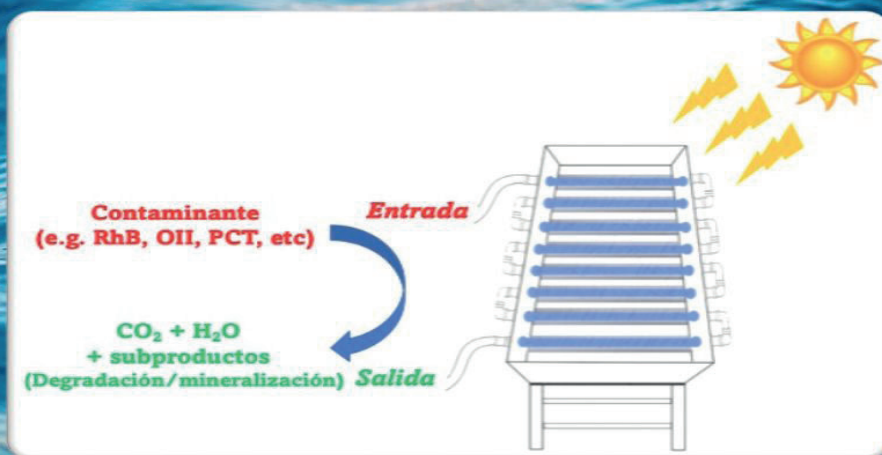


Sistema fotocatalítico solar integrado con colectores CPC para la degradación de contaminantes recalcitrantes en aguas residuales: nivel planta piloto



Elizabeth Rojas García
Richard S. Ruiz Martínez
Área de Ingeniería Química,
Universidad Autónoma Metropolitana,
Unidad Iztapalapa

Abstract

Solar photocatalysis is presented as a potential application to the treatment of water contaminated with organic waste whose degradation is hindered by conventional means of treatment. To this end, both the characteristics of photocatalysis to degrade pollutants and the design of a photocatalytic reactor that uses reflective surfaces to concentrate solar radiation in the reactor are highlighted. Finally, based on the experience of a pilot plant of the degradation of a dye for industrial use, the potential of this technology to degrade recalcitrant compounds in wastewater is discussed.

Keywords: Photocatalysis; solar; wastewater; pilot plant.

Resumen

Se presenta a la fotocatalisis solar como una potencial aplicación al tratamiento de aguas contaminadas con residuos orgánicos cuya degradación se dificulta por medios convencionales de tratamiento. Para ello, se destacan tanto las características de la fotocatalisis para degradar sustancias contaminantes como también las del diseño de un reactor fotocatalítico que emplea superficies reflejantes para concentrar la radiación solar en el reactor. Finalmente, basados en la experiencia de planta piloto de la degradación de un colorante de uso industrial, se discute la potencialidad de esta tecnología para degradar compuestos recalcitrantes en aguas residuales.

Palabras clave: Fotocatalisis; solar; aguas residuales; planta piloto.

1. Importancia de tratar las aguas residuales contaminadas

La contaminación de aguas residuales es un problema ambiental grave que surge

cuando el agua utilizada en actividades humanas, industriales, agrícolas o municipales contienen una variedad de sustancias y materiales que representan un riesgo para la salud humana y el medio ambiente, si no se tratan adecuadamente antes de ser liberadas al entorno natural. Algunas de las principales fuentes de contaminación en aguas residuales incluyen (Manasa y Mehta, 2020):

1. Descargas industriales: Las industrias liberan una amplia gama de contaminantes en sus aguas residuales, que van desde productos químicos tóxicos hasta metales pesados y compuestos orgánicos.

2. Agricultura: El uso de fertilizantes y pesticidas en la agricultura puede provocar la escorrentía de nutrientes y productos químicos a las fuentes de agua, causando la contaminación del agua.

3. Actividades domésticas: El vertido de productos químicos domésticos, aceites, grasas, medicamentos no utilizados y otros desechos domésticos en el sistema de alcantarillado puede contribuir a la contaminación del agua.

4. Sistemas de alcantarillado defectuosos: Las fugas en los sistemas de alcantarillado pueden permitir que aguas residuales no tratadas se filtren al medio ambiente, contaminando ríos, arroyos y acuíferos.

La contaminación de aguas residuales está presentando varios impactos negativos en el medio ambiente y la salud humana, incluyendo la degradación de ecosistemas acuáticos, la pérdida de biodiversidad, la contaminación del agua potable y la propagación de enfermedades

transmitidas por el agua. Para abordar este problema, es crucial implementar sistemas de tratamiento de aguas residuales efectivos y promover prácticas sostenibles en industrias, agricultura y actividades domésticas para reducir la cantidad de contaminantes liberados en el medio ambiente (INCyTU, 2019). Además, se requiere una regulación ambiental sólida y una gestión adecuada de los recursos hídricos para proteger la calidad del agua y garantizar la salud y el bienestar de las comunidades y los ecosistemas.

2. ¿Qué son los contaminantes recalcitrantes?

Los contaminantes recalcitrantes son sustancias que son difíciles de degradar o eliminar mediante los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales. Estos compuestos pueden persistir en el medio ambiente durante períodos prolongados y representar un riesgo significativo para la salud humana y el ecosistema (Römpp, 2017). Algunos ejemplos de contaminantes recalcitrantes incluyen ciertos productos químicos industriales (como los colorantes), compuestos orgánicos persistentes como los pesticidas y algunos productos farmacéuticos. Cuando las aguas residuales están contaminadas con estos tipos de contaminantes, es necesario emplear tecnologías de tratamiento más avanzadas y costosas para eliminarlos completamente o reducir su concentración a niveles seguros. Estos métodos pueden incluir procesos de oxidación avanzada, tratamiento con ozono, membranas de filtración avanzada y otros procesos de tratamiento químico y biológico especializados.

3. ¿Qué es la fotocatalisis heterogénea, como proceso efectivo para la eliminación de contaminantes recal-

itrantes de aguas residuales?

La fotocatalisis heterogénea es un proceso químico que utiliza la luz para acelerar una reacción catalítica en la superficie de un material sólido. En este proceso, un catalizador sólido absorbe la energía de la luz y la utiliza para iniciar una reacción química en una fase diferente a la del catalizador (Hoffmann, 1995). La fotocatalisis heterogénea es especialmente útil en la descomposición de contaminantes difíciles de degradar presentes en el agua y el aire. Por ejemplo, los contaminantes pueden adsorberse en la superficie de un material fotocatalítico, como el dióxido de titanio (TiO_2), y luego la luz ultravioleta (UV) excita el material catalítico, generando pares de electrones y huecos. Estos electrones y huecos pueden participar en reacciones redox que descomponen los contaminantes orgánicos en productos más seguros, como dióxido de carbono y agua.

La fotocatalisis heterogénea tiene varias ventajas, incluyendo su capacidad para degradar una amplia gama de contaminantes orgánicos, su efectividad bajo condiciones suaves de temperatura y presión, y su capacidad para funcionar de manera continua sin consumir productos químicos adicionales. Este proceso se está investigando y desarrollando activamente como una tecnología de tratamiento de aguas residuales y aire contaminado, ya que tiene el potencial de ser una solución sostenible y respetuosa con el medio ambiente para abordar la contaminación.

4. ¿Porqué los reactores fotocatalíticos solares son una alternativa viable para la degradación de contaminantes en aguas residuales?

Los reactores fotocatalíticos solares son sistemas que utilizan la energía solar

para llevar a cabo procesos de fotocatalisis heterogénea, como la descomposición de contaminantes orgánicos en aguas residuales o aire contaminado. Estos sistemas aprovechan la luz solar como fuente de energía para activar el catalizador fotocatalítico y desencadenar las reacciones químicas deseables.

En un reactor fotocatalítico solar típico, se coloca un catalizador fotocatalítico, como el dióxido de titanio (TiO_2), en un sistema que permite la exposición directa a la luz solar. El catalizador puede estar presente disperso en la solución contaminada, o en una matriz porosa o recubriendo una superficie específica, siendo estas últimas opciones las más viables dado que aumenta su área de exposición a la luz solar.

Los reactores fotocatalíticos solares tienen varias ventajas, como su capacidad para utilizar una fuente de energía renovable y abundante (la luz solar), su potencial para funcionar de manera continua y su efectividad para tratar una variedad de contaminantes orgánicos (Sundar, Kanmani, 2020). Sin embargo, también pueden presentar desafíos relacionados con la variabilidad de la intensidad solar y la necesidad de diseñar sistemas robustos y eficientes. Estos sistemas se están investigando y desarrollando activamente como una tecnología prometedora para el tratamiento de aguas residuales y la purificación del aire, especialmente en áreas donde la disponibilidad de energía solar es alta y se requieren soluciones sostenibles y respetuosas con el medio ambiente.

5. Reactores fotocatalíticos solares integrados con concentradores parabólicos compuestos

El flujo de energía solar que incide sobre

el catalizador es una variable importante que impacta directamente en el desempeño de un reactor fotocatalítico solar, por lo cual se suelen emplear superficies reflejantes en forma de CPCs (Concentradores Parabólicos Compuestos) para incrementar la luz incidente al reactor (Figura 1).

Un caso particular de estos sistemas es el de los reactores fotocatalíticos con CPCs (Concentradores Parabólicos Compuestos). Estos sistemas combinan la fotocatalisis heterogénea con la concentración de luz solar, para lo cual se emplean concentradores con geometría parabólica que enfocan la luz solar incidente en un área más pequeña, aumentando así la intensidad de la luz sobre el catalizador fotocatalítico y mejorando la eficiencia del proceso. En estos reactores los concentradores parabólicos compuestos están dispuestos de manera que recojan y concentren la luz solar incidente a lo largo de un eje focal, donde se encuentra el catalizador fotocatalítico. Esta concentración de luz solar aumenta la cantidad de energía por unidad de área que llega al catalizador, lo que puede acelerar las reacciones fotocatalíticas y mejorar la eficiencia del proceso.

Al utilizar concentradores parabólicos compuestos, los reactores fotocatalíticos pueden aprovechar la luz solar directa de manera más eficiente, lo que puede ser especialmente beneficioso en áreas con alta irradiación solar. Además, estos sistemas pueden diseñarse para ser modulares y escalables, lo que permite adaptarlos a diferentes aplicaciones y necesidades de tratamiento. Los reactores fotocatalíticos con CPCs tienen el potencial de ser una solución eficaz y sostenible para el tratamiento de aguas residuales y la purificación del aire, especialmente en áreas

donde se requiere un alto rendimiento y se dispone de abundante luz solar. Sin embargo, su diseño y operación adecuados son fundamentales para maximizar su eficiencia y rendimiento.

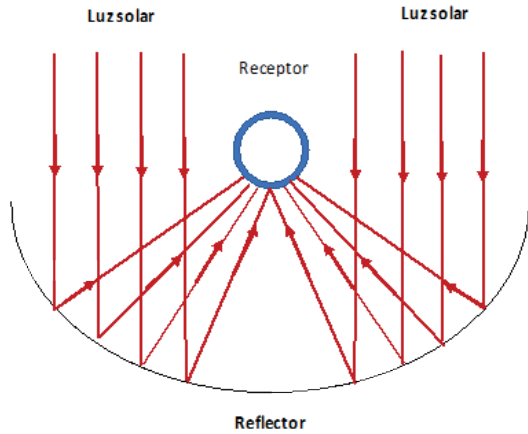


Figura 1. Diagrama de un concentrador solar parabólico que refleja los rayos solares en un punto focal (receptor, o reactor)

5.1 Aspectos generales sobre el diseño de un colector CPC

Los reactores CPC tienen la capacidad de concentrar la irradiación solar que incide en lo que se denomina área de apertura (Figura 2) y concentrarla en un área de recepción, que en el caso de un reactor corresponde al tubo o reactor fotocatalítico. Los CPC son colectores estáticos, es decir no requieren moverse para seguir el movimiento solar y se diseñan para cubrir la declinación solar entre los solsticios de verano e invierno. Estos sistemas se caracterizan por su capacidad de concentrar en el receptor tanto irradiación solar directa como reflejada, y las ecuaciones de diseño de la geometría de las superficies reflejantes están disponibles en la literatura (Salgado-Tránsito et. al., 2015; Soria-Mejía et.al, 2019). Para el propósito de reflejar y concentrar los rayos solares, las paredes del CPC se fabrican con materiales de alta

reflectividad como el aluminio o chapados con materiales de tales características.

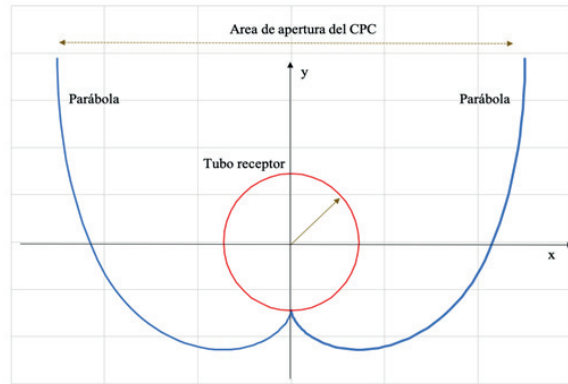


Figura 2. Diagrama esquemático de un colector CPC donde el tubo receptor corresponde a las paredes del reactor (color rojo) y las parábolas a las paredes reflejantes (color azul).

Al momento de diseñar un reactor fotocatalítico se habrá de tener presente algunas de las variables principales que afectan la reacción tales como son la fuente de luz, UV o visible (también si se tratará de una lámpara o de luz solar), la concentración del catalizador y si éste habrá de emplearse en forma de polvo disperso en el agua, o si habrá de estar fijo sobre algún material de soporte. Otro factor para considerar es la configuración del reactor y forma geométrica pues, por ejemplo, existen reactores con forma de tanque cilíndrico con agitación y otros que consisten en sistemas de tubos largos, y entre los cuales comparativamente habrá diferencias en el tipo de flujo y mezclado prevalente en cada uno de ellos que podrá afectar de manera diferente el desempeño de un sistema de reacción. En el caso particular de un reactor CPC, la reacción ocurre en tubos de vidrio (receptores) que deben ser lo más transparente posible al paso de la luz (Figura 3).

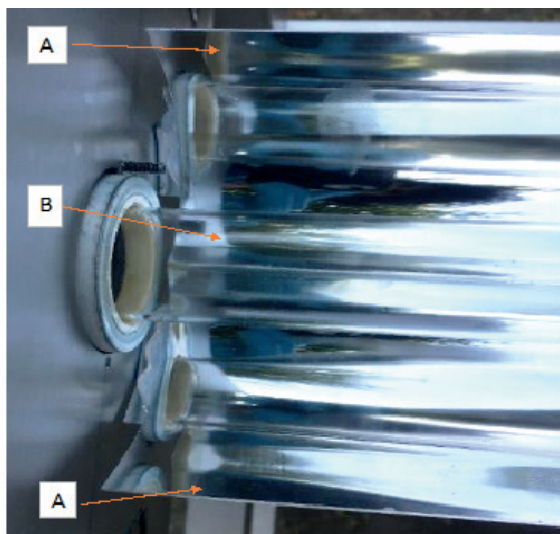


Figura 3. Sección de un reactor fotocatalítico con CPC, donde se muestra las láminas reflejantes en aluminio pulido (A) y el tubo receptor de cuarzo (B).

Existen diversos materiales que pueden emplearse para los tubos, sin embargo, su elección está íntimamente ligada a la energía lumínica con que se activa el fotocatalizador, pues una diversidad de materiales catalíticos requiere de energía UV para funcionar (principalmente por debajo de los 300 nm) mientras que otros que pueden operar también con luz visible (380-760 nm). Para los catalizadores que requieren fuentes lumínicas como la UV es recomendable usar materiales de alta transmitancia en regiones por debajo de 300 nm, aproximadamente, como es el caso de tubos comerciales de cuarzo, principalmente, seguido por tubos de borosilicato (e.g. vidrio Pyrex®). Para tales casos son menos recomendables los tubos de vidrio común, pues no resultan ser tan eficientes en permitir el paso de irradiación por debajo de los 300 nm comparado con los materiales previamente mencionados como se puede ver de la Figura 4 donde se compara su transmitancia, lo cual es una

medida del porcentaje de luz, de cierta longitud de onda, que deja pasar una muestra del material. A pesar de lo anterior, de esta misma figura se puede ver que el vidrio común si pudiera resultar convenientes para para reactores con catalizadores que operan con irradiación en la región de luz visible. Es importante tener presente que la diferencia en costos entre estos materiales puede variar de manera apreciable, lo cual no es asunto menor, pues estos reactores pueden requerir de decenas y en muchos casos hasta centenares de metros de tubería para alcanzar altos niveles de degradación de contaminantes.

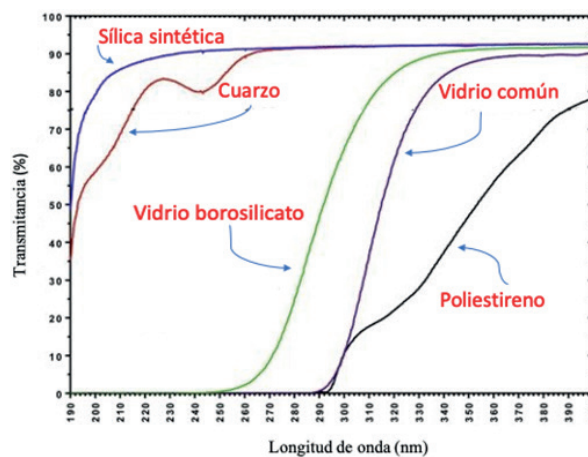


Figura 4. Comparación de la transmitancia de algunos materiales en función de la longitud de onda (adaptado a partir de Burgess, 2017).

6. Degradación de un colorante empleando un reactor CPC fotocatalítico solar

Mediante la fotocatalisis solar se ha buscado en múltiples estudios reportados en la literatura emplear la fracción UV en el espectro de luz solar para degradar contaminantes en agua. En la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa, ubicada en la Ciudad de México, se

implementó un reactor experimental para estudiar su desempeño en la degradación de colorantes mediante fotocátalisis solar, a nivel planta piloto. Sustancias de este tipo suelen estar presente en aguas residuales de la industria textil y se caracterizan por ser contaminantes recalcitrantes o difíciles de degradar tanto a condiciones ambientales como por métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales. Para evaluar la tecnología de fotocátalisis a base de energía solar se diseñó un reactor compuesto de ocho tubos de cuarzo (cada uno de 29 mm de diámetro interno y 55 cm de largo) donde el agua con colorante circula en circuito cerrado, como se muestra en la figura 5. Por ejemplo, como contaminante a degradar se utilizó el colorante textil Negro Reactivo 5 (NR5) tipo azo, y como fotocatalizador dióxido de titanio (TiO_2 degussa) en polvo. Para llevar a cabo la reacción a nivel planta piloto, previamente fue necesario establecer experimentalmente parámetros como: concentración del catalizador, nivel de pH óptimo, orientación del reactor respecto al sol y la inclinación de la plataforma de tubos respecto a la horizontal, la experiencia en la materia sugiere colocar los tubos receptores en dirección este-oeste para optimizar la radiación anual que se recibe; en cuanto a la inclinación de la plataforma es posible determinar la irradiancia solar que se recibe en los tubos a distintos ángulos de inclinación mediante un piranómetro, dispositivo que mide la irradiancia en W/m^2 . En el presente caso el ángulo empleado fue de 30° . El experimento consistió en preparar 15 L de una solución de concentración conocida que contiene el contaminante (25 – 50 mg/L), posteriormente, se adiciona la cantidad de catalizador adecuada para obtener la concentración deseada (generalmente 1-2 g/L). Esta disolución es co-

locada en agitación con la ayuda de un mezclador “caframo” con propela por alrededor de 30 minutos, en obscuridad total. Seguidamente, la disolución es pasada a través de los tubos (reactores) con la ayuda de una motobomba de acero inoxidable de la marca Pedrollo (Figura 5, paso 1 y 2), hasta regresar al recipiente que contienen la disolución (Figura 5, paso 3). Finalmente, son tomadas alícuotas del recipiente que contiene la disolución a distintos tiempos de reacción, y posteriormente analizadas en un espectrofotómetro UV-vis. Los datos obtenidos nos permiten determinar los parámetros cinéticos necesarios para el diseño y escalamiento de reactores fotocatalíticos solares.



Figura 5. Reactor fotocatalítico con CPC a nivel piloto empleado en la degradación de colorante textil NR5.

En la Figura 6 se muestra un par de imágenes de agua con colorante al inicio y después de haber sido tratada por fotocátalisis solar durante 2.5 h, alrededor de medio día, en un día del mes de junio del año 2023. El porcentaje de degradación del colorante en el experimento superó el 96% y resultó comparativamente muy superior a la degradación empleando sólo luz pero sin catalizador (fotólisis), de sólo 14%. Además de estos resultados de degradación

del colorante NR5 existen en la literatura especializada varios otros estudios enfocados en la degradación de contaminantes recalcitrantes y que destacan a la presente como una tecnología prometedora para eliminar compuestos difíciles de degradar por métodos convencionales. Sin embargo, a pesar de los buenos resultados obtenidos con esta tecnología aún se está lejos de ser aplicada a nivel industrial, principalmente debido a las limitaciones que representa concentrar la radiación solar y dirigir esta hacia el receptor (reactor), controlar la temperatura de la reacción, disposición de la luz solar durante un periodo corto durante el día, entre otras. Por ello, nuestras futuras investigaciones estarán dirigidas en tratar de minorizar estas limitaciones mejorando la captación de la luz solar, la disposición del catalizador, y colocar un sistema que permita controlar la temperatura de la reacción, entre otras.



Figura 6. Imágenes de coloración de solución de NR5 al inicio y después de 2.5 h de tratamiento por fotocatalisis.

7. ¿Hacia dónde vamos?

El tratamiento de agua residual por medio de fotocatalisis solar es una tecnología promisoriosa que aborda el problema de la contaminación empleando energía renovable ampliamente disponible en la mayor parte

de México. A pesar de los excelentes resultados obtenidos en nuestro laboratorio a nivel planta piloto, estos se realizaron utilizando moléculas modelo como colorantes (Orange II, y Negro reactivo 5) y metales pesados (cromo hexavalente). Por ello, a pesar de dicho potencial, todavía no se trata de una tecnología madura y se requiere profundizar en varios aspectos del diseño del sistema de reacción para optimizar su desempeño. Por ejemplo, (1) utilizar membranas tubulares fotocatalíticas que permitan minorizar los problemas que se presentan cuando el catalizador está disperso en el agua contaminada, tales como daño en las bombas, mangueras y tubos (reactores), y separación del catalizador del agua tratada, (2) utilizar aguas residuales reales provenientes, por ejemplo de PTARs donde se contemplen procesos secundarios (generalmente biológicos), y (3) controlar la temperatura de la reacción ya que al utilizar la luz solar como fuente de energía para activar el fotocatalizador, la temperatura de la mezcla de reacción suele incrementarse durante el transcurso de la reacción. Por tanto, estas serían nuestras próximas metas a cumplir en futuros proyectos de investigación.

8. Conclusión

Si bien la fotocatalisis solar es un proceso viable para la eliminación de contaminantes recalcitrantes de aguas residuales como los colorantes tipo azo, está aún lejos de su aplicación a nivel industrial. Las principales razones recaen en mejorar la captación/aprovechamiento de la luz solar, la disposición del fotocatalizador en la solución contaminada, disminuir el tamaño de los reactores, limitaciones relacionadas con la disposición de la luz solar durante el día, etc. Por ello en aportación a este

tema, la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa, implementó un reactor experimental para estudiar su desempeño en la degradación de colorantes tipo azo mediante fotocatalisis solar, a nivel planta piloto.

A pesar de que los resultados obtenidos son muy interesantes es necesario mejorar algunos aspectos como la disposición del fotocatalizador, diseñar nuevos catalizadores que permitan incrementar la actividad fotocatalítica, control de la temperatura de la reacción, incrementar la captación de la luz solar mediante el diseño de CPCs de más de 1 sol, entre otros, siendo estos nuestros siguientes objetivos a desarrollar para seguir aportando en la investigación de este tema tan relevante para las futuras generaciones.

Referencias

Burgess, C., *The Basis for Good Spectrophotometric UV-Visible Measurements, UV-Visible Spectrophotometry of Water and Wastewater* (Second Ed.), Elsevier, pp.1-35. ISBN: 978-0-44-463897-7, 2017.

Ceja de la Cruz, Z.T., Rentería-Rodríguez M.E., Tratamiento de aguas residuales, *INCyTU*, número 28, CDMX, 2019.

Hoffmann, M. R., Martin, S. T., Choi, W., y Bahnemann, D. W., Environmental applications of semiconductor photocatalysis. *Chemical reviews*, 95(1), 69-96, 1995.

Manasa, R. L., y Mehta, A., Wastewater: sources of pollutants and its remediation. *Environmental Biotechnology* Vol. 2, 197-219, 2020.

Römpp H., *Harzadous Chemicals Handbook*, Elsevier, 2017.

Salgado-Tránsito, I., Jiménez-González, A. E., Ramón-García, M. L., Pineda-Arellano, C. A., y Estrada-Gasca, C. A., Design of a novel CPC collector for the photodegradation of carbaryl pesticides as a function of the solar concentration ratio, *Solar Energy*, 115, pp. 537-551, 2015.

Soria-Mejía S.P., Ambrosio-Juarez J.E., Toledo-Manuel I. y Sabás-Segura J., Diseño y construcción de un Colector Solar de Tipo Concentrador Parabólico Compuesto (CPC) para pruebas de calentamiento de aire, *Revista de Energía Química y Física*, 6(19), pp. 22-30, 2019.

Sundar K.P. y Kanmani S. Progression of Photocatalytic reactors and its comparison: *A Review*, 154, pp. 135-150, 2020.