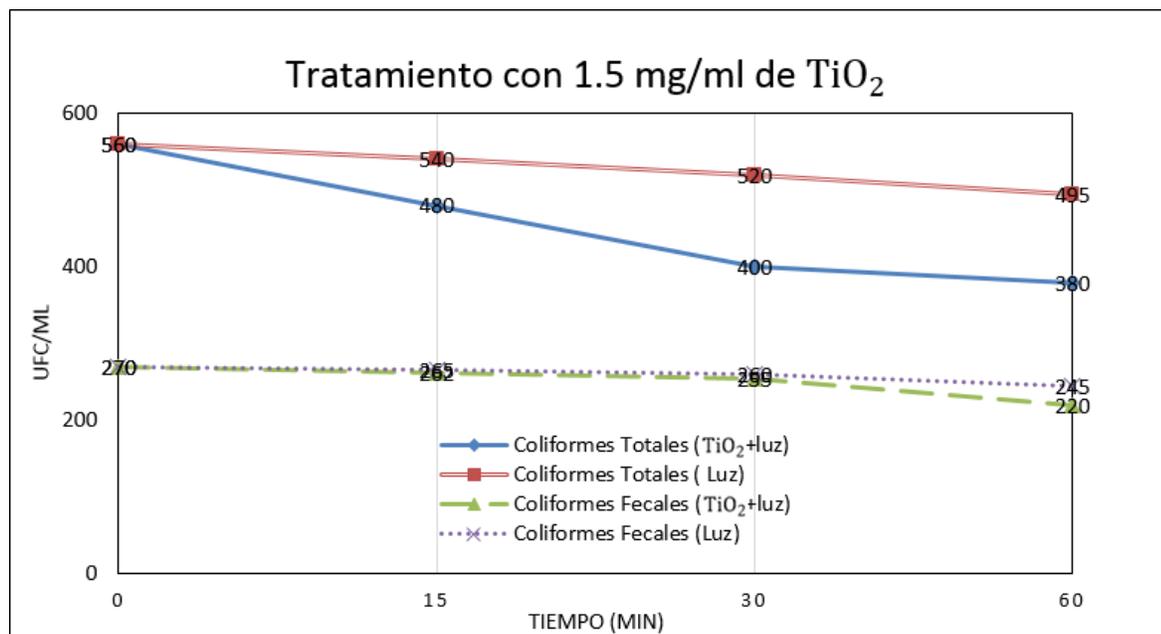


Figura 3. Eliminación de Coliformes utilizando fotólisis y fotocátalisis a una concentración de TiO<sub>2</sub> = 1.5 mg/ml y tiempo de reacción de 60 minutos

Para todos los experimentos realizados en el presente trabajo se puede observar que la fotocátalisis (TiO<sub>2</sub> + luz) permitió eliminar un mayor porcentaje de coliformes que la fotólisis (luz). Estos resultados concuerdan con los publicados por Helali *et al.* (2015), en un trabajo en el que se concluye que la adición de cualquier tipo de fotocatalizador (incluido TiO<sub>2</sub> P-25) al agua aceleró la acción bactericida de la radiación solar. Los resultados muestran que el tiempo de reacción y la concentración del catalizador influyen directamente en el

porcentaje de remoción de las bacterias Coliformes, lo que concuerda con lo encontrado por Helali *et al.* (2015).

El interés del presente trabajo fue mostrar los beneficios de utilizar la fotocátalisis con TiO<sub>2</sub> como un procedimiento fácil y eficiente en la remoción de bacterias Coliformes, por lo que a continuación se muestran los resultados obtenidos en las tres diferentes concentraciones de TiO<sub>2</sub> utilizadas con un tiempo de reacción constante de 60 minutos (Cuadro 3).

**Cuadro 3.** Porcentajes de remoción de coliformes utilizando diferentes concentraciones de TiO<sub>2</sub> durante la fotocátalisis.

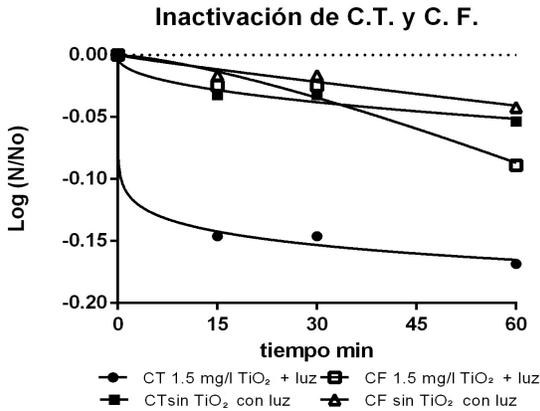
| Concentración TiO <sub>2</sub> | Remoción de Coliformes Totales | Remoción de Coliformes Fecales |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 0.1 mg/ml                      | 36.5%                          | 44.8%                          |
| 1.0 mg/ml                      | 53.7%                          | 41.7%                          |

|           |        |       |
|-----------|--------|-------|
| 1.5 mg/ml | 32.10% | 18.5% |
|-----------|--------|-------|

Los resultados muestran que, para las condiciones y tipo de agua utilizados en el presente trabajo, se alcanzó el mejor porcentaje de remoción de Coliformes (53.7%) con una concentración de 1 mg/ml de TiO<sub>2</sub>. Se puede observar que al aumentar la concentración del catalizador (TiO<sub>2</sub>) hasta 1.5 mg/ml, el porcentaje de remoción disminuye. La disminución puede ser el resultado de la aglomeración de partículas de TiO<sub>2</sub>, las cuales producen cierta turbiedad al agua y no permiten que la luz actúe en forma adecuada durante la fotocatalisis, disminuyendo así el efecto bactericida. Esto se debe a que la turbidez interfiere en la interacción de la luz ultravioleta y el catalizador, reduciendo la eficacia de la reacción fotocatalítica (Garcés *et al.*, 2004; Helali *et al.*, 2015).

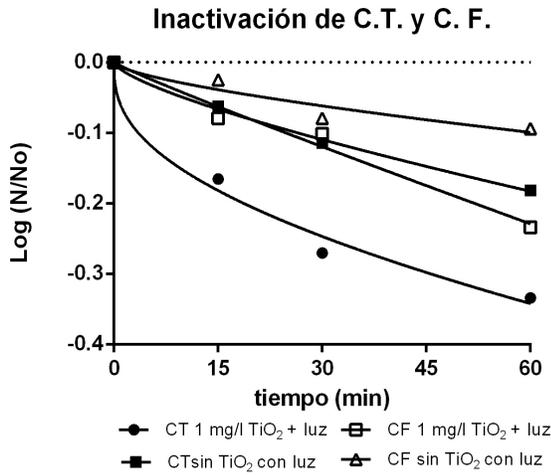
**Modelación de la cinética de inactivación de microorganismos por efecto de la fotocatalisis con TiO<sub>2</sub>.**

Las Figuras 4 y 5 muestran el comportamiento de la inactivación de microorganismos presentes en agua de pozo por acción del TiO<sub>2</sub> a 1 y 1.5 mg/l respectivamente modelada con Multiple Target. Se pueden observar dos tipos de comportamiento: una curva tipo valle y otro casi lineal. En todos los casos se obtuvieron coeficientes de correlación  $R_2 > 0.91$ , mostrando que el modelo puede predecir confiablemente los datos experimentales en diferentes tiempos. Para cada modelación se muestran los parámetros cinéticos de k y nc para Coliformes Totales y Fecales.



|                    | Fotocatalisis<br>TiO <sub>2</sub> = 1mg/ml          | Fotólisis   |
|--------------------|---|---|
| Coliformes Totales | k= 0.003327<br>nc= 0.3549<br>R <sup>2</sup> =0.9863 | k= 0.003878<br>nc= 0.6793<br>R <sup>2</sup> =0.9977 |
| Coliformes Fecales | k= 0.007899<br>nc= 0.9152<br>R <sup>2</sup> =0.9780 | k= 0.001495<br>nc= 0.6465<br>R <sup>2</sup> =0.9109 |

Figura 4. Cinética de inactivación de microorganismos usando fotocatalisis. Concentración. de TiO<sub>2</sub>= 1 mg/ml



|                    | Fotocatálisis<br>TiO <sub>2</sub> = 1.5 mg/ml                     | Fotólisis  |
|--------------------|---|--|
| Coliformes Totales | K=4.514x 10 <sup>-8</sup><br>nc= 0.8978<br>R <sup>2</sup> =0.9958 | K= 8.493 X10 <sup>-5</sup><br>nc= 0.4150<br>R <sup>2</sup> =0.9628 |
| Coliformes Fecales | K= 0.006013<br>nc= 1.429<br>R <sup>2</sup> =0.9472                | K= 0.001204<br>nc= 0.9056<br>R <sup>2</sup> =0.9415                |

Figura 5. Cinética de inactivación de microorganismos usando fotocatalisis. Concentración de TiO<sub>2</sub>= 1.5 mg/ml.

En las Figuras 4 y 5 es posible apreciar que la inactivación de Coliformes Totales presenta un comportamiento tipo valle lo que indica que son altamente susceptibles a la inactivación por presencia del TiO<sub>2</sub> + luz, un comportamiento similar, pero en menor concentración mostró la inactivación de Coliformes Fecales en ambos casos

### Conclusiones

- La fotocatalisis aplicada a las aguas de pozo utilizadas como muestra eliminó microorganismos patógenos en las condiciones naturales a las que se extrajo el agua, es decir no se ajustaron ni el pH ni la Temperatura.
- La fotocatalisis (TiO<sub>2</sub> + luz) permitió eliminar un mayor porcentaje de

coliformes que la fotólisis (luz) en las aguas de pozo utilizadas en el presente trabajo.

- La adición del fotocatalizador TiO<sub>2</sub> al agua aceleró la acción bactericida de la radiación solar.
- Para las condiciones y tipo de agua utilizados en el presente trabajo, se alcanzó un porcentaje de remoción de Coliformes de 53.7% con una concentración de 1 mg/ml de TiO<sub>2</sub> y un tiempo de reacción de 60 minutos.
- La inactivación de microorganismos patógenos por efecto de la fotocatalisis con TiO<sub>2</sub> en aguas de pozo pudo ser modelada utilizando el modelo de Multiple Target, siendo Coliformes Totales y fecales los indicadores estudiados.

## Referencias.

Binas V., Venieri D., Kotzias D., Kiriakidis G. (2017). Modified TiO<sub>2</sub> based photocatalysts for improved air and health quality. *J Materiomics* 3, 3-16.

Boyle M., Sichel C., Jaswa U. (2008). Bactericidal Effect of solar Water disinfection under sunlight conditions. *Applied and environmental microbiology*, 74 (10); 2997-3001.

Brame J., Li Q., Alvarez P.J.J. (2011). Nanotechnology-enabled water treatment and reuse: emerging opportunities and challenges for developing countries. *Trends in Food Science and Technology*. 22, 618 – 624.

Garcés Giraldo L., Mejía Franco E. y Santamaría Arango J. (2004). La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigación*, [en linea] 1(1), pp.83-92. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=69511013>.

Hagemann S.; Chen C.; Clark, D. B.; Folwell, S.; Gosling, S. N.; Haddeland, I.; Hanasaki N.; Heinke, J.; Ludwig, F.; Voss, F.; Wiltshire, A. J. (2013) Climate change impact on available water resources obtained using multiple global climate and hydrology models. “*Earth System Dynamics*”. 4 (1), 129–144.

Helali, S., Polo-López M.I., Fernández-Ibáñez P., Ohtani B., Amanoc F., Malato S., Guillard Ch. (2014). Solar photocatalysis: A green technology for E. coli contaminated water disinfection. Effect of concentration and different types of suspended catalyst. “*Journal of Photochemistry and Photobiology A Chemistry*” 276, 31–40

Lijuan J., Yajun W., Changgen F. (2012). Application of photocatalytic technology in environmental safety. *Procedia Engineering*. 45, 993 – 997.

McCullagh C., Robertson J.M.C., Bahnemann D.W., Robertson P.K.J. (2007). The application of TiO<sub>2</sub> photocatalysis for disinfection of water contaminated with pathogenic micro-organisms: a review, *Research on Chemical Intermediates*. 33(3–5), 359–375.

Méndez Novelo R.I, Castillo Borges E., Vázquez Borges E. y Magaña Pietra A. (2009) “Manejo sanitario de granjas porcinas y avícolas en Yucatán”. Ediciones de la Universidad Autónoma de Yucatán, p. 125, ISBN: 978-607-7573-27-2, Mérida, Yucatán, México.

Méndez-Novelo R.I., Pacheco Ávila J.G., Castillo Borges E.R., Cabrera Sansores A., Vázquez Borges E. y Cabañas Vargas D.D. (2015). “Calidad microbiológica de pozos de abastecimiento de agua potable en Yucatán, México”. *Ingeniería–Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán*. 19(1), 51 - 61.

Mukheibir P., Howe C., Gallet D. (2015). Institutional Issues for Integrated 'One Water' Management; IWA Publishing. Report 2015.

Negrón Marta. (2009). *Microbiología Estomatológica- Fundamentos y guía práctica*. 2ª edición. México. Editorial Médica Panamericana, pp 557

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-092-SSA1-1994. Bienes y servicios. Método para la cuenta de bacterias aerobias en placa.

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-1994, "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

Prieto-Rodríguez L., Oller I., Klammerth N., Agüera A., Rodríguez E.M., Malato S. (2013). Application of solar AOPs and ozonation for elimination of micropollutants in municipal wastewater treatment plant effluents. *Water Research* 47(4) 1521-1528.

Qu, X.; Alvarez, P. J. J.; Li, Q. (2013). Applications of nanotechnology in water and wastewater treatment. *Water Research*, 47 (12), 3931–3946.

Rattanakul S. and Oguma K. (2018) Inactivation kinetics and efficiencies of UV-LEDs against *Pseudomonas aeruginosa*, *Legionella pneumophila*, and surrogate microorganisms. *Water Research*, 130 31-37.

Rincón A.G. y Pulgarín C., (2003). Photocatalytical inactivation of *E. coli*: effect of (continuous–intermittent) light intensity and of (suspended–fixed) TiO<sub>2</sub> concentration. *Applied Catalysis B: Environmental*. 44(3) 263-284.

Schneider J., Matsuoka M., Takeuchi M., Zhang J., Horiuchi Y., Anpo M. and Bahnemann D.W. (2014). Understanding TiO<sub>2</sub> Photocatalysis: Mechanisms and Materials. *Chemicals Reviews*, 114 (19), pp 9919 – 9986.

Shatkhande D., Pangarkar V. G. and Beenackers A. (2001). Photocatalytic degradation for environmental applications – a review. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 77:102-116.

Solsona F y Méndez J.P. (2002). Desinfección del Agua. Lima, Perú. Centro panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, pp.3-98.

Venieria D., Fragedakia A., Kostadima M., Chatzisymeona E., Binas V., Zachopoulos A., Kiriakidis G., Mantzavinos D. (2014). Solar light and metal-doped TiO<sub>2</sub> to eliminate water-transmitted bacterial pathogens: Photocatalyst characterization and disinfection performance. *Applied Catalysis B: Environmental* 154–155, 93–101.