

Guillermo Centeno-Bordones

<http://dx.doi.org/10.35381/a.g.v4i7.1870>

Fotocatálisis: Tecnología sustentable para tratar materia orgánica natural (NOM) y desinfección del agua potable

Photocatalysis: Sustainable technology to treat natural organic matter (NOM) and disinfection of drinking water

Guillermo Centeno-Bordones
guillermocenteno15@hotmail.com
Universidad de Carabobo, Valencia, Carabobo
Venezuela
<https://orcid.org/0000-0003-1436-4764>

Recibido: 01 de marzo 2022
Revisado: 10 de abril 2022
Aprobado: 15 de junio 2022
Publicado: 01 de julio 2022

Guillermo Centeno-Bordones

RESUMEN

En esta revisión se hace una breve descripción de los Procesos Avanzados de Oxidación (PAO) de tipo fotoquímico, dirigido principalmente a los procesos fotocatalíticos heterogéneos de semiconductores especialmente el dióxido de titanio. Se expone la importancia y las condiciones experimentales de los sistemas de tratamiento de agua para consumo humano bajo esta tecnología. También, se hace referencia a la aplicación de la fotocatálisis para el tratamiento de materia orgánica natural y desinfección del agua de lluvia, que permitirán enfrentar los desafíos que tienen algunos países con respecto de los abastecimientos de agua potable. Igualmente se expone la importancia e inconvenientes que tiene la desinfección de aguas utilizando fotocatálisis con radiación solar.

Palabras clave: Fotocatálisis; materia orgánica natural; desinfección. (Tesoro AGROVOC).

ABSTRACT

In this review, a brief description is made of the Advanced Oxidation Processes (AOP) of the photochemical type, aimed mainly at the heterogeneous photocatalytic processes of semiconductors, especially titanium dioxide. The importance and experimental conditions of water treatment systems for human consumption under this technology are exposed. Also, reference is made to the application of photocatalysis for the treatment of natural organic matter and disinfection of rainwater, which will allow us to face the challenges that some countries have with regard to drinking water supplies. The importance and drawbacks of water disinfection using photocatalysis with solar radiation are also exposed.

Key words: Photocatalysis; natural organic matter; disinfection. (AGROVOC Thesaurus).

Guillermo Centeno-Bordones

INTRODUCCIÓN

El agua potable es esencial e imprescindible para la vida, es más bien, un recurso, y no una mercancía, el agua potable es concretamente un derecho humano (González, 2015). Los esfuerzos científicos por mejorar el medio ambiente y el hábitat, para elevar la calidad de vida de la población depende fundamentalmente de la disponibilidad de agua, existiendo una estrecha relación entre la calidad del agua y la salud pública, entre la posibilidad de acceder al agua y el nivel de higiene, la abundancia del agua y el crecimiento económico, (Chávez, 2018).

Las políticas públicas de salud y las tecnologías dirigidas a mejorar los sistemas públicos del servicio de agua potable contribuyen a una disminución de la morbilidad y la mortalidad de enfermedades entéricas de la población, en especial de la más vulnerable como es la pediátrica y la geriátrica, porque dichas enfermedades y estos grupos etarios, están directa o indirectamente relacionados con el abastecimiento de aguas con deficientes tratamientos fisicoquímicos (Álvarez, 2017).

Actualmente, el 20% de la población mundial, alrededor de 1.400 millones de personas no tienen acceso al agua potable, y casi 4.000 millones carecen de un saneamiento adecuado, es decir, un 68% de la población del planeta. Según estimaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS) en su informe N°. A71/28 del 2018, el 80% de las enfermedades se transmiten a través de agua contaminada (Mejía, Castillo, y Vera, 2016).

El acceso al agua potable es un factor importante en materia de salud para un país, debido a que impacta directamente en cada región y comunidad elevando su nivel de desarrollo (Chávez, 2018; Correa, 2017). Se ha comprobado que las inversiones en sistemas de abastecimiento y saneamiento de agua pueden ser rentables desde un punto de vista económico para los estados-nación, ya que la disminución de las enfermedades y los costos de asistencia sanitaria, son superiores al costo de las plantas de tratamientos de aguas. (Bohórquez, 2019; Mejía, Castillo, y Vera, 2016).

Guillermo Centeno-Bordones

La experiencia ha demostrado que las medidas destinadas a mejorar el acceso al agua potable favorecen en particular a la población más pobre, tanto de zonas rurales como urbanas, y son un componente eficaz de las estrategias de mitigación de la pobreza. (Santos 2017; Chávez 2018). Desde el punto de vista técnico el tratamiento de aguas es el conjunto de operaciones unitarias de tipo físico, químico o biológico cuya finalidad es la eliminación o reducción de las características no deseables de las aguas, bien sean naturales, de abastecimiento, de proceso o residuales. (Salamanca, 2016).

Las Plantas Potabilizadoras de Agua para consumo humano, necesitan siempre de un paso previo al tratamiento bacteriológico o fisicoquímico del fluido: “la etapa de clarificación”. (Carrasquero, *et al*, 2016; Cuartero, *et al*, 2017). La secuencia más habitual del mismo es la siguiente:

Captación: mediante una red de tuberías y bombeos se envía el líquido de una fuente superficial (ríos, lagos) o de origen profundo.

Coagulación y floculación: mediante este proceso, se promueve la agrupación de las partículas suspendidas que son responsables del color y la turbidez del agua.

Decantación: con el agua casi en reposo y a través de la acción de la gravedad, se depositan en el fondo las partículas y los flóculos formados en el proceso anterior, teniendo como subproducto un lodo que se extrae posteriormente.

Filtración: retención de las partículas que no pudieron ser extraídas en el proceso anterior haciendo pasar el agua por unos filtros.

Desinfección final: con la adición de reactivos, normalmente cloro y amoníaco para formar cloraminas, ozono y/o radiación ultravioleta, se consigue eliminar los microorganismos que hayan podido sobrevivir a los procesos anteriores y se garantiza la calidad microbiológica del agua. (Mayorga, y Mayorga, 2016; Salamanca, 2016; Cuicas, y Cuadra, 2017; Campos, y Vargas, 2019).

Guillermo Centeno-Bordones

Una de las tecnologías prometedoras para mejorar los procesos de clarificación y desinfección de agua potable son procesos de oxidación avanzada (POA) pueden definirse como procesos que implican la formación de radicales hidroxilos (OH^\bullet) de potencial de oxidación de 2.8 V mucho mayor que el de otros oxidantes tradicionales. Estos radicales son capaces de oxidar compuestos orgánicos, principalmente por abstracción de hidrógeno o por adición electrofílica a dobles enlaces, permitiendo degradar la materia orgánica que se encuentra en el agua de captación, disminuyendo considerablemente la cantidad de materia orgánica en el agua (Centeno, y Jiménez, 2018; Sillanpää, Ncibi, y Matilainen, 2018; Remucal, y Manley, 2016).

En el caso de microorganismos, estos radicales atacan la bicapa lipídica que conforma la pared externa de la célula, generando reacciones de peroxidación lipídica letales para el microorganismo. Los POA abarcan procesos como ozono/luz UV, H_2O_2 /luz UV, ultrasonido, fotocátalisis y fotoquímica, y los tratamientos electroquímicos (Stefan, 2017). Una de las razones que ha hecho que los POA sean objeto de un creciente interés es la posibilidad de utilizar energía solar como fuente de fotones, con el consiguiente ahorro energético y ventajas medioambientales (Aguas, *et al*, 2017).

Una de las alternativas tecnológicas para la desinfección de agua potable es la fotocátalisis con dióxido de titanio (TiO_2) con el uso de radiación ultravioleta de 254 nm, mediante lámparas (Agudelo, Terranova, y Alcantar, 2018). También es cierto que la fotocátalisis utilizando radiación solar, es un poco menos eficiente debido a que la radiación ultravioleta del sol es menos concentrada (alrededor del 7% del espectro electromagnético del sol es radiación UV) que la utilizada por lámparas germicidas de radiación UV, donde la longitud de onda se concentra en un 80% para cual fue diseñada (González-López, y Pinto-Acosta, 2018). Pero es sabido el costo de instalación y mantenimiento que representa el uso de lámparas de radiación ultravioleta en las instalaciones de tratamientos de aguas potables a gran escala.

Guillermo Centeno-Bordones

En un estudio realizado por Posso *et al* (2015), se afirma que en términos generales y según la información analizada, en los países del norte de Suramérica existe un potencial de energía solar que puede hacer factible el aprovechamiento de la radiación solar como fuente de energía alternativa en el 80 % de los países, debido a que alcanza valores de radiación superior a los 5,1 kWh/m² día. Por lo que el uso de reactores solares es una posibilidad cierta en el manejo de procesos de oxidación avanzada como la fotocatálisis en el tratamiento de desinfección primaria de agua potable.

Por lo anteriormente expuesto es necesario conocer que la eficiencia de la fotocatálisis para la eliminación de materia orgánica natural y la desinfección en aguas para el consumo humano.

METODOLOGÍA

El presente trabajo de investigación es de tipo documental (Posada-González, 2017) y se llevó a cabo realizando una revisión de los artículos publicados durante los últimos cinco años (desde el 2015 hasta el 2020) en directorios de acceso abierto (Open Access) tales como SciELO (Scientific Electronic Library Online), DOAJ (Directory of Open Access Journals), Redalyc (Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal), e-Revistas (Plataforma Open Access de Revistas Científicas Electrónicas Españolas y Latinoamericanas) y Dialnet (Portal bibliográfico de acceso libre de la Universidad de la Rioja, España), Una vez revisados, los artículos fueron clasificados de acuerdo al tipo de temática abordada. Se usaron como palabras claves fotocatálisis, agua potable, desinfección, oxidación orgánica.

RESULTADOS

Fotocatalizadores

Un fotocatalizador puede ser definido como una sustancia que acelera una reacción mediante la acción directa de una fuente de emisión de radiación UV visible. Segura

Guillermo Centeno-Bordones

Sanchis, E. (2017) afirma que la fotocatalisis puede ser definida como la aceleración de una fotoreacción mediante un catalizador fotosensibilizado. En el caso de los fotocatalizadores heterogéneos, se emplean comúnmente semiconductores (sólidos tipo óxido en suspensión acuosa o gaseosa). Existen múltiples de estos fotosensibilizadores tales como: Al_2O_3 , ZnO , Fe_2O_3 , CuO , MnO y TiO_2 y compositos como Ag-BiVO_4 entre otros (Centeno y Jiménez, 2018).

Este tipo de catalizadores tipo óxido permiten la fotocatalisis heterogénea, que según Castillo, (2016), es un proceso que se basa en la absorción directa o indirecta de energía radiante de tipo UV, por un sólido semiconductor de banda ancha, es decir, un material con valor de energía de activación mayor respecto a otros materiales; el cual modifica la velocidad de reacción química sin verse involucrado, se debe mencionar la presencia fundamental de O_2 , debido a que sin su presencia se nota una supresión casi total de la actividad fotocatalítica (Nevárez-Martínez, *et al*, 2017).

La Figura 1 muestra esquemáticamente el potencial redox correspondiente a la banda de valencia ya la banda de conducción para distintos semiconductores puede ser expresado en eV (escala izquierda de la Figura 1) o en voltios respecto al potencial del electrodo normal de hidrógeno, ENH (escala derecha de la Figura 1). Se muestran los potenciales redox de las cuplas ($\text{H}^+/\frac{1}{2}\text{H}_2$) y $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ respecto del potencial del electrodo normal de hidrógeno (ENH) (Centeno y Jiménez 2018). Nótese que dichas líneas se corren por cambios en el pH, en la presión parcial de oxígeno, o en la temperatura. Aquellos materiales cuya banda de conducción se ubica por encima de la línea H^+/H_2 son termodinámicamente capaces de reducir al agua, mientras que los materiales cuya banda de valencia se ubica por debajo de la línea $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ pueden oxidarla (Corrales- González, 2018; Centeno y Jiménez, 2018).

Guillermo Centeno-Bordones

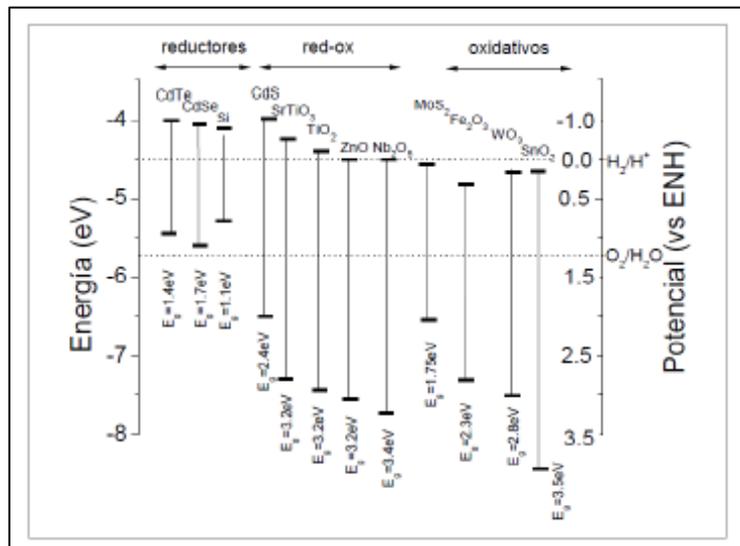


Figura 1. Posición relativa de los bordes de las bandas de conducción y de valencia de algunos semiconductores.

De acuerdo al potencial de estos semiconductores para la oxidación o reducción del agua se pueden dividir en tres grupos según Centeno y Jiménez:

Reductivos: Pueden producir la reducción del agua y generar H₂, sin embargo, su potencial de oxidación es muy débil para oxidarla, como ejemplos se tienen: CdTe, CdSe y Si.

Redox: En este caso existe la posibilidad de oxidar y reducir el agua, como ejemplos se tienen al CdS, SrTiO₃, TiO₂, ZnO, Nb₂O₅.

Oxidativos: Pueden producir la oxidación del agua y generar O₂, ya que la banda de valencia está localizada a un potencial energético suficientemente negativo.

Guillermo Centeno-Bordones

Sin embargo, en algunos casos el potencial de reducción de la banda de conducción es insuficiente para reducir el agua, como ejemplos se tienen al MoS_2 , Fe_2O_3 , WO_3 y SnO_2 . Luego de la separación electrón-hueco, la transferencia interfacial de las cargas, que conduce a la oxidación de un compuesto orgánico por el hueco, puede producirse por cualquiera de los siguientes caminos: i) transferencia directa del hueco a la sustancia adsorbida sobre el fotocatalizador, ii) a través de especies intermediarias fuertemente oxidantes, como el $\cdot\text{OH}$ o superóxido (O_2^-) formados respectivamente por oxidación de agua o reducción de oxígeno adsorbidos sobre el catalizador, iii) ambos caminos en simultáneo.

El electrón fotogenerado debe ser secuestrado por algún oxidante presente en el medio de reacción, típicamente oxígeno, agua oxigenada o persulfato de amonio entre otros. Aquellos semiconductores de la Figura 1 que tengan un potencial de oxidación mayor a 2 V respecto del ENH son potenciales oxidantes de contaminantes orgánicos (Rosales-Vera, 2020; Corrales-González, 2018; Centeno y Jiménez, 2018).

Estas propiedades de los fotocatalizadores heterogéneos permiten que las reacciones (óxido-reducción) transcurran en la superficie del catalizador (interface líquido-sólido o gas-sólido, respectivamente), generando radicales libres muy reactivos; permitiendo la degradación, e incluso la mineralización, de una gran variedad de compuestos orgánicos. En este tipo de reacciones las condiciones de reacción son muy importantes porque van a determinar la especiación en la que se encuentra el catalizador y la sustancia a oxidar, por lo que controlar las condiciones de temperatura, pH, tamaño de partícula, concentración del oxidante, son muy importante (Centeno y Jiménez 2018).

Fotocatálisis heterogénea con óxido de titanio

Fotocatálisis heterogénea con dióxido de titanio (TiO_2) Como ya se ha mencionado, la fotocatalisis implica la combinación de la fotoquímica con la catálisis. Ambos, luz y catalizador, son necesarios para alcanzar o acelerar una reacción química. En el caso de

Guillermo Centeno-Bordones

la fotocatalisis heterogénea, se emplean semiconductores (sólidos en suspensión acuosa). Existen múltiples de estos fotosensibilizadores como se dijo antes, sin embargo, el más ampliamente usado en aplicaciones fotocatalíticas es el dióxido de titanio (Degussa p25) en forma de anatasa 99% y en forma de rutilo 1% (Figura 2), y también está la formada por la estructura cristalina anatasa en un 70% y por rutilo en un 30%, ya que estas dos especies son las que presentan una mayor actividad fotocatalítica que la brukita, no es tóxico, el dióxido de titanio es estable en soluciones acuosa y no es costoso, habiéndose evaluado diferentes estructuras del mismo (Vallejo, *et al* 2016; Loiza, *et al* 2016; Barber-Núñez, 2018).

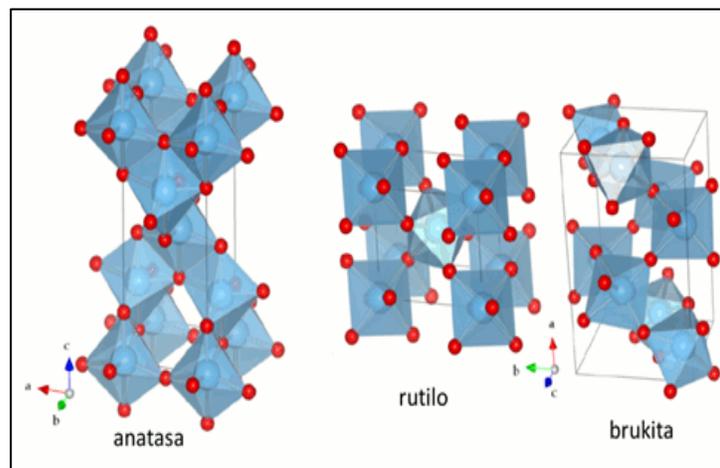


Figura 2. Estructuras cristalinas del dióxido de titanio, donde se aprecia la estructura cristalina de la fase anatasa, rutilo y brukita.

El proceso de fotocatalisis heterogénea sobre TiO₂, se basa principalmente, en la iluminación del semiconductor según su estructura cristalina predominante es excitado con luz (UV) conteniendo mayor energía que su energía de banda prohibida (E_g) (E_g anatasa TiO₂: 3.2 eV; rutilo TiO₂: 3.0 eV) que corresponde a longitudes de onda del UV,

Guillermo Centeno-Bordones

esto hace posible la promoción de un electrón (e^-) desde la banda de Valencia (BV) hacia la banda de conducción (BC), dejando un hueco positivo (h^+) en la BV (ecuaciones 1, 2 y 3). Estos portadores de carga, el electrón y el hueco, pueden migrar hacia la superficie del semiconductor atrapándose sobre defectos de superficie ó reaccionando con un aceptor ó donador apropiado de electrones. Existe también la posibilidad que estos portadores de carga puedan recombinarse entre sí disipando el exceso de energía en forma de calor, esto según Nevárez-Martínez, *et al* 2017 y Centeno y Jiménez 2018. Los huecos pueden ser atrapados por grupos hidroxilo o moléculas de agua adsorbidos en la superficie, produciendo radicales OH^\bullet que posee un potencial oxidativo alto (~ 1.7 Vvs) y son altamente reactivos con la materia orgánica y tóxicos para los microorganismos ecuaciones 4 y 5), según Nam, *et al* (2018) Figura 3.

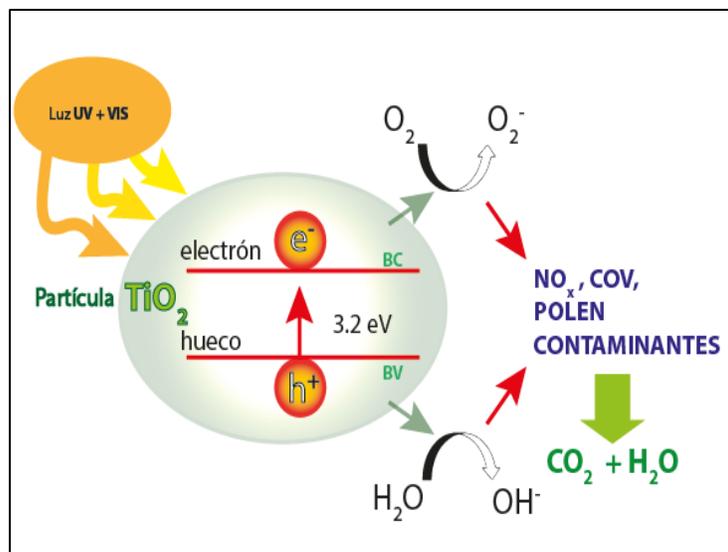
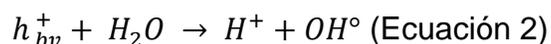
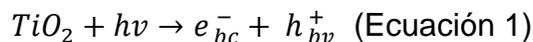


Figura 3. Mecanismo de reacción propuesto para la fotocatalisis con dióxido de titanio.

Guillermo Centeno-Bordones

Es decir, el proceso se describe de la siguiente manera según Nevárez-Martínez, *et al* (2017):



Sustancias orgánicas / microorganismos + $OH^\circ \rightarrow$ Productos de degradación (Ecuación 4)

Sustancias orgánicas / microorganismos + $h_{bv}^+ \rightarrow$ Productos de degradación (Ecuación 5)

Actualmente se reconoce que los defectos por vacancias de oxígeno en la superficie del TiO_2 juegan un papel esencial en la adsorción de O_2 , las moléculas de oxígeno adsorbidas o los electrones foto-promovidos a la banca de conducción atrapados por estos defectos pueden producir radicales superóxido, los cuales en medio acuoso y ligeramente ácido tienden a dismutarse para generar peróxido de hidrógeno que actuará también como aceptor de electrones foto-excitados para finalmente producir radicales $\bullet OH$, tal como lo afirma Izquierdo (2016).

Parámetros para reacciones fotocatalíticas:

Existen varios parámetros que según Trinidad (2017), Gómez-Muñoz, (2017), Hernández y Prieto (2017) estos investigadores afirman que los factores que influyen cualitativa y cuantitativamente en el proceso de óxido-reducción fotocatalítico se presentan a continuación:

Guillermo Centeno-Bordones

Longitud de onda e intensidad de la luz:

El dióxido de titanio absorbe longitudes de onda inferiores a 400 nm, que corresponden al espectro ultravioleta. Cualquier radiación de estas características tendrá la capacidad de generar en el semiconductor un par electrón-hueco. La distancia de penetración de los fotones dentro de la partícula de TiO_2 es más corta cuanto menor es la longitud de onda ya que son absorbidos por las moléculas del semiconductor con más fuerza. Debido a esto, el empleo de longitudes de onda más corta (UVC 200-280 nm) generan los pares electrón-hueco más cerca de la superficie, siendo menor el tiempo empleado para la migración de estos pares electrón-hueco hasta la superficie de la partícula y, por tanto, menores las posibilidades para que ocurra la recombinación de los mismos antes de que se produzca en la superficie de la partícula las reacciones con las especies químicas presentes en el agua. En conclusión, el aprovechamiento de la energía absorbida es mayor cuanto menor es la longitud de onda empleada.

El catalizador:

Cuanto mayor sea la dosis del catalizador, mayor será en principio la eficiencia obtenida, si bien el efecto de la turbidez ocasionada por sus partículas también aumenta, dificultando la difusión de la luz ultravioleta. En lo que respecta a su disposición, el dióxido de titanio puede estar en suspensión o inmovilizado. La utilización de partículas de TiO_2 ocasiona la aparición de sólidos suspendidos, parámetro limitado por la legislación en materia de vertidos. Por lo tanto, es necesario separar las partículas de TiO_2 de las aguas tratadas, siendo este uno de los principales inconvenientes a la hora de aplicar esta tecnología debido a su reducido tamaño. Para su separación se pueden usar técnicas de filtración, que encarecerán el tratamiento. La aplicación de técnicas de decantación, dado el reducido peso y tamaño de las partículas a separar, obliga a tiempos de residencia excesivos para que el proceso resulte económico. Para solucionar este problema existen dos alternativas: aumentar el tamaño de las partículas o adherirlas a soportes (vidrio,

Guillermo Centeno-Bordones

policarbonato, estireno, etc.) de mayor tamaño para mejorar la decantación y evitar utilizar el catalizador en suspensión, depositándolo sobre las paredes iluminadas del fotorreactor o sobre materiales transparentes a la radiación.

Efecto del oxígeno:

Los huecos generados en la fotocatalisis producen radicales hidroxilos en la interfase del semiconductor con el agua. Por otro lado, los electrones generados requieren una especie aceptadora de electrones, evitando de esta forma la recombinación de éstos con los huecos. Así, el oxígeno molecular actúa como aceptor de electrones generándose el radical superóxido, promotor de más radicales hidroxilos. La presencia de oxígeno es por tanto esencial para que se produzca una oxidación efectiva. Por otro lado, una aireación controlada permite la continua suspensión del catalizador en la disolución, favoreciendo una degradación más homogénea.

Temperatura y pH:

La variación de la 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_2 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_2 debido a su carácter anfotérico. Debe trabajarse a un pH diferente al punto isoeléctrico para el TiO_2 (pH 7), donde la superficie del óxido no está cargada.

Concentración inicial del contaminante:

Las cinéticas de degradación fotocatalítica siguen generalmente el mecanismo de Langmuir-Hinshelwood donde la velocidad de reacción varía proporcionalmente a la fracción de superficie cubierta por el sustrato

Guillermo Centeno-Bordones

Calidad del agua a tratar:

La presencia de turbidez, sólidos en suspensión y materia orgánica e inorgánica en el agua a tratar pueden restar eficiencia a la oxidación fotocatalítica con TiO_2 . La turbidez interfiere en la interacción de la luz ultravioleta y el catalizador, reduciendo la eficacia de la reacción de oxidación y desinfección.

Tratamiento de materia orgánica natural en agua potable

La materia orgánica natural (por sus siglas en inglés NOM) deriva de la descomposición de residuos vegetales y animales y actividad microbiana y es ubicua en las aguas superficiales y subterráneas. Si bien su presencia no representa una amenaza directa para la salud humana, sí lo hace introducir otras preocupaciones, sobre todo la producción de carcinógenos, mutagénicos, potencialmente genotóxicos y teratogénicos cuando reacciona con desinfectantes oxidantes como el cloro, (Lemus-Pérez, 2017). Las estrategias más comunes para la mitigación de NOM coagulación mejorada o ablandamiento, carbón activado granular (GAC), o filtración por membrana (Salamanca, 2016). Estas prácticas son a menudo suficientes para controlar la materia orgánica natural; sin embargo, también se está investigando la efectividad de los POA en su mineralización.

Una investigación desarrollada por Mayer, *et al* 2018, evaluaron unas estrategias dirigidas a la mitigación de contaminantes macro y microorgánicos utilizando fotocátalisis de dióxido de titanio de baja energía. Los aportes de energía de 1, 2 y 5 kWh m^3 dieron como resultado oxidación incompleta de materia orgánica natural macro-orgánica, significada por mayores reducciones de UV a 254 nm (UV254) y absorbancia UV ultravioleta específica (SUVA) en comparación con orgánicos disueltos carbonos (DOC). La tasa de eliminación de UV254 fue a 3 niveles de magnitud mayor que la tasa de degradación del DOC. La oxidación incompleta mejoró la operación de los procesos de filtración aguas abajo.

Guillermo Centeno-Bordones

La fotocatalisis a 2 kWh m³ aumentó la vida útil del lecho de carbón activado granular aguas abajo (GAC) filtrando en un 340% en relación con el pretratamiento de filtración directa. Asimismo, la fotocatalisis funciona antes de la microfiltración disminuyó el ensuciamiento, lo que resultó en tiempos de funcionamiento del filtro más largos. Usando 2 kWh m³ la fotocatalisis aumentó el tiempo de funcionamiento del filtro en 36 veces en comparación con la filtración directa.

Además, los niveles de DOC y UV254 en el permeado de la membrana mejoraron (sin cambios en eliminación a través de la membrana) utilizando pretratamientos de fotocatalisis de baja energía. Mientras más altas sean las entradas de energía UV proporcionaron altos niveles de eliminación de la estrona microorgánica estrogénica (E1), 17β-estradiol (E2), estriol (E3) y 17α-etinilestradiol (EE2), la fotocatalisis de baja energía no mejora la eliminación de estrógenos más allá de los niveles alcanzados por la fotólisis sola. En los casos de E1 y E3, la adición de TiO₂ como fotocatalizador redujo las tasas de degradación de estrógenos en comparación a fotólisis UV. En general, el proceso mejora enormemente usando fotocatalisis, versus fotólisis, para los macroorgánicos, DOC, UV254, y SUVA; sin embargo, la energía requerida para la eliminación de estrógenos fue similar entre fotólisis y fotocatalisis.

La presencia de sustancias húmicas en el agua es peligrosa porque se consideran los principales precursores de subproductos de desinfección (DBP), especialmente de trihalometanos (THM) durante el paso de cloración. La presencia de ácidos húmicos en el sistema de distribución favorece a las bacterias crecimiento en la red de agua potable, que puede conducir a graves problemas sanitarios problemas en la calidad del agua potable. Los procesos habituales de tratamiento de agua potable que implican filtración de arena, sedimentación y coagulación, generalmente son capaces de eliminar entre el 20 y el 50% de las sustancias húmicas del agua, lo que implica altos costos de operación y contaminación secundaria tóxica.

Guillermo Centeno-Bordones

Para la eliminación de ácidos húmicos como compuesto orgánico natural se desarrolló una investigación por Orhaa, *et al* (2016) que lleva por título Carbón activado modificado con dióxido de titanio para tratamiento avanzado de agua potable. Este estudio informó un nuevo carbón activado granular modificado con anatasa TiO_2 (GAC- TiO_2) sintetizado por el método hidrotérmal asistido por microondas. El compuesto fue caracterizado morfo-estructuralmente utilizándose para la eliminación de ácidos húmicos (HA) del agua mediante fotocatalisis bajo radiación UV en comparación con el proceso de sorción.

El compuesto GAC- TiO_2 reveló una alta fotoactividad para la degradación y mineralización de HA. La actividad de autolimpieza del material compuesto probada en este estudio lo hace muy notable en desarrollar la próxima generación de sistemas de filtrado evitando su ensuciamiento en el agua potable. La tecnología de tratamiento compuesta de carbón activado granular modificado con TiO_2 (GAC- TiO_2) fue sintetizado con éxito por microondas condiciones hidrotermales. La presencia de anatasa TiO_2 forma dentro de la composición compuesta se evidenció por diferentes técnicas de caracterización, que revelaron una superficie específica más baja del composite en comparación con el GAC comercial. La actividad fotocatalítica de este nuevo compuesto se evaluó la degradación y mineralización de ácido húmico (HA) del agua. El óptimo condiciones de trabajo, por ejemplo, pH de 7, dosis de catalizador de 1 g L^{-1} para las concentraciones de ácido húmico oscilaron entre 10 y 25 ppm.

En los resultados el GAC- TiO_2 exhibió una actividad de autolimpieza bajo irradiación UV para la eliminación del ácido húmico del agua, que lo hace notable y sorprendente importante en el desarrollo nueva generación de sistema de filtrado en el tratamiento de agua potable.

El cambio climático en el planeta y sus influencias en los embalses de almacenamiento de agua potable se evidencia en efecto que tienen las temperaturas altas y períodos más largos de altas temperaturas resultando en más Anoxia hipolimnética en el lago de forma generalizada que puede conducir a la liberación de fósforo sedimentario causando

Guillermo Centeno-Bordones

floraciones de algas no deseadas (Bazán, *et al* 2018). Los compuestos de sabor y olor son producidos principalmente por floraciones de cianobacterias como metabolitos secundarios (Cantoral, *et al* 2017). El umbral de olor de estos compuestos es en el rango de los ng. L⁻¹, lo que hace que su eliminación efectiva del agua potable sea una tarea difícil. Estudios han demostrado que la mayoría de los compuestos de sabor y olor son resistentes a técnicas convencionales de tratamiento de agua, como coagulación, sedimentación y filtración, especialmente a muy baja concentración (Salamanca, 2016). Solo unos pocos métodos convencionales de tratamiento de agua han tenido éxito en eliminar el sabor y compuestos de olor a concentraciones tan bajas.

Los oxidantes como Cl₂, ClO₂ y KMnO₄ tienen demostrado ser ineficaz en la degradación de estos compuestos debido a la resistencia de los alcoholes terciarios hacia la oxidación leve (Lemus-Pérez, 2017). La filtración con carbón activado granular y arena, y alumbre la coagulación se usa para eliminar compuestos de sabor y olor en algunas instalaciones de tratamientos de agua.

Dos compuestos comunes de sabor y olor encontrados en las aguas superficiales son 2-metil isoborneol (MIB; umbral de olor 15 ng L⁻¹) y geosmina (GSM; umbral de olor 4 ng L⁻¹). MIB es un terpenoide producido por la especie cianobacteriana, *Oscillatoria* y *Phormidium*, y actinomicetos. GSM es un alcohol terciario bicíclico producido por ciertas especies de *Oscillatoria*, *Anabaena*, *Lyngbya*, *Symploca* y *Actinomicetos* (Gamón-Olmo, 2017). Estos compuestos orgánicos naturales producidos como metabolitos por especies de microorganismos presentes en el agua como las descritas anteriormente.

En relación con esto surge una investigación desarrollada por Yaparathne, Tripp, y Amirbahman, en el 2017 denominada Fotodegradación de compuestos de sabor y olor en agua en presencia de fotocatalizadores de TiO₂-SiO₂ inmovilizados. La desinfección por radiación ultravioleta (UV) es una tendencia creciente en los sistemas públicos de tratamiento de agua por su efectividad con respecto a la inactivación de protozoos y otros agentes como microorganismos patógenos. Sin embargo, la eliminación de diferentes

Guillermo Centeno-Bordones

clases de compuestos orgánicos, incluido el sabor y los compuestos de olor en el agua no son efectivos con la radiación UV. En este estudio, El fotocatalizador TiO_2 inmovilizado se desarrolló para mejorar la fotodegradación UV de dos de los principales compuestos de sabor y olor, el 2-metil isoborneol (MIB) y Geosmin (GSM) en agua potable.

El TiO_2 modificado con polvo P-25 de Evonik (anteriormente Degussa) se inmovilizó en portaobjetos de vidrio usando la mezcla sol-gel $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ como aglutinante y se calcinó a $500\text{ }^\circ\text{C}$. Varias películas catalizadoras se sintetizaron con diferentes cantidades de Si y se caracterizaron. La degradación fotocatalítica de MIB y GSM se investigó irradiando soluciones acuosas bajo luz UV-A (350 nm). La generación de radicales hidroxilos ($^\circ\text{OH}$) también se evaluó para medir la actividad de las películas de fotocatalizador. Las Películas catalizadoras con relaciones de superficie de Ti: Si ≈ 6 mostraron tasas de degradación similares pero mejor robustez en comparación con las películas P25 inmovilizadas.

Los resultados obtenidos en este estudio muestran que las películas de catalizador modificado con polvo P25 tienen la capacidad de fotodegradar compuestos de sabor y olor más eficientemente que el tratamiento solo con UV. El P25 inmovilizado sobre el sustrato de vidrio sin el recubrimiento de sol-gel $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$, a pesar de su alta eficiencia fotocatalítica, no tenía una adherencia fuerte y estable; la mezcla sol-gel ayuda en la unión de P25 al sustrato de manera robusta. La película de catalizador modificada en polvo con una relación Si: Ti = 3% fue capaz de degradar $\sim 80\%$ de MIB y GSM en una hora (Yaparathne, Tripp, y Amirbahman, 2017). Se observó actividad fotocatalítica con respecto a los compuestos de sabor y olor. Evidenciando que Estas películas catalizadoras pueden usarse para aumentar la radiación UV existente sistemas de desinfección para la eliminación de compuestos de sabor y olor y otros contaminantes orgánicos en instalaciones de tratamiento de agua potable y aguas residuales.

Guillermo Centeno-Bordones

Desinfección de aguas pluviales una alternativa ante la escases del recurso hídrico

La calidad del agua de lluvia, pluvial o meteórica es implícitamente mejor que el de las aguas superficiales, debido a la composición que no permite que se deteriore tanto como las otras que están expuestas constantemente a más agentes contaminantes (Calheiros, *et al* 2015). El agua de lluvia si es bien tratada en cuanto a su recolección, distribución y almacenamiento puede ser utilizada directamente para algunos usos domésticos como lavado sanitario, lavado y limpieza de pisos, inodoros y riego de jardines. Asimismo, se sabe que se puede utilizar para distintos usos comerciales e industriales. Para que el agua pueda ser potable, se deben realizar purificaciones y desinfecciones más especializadas. Sin embargo, ello representaría un gasto adicional dependiendo del tipo de sistema de purificación que se decida implementar (Calheiros, *et al* 2015; León-Romero, 2016).

En un estudio realizado en el 2018 por los investigadores García-Hernández, *et al* con una investigación titulada purificación de agua de lluvia en un reactor de fotocátalisis heterogénea nanoestructurada con $\text{TiO}_2/\text{UV}/\text{aire}$, se pudo demostrar que mediante la aplicación de tecnologías fotocatalíticas a través de la fotorreacción con un catalizador para generar especies reactivas de oxígeno ($^{\circ}\text{OH}$, $\text{O}_2^{\circ-}$), las cuales degradan contaminantes orgánicos y eliminan microorganismos en el agua de lluvia. Se evaluó este POA para la purificación del agua de lluvia recolectada y almacenada durante 5 años. Se utilizó un fotorreactor con nano- $\text{TIO}_2/ \text{UV}/\text{aire}$, bajo las condiciones estudiadas y en un lapso de 15 min de tratamiento, se eliminaron completamente los coliformes totales y *E. coli*. Además, se obtuvo una disminución en la DQO (44 a 39 mg/L), de COT (0.7588 a 0.4834 mg/L) y de NT (6.2029 a 4.7385 mg/L). En este estudio se comprobó que el sistema de fotocátalisis con nano- $\text{TIO}_2/\text{UV}/\text{aire}$ es factible para potabilizar el agua de lluvia almacenada convirtiéndose en una tecnología alternativa para la purificación de aguas meteóricas en zonas rurales y poco acceso al recurso hídrico.

Guillermo Centeno-Bordones

En este mismo orden de ideas una investigación realizada por los investigadores, Agudelo, Terranova, y Alcantar, (2018) comprobaron que la aplicación de la fotocatalisis para la pasteurización y desinfección del agua de lluvia es efectiva utilizando radiación solar. La fotocatalisis heterogénea se presenta como una alternativa de potencial implementación y operación, porque buscan el aprovechamiento de la radiación y el incremento de la temperatura, haciéndola apta para emplearla en múltiples locaciones, principalmente donde existan fuentes de abastecimiento que presenten bajos niveles de turbiedad en el agua pluvial. Para verificar la efectividad de estas técnicas, se evaluó una unidad compuesta por un sistema de captación de aguas lluvias, un filtro lento de arena y un sistema de desinfección solar compuesto por fotocatalisis, que emplea como catalizador dióxido de titanio (TiO_2) en forma de anatasa 99 % en un lecho fijo. La caracterización del afluente mostró valores de turbiedad iguales a 3,29 UNT, pH de 6,4 y presencia de coliformes. La eliminación de microorganismos se hizo efectiva en días con índices de radiación por encima de 4UV (longitudes de onda de 315-400 nm), estados de los tiempos soleados o parcialmente nublados y valores de turbiedad de 4 UNT. El efluente presentó efectividad próxima al 60 % en la remoción de turbiedad y 100 % en coliformes. Los resultados obtenidos permiten el uso del agua tratada en actividades complementarias, excluyendo el consumo humano.

La implementación de un sistema de tratamiento constituido por filtración y desinfección solar por fotocatalisis, para un afluente producto de la captura de aguas de lluvias, pudo contribuir a la carencia del recurso en una locación vulnerable; no obstante, si se presenta el hecho de que en la localidad en la que se desea implementar el piloto no se cuenta con probabilidad alta de precipitación, se puede buscar una fuente de agua con bajos niveles de turbiedad para tratar, como se ha mencionado anteriormente; el sistema de tratamiento de fotocatalisis solo es efectivo si la turbiedad del agua es baja ya que, si fuera al contrario, los rayos ultravioleta no pueden actuar efectivamente con el catalizador dióxido de titanio (Agudelo, Terranova, y Alcantar, 2018).

Guillermo Centeno-Bordones

Esta tecnología depende de las condiciones meteorológicas y climatológicas de la zona donde se implemente el proyecto, las variables más importantes son la carga hidráulica en función de la radiación, la turbiedad, la presencia de coliformes y la temperatura, variables que determinaron las unidades de captación de agua lluvia, tratamiento de filtración y desinfección solar, empleando materiales adecuados para cada una de las variables: carga hidráulica y turbiedad (Filtro lento de arena), radiación (vidrio Pyrex borosilicato), temperatura: (tubo negro y tapa en acrílico), coliformes (sistema de desinfección solar por fotocátalisis heterogénea con catalizador dióxido de titanio). El proceso de análisis permitió evidenciar que, en la filtración, a mayor carga hidráulica, menor eficiencia en cuanto a remoción de turbiedad, factor que influye en el paso de la radiación. Asimismo, en los resultados de la influencia de la radiación y la turbiedad en la desinfección (presencia de coliformes), se observó que con índices de radiación que van desde los 4UV se presenta desinfección en el sistema de fotocátalisis heterogénea. La evaluación del sistema de desinfección solar indica que no hubo ausencia de coliformes, puesto que la temperatura ambiente de la zona no fue suficiente para elevar la temperatura del agua en el sistema a más de 60 °C, lo que indica que la desinfección se logró por la fotocátalisis heterogénea, y la generación de radicales libres. Lo anterior basado en que este proceso causa daño celular por la generación de radicales OH en la superficie del fotocatalizador y por la absorción directa de la radiación UV por las células, lo que contribuye en gran medida a promover la inactivación celular (Agudelo, Terranova, y Alcantar, 2018).

Desinfección primaria de aguas superficiales y subterráneas con fotocátalisis solar una alternativa de futuro

En numerosas ocasiones el agua que llega a las viviendas de muchas comunidades rurales proviene de manantiales, ríos, arroyos, ojos de agua, pozos profundos u otros tipos de fuentes naturales casi siempre expuestas a contaminación (Pedraza, y de Jesús,

Guillermo Centeno-Bordones

2017), por lo que se busca la necesidad de una tecnología para la desinfección del agua que sea barata y accesible para minimizar los incidentes de las enfermedades transmitidas por el agua.

El proceso de desinfección solar del agua (SODIS) es una tecnología simple, usada para mejorar la calidad microbiológica del agua para consumo humano, es un tratamiento ideal para pequeñas cantidades de agua, que utiliza botellas de plástico llenas de agua contaminada y se exponen a la luz solar por seis horas, este proceso requiere de agua con turbiedad menor a 30 UNT (Keogh, *et al* 2017). El efecto de la inactivación de microorganismos en el proceso SODIS es atribuido al calentamiento por la radiación infrarroja y a la radiación ultravioleta A (UVA) (Keogh, *et al* 2017).

En relación con lo anterior, se desarrolló una investigación titulada desinfección fotocatalítica del agua para consumo humano usando luz solar y dióxido de titanio (TiO₂) inmovilizado, realizada por Rico, *et al* (2018).

Una tecnología simple, de bajo costo, accesible y ambientalmente sostenible, para desinfección del agua, que minimice las enfermedades transmitidas por ésta. El proceso que cumple con estas características es el de desinfección solar del agua (SODIS), Figura 4. En esta investigación se mejoró dicho proceso, que puede ser usado en la desinfección del agua para consumo humano a nivel doméstico, e implementarse en lugares donde no hay acceso al agua potable. La mejora consistió en el uso de un reactor solar con TiO₂ inmovilizado en vidrio Pyrex (borosilicato con 80 % de transmitancia de radiación UV) en donde se llevó a cabo el proceso de desinfección oxidativa solar, con ello se logró reducir el tiempo de exposición a la radiación solar de seis horas a dos horas y se incrementó la eficiencia de la inactivación de coliformes totales y fecales (Rico, *et al* 2018).

Guillermo Centeno-Bordones



Figura 4. Montaje de la tecnología experimental para desinfección solar de agua (SODIS).

Con la prueba comparativa del efecto de utilizar SODIS y SODIS con TiO_2 , se concluye que, al utilizar el fotocatalizador, el proceso de desinfección es más eficiente que el SODIS convencional. En la inactivación de Coniformes totales se requieren de 2 h para SODIS con TiO_2 y para SODIS de 4 h, esto representa un 50% menor en el tiempo de exposición solar para desinfectar el agua. Utilizar SODIS con TiO_2 también garantiza que cuando se almacena el agua por un periodo de siete días no hay recrecimiento de coliformes totales. Como puede suceder con SODIS convencional (Rico, *et al* 2018).

La inactivación química de los contaminantes microbiológicos en agua natural o no tratada es normalmente uno de los pasos finales de la purificación para la reducción d microorganismos patógenos en el agua.

La combinación de diferentes pasos o técnicas fisicoquímicas para la purificación del agua sea esta de origen superficial o de pozo profundo tiene como finalidad la producción de agua potable y segura para la salud. Como medida adicional en muchas plantas de

Guillermo Centeno-Bordones

tratamiento utilizan un método secundario de desinfección del agua, para evitar y proteger las aguas de la contaminación biológica que se pudiera producir en la red de distribución (Lemus-Pérez, 2017). Normalmente se utilizan un tipo de desinfectante diferente al que se utilizó en el proceso de purificación durante etapas previas. El tratamiento secundario de desinfección (normalmente cloro) asegura que las bacterias no se multiplican en el sistema de distribución y almacenamiento del agua. Esto es necesario porque las bacterias pueden permanecer en el sistema y en el agua a pesar de un tratamiento primario de desinfección, o pueden aparecer posteriormente durante procesos de retrolavado o por mezcla de aguas contaminadas (ej. por inclusión de bacterias en las procedentes de aguas subterráneas que se introducen debido a grietas en el sistema de tuberías o distribución) (Sosa y Sanjuan, 2018).

La desinfección normalmente provoca la corrosión de la pared celular de los microorganismos, o cambios en la permeabilidad de la célula, cambios en la actividad de protoplasma celular o actividad enzimática (debido al cambio estructural de las enzimas). Estos problemas en la célula evitan la multiplicación de los microorganismos. Los desinfectantes también provocan la oxidación y destrucción de la materia orgánica que son generalmente nutrientes y fuente de alimentación de los microorganismos (Almendariz-González, 2017).

Tomando en cuenta lo anteriormente expuesto se presenta una investigación desarrollada por Reddy, *et al* (2017), Desinfección fotocatalítica a base de TiO_2 de microbios en medios acuosos, en este estudio se demostró que el TiO_2 tiene un gran potencial para la desinfección / inactivación de patógenos nocivos (como *E. coli* en medios acuosos) junto con su conocida utilidad en diversos contaminantes químicos. La desinfección por medio del TiO_2 se atribuye principalmente a la generación superficial de especies reactivas de oxígeno (ROS), así como a la libre formación de iones metálicos. Además, su capacidad de desinfección y su rendimiento general pueden ser significativamente mejorados a través de modificaciones del material TiO_2 .

Guillermo Centeno-Bordones

Diversos materiales compuestos con TiO_2 en la desinfección de una amplia gama de patógenos microbianos perjudiciales para el medio ambiente (p. ej bacterias, hongos, algas y virus) en medios acuosos. Los factores que influyen (como el diseño del reactor, la química del agua y las modificaciones de TiO_2) en estos procesos se discuten junto con los mecanismos de desinfección. Se cree que la aplicación combinada de desinfección y descontaminación será muy importante (Reddy, *et al* 2017). Los investigadores afirman que esta tecnología de desinfección basada en fotocátalisis ofrece una excelente perspectiva para el tratamiento del agua. Sin embargo, las técnicas adolecen de muchos obstáculos para la mejora de esta tecnología, como la fotocátalisis requiere de diseño de materiales, condiciones de operación, diseño de reactores, etc. Uno de los factores más importantes es la ingeniería de materiales de la fotocatalítica porque deben mejorarse para maximizar su sensibilidad solar o de radiación UV.

En relación con lo anterior Malato *et al* (2016) Descontaminación y desinfección del agua por fotocátalisis solar: plantas pilotos de la Plataforma solar de Almería. Esta investigación desarrolla una revisión del uso de la luz solar para producir especies radicales de oxígeno mediante nanofotocátalisis de TiO_2 . La reacción describirá los sistemas necesarios para realizar la fotocátalisis solar y los factores que rigen la cinética de la fotocátalisis, como la concentración inicial de reactivo, la masa del catalizador, el pH, se destacan la temperatura, el flujo radiante y la concentración de oxígeno. Varios enfoques para mejorar la eficiencia de la fotocátalisis de TiO_2 también se describirán. Problemas de ingeniería de reactores solares para el tratamiento fotocatalítico del agua y el uso de los procesos fotocatalíticos solares. Con el fin de inactivar microorganismos presentes en el agua, poniendo especial énfasis en los mecanismos que actúan durante el proceso, principalmente la generación de radicales hidroxilo y oxígeno singlete, y en sistemas experimentales realizados para optimizar esta técnica de desinfección

La desinfección del agua es esencial para el consumo de agua segura, además de la conocida tarea de desinfección del agua potable, la segunda cuestión más crítica es la

Guillermo Centeno-Bordones

desinfección del agua para la agricultura, el agua de lluvia almacenada o agua superficial utilizada para riego puede acumular bacterias fitopatógenas, hongos y virus.

Los fitopatógenos pueden combatirse con pesticidas, pero esto implica muchos aspectos negativos. El cloro se usa ampliamente, pero tiene el inconveniente de los subproductos de desinfección y su resistencia. Recientemente se han provisto investigaciones sobre desinfección solar y fotocatalítica solar combinando sostenibilidad con bajo costo que conduzca a una eficiencia de método de desinfección, no solo para el agua potable, sino también para riego (Malato *et al* 2016).

La aceleración y mejora de la inactivación de microorganismos en agua bajo radiación solar mediante el uso de fotocatalítico ha sido ampliamente probado utilizando energía radiante artificial y natural, para fotoactivar nanopartículas de TiO₂ suspendidas o inmovilizado contra una gran cantidad de microorganismos acuáticos como células bacterianas (*Escherichia coli*, *Enterococcus faecalis*, coliformes totales, *Salmonella*, *Pseudomonas*, etc.), partículas virales (fago MS2, ARN, bacteriófagos, phiX-174, etc.), esporas de bacterias y hongos (*Bacillus subtilis*, *Fusarium*, *Candida albicans*, *Aspergillus niger*, *Phytophthora*, etc.), y parásitos acuáticos. Investigaciones recientes de desinfección con TiO₂ se centran más en la desinfección aplicada a microorganismos más resistentes como *Bacillus spp.*, y esporas de *Cryptosporidium*, *Clostridium*, partículas virales, esporas de ántrax y resistencia a los antimicrobianos (Malato *et al* 2016).

La desinfección fotocatalítica en agua requiere decenas de minutos de exposición directa a los rayos UVA en presencia de TiO₂ (o un fotocatalizador modificado) para observar cualquier inactivación significativa en el viable microorganismo presentes en el agua. En comparación con el estándar de los procesos de desinfección del agua como UVC (desinfección en pocos segundos), se considera una inactivación microbiana bastante lenta.

Guillermo Centeno-Bordones

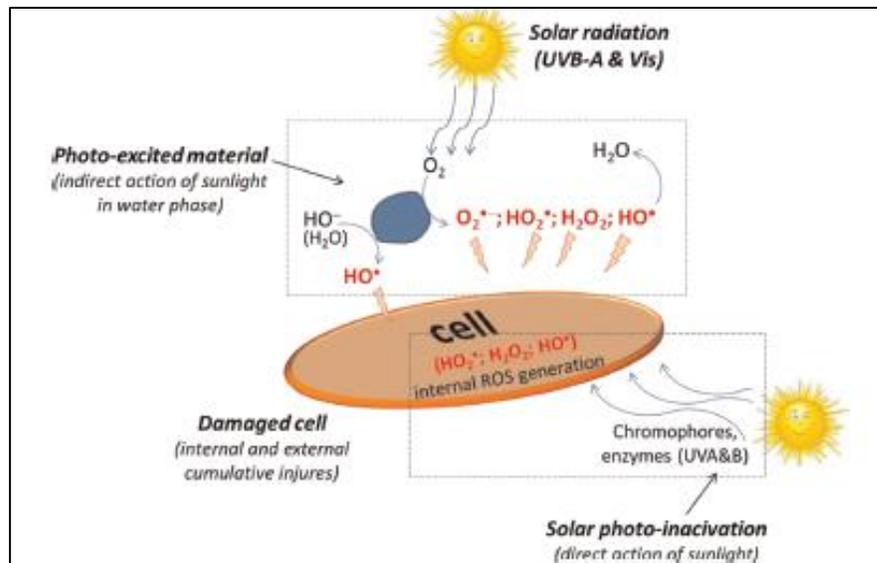


Figura 5. Diagrama del mecanismo de acción de la fotocatalisis con luz solar en la desinfección de agua.

Contrariamente al cloro, la fotocatalisis mediada por TiO₂ no tiene calidad residual ya que su efecto perjudicial se atribuye principalmente a la generación de los ROS bajo radiación UVA, que inmediatamente reaccionan con compuestos orgánicos y microorganismos en agua. Tras la fotoexcitación del catalizador, se genera un rango de los ROS en la interfaz de solución de partículas semiconductoras; principalmente estos ROS son radicales hidroxilo (HO•), que según la mayoría de trabajos de investigación son la principal especie responsable de la inactivación de los microorganismos, el anión radical superóxido (O₂^{-•}), el radical hidroperoxilo (HO₂[•]) y el peróxido de hidrógeno (H₂O₂), que también puede contribuir al proceso biocida (Patiño, *et al* 2018; Malato *et al* 2016).

Diferentes evidencias experimentales señalan que el ataque prolongado de los ROS sobre microorganismos, Figura 5; además existe un acuerdo general sobre el papel principal del radical hidroxilo que oxida los componentes externos de la pared celular, seguido por la formación de poros en la membrana citoplasmática y el ataque directo de

Guillermo Centeno-Bordones

los componentes intracelulares da como resultado la pérdida de vitalidad de los microorganismos. Algunos estudios contribuyen a la misma idea que muestran pruebas de la pérdida de fluidez y el aumento de la permeabilidad iónica de pared celular externa (Patiño, *et al* 2018; Malato *et al* 2016).

El uso de nuevos materiales fotocatalíticos modificados con fotoactividad en el rango visible tienen un gran interés por las aplicaciones con radiación solar un ejemplo reciente es el dióxido de titanio con un compuesto reducido de óxido de grafeno (TiO₂ – RGO), que han sido demostrado para mejorar la eficiencia fotocatalítica de TiO₂ nanopartículas en la región visible para la inactivación bacteriana y fúngica (Malato *et al* 2016).

Este material fue sintetizado por reducción fotocatalítica de óxido de grafeno exfoliado (GO) por TiO₂ (Evonik Aeroxide P25) bajo irradiación UV en presencia de metanol como un hueco-aceptor. Los compuestos TiO₂-RGO fueron probados para la desinfección de agua contaminada con células de *E. coli* y esporas de *Fusarium solani* bajo luz solar natural, que muestra una inactivación rápida y variable de *E. coli* y las esporas de *F. solani*. Los resultados mostraron una tasa mejorada en la eficacia de inactivación del compuesto TiO₂-RGO en comparación con P25 solo (TiO₂ comercial). La alta actividad de TiO₂-RGO se atribuyó a la producción de oxígeno singlete con excitación de la luz visible del compuesto de TiO₂-RGO que conducirían a la inactivación de *E. coli*, mientras que las esporas de *Dusarium* permanecieron resistentes. La membrana de la célula de microorganismos es el objetivo probable para el oxidante oxígeno singlete que causan la pérdida de viabilidad de las células bacterianas. Otros estudios con fotosensibilizadores activos en el rango visible demostraron que la generación de oxígeno singlete puede inactivar el *E. coli* y *Deinococcus radiodurans* para la desinfección del agua. (Malato *et al* 2016).

La morfología de las nanopartículas de fotocatalizador también puede ser objeto de estudio durante la desinfección fotocatalítica. Un estudio reciente investigó cuatro morfologías de TiO₂, nanotubos (NT), nanoplacas (NPL), nanorods (NR) y nanoesferas

Guillermo Centeno-Bordones

(NS) para la inactivación de esporas de *F. solani* en agua. Este estudio mostró que el solar con inactivación fotocatalítica de estas esporas estaba relacionada con la exposición de las facetas de TiO₂, descubriendo que las nanoesferas de TiO₂ tienen la mejor desinfección y eficiencia con respecto a las otras morfologías. La eficiencia de un material para reacciones fotoquímicas y fotocatalíticas con aplicaciones de desinfección del agua dependen del material, su composición y estructura superficial, pero también de la configuración del catalizador en el reactor, este factor puede alterar significativamente la desinfección. (Malato *et al* 2016).

Hay dos formas de usar el TiO₂ para el tratamiento del agua, (i) como partículas suspendidas; y (ii) como inmovilizado sobre soportes apropiados que son resistentes a los procesos fotocatalíticos y también a las condiciones hidrodinámicas (flujo y presión) en el foto-reactor durante el proceso (Figura 6). El uso de uno u otro tipo de configuración también estará determinado por la solicitud o necesidad detectada. Si el sistema está diseñado para purificación de agua potable para consumo humano, el uso de partículas de TiO₂ suspendidas, como parte de una intervención de rutina para mejorar la potabilidad del agua a nivel doméstico puede no ser aceptable debido a las preocupaciones sobre la toxicidad de los nanomateriales y las partículas del fotocatalizador tendrían que eliminarse antes consumo (Medina-Pérez, y Fernández-Luqueño, 2018). Para evitar este problema, se puede utilizar el fotocatalizador como un sistema inmovilizado, pero esto resultará en unas menores tasas de desinfección o sistemas más complejos y por ende con mayor costo de ejecución y escalamiento. (Malato *et al* 2016).

La configuración del catalizador en el reactor (Figura 6) puede significativamente afectar el resultado de desinfección, típicamente suspensiones acuosas de partículas de TiO₂ y TiO₂ inmovilizado sobre una matriz inerte. Si el sistema está diseñado para la purificación del agua potable, el uso de TiO₂ en suspensión no es factible. Desafortunadamente, en la desinfección fotocatalítica, casi todos los TiO₂ inmovilizados tenían muy poco

Guillermo Centeno-Bordones

rendimiento o implica un esfuerzo técnico que conduce a un alto costo. La inmovilización de TiO_2 produce una desinfección más baja en comparación con los sistemas de lodos de óxido de titanio. (Malato *et al* 2016).

Guillermo Centeno-Bordones

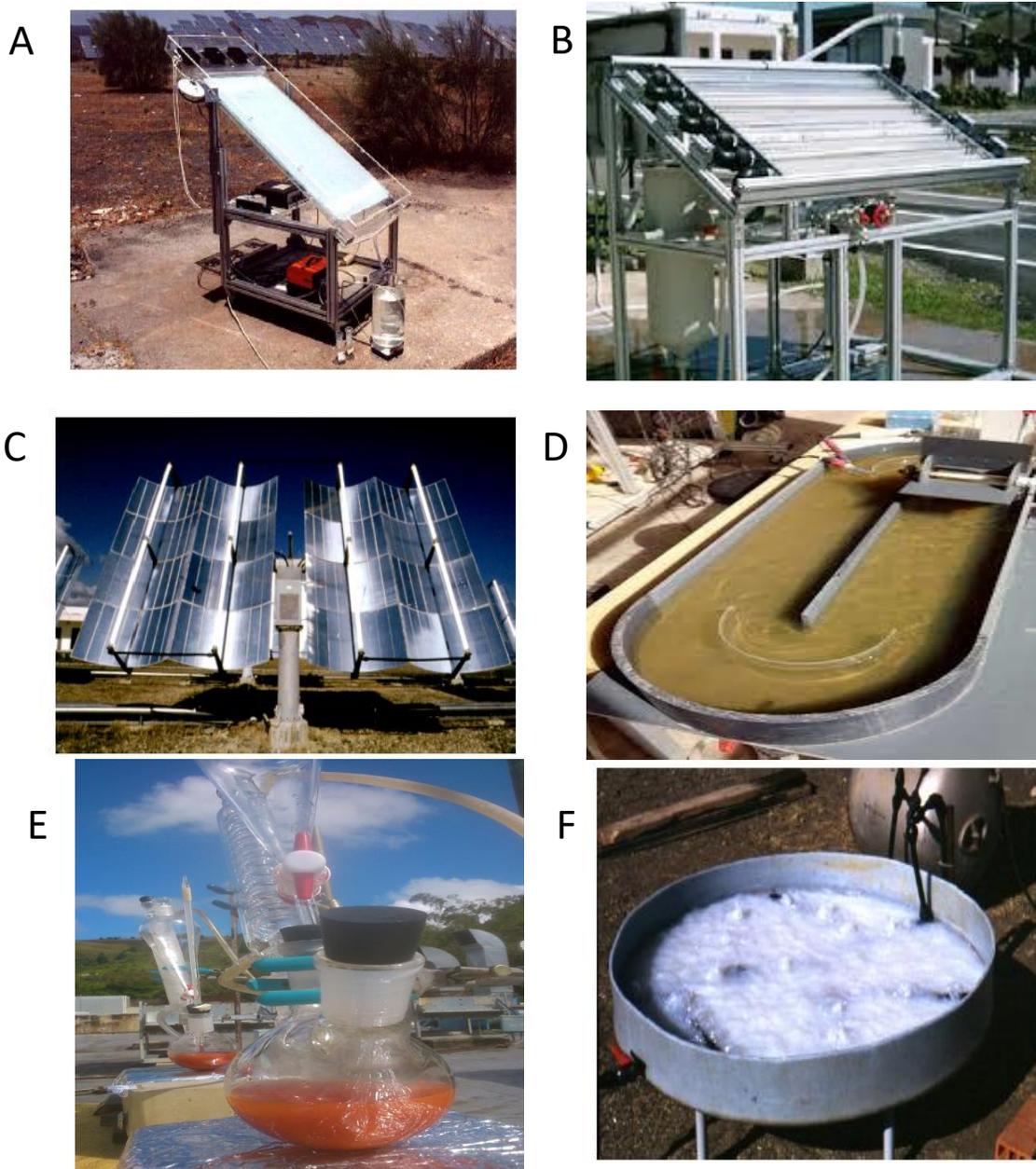


Figura 6. Reactores solares experimentales: A.- Reactor tipo placa plana o cascada, B.- Reactor cilindro parabólico de un eje, C.- Reactor cilindro parabólico compuestos de dos ejes móviles o seguimiento solar, D.- Reactor tipo carrusel, E.- Reactor bach de bosorosilicato o cuarzo, F.- Reactor bach de balsa superficial.

Guillermo Centeno-Bordones

El modo de irradiación en el fotoreactor también tiene una gran influencia sobre el comportamiento de desinfección. Cuando la exposición a la luz es continua (sin interrupciones temporales) el efecto bactericida del proceso es rápido y más eficiente que cuando la luz se aplica de forma intermitente porque los mecanismos bacterianos de reparación oscura permiten que las bacterias se reactiven después del tratamiento (Betancur, Hernández, y Buitrago Sierra, 2016; Malato *et al* 2016). Este hecho también puede atribuirse al daño parcial producido por la radiación que no puede inactivar totalmente todas las colonias de bacterias presentes en el agua. Por lo tanto, hay aspectos que son esenciales como generar una tecnología en desinfección fotocatalítica solar que permitan:

- (i) la optimización de los fotorreactores teniendo en cuenta los procesos y sus requisitos específicos;
- (ii) el desarrollo de esquemas de procesos viables (lote, continuo, semicontinuo);
- (iii) el desarrollo de estrategias de control del proceso; (iv) la influencia de los parámetros del proceso;
- (v) la evaluación de la influencia de los parámetros fisicoquímicos del agua,
- (vi) que descubra aplicaciones diferentes a la desinfección de agua potable (como un sistema libre de químicos para controlar los patógenos en la agricultura) (Malato *et al* 2016).

CONCLUSIONES

La revisión de los conceptos y fundamentos de la fotocatalisis permitió esclarecer este proceso, la descripción de las reacciones posibles en la superficie del TiO_2 ha abierto el campo de investigación sobre aplicaciones de interés en el tratamiento de agua, por hidrólisis, o a través de la degradación de contaminantes como materia orgánica natural. Sin embargo, la eficiencia de estas aplicaciones requiere mejorar a través de estrategias

Guillermo Centeno-Bordones

de modificación de los fotocatalizadores existentes, para esto, es importante recordar que los parámetros que benefician ciertas reacciones pueden tener un efecto perjudicial en otras, y, por tanto, un análisis más profundo debe ser realizado en su puesta en práctica. El desarrollo de fotocatalizadores exige a la comunidad científica mejorar la capacidad que tienen los semiconductores para adsorber la radiación solar y ultravioleta para mejorar su eficiencia. Como proceso de desinfección la fotocatálisis posee un amplio espectro de acción para la eliminación de microorganismos como bacterias, virus, hongos y protozoos. Este proceso tiene amplia efectividad en la eliminación de coliformes fecales y totales gracias a la generación de sustancias radicales de oxígeno que permiten la inactivación de estas especies indicadoras de contaminación de agua potable. La desinfección mediante esta técnica tiene como principal objetivo la eliminación de las especies de microorganismos presentes en el agua al momento de la reacción, lo que hace necesario el uso de un sistema de desinfección secundario (cloración u otros) que permitan la desinfección de la red de distribución y de almacenamiento del agua potable. Entre sus ventajas es que con este sistema se puede utilizar luz solar permitiendo realizar una reacción fotocatalítica sustentable energéticamente, disminuyendo la materia orgánica natural y por lo tanto la cantidad de carbono asimilable por los microorganismos disminuyendo su multiplicación y al mismo tiempo la generación de sustancias orgánicas tóxicas por la adición de un desinfectante secundario como el cloro.

FINANCIAMIENTO

No monetario.

AGRADECIMIENTO

Al Centro de Investigaciones en Ambiente, Biología y Química y a la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad de Carabobo; por apoyar el desarrollo de la investigación.

REFERENCIAS

- Aguas, Y., Hincapie, M., Fernández-Ibáñez, P., & Polo-López, M. I. (2017). Solar photocatalytic disinfection of agricultural pathogenic fungi (*Curvularia* sp.) in real urban wastewater. *Science of the Total Environment*, 607, 1213-1224. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.085>
- Agudelo, A. C. Q., Terranova, C. A. V., & Alcantar, J. P. S. (2018). Evaluación de un sistema de fotocatalisis heterogénea y pasteurización para desinfección de aguas lluvias. [Evaluation of a heterogeneous photocatalysis and pasteurization system for rainwater disinfection.]. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 28(1), 117-134. <https://doi.org/10.18359/rcin.2350>
- Almendariz González, A. B. (2017). Análisis microbiológico de las aguas del Parque de las Fuentes del cantón Guano, perteneciente a la provincia Chimborazo [Microbiological analysis of the waters of the Parque de las Fuentes of the Guano canton, belonging to the Chimborazo province]. (Bachelor's tesis), Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Chimborazo, Ecuador.
- Álvarez, E. A. V. (2017). Enfermedad de transmisión digestiva y factores riesgo. Aplicación de un método de evaluación rápida [Digestive transmission disease and risk factors. Application of a rapid evaluation method]. *Gaceta Médica Espirituana*, 9(2), 11.
- Barber Núñez, B. (2018). Estudio de la degradación fotocatalítica de naftaleno mediante compositos de óxido de cerio-dióxido de titanio P25. [Study of the photocatalytic degradation of naphthalene by means of cerium oxide-titanium dioxide P25 compounds].
- Bazán, R., García, M., Lozada, J. M. D., Chalimond, M. L., Herrero, H., Bonansea, M., ... & Cossavella, A. (2018). Estudio multidisciplinario e interinstitucional de dos fuentes principales de agua potable para la Provincia de Córdoba [Multidisciplinary and inter-institutional study of two main sources of drinking water for the Province of Córdoba]. *Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 5, 57.
- Betancur Henao, C. P., Hernández Montes, V., & Buitrago Sierra, R. (2016). Nanopartículas para materiales antibacterianos y aplicaciones del dióxido de titanio [Nanoparticles for antibacterial materials and titanium dioxide applications]. *Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas*, 35(4), 387-402.

Guillermo Centeno-Bordones

- Bohorquez Aliaga, P. I. (2019). Aplicación de la Metodología costo beneficio para la evaluación económica de proyectos de plantas de tratamiento de agua potable– Camaná 2018 [Application of the cost-benefit methodology for the economic evaluation of drinking water treatment plant projects - Camaná 2018]. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Arequipa, Perú.
- Calheiros, Herlane Costa; GOMES, Mônica Regina y ESTRELLA, Percy Máximo Anco. Calidad de las aguas meteóricas en la ciudad de Itajubá, Minas Gerais, Brasil [Quality of meteoric waters in the city of Itajubá, Minas Gerais, Brazil]. *Rev. Ambient. Água*. 2015, vol.9, n.2, pp.336-346. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1329>
- Campos, A. C. E., & Vargas, P. A. A. (2019). Análisis técnico y ambiental de una planta de tratamiento compacta de agua potable en Villarrica-Tolima [Technical and environmental analysis of a compact drinking water treatment plant in Villarrica-Tolima]. *Boletín Semillas Ambientales*, 13(1), 40-51.
- Cantoral Uriza, E. A., Asencio Martínez, A. D., & Aboal Sanjurjo, M. (2017). Cianotoxinas: efectos ambientales y sanitarios. Medidas de prevención [Cyanotoxins: environmental and health effects. Prevention measures]. *Hidrobiológica*, 27(2), 241-251.
- Carrasquero, S., Ferreira, M., Mezzoni, V., Acosta, R, Marin, J., & Colina, G. (2016). Efectividad del quitosano en la clarificación de aguas para una industria procesadora de alimentos [Effectiveness of chitosan in water clarification for a food processing industry]. *Revista de la Facultad de Ingeniería UCV*, 31(2), 57-68.
- Castillo, A. U. (2016). Regeneración de aguas depuradas mediante fotocatalisis heterogénea con dióxido de titanio: Análisis de variables influyentes. Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España [Regeneration of treated water by heterogeneous photocatalysis with titanium dioxide: Analysis of influencing variables. University of Zaragoza, Zaragoza, Spain].
- Centeno-Bordones. G, & Jiménez, Y. (2018). Uso de Lodos Rojos como catalizador en los procesos de oxidación avanzada: una aproximación al estado del arte [Use of Red Mud as a catalyst in advanced oxidation processes: an approach to the state of the art]. *Tekhné*, 21(4).

Guillermo Centeno-Bordones

- Corrales González, Y. (2018). Estudio de la capacidad fotocatalítica de películas delgadas de dióxido de titanio generadas a partir de titanio metálico soportadas en placas de titanio metálico y vidrio conductor (FTO) [Study of the photocatalytic capacity of titanium dioxide thin films generated from metallic titanium supported on metallic titanium plates and conductive glass (FTO)]. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Correa Assmus, G. (2017). Acceso al agua, pobreza y desarrollo en Colombia [Access to water, poverty and development in Colombia]. *Revista de la Universidad de la Salle*, 2017(72), 27-46.
- Cuartero, J. L. G., Rodríguez, M. C., Gallego, C. T., Castillo, F. J. G., & Gómez, M. O. (2017). Planta piloto para la selección de la mejor tecnología de potabilización en aguas superficiales. In XXXIV Jornadas Técnicas de AEAS (pp. 84-93) [Pilot plant for the selection of the best surface water purification technology. In XXXIV AEAS Technical Conference]. Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento. Toledo, España.
- Cuicas, J. R. P., & Cuadra, R. L. A. (2017). Evaluación de la electrocoagulación en el tratamiento de agua potable [Evaluation of electrocoagulation in drinking water treatment]. *Química Viva*, 16(1), 56-69.
- Chávez, J. A. V. (2018). Calidad del agua y desarrollo sostenible [Water quality and sustainable development]. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 35, 304-308. <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2018.352.3719>
- OMS (2018). Informe sobre los resultados de la OMS: presupuesto por programas 2016-2017 (No. A71/28). [WHO Performance Report: Program Budget 2016-2017 (No. A71/28)]. Organización Mundial de la Salud.
- Echarddak Yahyaoui, K. (2018). Estudio de distintos sistemas de cloración del agua potable [Study of different drinking water chlorination systems] (Master's thesis), Universitat Politècnica de Catalunya, Cataluña, España.

Guillermo Centeno-Bordones

- Gamón Olmo, A. (2017). Estudio de la problemática organoléptica en aguas potables asociadas a proliferaciones de algas en las fuentes de abastecimiento. Aplicación al caso de la ETAP el Realón en Picassent (Valencia) (Doctoral dissertation) [Study of organoleptic problems in drinking water associated with algae blooms in supply sources. Application to the case of the Realón DWTP in Picassent (Valencia) (Doctoral dissertation)]. Universidad Politécnica de Valencia, España.
- Gómez Muñoz, B. V. (2017). Remoción de azul de metileno mediante fotocatalisis heterogénea [Removal of methylene blue by heterogeneous photocatalysis] (Doctoral dissertation, Facultad de Ingeniería-Ingeniería Ambiental-UNICACH). Universidad Católica de Chiguagua, Chiguagua, Mexico.
- González López, S. C., & Pinto Acosta, K. Y. (2018). Incidencia de la radiación solar, rayos UV y temperatura, en el crecimiento de coliformes totales y fecales en arena de playa puerto mocho en la ciudad de Barranquilla [Incidence of solar radiation, UV rays and temperature, in the growth of total and fecal coliforms in Puerto Mocho beach sand in the city of Barranquilla] (Doctoral dissertation). Universidad de la Costa, Barranquilla, Colombia.
- González, J. G. (2015). El acceso al agua potable como derecho humano. Editorial Club Universitario [Access to drinking water as a human right. Publisher University Club]. *Revista Prolegómenos - Derechos y Valores* - pp. 125-146. <http://dx.doi.org/10.18359/prole.1683>
- Hernández Laverde, M. S., & Prieto Suárez, G. A. (2017). El papel de la fotocatalisis en la protección ambiental y química verde [The role of photocatalysis in green chemical and environmental protection]. *Investigación Joven*, 4 (1).
- Izquierdo, M. F. (2016). Fotocatalisis: nanomateriales para combatir la contaminación y obtener energía [Photocatalysis: nanomaterials to combat pollution and obtain energy]. *Boletín del Grupo Español del Carbón*, (41), 9-11.
- Keogh, M. B., Elmusharaf, K., Borde, P., & McGuigan, K. G. (2017). Evaluation of the natural coagulant Moringa oleifera as a pretreatment for SODIS in contaminated turbid water. *Solar energy*, 158, 448-454. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.10.010>

Guillermo Centeno-Bordones

- Lemus Pérez, M. F. (2017). Reacción del cloro con sustancias exopoliméricas provenientes de biopelículas de agua potable-subproductos de desinfección, características y toxicidad (Doctoral dissertation, Uniandes) [Reaction of chlorine with exopolymeric substances from drinking water biofilms-disinfection by-products, characteristics and toxicity]. Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.
- León Romero, L. M. (2016). Aprovechamiento sostenible de recursos hídricos pluviales en zonas residenciales [Sustainable use of rainwater resources in residential areas]. (Bachelor). Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.
- Loaiza, A., Segura, C. Q., Sierra, I. V., & Portela, L. (2016). Evaluación del efecto de la temperatura de calcinación sobre la actividad fotocatalítica de cinco marcas de dióxido de titanio comerciales en la degradación de azul de metileno en presencia de radiación UV [Evaluation of the effect of calcination temperature on the photocatalytic activity of five commercial titanium dioxide brands in the degradation of methylene blue in the presence of UV radiation]. Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI. Bogotá, Colombia.
- López Jiménez, E. V. (2016). Subproductos de la cloración del agua, su formación, reglamentación y riesgos para la salud humana [By-products of water chlorination, their formation, regulation and risks to human health] (Bachelor's thesis, Quito: UCE). Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador.
- Lucero Santos, E. M. (2017). Acceso al agua y su incidencia en la pobreza del cantón Cotacachi, provincia de Imbabura [Access to water and its impact on poverty in the Cotacachi canton, Imbabura province] (Bachelor's thesis). Universidad Técnica del Norte, Cotacachi, Ecuador.
- Malato, S., Maldonado, M. I., Fernandez-Ibanez, P., Oller, I., Polo, I., & Sánchez-Moreno, R. (2016). Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: The pilot plants of the Plataforma Solar de Almeria. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 42, 15-23. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.07.017>
- Mayer, B. K., Johnson, C., Yang, Y., Wellenstein, N., Maher, E., & McNamara, P. J. (2019). From micro to macro-contaminants: The impact of low-energy titanium dioxide photocatalysis followed by filtration on the mitigation of drinking water organics. *Chemosphere*, 217, 111-121. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.10.213>

Guillermo Centeno-Bordones

- Mayorga, O., & Mayorga, J. (2016). Propuesta de tratamiento del agua de consumo humano en pequeñas comunidades. Caso: sector Santa Rosa-La Hechicera (Mérida, Venezuela) [Proposal for the treatment of water for human consumption in small communities. Case: Santa Rosa-La Hechicera sector (Mérida, Venezuela)]. *Revista INGENIERÍA UC*, 23(3), 376-380.
- Medina-Pérez, G., & Fernández-Luqueño, F. (2018). Nanotoxicidad: retos y oportunidades. Mundo Nano. [Nanotoxicity: challenges and opportunities. Nano world] *Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 11(20), 7-16. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2018.20.64105>
- Mejía, A., Castillo, O., & Vera, R. (2016). Agua potable y saneamiento en la nueva ruralidad de América Latina [Drinking water and sanitation in the new rurality of Latin America]. Agua para el desarrollo; Bogotá: CAF. Colombia.
- Nam, S. N., Cho, H., Han, J., Her, N., & Yoon, J. (2018). Photocatalytic degradation of acesulfame K: Optimization using the Box–Behnken design (BBD). *Process Safety and Environmental Protection*, 113, 10-21. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.09.002>
- Nevárez-Martínez, M. C., Espinoza-Montero, P. J., Quiroz-Chávez, F. J., & Ohtani, B. (2017). Fotocatálisis: inicio, actualidad y perspectivas a través del tio₂ [Photocatalysis: beginning, current situation and perspectives through the tio₂]. *Avances en Química*, 12(2-3), 45-59.
- Orha, C., Pode, R., Manea, F., Lazau, C., & Bandas, C. (2017). Titanium dioxide-modified activated carbon for advanced drinking water treatment. *Process Safety and Environmental Protection*, 108, 26-33. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.07.013>
- Patiño Bello, D. P., Pérez Acevedo, L. V., Torres Caycedo, M. I., Rosas Leal, D. A., & Di Filippo Iriarte, G. (2018). Uso de biocidas y mecanismos de respuesta bacteriana [Use of biocides and bacterial response mechanisms]. *Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas*, 37(3), 1-17.
- Pedraza, I. G. R., & de Jesús Muñoz, E. (2017). Adsorbentes y materiales utilizados para filtración y reducción de contaminantes en aguas potables [Adsorbents and materials used for filtering and reducing contaminants in drinking water]. *Ciencia, Innovación y Tecnología*, 3, 51-61.

Guillermo Centeno-Bordones

- Posada González, N. L. (2017). Algunas nociones y aplicaciones de la investigación documental denominada estado del arte. [Some notions and applications of documentary research called state of the art] *Investigación bibliotecológica*, 31(73), 237-263. <https://doi.org/10.22201/iibi.24488321xe.2017.73.57855>
- Posso, J González, F Guerra, H Gómez. (2014). Estimación del potencial de energía solar en Venezuela utilizando sistemas de información geográfica. [Estimation of solar energy potential in Venezuela using geographic information systems] *Revista Geográfica Venezolana* 55, 27-43.
- Remucal, C. K., & Manley, D. (2016). Emerging investigators series: the efficacy of chlorine photolysis as an advanced oxidation process for drinking water treatment. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2(4), 565-579. DOI: [10.1039/C6EW00029K](https://doi.org/10.1039/C6EW00029K)
- Rico, C, Dávila, Arredondo, F & García, L. (2018). Desinfección foto-catalítica del agua para consumo humano usando luz solar y dióxido de titanio (TiO₂) inmovilizado [Photocatalytic disinfection of water for human consumption using sunlight and immobilized titanium dioxide (TiO₂)]. Centro de Estudios Académicos sobre Contaminación Ambiental, Facultad de Química e Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México.
- Rosales Vera, M. C. (2020). Síntesis controlada de semiconductores metal-óxido nanoestructurados y su efecto en el tratamiento de aguas contaminadas por fotocatalisis heterogénea [Controlled synthesis of nanostructured metal-oxide semiconductors and their effect on the treatment of water contaminated by heterogeneous photocatalysis]. (Disertación Doctoral), Santiago, Chile.
- Salamanca, E. (2016). Tratamiento de aguas para el consumo humano. Modulo Arquitectura CUC, 17, 29-48 [Water treatment for human consumption. CUC Architecture Module, 17, 29-48]. Universidad de la Costa, Barranquilla, Colombia. <https://doi.org/10.17981/moducuc.17.1.2016.02>
- Segura Sanchis, E. (2017). Estudio de nuevos fotocatalizadores para la obtención de combustibles solares. [Study of new photocatalysts to obtain solar fuels] (Master Thesis). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.

Guillermo Centeno-Bordones

- Sillanpää, M., Ncibi, M. C., & Matilainen, A. (2018). Advanced oxidation processes for the removal of natural organic matter from drinking water sources: A comprehensive review. *Journal of environmental management*, 208, 56-76. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.12.009>
- Sosa, L., & Sanjuan, A. (2018). Planta potabilizadora de agua de río con utilización de fotocatalisis heterogénea para desinfección primaria. [River water treatment plant using heterogeneous photocatalysis for primary disinfection] (Master Thesis), Universidad Técnica Nacional, Santa Fe, Argentina.
- Stefan, M. I. (Ed.). (2017). *Advanced oxidation processes for water treatment: fundamentals and applications*. IWA publishing. Editado IWA Publishin. Londres, Reino Unido.
- Trinidad Cruz, I. (2017). Optimización de los parámetros que influyen en la degradación química de rojo congo utilizando fotocatalisis heterogénea [Optimization of the parameters that influence the chemical degradation of congo red using heterogeneous photocatalysis] (Doctoral dissertation, Facultad de Ingeniería-Ingeniería Ambiental-UNICACH). Universidad Católica de Chiguagua, Chiguagua, Mexico.
- Vallejo, W., Díaz-Urbe, C., Navarro, K., Valle, R., Arboleda, J. W., & Romero, E. (2016). Estudio de la actividad antimicrobiana de películas delgadas de dióxido de titanio modificado con plata [Study of the antimicrobial activity of thin films of titanium dioxide modified with silver]. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 40(154), 69-74. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.289>
- Yaparathne, S., Tripp, C. P., & Amirbahman, A. (2018). Photodegradation of taste and odor compounds in water in the presence of immobilized TiO₂-SiO₂ photocatalysts. *Journal of hazardous materials*, 346, 208-217. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.12.029>

Guillermo Centeno-Bordones

©2022 por el autor. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).