UNIFSLB | DÉKAMU AGROPEC

Aplicación de fotocatálisis solar en el tratamiento de agua para consumo humano y aguas residuales

Application of solar photocatalysis in the treatment of water for human consumption and wastewater

Aplicação da fotocatálise solar no tratamento de águas para consumo humano e águas residuais

Gosgot Angeles, Wildor; Montengro, Yesica; Yalta Chappa, Merbelita; Santillan Gomez, Homar; Mori Servan, Diana Carina; Bautista Alcantara, Roicer; Lopez Mas, Mariños

Wildor Gosgot Angeles
wildor.gosgot@untrm.edu.pe
Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza, Perú
Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Perú
Yesica Montengro
Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza, Perú
Merbelita Yalta Chappa
Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza, Perú
Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Perú
Homar Santillan Gomez
gomez08santillan@gmail.com
Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza, Chachapoyas, Perú
Diana Carina Mori Servan
diana.mori@untrm.edu.pe
Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza, Perú
Roicer Bautista Alcantara
roicer.bautista@untrm.edu.pe
Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza, Perú
Mariños Lopez Mas
marinos.lopez@untrm.edu.pe
Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza, Perú
Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Perú

Resumen: Se investigó la eficiencia de desinfección de agua de pozo y degradación de materia orgánica de agua residual de tratamientos por desinfección solar (SODIS-CPC) y fotocatálisis (TiO. en suspensión [TiO.susp. - CPC], catalizador de concreto mezclado con TiO. [CI-CPC] y catalizador de concreto impregnado con TiO. [CII-CPC]) acoplado a un colector parabólico compuesto 1.15 X (CPC 1.15X) y fotorreactor de botella PET de 1.5 L. Las evaluaciones se llevaron a cabo en el mes de septiembre y octubre entre las 8:00 y 16 horas, con radiación solar menor a los 1000 W/m.. Los resultados demostraron que el CII-CPC logró tener una eficiencia máxima de 99.99 % de inactivación de coliformes totales, fecales y E. coli en el agua de pozo. El SODIS-CPC tuvo una eficiencia máxima de remoción DBO. y DQO de 93.08 y 94.94 %, respectivamente. La eficiencia de desinfección y degradación depende de la intensidad de la radiación incidente, el tiempo de exposición, concentración de TiO. y la geometría del reactor.

Palabras clave: Energía solar, tratamiento de agua, fotocatálisis, SODIS, E. Coli, fotorreactor, catalizador, Amazonas, desinfección.

Abstract: The efficiency of disinfection of well water and degradation of organic matter of residual water of treatments by solar disinfection (SODIS-CPC) and photocatalysis (TiO. in suspension [TiO.susp. - CPC], concrete catalyst mixed with TiO. [CI- CPC] and concrete catalyst impregnated with TiO2 [CII-CPC]) coupled to a 1.15X compound parabolic collector (CPC 1.15X) and a 1.5 L PET bottle photoreactor. The evaluations were carried out in September and October. between 8:00 a.m. and 4:00 p.m., with solar radiation of less than 1000 W/m.. The results showed that the CII-CPC achieved a maximum efficiency of 99.99% of inactivation of total, fecal coliforms and E. coli in the well water. The SODIS-CPC had a maximum BOD and COD removal efficiency of 93.08 and 94.94 %, respectively. The disinfection and degradation efficiency depends on the intensity of the incident radiation,

Revista Científica Dékamu Agropec
Universidad Nacional Intercultural Fabiola Salazar Leguia de Bagua, Perú
ISSN: 2709-3190
ISSN-e: 2709-3182
Periodicidad: Semestral
vol. 4, núm. 2, 2023
dekamuagropec@unibagua.edu.pe

Recepción: 05 Junio 2023
Aprobación: 18 Noviembre 2023

URL: http://portal.amelica.org/ameli/journal/744/7444746008/

DOI: https://doi.org/10.55996/dekamuagropec.v4i2.200

Copyright UNIFSLB, 2023

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional.

the exposure time, TiO. concentration and the geometry of the reactor.

Keywords: Solar energy, water treatment, photocatalysis, SODIS, E. Coli, photoreactor, catalyst, Amazon, disinfection.

Resumo: A eficiência de desinfecção de água de poço e degradação da matéria orgânica de águas residuais de tratamentos por desinfecção solar (SODIS-CPC) e fotocatálise (TiO. em suspensão [TiO.susp. - CPC], catalisador de concreto misturado com TiO. [CI-CPC] e concreto catalisador impregnado com TiO. [CII-CPC]) acoplado a um coletor parabólico composto 1.15X (CPC 1.15X) e um fotorreator de garrafa PET de 1.5 L. As avaliações foram realizadas nos meses de setembro e outubro, entre 8h e 4h. da tarde, com radiação solar inferior a 1000 W/m.. Os resultados mostraram que o CII-CPC alcançou eficiência máxima de 99,99% de inativação de coliformes totais, fecais e E. coli na água do poço. O SODIS-CPC apresentou eficiência máxima de remoção de DBO e DQO de 93.08 e 94.94%, respectivamente. A eficiência de desinfecção e degradação depende da intensidade da radiação incidente, do tempo de exposição, da concentração de TiO. e da geometria do reator.

Palavras-chave: Energia solar, tratamento de água, fotocatálise, SODIS, E. Coli, fotorreator, catalisador, Amazônia, desinfecção.

INTRODUCCIÓN

Los servicios de agua y saneamiento inexistentes, insuficientes o gestionados de forma inapropiada exponen a la población a riesgos para la salud; ya que, el consumo de agua contaminada con heces favorece la propagación de microorganismos patógenos, incluidos virus, bacterias y parásitos. Estos microorganismos son responsables de diversas enfermedades como el cólera, diarreas, disentería, hepatitis A, fiebre tifoidea y poliomielitis; además, contribuyen a la desnutrición infantil y al deterioro del crecimiento físico y desarrollo cognitivo (Shannon et al., 2008; Guerrant, Deboer, Moore, Scharf, y Lima, 2013; Pichel, Vivar, y Fuentes, 2019). Se calcula que unas 842 mil personas mueren cada año de diarrea y aproximadamente 240 millones de personas se ven afectadas por esquistosomiasis, una enfermedad grave y crónica provocada por lombrices parasitarias contraídas por exposición a agua infestada (OMS, 2018).

La mayoría de los patógenos transmitidos por el agua se pueden eliminar físicamente por adsorción / filtración o inactivados por desinfectantes químicos (cloro libre , dióxido de cloro y ozono) y luz ultravioleta (UV) en los procesos convencionales de tratamiento de agua; sin embargo, estos métodos generan subproductos altamente tóxicos, como los trihalometanos y otros compuestos cancerígenos (Blanco et al. 2009); además, estos procesos son intensivos desde el punto de vista químico, energético y operativo, por ser sistemas que requieren de considerable capital y experiencia en ingeniería e infraestructura, lo que impide su uso masivo en gran parte del mundo (Malato et al. 2009).

Las tecnologías de tratamiento de agua impulsadas por energía solar son alternativas sostenibles para abordar el problema del agua ya que la luz solar está disponible gratuitamente en la tierra y los efectos combinados del calor y los rayos UV del sol inactivan a los organismos patógenos presentes en el agua. Este es el principio de la desinfección solar del agua (SODIS, por sus siglas en inglés), la cual consiste en colocar agua contaminada en recipientes de plástico o vidrio transparentes (normalmente botellas descartables (PET) de bebidas de 2 L) que se exponen al sol durante 6 a 48 h dependiendo de la intensidad de la luz solar y la sensibilidad de los patógenos (McGuigan et al., 2012; Byrne et al., 2015; Eke and Demircan 2013)

Sin embargo. existen una serie de parámetros que afectan la eficacia de SODIS como son la intensidad solar, temperatura (condiciones climáticas), el nivel y la naturaleza de la contaminación ya que el SODIS no tiene efecto residual, lo que favorece el recrudecimiento bacteriano algunos patógenos son más resistentes a luz solar que otros. Un enfoque para la mejora de SODIS es el uso de la fotocatálisis (Byrne et al., 2015; Zhang et al, 2018).

La fotocatálisis solar logra una mineralización completa de los contaminantes y sus compuestos intermedios sin contaminación secundaria, funciona a temperatura y presión ambiente a bajos costos de operación (Chong et al. 2010); pero la mayoría de los estudios de degradación fotocatalítica realizados con suspensiones de TiO2 en polvo fino en la solución contaminada, complican la filtración de suspensiones de partículas de titanio, además, se listan otras dificultades para su aplicación a gran escala: la optimización del catalizador para mejorar el rendimiento cuántico o para utilizar la luz visible; el diseño eficiente del reactor fotocatalítico y técnicas de recuperación y/o inmovilización del catalizador y mejor selectividad de reacción (Qu et al., 2013; Borges, Hernández, y Esparza, 2014).

Una posible solución para superar estas limitaciones de las tecnologías antes mencionadas es la combinación de fotocatálisis solar heterogénea, SODIS y la técnica de adsorción (Xing et al. 2018). Las limitaciones de TiO2 puro, que requieren el uso de luz UV y su alta tasa de recombinación de electrones y agujeros fotogenerados, se pueden superar mediante la aplicación de un soporte adsorbente (Daghrir, Drogui, y Robert, 2013; MiarAlipour et al., 2018). Existen varios materiales que se puede utilizar como soportes para inmovilizar el TiO2, entre ellos tenemos, vidrio, carbón activado, sílice, polímeros, piedra pómez, zeolitas, ceniza, entre otros (Srikanth et al., 2017; Yahya et al., 2018).

Por ello; en este estudio, se investigó la eficiencia de desinfección de agua de pozo y degradación de materia orgánica de agua residual de tratamientos por desinfección solar (SODIS-CPC) y fotocatálisis (TiO2 en suspensión [TiO2susp. - CPC], catalizador de concreto mezclado con TiO2 [CI-CPC] y catalizador de concreto impregnado con TiO2 [CII-CPC]) acoplado a un colector parabólico compuesto 1.15 X (CPC 1.15X) y fotorreactor de botella PET de 1.5 L.

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestras de agua

Para la evaluación de la desinfección de microorganismos patógenos, se utilizó agua procedente de pozos localizado en el Asentamiento Humano 16 de octubre en las coordenadas 6°13'4.81"S y 77°51'39.81"O; y para evaluar la degradación de materia orgánica se utilizaron muestras de agua residual y fueron tomadas del punto con coordenadas de 6°13'25.08"S y 77°51'40.59"O de la quebrada de Santa Lucía en la cuidad de Chachapoyas.

Colector parabólico compuesto

Los colectores parabólicos compuestos (CPC), es un tipo de colector de baja concentración que combinan algunas características de los concentradores parabólicos y los sistemas estacionarios planos. La geometría del CPC permite que el reflector refleje la luz indirecta sobre el tubo receptor y, por lo tanto, pueda capturar la luz solar directa y difusa (Malato et al., 2009; Keane et al., 2014). En el presente estudio, se diseñó un colector parabólico compuesto denominado CPC 1.15 X con un receptor tubular de botella de tereftalato de polietileno (PET). El CPC 1.15 X con un ángulo de aceptación de 30 ° y un factor de concentración 1.15, para aprovechar 15 % más de los rayos incidentes en la superficie del colector. Las dimensiones de la botella PET fueron de 9 cm diámetro y 33 cm de longitud.

Los colectores parabólicos compuestos (CPC), es un tipo de colector de baja concentración que combinan algunas características de los concentradores parabólicos y los sistemas estacionarios planos. La geometría del CPC permite que el reflector refleje la luz indirecta sobre el tubo receptor y, por lo tanto, pueda capturar la luz solar directa y difusa (Malato et al., 2009; Keane et al., 2014). En el presente estudio, se diseñó un colector parabólico compuesto denominado CPC 1.15 X con un receptor tubular de botella de tereftalato de polietileno (PET). El CPC 1.15 X con un ángulo de aceptación de 30 ° y un factor de concentración 1.15, para aprovechar 15 % más de los rayos incidentes en la superficie del colector. Las dimensiones de la botella PET fueron de 9 cm diámetro y 33 cm de longitud.

En la Tabla 1 se muestra del CPC 1.15 X. Para graficar el perfil en el plano (x, y) de colector se procedió ingresar los códigos del modelo en software de Matlab R2017a.

TABLA 1 .
Parámetros de diseño del CPC 1.15 X

Parámetro	Características
Sección parabólica en el plano (x,y)	$x = 4.5\left(sen\,\varphi - \left(\frac{\pi+\varphi-cos(\varphi-\pi)}{1+sen(\varphi-\pi)}\right)cos\varphi\right), \varphi\,\epsilon\,\left[\frac{5\pi}{6};\frac{7\pi}{6}\right]$ $y = -4.5\left(\left(\frac{\pi+\varphi-cos(\varphi-\pi)}{1+sen(\varphi-\pi)}\right)sen\,\varphi + cos\varphi\right), \varphi\,\epsilon\,\left[\frac{5\pi}{6};\frac{7\pi}{6}\right]$
Sección de involuta en el plano (x,y)	$x = 4.5\,(sen\,\varphi - \varphi cos\varphi), \varphi\,\epsilon\,\left[-\frac{5\pi}{6};\frac{5\pi}{6}\right]$ $y = -4.5(\varphi sen\,\varphi + cos\varphi), \varphi\,\epsilon\,\left[-\frac{5\pi}{6};\frac{5\pi}{6}\right]$
Perfil de la circunferencia del receptor tubular en el plano (x, y)	$x = 4.5\,(cos\,\alpha),\ \propto\in[-\pi;\pi]$ $y = -4.5(sen\,\alpha),\ \propto\in[-\pi;\pi]$
Área del reflector	0.25 m^2
Área del receptor tubular	0.09 m^2

Para la construcción del CPC 1.15 X, se imprimió el perfil del CPC en tamaño de 1:1, en hoja A3, luego, en tableros de triplay con dimensiones 40 cm de ancho, 37 de longitud, 25 cm de alto y 1 cm de espesor, se realizó el trazo del CPC, seguidamente, se procedió córtalo con una sierra cinta alrededor la curva parabólica e involuta. Estos perfiles se unieron en la parte superior con amarres de triplay de 37 cm de longitud, 5 cm de ancho y 1 cm de espesor. Para la superficie reflectora se utilizó, una plancha liza de acero galvanizado (calamina) de 2 mm de espesor, 37 cm de longitud y 70 cm de ancho, estas planchas, fueron fijadas con clavos de una pulgada alrededor de la silueta de los perfiles de triplay, además se colocó, dos sujetadores en la parte central del CPC para poner la botella.

Elaboración de bloques cilíndrico de cemento

Las dimensiones del catalizador cilíndrico fueron hechas a partir de las medidas de la botella PET, 2 cm de abertura de boca y 33 cm altura, obteniendo un catalizador de área lateral del catalizador de 207.4 cm^2, área total del catalizador de 213.6 cm^2 y volumen de103.7 cm^3. Para la elaboración del molde del catalizador se cortó rectángulos de cartulina plastifica con medidas de 3.15 cm de ancho y 33 cm de longitud, estas cartulinas fueran envueltas alrededor con un tubo con diámetro de 3/8 de pulgada y fijado con cinta.

En la norma E.060 del Reglamento Nacional de Edificaciones establece que cuando un concreto va a ser expuesto al agua debe tener una relación máxima agua: material cementante (en peso) de 0.50 y una resistencia específica a la compresión de 280 kg/cm^2. En base esta premisa, para elaboración de los catalizadores, se realizó

una mezcla de cemento portland tipo I, arena de río de 0.5 – 4 mm de diámetro y agua en proporción de 1:2:2 respectivamente, además, un alambre galvanizado de 2 mm de espesor como soporte.

Impregnación de TiO2 en los bloques concreto

Según Castro et al., (2011), dióxido de titanio (TiO_2) con una concentración 70:30 anatasa: rutilo, área superficial $55 \pm 15\ m^2\ g^{-1}$ y tamaño de partícula promedio de 30 nm, tiene un alto rendimiento en los procesos de fotocatálisis. Por ello, se adquirió dióxido de titanio (TiO_2) comercial (Degussa P-25) de laboratorios Pflüquer e hijos S.A.C., mientras que, la impregnación del TiO_2 se realizó a través de métodos aplicados por Shen, Burton, Jobson, y Haselbach (2012), con cantidad optima de TiO_2, en ambos métodos, de 86.1 g por metro cuadro de superficie total del catalizador.

Método 1 (Mezcla de concreto - TiO2):

Consistió en mezclar el TiO_2 con cemento, arena y agua en recipiente para luego depositar en el molde del catalizador.

Método 2 (Deposición de TiO2 sobre concreto):

Consistió diluir el TiO_2 en agua y luego aplicarlo sobre la superficie del catalizador.

A los catalizadores impregnados de TiO2 por el método 1, se les nombro “CI”, y por método 2, “CII”. Se elaboró 20 catalizadores en total (10 CI y 10 CII) con la mezcla de cemento, arena ya agua en proporciones mencionada anteriormente, para el caso de C-I se agregó 1.8 g de TiO2 por catalizador a mezcla, después se vertió en los moldes y se dejó secar a 25 °C de temperatura por 7 días, con hidratación cada 24 horas, luego de estas condiciones, para el caso de C-II, se procedió a diluir 1.8 g de TiO2 en 10 mL por catalizador y se aplicó con un pincel sobre toda la superficie del concreto, posteriormente, se dejó secar a temperatura ambiente.

A los catalizadores obtenidos por ambos métodos, se realizó el cálculo de porosidad, medida de espacios vacíos en el catalizador, calculada a través de la masa seca (Wd) y la masa sumergida (Ws). Las propiedades de los catalizadores.

TABLA 2
Propiedades del catalizador de concreto impregnado con TiO_2

Propiedades	Catalizador CI	Catalizador CII
Peso seco (g)	300	302
Peso sumergido (g)	210	215
Volumen (cm3)	103.7	103.7
Porosidad (%)	13. 2	16.1

Instalación del sistema de tratamiento fotocatalítico

El sistema de tratamiento fue instalado en la ciudad de Chachapoyas (6°13'34.11"S y 77°51'51.91"O), en la dirección norte-sur, con el lado sur levantado 30° (suma del ángulo de latitud sur de la ubicación del sistema más el 29.45 ° de la rotación de la Tierra) de inclinación para compensar la curvatura terrestre.

Para lograr dicha inclinación se construyó un soporte de fierro corrugado de ½ pulgada de espesor. Las medidas del soporte fueron calculadas de acuerdo las relaciones trigonométricas de un triángulo rectángulo de 30 grados, y dimensiones base del plano inclinado de 80 cm ancho y 74 cm de longitud (superficie para instalar 4 CPC 1.15 X), además, se consideró la altura de salpicadura de la lluvia que es de 40 cm para que no afecte a la superficie reflectante del colector.

Tratamientos

Los tratamientos aplicados para evaluar la desinfección de microorganismos patógenos de agua de pozo y degradación de materia orgánica de aguas residuales fueron los siguientes:

Tratamiento SODIS – CPC (T0):

consistió en exponer el agua de pozo y el agua residual a la radiación solar, en una botella PET trasparente de 1.5 L de volumen (receptor tubular) sobre el CPC 1.15 X.

Tratamiento TiO2 en suspensión – CPC (T1):

Consistió en agregar TiO2 en polvo al agua de pozo y el agua residual, con una concentración de 1 g L^{-1}, recomendado por Threrujirapapong, Khanitchaidecha, y Nakaruk (2017), luego se expuso a la radiación solar en una botella PET trasparente de 1.5 L de volumen (receptor tubular) sobre el CPC 1.15 X.

Tratamiento con CI - CPC (T2):

En este tratamiento, se insertó el catalizador CI dentro de la botella PET trasparente de 1.5 L de volumen (receptor tubular) que contenía el agua de pozo y el agua residual, en seguida se expuso a la radiación solar sobre el CPC 1.15 X.

Tratamiento con CII – CPC (T3):

Para este tratamiento, se insertó el catalizador CII dentro de la botella PET trasparente de 1.5 L de volumen (receptor tubular) que contenía el agua de pozo y el agua residual, y posteriormente se expuso a la radiación solar sobre el CPC 1.15 X.

Para aplicar los tratamientos se realizó el procedimiento siguiente:

- Se realizó una filtración de agua de pozo y de agua residual.
- Las botellas PET de 1.5 L, se llenó los dos tercios de su volumen de agua, luego se agitar vigorosamente durante 30 segundos, en seguida se completó todo el volumen.

Para mejorar la concentración de los rayos solares sobre los colectores CPC 1.15X se acoplo un espejo sobre el soporte

Evaluación experimental

Las evaluaciones de eficiencia de desinfección de agua se realizaron en el mes de septiembre, en los días 09, 12, 16 y 19; mientras que la evaluación de degradación de materia orgánica se realizó entre los meses de setiembre (en los días 23 y 30) y octubre (en los días 7 y 12), con exposición a la radiación de 8 horas desde las 8:00 am hasta las 4 pm (Figura 1).

FIGURA 1.
Experimento de desinfección de agua de pozo y agua residual con los tratamientos: T_o (SODIS-CPC), T1 ($TiO_{2susp.}$ – CPC), T2 (CI-CPC) y T3 (CII-CPC).

Medición de la radiación solar

La radiación solar fue medida cada media hora en los días de evaluación, dicha información fue brindada por la estación meteorológica del Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva (INDES-CES) de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas. Además, para estimar la radiación UV se tuvo en consideración que la energía solar está compuesta por 52% de radiación infrarroja (> 700 nm), el 43% es radiación de luz visible (400–700 nm) y 5% está en el rango ultravioleta (<400 nm) (Colmenares 2019).

Medición de la temperatura

La mediación de la temperatura del agua se llevó a cabo con hidrómetro (MODEL: 3003C), en intervalos de 30 minutos, en cada uno del tratamiento aplicados, en cambio la temperatura ambiente fue obtenida de las estaciones meteorológicas del INDES-CES.

Análisis de los parámetros microbiológico y materia orgánica

Las muestras de agua recolectas antes y después de la aplicación del tratamiento fotocatalítico, fueron rotulados y etiquetados, en frasco de vidrio esterilizado de 1 L de volumen para el agua de pozo; mientras que, las muestras de agua residual fueron tomadas en frasco de color negro de 1.5 L de capacidad para su posterior análisis en Laboratorio de Investigación de Aguas y Suelos del INDES-CES.

Los parámetros microbiológicos evaluados del agua de pozo son: pH, coliformes totales, fecales y *E. coli*., en cambio, los parámetros evaluados del agua residual son: pH, Demanda Biológica de Oxigeno (DBO_5) y Demanda Química de Oxígeno (DQO).

Cálculo de eficiencia

La eficiencia (% #) de inactivación de microorganismos patógenos de agua de pozo y degradación de materia orgánica de agua residual fue calculada por la ecuación (1).

$$\eta = \frac{c_{inicial} - c_{final}}{c_{inicial}} \; x \; 100 \qquad (1)$$

Donde ,$c_{inicial}$es la concentración antes del tratamiento, yc_{final} , concentración después del tratamiento.

RESULTADOS

Tratamiento de agua para consumo humano

Los principales parámetros microbiológicos del agua de pozo in situ se muestran la Tabla 3.

TABLA 3:
Parámetros de calidad del agua de pozo en la fuente.

Parámetro	Unidad	Agua de pozo
pH	pH	5.9
Coliformes Totales	NMP/100mL	48
Coliformes Fecales	NMP/100mL	1700
E. coli	NMP/100mL	11
Estreptococos	NMP/100mL	< 1.8
Enterococos	NMP/100mL	< 1.8
Salmonella	Presencia/Ausencia	Ausencia
Vibrio Cholerae	Presencia/Ausencia	Ausencia

Inactivación de Coliformes totales

El tratamiento CII – CPC, logro la inactivación de coliformes totales, en los días 16/09/2018 y 19/09/2018 con concentración <1.8 NMP/100mL en ambos casos, y temperatura máxima alcanzado del agua dentro de la botella PET en el CPC 1.15 X fue de 39.6 y 40.6 ° C respectivamente, bajo condiciones de una radiación UV máxima de 44 y 41 W/m^2 en los días antes mencionados (Tabla 4).

Inactivación de Coliformes fecales

El tratamiento CII – CPC ha logrado inactivar coliformes fecales en 3 de 4 días de evaluación, por su parte el tratamiento TiO2 (susp.) – CPC y SODIS – CPC han disminuido la concentración a < 1.8 NMP/100 mL en los dos últimos días de evaluación. Cada uno de los tratamientos ha tenido efecto según los parámetros evaluados (Tabla 5).

Inactivación de E. coli

Los tratamientos CI – CPC y CII – CPC inactivaron en totalidad E. coli del agua de pozo en todos los días evaluados con concentración < 1.8 NMP/100 mL. Los otros dos tratamientos tuvieron el igual efecto en los días 16/09/2018 y 19/09/2018 disminuyendo la concentración de *E. coli* a 2 NMP/100 mL. Por otro lado, en la Tabla 6, se muestra los valores máximos de los parámetros que influyeron en la inactivación de *E. coli*, así como el rendimiento de cada uno de los tratamientos.

TABLA 4.
Resultados de inactivación de coliformes totales según los tratamientos y los días y sus parámetros evaluados.

Fecha de experimento	Tamb. Máx (°C)	Radiación (W/m^2)			Tratamientos																
		SODIS – CPC							TiO_2 (susp.) – CPC				CI – CPC				CII – CPC				
(dd/mm/aa)		Total	IR	UV	pH	T H_2O Máx (°C)	Col. Total. (NMP/100 mL)	% η	pH	T H_2O Máx (°C)	Col. Total. (NMP/100 mL)	% η	pH	T H2O Máx (°C)	Col. Total. (NMP/100 mL)	% η	pH	T H_2O Máx (°C)	Col. Total. (NMP/100 mL)	% η
9/09/2018	24.3	983	521	49	6.1	35.6	21	56.25	5.91	35.6	24	50.00	9.11	36.5	21	56.25	9.12	37.2	6.8	85.83
12/09/2018	25.5	1001	531	50	6.06	32.5	24	50.00	5.85	32	48	0.00	9.21	32.6	21	56.25	8.96	33.5	6.8	85.83
16/09/2018	24.2	883	468	44	6.15	37.8	6,8	85.83	6.11	37.2	6.8	85.83	9.29	38.5	17	64.58	9.21	39.6	<1.8	99.99
19/09/2018	25.1	829	439	41	6.28	37.8	6,8	85.83	6.17	36.1	6.8	85.83	9.46	38.5	17	64.58	9.57	40.9	<1.8	99.99

TABLA 5.
Resultados de inactivación de coliformes fecales según los tratamientos y los días evaluados, así, como los parámetros medidos.

Fecha de experimento	Tamb. Máx (°C)	Radiación (W/m^2)			Tratamientos																
		SODIS – CPC							TiO_2 (susp.) – CPC				CI – CPC				CII - CPC				
(dd/mm/aa)		Total	IR	UV	pH	T H2O Máx (°C)	Col. Fecal. (NMP/100 mL)	% η	pH	T H2O Máx (°C)	Col. Fecal. (NMP/100 mL)	% η	pH	T H2O Máx (°C)	Col. Fecal. (NMP/100 mL)	% η	pH	T H2O Máx (°C)	Col. Fecal. (NMP/100 mL)	% η
9/09/2018	24.3	983	521	49	6.1	35.6	24	98.58	5.91	35.6	24	98.58	9.11	36.5	6	99.64	9.12	37.2	<1,8	99.99
12/09/2018	25.5	1001	531	50	6.06	32.5	24	98.58	5.85	32	24	98.58	9.21	32.6	6	99.64	8.96	33.5	9	99.47
16/09/2018	24.2	883	468	44	6.15	37.8	2	99.88	6.11	37.2	2	99.88	9.29	38.5	5.6	99.67	9.21	39.6	<1.8	99.99
19/09/2018	25.1	829	439	41	6,28	37.8	2	99.88	6.17	36.1	2	99.88	9.46	38.5	5.6	99.67	9.57	40.9	<1.8	99.99

TABLA 6.
Resultados de inactivación de coliformes fecales según los tratamientos y los días evaluados, así, como los parámetros medidos

Fecha de experimento	Tamb. Máx (°C)	Radiación (W/m2)			Tratamientos																
		SODIS – CPC							TiO_2 (susp.) – CPC				CI – CPC				CII – CPC				
(dd/mm/aa)		Total	IR	UV	pH	T H_2O Máx (°C)	*E. coli* (NMP/100 mL)	% η	pH	T H_2O Máx (°C)	*E. coli* (NMP/100 mL)	% η	pH	T H_2O Máx (°C)	*E. coli* (NMP/100 mL)	% η	pH	T H_2O Máx (°C)	*E. coli* (NMP/100 mL)	% η
9/09/2018	24.3	983	521	49	6.1	35.6	2	81.81	5.91	35.6	2	81.81	9.11	36.5	<1.8	99.99	9.12	37.2	<1.8	99.99
12/09/2018	25.5	1001	531	50	6.06	32.5	7	36.36	5.85	32	5	54.54	9.21	32.6	<1.8	99.99	8.96	33.5	<1.8	99.99
16/09/2018	24.2	883	468	44	6.15	37.8	2	81.81	6.11	37.2	2	81.81	9.29	38.5	<1.8	99.99	9.21	39.6	<1.8	99.99
19/09/2018	25.1	829	439	41	6.28	37.8	2	81.81	6,17	36.1	2	81.81	9,46	38.5	<1.8	99.99	9.57	40.9	<1.8	99.99

Degradación de materia orgánica de agua residual

Las características de la materia orgánica antes del aplicar los tratamientos experimentales se muestran en la Tabla 7.

TABLA 7.
Parámetros de materia orgánica del agua residual de la quebrada Santa Lucía

Parámetro	Unidad	Agua residual
pH	pH	6.5
DBO5	mg/L de O2	351.6
DQO	mg/L de O2	408

Demanda Biológica de Oxígeno (DBO5)

El rango de reducción de la DBO_5, por los tratamientos aplicados, se encuentra entre 24 y 31 mg/L de O_2. Las eficiencias de remoción en todos los tratamientos superan el 91 %, de los cuales ellos tratamientos CI-CPC y SODIS-CPC, han alcanzado 93.08 %, en los días 30/3.2.5 (Tabla 8).

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La reducción de la DQO lograda por los tratamientos aplicados, se encuentra entre un rango 20 y 40 mg/L de O_2. Las eficiencias de los tratamientos aplicados son superiores al 90%, entre los cuales, el tratamiento SODIS-CPC ha logrado un rendimiento máximo de 94.94 % en el día 12/10/2018 09/2018 y 12/10/2018 (Tabla 9).

TABLA 8.
Eficiencia de reducción de DBO_5 por los tratamientos aplicados según los días de evaluación

Fecha de experimento	Tamb. Máx (°C)	Radiación (W/m2)			Tratamientos															
					SODIS – CPC				TiO_2 (susp.) – CPC				CI – CPC				CII – CPC			
(dd/mm/aa)		Total	IR	UV	pH	T H2O Máx (°C)	DBO5 (mg/L de O2)	% η	pH	T H2O Máx (°C)	DBO5 (mg/L de O_2)	% η	pH	T H2O Máx (°C)	DBO5 (mg/L de O_2)	% η	pH	T H2O Máx (°C)	DBO5 (mg/L de O_2)	% η
23/09/2018	23.3	718	381	36	7.03	35.8	28.47	91.90	6.98	35.5	30.62	91.29	7.98	35.8	29.02	91.74	7.43	37.5	27.77	92.1
30/09/2018	24.6	940	498	47	7.51	37.4	25.13	92.85	7.1	36.5	25.13	92.85	8.05	38.0	24.33	93.08	7.71	39.5	25.13	92.85
07/10/2018	25.3	549	291	27	713	32.8	31.27	91.10	7.2	32.0	29.02	91.74	8.20	32.8	31.27	91.10	7.68	33.6	31.27	91.10
12/10/2018	23.4	998	529	50	7.52	41.1	24.33	93.08	7.8	41.0	25.53	92.74	8.42	42.5	25.13	92.85	8.12	44.5	31.27	91.10

TABLA 9.
Eficiencia de reducción de DQO por los tratamientos aplicados según los días de evaluación

Fecha de experimento	Tamb. Máx (°C)	Radiación (W/m^2)			Tratamientos															
					SODIS – CPC				TiO2 (susp.) – CPC				CI – CPC				CII – CPC			
(dd/mm/aa)		Total	IR	UV	pH	T H2O Máx (°C)	DQO (mg/L de O2)	% η	pH	T H2O Máx (°C)	DQO (mg/L de O_2)	% η	pH	T H2O Máx (°C)	DQO (mg/L de O_2)	% η	pH	T H_2O Máx (°C)	DQO (mg/L de O_2)	% η
23/09/2018	23.3	718	381	36	7.03	35.8	38.87	90.47	6.98	35.5	33.6	91.76	7.98	35.8	33.62	91.76	7.43	37.5	39.19	90.39
30/09/2018	24.6	940	498	47	7.51	37.4	25.52	93.75	7.1	36.5	29.21	92.84	8.05	38.0	33.62	91.76	7.71	39.5	32.92	91.93
07/10/2018	25.3	549	291	27	7.13	32.8	29,21	92.84	7.2	32.0	33.62	91.76	8.20	32.8	30.12	92.62	7.68	33.6	29.21	92.84
12/10/2018	23.4	998	529	50	7.52	41.1	20.63	94.94	7.8	41.0	22.5	94.49	8.42	42.5	32.92	91.93	8.12	44.5	29.21	92.84

DISCUSIÓN

En los días que se realizó la evaluación de los diferentes tratamientos, la radiación solar no superó los 1000 W/m2, esto debido, a que la cantidad de radiación incidente en la superficie depende de factores como ubicación, hora del día, declinación e inclinación de la superficie de la Tierra; clima, entre otros (Colmenares 2019). La cantidad de radiación influye en el proceso de desinfección, ya que, la radiación infrarroja (representa el 53% de la radiación solar) es el responsable del incremento de la temperatura del agua, mientras que, la radiación ultravioleta (5% de la radiación solar) inhibe a los microorganismos presentes en el agua (Castro-Alférez et al. 2017).

El tratamiento SODIS-CPC, alcanzó un rendimiento de 50.0 % a 85.83 % en inactivación de coliformes fecales, 98 - 99 % en coliformes fecales y 36,6 % a 81.81 % en inactivación de E. coli, debido a que, en los procesos de desinfección del agua en ausencia de fotocatalizador, el líquido es a menudo transparente a la luz (muy bajo coeficiente de extinción). En consecuencia, la tasa de desinfección depende de la intensidad de la radiación incidente, el tiempo de exposición y la geometría del reactor (Rizzo, Della Sala, Fiorentino, y Li Puma, 2014). La muerte bacteriana durante la exposición solar de botellas transparentes llenas de agua contaminada se atribuye al efecto combinado de, i) los fotones UV absorbidos por las bacterias y que producen especies de oxígeno reactivo intracelular que inducen daños oxidativos, y ii) un ligero aumento de la temperatura del agua (comúnmente entre 25 ° C y 50 ° C) que acelera el proceso de inactivación bacteriana (Castro-Alférez et al. 2017).

Los efectos sinérgicos de la radiación y la temperatura podrían variar en relación con las condiciones meteorológicas. Según Amin y Han (2009), el agua en los reactores de PET sobre un soporte de papel de aluminio desinfectó completamente el agua en condiciones climáticas fuertes (temperatura máxima del agua 48 °C), eliminando todos los microorganismos analizados. Marques, Gomes, Fonseca, Parreira, y Santos, (2013), experimentaron con muestras de agua de río expuestas a 3 h de radiación solar en días de clima moderado y obtuvieron un 99.9% de inactivación de coliformes fecales (E. coli) cuando el agua alcanzó más de 50° C (un promedio de 6 h picos de radiación - 685.6 W / m2), pero, observaron inactivación de coliformes fecales en reactores expuestos a la radiación solar en las mismas condiciones climáticas en techos de asbesto. Del mismo modo, el proceso SODIS con los concentradores solares utilizados por Cavallini, Lira, Araujo, y Lima, (2018), en la región Sur del Estado de Tocantins – Brasil tuvo una eficiencia de 100 % desinfección E. coli y coliformes totales en agua de pozo, en un tiempo de 4 a 6 horas con una exposición de radiación solar 15960- 71646 Whm-2 (en rango 312 – 365 nm de longitud de onda).

La radiación UV recibida en tratamiento SODIS-CPC, es menor a los 50 W/m2, lo cual ha sido un factor determinante en el bajo rendimiento del sistema comparado con los otros estudios, debido a que, las longitudes de onda más destructivas para la vida microbiana están cerca del espectro UV-A (320–400 nm), mientras que la banda espectral de 400 a 490 nm es la menos dañina. Del mismo modo, las diferencias en las tasas de inactivación bacteriana a temperaturas entre 12 y 40°C son insignificantes, pero la acción bactericida se acelera al doble cuando la temperatura aumenta a 50°C, probablemente debido al efecto sinérgico entre la radiación y la temperatura (Blanco et al. 2009). Además, el agua que presenta una población de bacterias residuales después de SODIS, el recrecimiento podría ocurrir dependiendo de la temperatura de almacenamiento del agua, el contenido de nutrientes del agua, el período de almacenamiento y el estado de las células después de la exposición al sol (Vivar y Fuentes 2016).

Por otro lado, en la fotocatálisis de TiO2 hay fuertes gradientes de la irradiación a través de la profundidad del líquido penetrada por la luz debido a los altos coeficientes de extinción de las suspensiones de TiO2, por lo tanto, la eficiencia del proceso de desinfección también se rige por la carga del fotocatalizador y la geometría del reactor (Rizzo et al., 2014). Los factores mencionados anteriormente, han influido en el rendimiento del tratamiento TiO2 (susp.) – CPC, ya que, las partículas en suspensión obstruían el paso de los rayos solar, lo cual, limitaban efecto combinado de la radiación UV y la fotocatálisis, ya que, el grosor óptico de la suspensión

acuosa en el reactor es el parámetro que determina el uso óptimo de la energía del fotón y afecta la tasa de desinfección (Castro-Alférez et al. 2018).

Existe un amplio consenso de que la inmovilización de TiO2 en un sólido requiere más tiempo de contacto que los sistemas de suspensión. Sin embargo, la ausencia de una necesidad de separar el fotocatalizador es la ventaja de los sistemas inmovilizados, lo que aumenta su simplicidad en el diseño y el funcionamiento (Alrousan et al. 2012). Esto ha sido demostrado, en esta investigación, los tratamientos CI – CPC y CII – CPC, los cuales han logrado rendimiento elevados de inactivación de coliformes totales, fecales y la eliminación completa de E. coli, pero, en términos de pH, el agua tratada supera el rango óptimo (6.5 – 8.5) para el consumo humano, este en pH se debe al concreto ya al tener contacto con el agua, se desprende los compuestos alcalinos del cemento. Sin embargo, los sistemas de fotocatalizadores inmovilizados (como se informa aquí) supera la necesidad de recuperación del catalizador después del tratamiento.

El efecto de desinfección de estos catalizadores impregnados por TiO2 es debido a que la radiación UV con longitud de onda (320 – 400 nm), realiza la foto-excitación de TiO2, propiciando reacciones primarias de oxidación o reducción electroquímica que involucran la transferencia de electrones del semiconductor fotoexcitado. Estas reacciones redox, en presencia de agua y oxígeno, pueden resultar en la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS, por sus siglas en inglés), que pueden atacar e inactivar microorganismos (Mani et al. 2006). El ROS incluyen el radical hidroxilo (HO•), que ha sido sugerido para ser las especies primarias responsables de la inactivación de microorganismos, anión radical superóxido (O2•-), hidroperoxilo radical (HO2•) y peróxido de hidrógeno (H2O2) (Vonberg et al. 2014). El ROS ataca indiscriminadamente y, por lo tanto, la aparición de resistencia antimicrobiana a la fotocatálisis es poco probable; sin embargo, un tratamiento fotocatalítico debe ser adecuado para evitar la reparación y el recrecimiento de los organismos objetivo (Byrne et al., 2015; Laxma Reddy, Kavitha, Kumar Reddy, y Kim, 2017).

Por otro lado, la eficiencia de la fotocatálisis de TiO2 en tratamiento de aguas residuales depende de las características en la fuente, la carga del fotocatalizador, el campo de radiación. Las muestras iniciales de la quebrada de Santa Lucía superan los límites máximos permisibles establecidos por el Ministerio del Ambiente, ya que, no reciben tratamiento alguno. Los resultados de degradación de materia orgánica, lograda los tratamientos evaluados, son eficientes que los valores obtenidos de DBO5 y DQO se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles para los efluentes de una planta de tratamiento de aguas residuales, 100 mg/L de O2 DBO5 y 200 mg/L de O2 DQO, establecido por el Decreto Supremo Nº 003-2010-MINAM.

Entre los cuatro tratamientos evaluados, se destaca el tratamiento CI-CPC y CII-CPC, ya que superan limitaciones como, la pérdida del TiO2 (que presenta el tratamiento TiO2 (susp.) – CPC) y la degradación de contaminantes emergentes (dificultad presentada por el SODIS – CPC), aunque esta última nos has sido evaluada en esta investigación, pero de estudios anteriores se conoce amplio el amplio rango de mineralización de contaminantes por la fotocatálisis de TiO2.

Las limitaciones de los sistemas con los catalizadores CI y CII son: (i) el tiempo de contacto (ii) el volumen total de agua a tratar; (iii) las características físico-químicas del agua; (iv) el envejecimiento o la durabilidad del recubrimiento; (v) ensuciamiento de la foto-catalizador. Por lo tanto, en investigaciones futuras tienes que ser evaluados bajo estos parámetros. Además, los indicadores de rendimiento de desinfección del agua de pozo, en esta investigación, están basados en la inactivación de coliformes totales, fecales y E. coli. Sin embargo, estos indicadores no proporcionan información sobre la incidencia y el comportamiento de los virus y los protozoos (Keane et al. 2014).

CONCLUSIONES

El sistema tratamiento compuesto por el CPC 115 X (factor de concentración solar de 1.15 y un ángulo de aceptación de 30°) con superficie reflectora de plancha de acero galvanizado y receptor de botella PET de 1.5 L, ubicado en posición norte-sur levantado la parte sur 30 ° para compensar la curvatura terrestre, y radiación solar entre los 60 y 1000 W/m^2, en la ciudad de Chachapoyas ha logrado tener las eficiencias máximas con el tratamiento SODIS-CPC y el tratamiento TiO_2 (susp.) – CPC, de 88.83% de inactivación de coliformes totales, 99.88 % de eliminación de coliformes fecales; así mismo, el CI - CPC (catalizador de concreto con porosidad de 13.2 %), su eficiencia fue de 64.58 % de coliformes totales, 99.67 % de inactivación de coliformes fecales y 99.99 % de *E. coli*, por último, con el tratamiento CII–CPC, tuvo una eficiencia de 99.99% en todos los parámetros mencionados.

Las eficiencias máximas de degradación de materia orgánica de agua residual de los tratamientos evaluados son: SODIS – CPC y CI – CPC han removido un 93.08% DBO, TiO_2 (susp.) – CPC y CII – CPC han tenido una remoción del 92.85 %, mientras que, la eficiencia de remoción de DQO para el tratamiento SODIS – CPC es de 94.94%; TiO_2 (susp.) – CPC es de 94.49 % CI – CPC es de 92.62% y CII – CPC es de 92.84%.

El sistema propuesto, es de bajo costo y puede operar en cualquier lugar del mundo para el tratamiento de agua; sin embargo, hay que tener en cuenta que la tasa de desinfección de coliformes totales, fecales y *E. coli* en el agua de pozo y degradación de materia orgánica depende de la intensidad de la radiación incidente, el tiempo de exposición, concentración de TiO_2 y la geometría del reactor.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alrousan, D. M.A., M. I. Polo-López, P. S.M. Dunlop, P. Fernández-Ibáñez, and J. A. Byrne. 2012. "Solar Photocatalytic Disinfection of Water with Immobilised Titanium Dioxide in Re-Circulating Flow CPC Reactors." Applied Catalysis B: Environmental 128: 126–34. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2012.07.038.

Amin, M.T., and M.Y. Han. 2009. "Roof-Harvested Rainwater for Potable Purposes: Application of Solar Collector Disinfection (SOCO-DIS)." Water Research 43 (20): 5225–35. https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2009.08.041.

Blanco, J., S. Malato, P. Fernández-Ibañez, D. Alarcón, W. Gernjak, and M. I. Maldonado. 2009. "Review of Feasible Solar Energy Applications to Water Processes." Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (6–7): 1437–45. https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.016.

Borges, M. E., T. Hernández, and P. Esparza. 2014. "Photocatalysis as a Potential Tertiary Treatment of Urban Wastewater: New Photocatalytic Materials." Clean Technologies and Environmental Policy 16 (2): 431–36. https://doi.org/10.1007/s10098-013-0637-z.

Byrne, John Anthony, Patrick Stuart Morris Dunlop, Jeremy William John Hamilton, Pilar Fernández-Ibáñez, Inmaculada Polo-López, Preetam Kumar Sharma, and Ashlene Sarah Margaret Vennard. 2015. "A Review of Heterogeneous Photocatalysis for Water and Surface Disinfection." Molecules 20 (4): 5574–5615. https://doi.org/10.3390/molecules20045574.

Castro-Alférez, María, María Inmaculada Polo-López, Javier Marugán, and Pilar Fernández-Ibáñez. 2018. "Validation of a Solar-Thermal Water Disinfection Model for Escherichia Coli Inactivation in Pilot Scale Solar Reactors and Real Conditions." Chemical Engineering Journal 331: 831–40. https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.09.015.

Castro-Alférez, María, María Inmaculada Polo-López, Javier Marugán, and Pilar Fernández-Ibáñez. 2017. "Mechanistic Modeling of UV and Mild-Heat Synergistic Effect on Solar Water Disinfection." Chemical Engineering Journal 316: 111–20. https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.01.026.

Castro, Artículo Científico, C#; Romero, C#; Salazar, O#; Centeno, A#; Giraldo, Camilo Castro, Carlos Romero, Oscar Salazar, Aristóbulo Centeno, and Sonia A Giraldo. 2011. "Efecto De La Composición Química Del

Agua Sobre Su Desinfección Fotocatalítica Effect of the Chemical Composition of Water on Its Photocatalytic Disinfection." y Div. Cient 14 (1): 117–25.

Cavallini, Grasiele Soares, Dayane Lira, Silva Araujo, and Gabriel Freitas Lima. 2018. "DESINFECÇÃO DE ÁGUA DE POÇO POR RADIAÇÃO SOLAR (SODIS): UM ESTUDO NA REGIÃO SUL DO TOCANTINS." Desafios, no. 2914.

Chong, Meng Nan, Bo Jin, Christopher W K Chow, and Chris Saint. 2010. "Recent Developments in Photocatalytic Water Treatment Technology: A Review." Water Research 44 (10): 2997–3027. https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.02.039.

Colmenares, Juan Carlos. 2019. "Selective Redox Photocatalysis: Is There Any Chance for Solar Bio-Refineries?" Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry 15: 38–46. https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.08.008.

Daghrir, Rimeh, Patrick Drogui, and Didier Robert. 2013. "Modified TiO2for Environmental Photocatalytic Applications: A Review." Industrial and Engineering Chemistry Research 52 (10): 3581–99. https://doi.org/10.1021/ie303468t.

Eke, Rustu, and Huseyin Demircan. 2013. "Performance Analysis of a Multi Crystalline Si Photovoltaic Module under Mugla Climatic Conditions in Turkey." Energy Conversion and Management 65 (January): 580–86. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.09.007.

Guerrant, Richard L., Mark D. Deboer, Sean R. Moore, Rebecca J. Scharf, and Aldo A.M. Lima. 2013. "The Impoverished Gut - A Triple Burden of Diarrhoea, Stunting and Chronic Disease." Nature Reviews Gastroenterology and Hepatology 10 (4): 220–29. https://doi.org/10.1038/nrgastro.2012.239.

Keane, Donal A., Kevin G. McGuigan, Pilar Fernández Ibáñez, M. Inmaculada Polo-López, J. Anthony Byrne, Patrick S.M. Dunlop, Kevin O'Shea, Dionysios D. Dionysiou, and Suresh C. Pillai. 2014. "Solar Photocatalysis for Water Disinfection: Materials and Reactor Design." Catalysis Science and Technology 4 (5): 1211–26. https://doi.org/10.1039/c4cy00006d.

Laxma Reddy, P. Venkata, Beluri Kavitha, Police Anil Kumar Reddy, and Ki Hyun Kim. 2017. "TiO2-Based Photocatalytic Disinfection of Microbes in Aqueous Media: A Review." Environmental Research 154 (December 2016): 296–303. https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.01.018.

Malato, S., P. Fernández-Ibáñez, M. I. Maldonado, J. Blanco, and W. Gernjak. 2009. "Decontamination and Disinfection of Water by Solar Photocatalysis: Recent Overview and Trends." Catalysis Today 147 (1): 1–59. https://doi.org/10.1016/j.cattod.2009.06.018.

Mani, Shibu K., Ranjit Kanjur, Isaac S. Bright Singh, and Robert H. Reed. 2006. "Comparative Effectiveness of Solar Disinfection Using Small-Scale Batch Reactors with Reflective, Absorptive and Transmissive Rear Surfaces." Water Research 40 (4): 721–27. https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2005.11.039.

Marques, Andréa Rodrigues, Fátima de Cássia Oliveira Gomes, Marcos Paulo Pontes Fonseca, Júlia Soares Parreira, and Verônica Pinheiro Santos. 2013. "Efficiency of PET Reactors in Solar Water Disinfection for Use in Southeastern Brazil." Solar Energy 87 (1): 158–67. https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.10.016.

McGuigan, Kevin G., Ronán M. Conroy, Hans Joachim Mosler, Martella du Preez, Eunice Ubomba-Jaswa, and Pilar Fernandez-Ibañez. 2012. "Solar Water Disinfection (SODIS): A Review from Bench-Top to Roof-Top." Journal of Hazardous Materials 235–236: 29–46. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.07.053.

MiarAlipour, Shayan, Donia Friedmann, Jason Scott, and Rose Amal. 2018. "TiO 2 /Porous Adsorbents: Recent Advances and Novel Applications." Journal of Hazardous Materials 341: 404–23. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.07.070.

Organización Mundial de la Salud. 2018. "Agua." 2018.

Pichel, N., M. Vivar, and M. Fuentes. 2019. "The Problem of Drinking Water Access: A Review of Disinfection Technologies with an Emphasis on Solar Treatment Methods." Chemosphere 218: 1014–30. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.205.

Qu, Xiaolie, Pedro J.J. Alvarez, and Quin Li. 2013. "Applications of Nanotechnology in Water and Wastewater Treatment." Water Res 47 (12): 3931–46.

Rizzo, L., A. Della Sala, A. Fiorentino, and G. Li Puma. 2014. "Disinfection of Urban Wastewater by Solar Driven and UV Lamp - TiO2 Photocatalysis: Effect on a Multi Drug Resistant Escherichia Coli Strain." Water Research 53 (0): 145–52. https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.01.020.

Shannon, Mark A., Paul W. Bohn, Menachem Elimelech, John G. Georgiadis, Benito J. Marĩas, and Anne M. Mayes. 2008. "Science and Technology for Water Purification in the Coming Decades." Nature 452 (7185): 301–10. https://doi.org/10.1038/nature06599.

Shen, Shihui, Maria Burton, Bertram Jobson, and Liv Haselbach. 2012. "Pervious Concrete with Titanium Dioxide as a Photocatalyst Compound for a Greener Urban Road Environment." Construction and Building Materials 35 (October): 874–83. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.097.

Srikanth, B., R. Goutham, R. Badri Narayan, A. Ramprasath, K. P. Gopinath, and A. R. Sankaranarayanan. 2017. "Recent Advancements in Supporting Materials for Immobilised Photocatalytic Applications in Waste Water Treatment." Journal of Environmental Management 200: 60–78. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.063.

Threrujirapapong, T., W. Khanitchaidecha, and A. Nakaruk. 2017. "Treatment of High Organic Carbon Industrial Wastewater Using Photocatalysis Process." Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management 8 (December): 163–68. https://doi.org/10.1016/j.enmm.2017.07.006.

Vivar, M., and M. Fuentes. 2016. "Using Solar Disinfected Water: On the Bacterial Regrowth over 1-Week of Water Usage Including Direct Intake after Sun Exposure and Long-Term Dark Storage." Solar Energy 131: 138–48. https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.02.044.

Vonberg, David, Jan Vanderborght, Nils Cremer, Thomas Pütz, Michael Herbst, and Harry Vereecken. 2014. "20 Years of Long-Term Atrazine Monitoring in a Shallow Aquifer in Western Germany." Water Research 50 (March): 294–306. https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2013.10.032.

Xing, Zipeng, Jiaqi Zhang, Jiayi Cui, Junwei Yin, Tianyu Zhao, Junyan Kuang, Ziyuan Xiu, Ning Wan, and Wei Zhou. 2018. Recent Advances in Floating TiO 2 -Based Photocatalysts for Environmental Application. Applied Catalysis B: Environmental. Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.12.005.

Yahya, N., F. Aziz, N. A. Jamaludin, M. A. Mutalib, A. F. Ismail, W. N. W. Salleh, J. Jaafar, N. Yusof, and N. A. Ludin. 2018. "A Review of Integrated Photocatalyst Adsorbents for Wastewater Treatment." Journal of Environmental Chemical Engineering. https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.06.051.

Zhang, Ying, Muttucumaru Sivakumar, Shuqing Yang, Keith Enever, and Mohammad Ramezanianpour. 2018. "Application of Solar Energy in Water Treatment Processes: A Review." Desalination 428 (October 2017): 116–45. https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.11.020.