

**UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
E.P. INGENIERÍA AMBIENTAL**



**EFICIENCIA DE LOS COMPONENTES DEL FOTOCATALIZADOR
TiO₂ EN LA REDUCCIÓN DEL CO₂ EN AMBIENTES CERRADOS CON
ALTA CONCENTRACIÓN DE PERSONAS**

**CURSO:
Investigación 2**

**DOCENTE:
STIVE FLORES GÓMEZ**

**AUTORES:
Meza Yauri Helen Celeste
Mayhuire Zuñiga Giancarlo Edu**

EFICIENCIA DE LOS COMPONENTES DEL FOTOCATALIZADOR TiO₂ EN LA REDUCCIÓN DEL CO₂ EN AMBIENTES CERRADOS CON ALTA CONCENTRACIÓN DE PERSONAS

ÍNDICE DEL CONTENIDO:

1.	IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA:	3
2.	OBJETIVOS:	4
2.1.	Objetivo general:	4
2.2.	Objetivos específicos:	4
3.	HIPÓTESIS:	4
3.1.	General:	4
3.2.	Específico:	4
4.	JUSTIFICACIÓN DE LA ORIGINALIDAD Y RELEVANCIA DEL TEMA:	5
5.	REVISIÓN DE LITERATURA:	6
5.1.	FOTOCATÁLISIS:	6
5.1.1.	FOTOCATALIZADOR TiO ₂ :	6
5.2.	ELEMENTOS RELACIONADOS CON EL FOTOCATALIZADOR TiO ₂ :	7
5.2.1.	Hetero-unión de Cu-porfirina/TiO ₂ para la Reducción Foto-catalítica de CO ₂	7
5.2.2.	Ajuste de Vacantes de Oxígeno en Nanopartículas de TiO ₂ ¡Error! Marcador no definido.	
5.2.3.	Sitios Atómicos de Cu y Ni en TiO ₂ Poroso para la Reducción de CO ₂ a CH ₄	8
6.	MATERIALES Y MÉTODOS:	10
6.1.	DESCRIPCIÓN DEL ÁMBITO DE ESTUDIO:	10
6.1.1.	LUGAR DE ESTUDIO:	10
6.2.	OBTENCIÓN DE DATOS:	11
6.2.1.	DATOS DE LA CONCENTRACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN:	11
6.2.2.	DATOS DE LOS FOTOCATALIZADORES:	12
6.3.	DISEÑO ESTADÍSTICO:	17
6.3.1.	Análisis de varianza ANOVA	17
6.3.2.	Diseño completamente al azar - ANOVA:	¡Error! Marcador no definido.
6.3.3.	Diseño en bloque al azar – ANOVA:	17
6.4.	ANÁLISIS DE DATOS:	17
6.4.1.	Prueba estadística:	18
6.4.2.	Software Rstudio:	19
7.	Cronograma de actividades:	20
8.	Presupuesto y financiamiento:	21
8.1.	Presupuesto- Aporte Monetario:	21
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:	23
10.	ANEXOS:	23

1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA:

A pesar de la incertidumbre en los niveles de análisis, las alteraciones climáticas recientes y a largo plazo registran que las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) han afectado las temperaturas anuales medias, las precipitaciones y los patrones climáticos, en base a esto se generaron modelos los cuales predijeron un aumento de la temperatura global de 1 a 7 °C, esto generó eventos anómalos (Chen, 2019), debido a las actividades antropogénicas, como la quema de combustibles fósiles, han aumentado las emisiones de CO₂, lo que ha desencadenado un impacto directo en el calentamiento global y el cambio climático (Canadell, 2007).

Este aumento brusco de la concentración atmosférica de CO₂ ha perturbado el equilibrio natural del ciclo del carbono, ocasionando una retención adicional de calor en la atmósfera, fenómeno conocido como efecto invernadero (Zapata, 2009). Las repercusiones de este fenómeno son de una magnitud alarmante, con efectos devastadores tanto para el planeta como para sus habitantes (Greenpeace España, 2023). El deshielo de glaciares, el aumento del nivel del mar, la acidificación de los océanos y la intensificación de fenómenos climáticos extremos son solo algunas de las manifestaciones del impacto del exceso de CO₂ en la atmósfera (Álvarez & Lires, 2017).

Los efectos generales del cambio climático en los sistemas de agua dulce probablemente incluyan un aumento de la temperatura del agua, una disminución de los niveles de oxígeno disuelto y una mayor toxicidad de los contaminantes (Amato, 2015). En años recientes, se han registrado eventos climáticos extremos a escala global, con un incremento en el número de fallecimientos atribuibles al calor y cambios notables en la temperatura promedio del aire y los océanos (Vargas, 2009). Estos indicadores ponen de manifiesto la urgencia de abordar de forma efectiva la problemática de las emisiones de CO₂ y sus implicaciones en el clima y la salud humana (Figuroa Clemente, 2007).

Para contrarrestar el cambio climático y disminuir las emisiones de CO₂, lo que genera la necesidad de tomar conciencia (Anwar, 2021), ya que la contaminación atmosférica por el CO₂ es un desafío global que con el transcurso del tiempo tiende a incrementar preocupantemente (Solarin, 2017). Los niveles actuales de CO₂ en la atmósfera son alarmantes, superando récords históricos y requiriendo medidas urgentes para limitar el aumento de la temperatura global, y así evitando consecuencias catastróficas lo que implicaría reducir las emisiones para mantener el calentamiento por debajo de 1,5 °C (Ibáñez, 2015).

2. OBJETIVOS:

2.1. Objetivo general:

Determinar la eficiencia del fotocatalizador TiO_2 en la reducción del contaminante atmosférico CO_2 en ambientes cerrados con alta concentración de personas.

2.2. Objetivos específicos:

- Evaluar la eficiencia del componente **Cu-porfirina** en el fotocatalizador TiO_2 para la reducción del CO_2 en ambientes cerrados con alta concentración de personas.
- Evaluar la eficiencia del componente **ZnO** en el fotocatalizador TiO_2 para la reducción del CO_2 en ambientes cerrados con alta concentración de personas.

3. HIPÓTESIS:

3.1. General:

El fotocatalizador TiO_2 con el componente **Cu-porfirina y ZnO** reducen con eficiencia el 50% del CO_2 en ambientes cerrados con alta concentración de personas.

3.2. Especifico:

- El componente **Cu-porfirina** complementa eficientemente al fotocatalizador TiO_2 en la reducción del CO_2 al 50%, en ambientes cerrados con alta concentración de personas.
- El componente **ZnO** complementa eficientemente al fotocatalizador TiO_2 en la reducción del CO_2 al 50%, en ambientes cerrados con alta concentración de personas.

4. JUSTIFICACIÓN DE LA ORIGINALIDAD Y RELEVANCIA DEL TEMA:

La investigación sobre el uso de dióxido de titanio (TiO₂) como fotocatalizador para abordar la contaminación atmosférica por el CO₂ es altamente relevante y justificada debido a varias investigaciones que la respaldan (Zhu, 2018). En primer lugar, el TiO₂ ha demostrado ser eficaz en la reducción de contaminantes atmosféricos, entre estos se encuentra el CO₂, a través de reacciones foto-catalíticas, lo que ofrece una solución innovadora y escalable para reducir focalmente la concentración de CO₂ en áreas urbanas densamente pobladas. Además, al utilizar fotocatalizadores como el TiO₂ (Guarino, 2008), se pueden reducir las emisiones de CO₂ a largo plazo, lo que contribuye significativamente a la mitigación del cambio climático y a la creación de un entorno más limpio y sostenible para las generaciones futuras (Lee et al., 2010; Moreira & Pires, 2016).

Por otro lado, la combinación de fotocatalizadores como el TiO₂ con áreas verdes puede potenciar aún más la reducción de CO₂ y la mejora de la calidad del aire en entornos urbanos, ya que las áreas verdes actúan como sumideros naturales de CO₂, complementando así la acción de los fotocatalizadores (Ma, 2014). Finalmente, la investigación y aplicación de fotocatalizador, en la reducción de CO₂ representan un enfoque innovador y efectivo para abordar un problema global de manera localizada o focalizada y sostenible, lo que no solo promueve la innovación en tecnologías limpias, sino que también fomenta el desarrollo de soluciones ambientales viables a largo plazo (He et al., 2020a; Zhu et al., 2018). Se puede decir que la investigación está centrada en el uso de TiO₂ como fotocatalizador para reducir la contaminación atmosférica por CO₂ lo que es relevante en el contexto actual del cambio climático y degradación ambiental, y ofrece oportunidades concretas para mitigar los impactos adversos del calentamiento global y promover un futuro más limpio y sostenible (Lee et al., 2010; Moreira & Pires, 2016).

5. REVISIÓN DE LITERATURA:

5.1. FOTOCATÁLISIS:

La fotocatalisis es un proceso catalítico que implica la absorción de luz por un catalizador o sustrato, siendo una herramienta efectiva en la eliminación de contaminantes persistentes y refractarios (Ohtani, 2011). Uno de los autores que estudio este tema durante años lo define como "aceleración de un electrón fotogenerado en presencia de un catalizador", en la que se concluye como definición que la fotocatalisis se basa en la foto-absorción de un material sólido, donde este actúa como catalizador sin alterar su composición o estructura (Ganguly, 2019).

Parte de los estudios que se realizó para este tema conlleva una historia relativamente larga, este tuvo un inicio con el estudio de la fotocatalisis en el año 1981 (Loddo, 2018). En ese entonces no se presenciaba investigaciones sobre fotocatalisis por lo que solo se realizaba en laboratorios del campo de la catálisis, la electroquímica, la fotoquímica, la química de materiales; esto ha llevado a discusión los conceptos que se le daría por los métodos analíticos según los campos en la que se ha estado realizando (Ohtani, 2011). Por ello, resultaba difícil encontrar una revisión completa de este tema debido a la longevidad del estudio.

Después de varios estudios a través de los años, actualmente se ha convertido en una Tecnología Sostenible para la Eliminación de Contaminantes y por ello se ganó el respeto al medioambiente y su alineación con los principios de la Química Verde (Patil, 2022). Las aplicaciones más comunes de la fotocatalisis son la purificación del aire y la degradación de contaminantes atmosféricos, contribuyendo así a la mitigación y purificación del entorno (Tsendzughul & Ogwu, 2020). Por lo tanto, es necesario tener un nivel de eficacia, el cual depende de diferentes factores como el de la cercanía entre el contaminante, el catalizador y la fuente de iluminación (Pichat, 2014).

5.1.1. FOTOCATALIZADOR TiO₂:

El TiO₂ se ha establecido como uno de los fotocatalizadores más estudiados y utilizados debido a sus características destacadas. Su estabilidad química, abundancia, bajo costo y baja toxicidad en comparación con otros óxidos metálicos lo han convertido en un material de gran interés (Ma & Wang, 2014).

Además, este tiene un papel importante en la historia, ya que el fotocatalizador TiO₂ fue descubierto en el año 1972, demostrando su capacidad para dividir fotocatalíticamente el agua en electrodos monocristalinos, en la cual consiste como el TiO₂ puede dividir foto-catalíticamente las moléculas del agua generando hidrogeno y oxígeno, por lo que esta acción tiende aplicarse en el ambiente disminuyendo emisiones de gases contaminantes ya que se emplea como una energía renovable, este descubrimiento es parte del científico Fujishima (Nozik, 1975). Este hallazgo despertó un gran entusiasmo por el potencial del TiO₂ como fotocatalizador (Huang, 2017). Además, la foto-degradación de contaminantes orgánicos tóxicos en aguas residuales utilizando el TiO₂ en energía solar se consideró una de las vías más prometedoras para abordar los problemas ambientales globales (Li, 2015).

El TiO₂ también se destaca por su estabilidad química, respeto al medio ambiente y abundancia en la Tierra, siendo reconocido por su capacidad de reducir el CO₂ (Schneider, 2014). De hecho, el TiO₂ se ha establecido como el principal candidato y sigue siendo un punto de referencia debido a su eficacia, respeto al medio ambiente y foto-estabilidad (Nozik, 1975).

Sin embargo, el TiO₂ también enfrenta desafíos, como su amplia banda prohibida y la rápida recombinación de pares electrón-hueco fotogenerados, lo que limita sus aplicaciones prácticas. Para abordar estas limitaciones, se han realizado investigaciones para mejorar la ingeniería de su banda prohibida y aumentar su eficiencia como fotocatalizador bajo luz visible (Schneider, 2014). Se han propuesto diversas estrategias, como la modificación de la superficie, la carga de cocatalizadores, el dopaje y la construcción de hetero-uniones, con el objetivo de mejorar el rendimiento foto-catalítico del TiO₂ en la reducción de contaminantes como el CO₂, tanto en entornos acuáticos como aéreos (Low, 2018)(Huang, 2017). Estos enfoques buscan aumentar la eficiencia de la foto-conversión del TiO₂ para la captura de CO₂. Por lo tanto, el TiO₂ se ha consolidado como una solución prometedora para abordar la contaminación ambiental y la crisis energética, gracias a sus propiedades favorables y al continuo desarrollo de estrategias innovadoras para mejorar su desempeño foto-catalítico (Qi, 2017).

Para abordar la disminución del CO₂, el TiO₂ se anexa con otros elementos debido a las limitaciones que presenta en cuanto trabaja individualmente, ya que así puede lograr una capacidad redox sólida y una respuesta amplia a la luz para favorecer una actividad foto-catalítica más efectiva en los mecanismos de reacción (He, 2020). Por lo tanto, se profundizará la relación que tiene el TiO₂ con tres elementos o componentes que a continuación presentaran un contacto adecuado y fluido, junto con características morfológicas particulares que impulsen estos mecanismos de reacción para una mejor eficiencia en respecto a la reducción del CO₂.

5.2. ELEMENTOS RELACIONADOS CON EL FOTOCATALIZADOR TIO₂:

La captura y conversión de CO₂ es un desafío crucial para mitigar el cambio climático y lograr un futuro sostenible. En este contexto, los recientes avances en el desarrollo de materiales foto-catalíticos han demostrado un gran potencial para abordar este problema de manera eficiente y rentable.

5.2.1. Hetero-unión de Cu-porfirina/TiO₂ para la Reducción Foto-catalítica de CO₂

Un estudio destacado presenta la innovadora estrategia de anclar moléculas de Cu-porfirina en nano hojas de TiO₂ para formar una hetero unión de esquema S. Esta estructura mejora significativamente la captura de luz, la superficie específica y la cantidad de sitios de reacción, lo que permite una mayor captura de CO₂ y una eficiente separación de cargas fotogeneradas (Bi, 2021). La metodología implica la construcción de un sistema foto-catalítico integrado para la captura y conversión in situ de CO₂ en la interfaz gas-sólido, sin necesidad de agentes de sacrificio.

La eficiencia de conversión de CO₂ es notable, con tasas de evolución de CO de 56 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ y 73 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ bajo luz visible y solar, respectivamente, y tasas potenciales de conversión de CO₂ del 35,8% y 50,4% (Yue, 2024).

La construcción de la hetero-unión de esquema S (Cu-porfirina/TiO₂) (Li, 2022), se basa en interacciones débiles como interacciones electrostáticas, apilamiento π - π y enlaces de hidrógeno. Esta estructura mejora la captura de luz, la superficie específica y la cantidad de sitios de reacción, permitiendo una mayor captura de CO₂ y una eficiente separación de cargas fotogeneradas. La hetero-unión del esquema S amplía el rango redox y mejora la eficiencia de separación de cargas, facilitando la foto-reducción efectiva de CO₂ (Xu, 2020).

Como resultado, el sistema catalítico logra una conversión estable, eficiente y altamente selectiva de CO₂ a CO, sin necesidad de agentes de sacrificio ni absorbentes alcalinos. La introducción de Cu-porfirina mejora significativamente la capacidad de captura de CO₂ y la utilización de electrones, lo que resulta en una conversión estable y eficiente. Además, la formación de la hetero-unión de esquema S permite una excelente reducción foto-catalítica del CO₂ bajo luz visible y solar (Nakashima, 2016).

El uso de Cu-porfirina y TiO₂ como materiales catalíticos es significativo debido a su eficacia y bajo costo. La Cu-porfirina proporciona sitios activos adicionales y mejora la captura de CO₂, mientras que el TiO₂ semiconductor es conocido por su bajo costo y estabilidad. Esta combinación resulta en un sistema catalítico eficiente y sostenible.

5.2.2. El ZnO en el TiO₂ para la Reducción de CO₂.

El óxido de zinc (ZnO) es un material semiconductor ampliamente utilizado como fotocatalizador para la degradación de contaminantes orgánicos en agua. Según diversos estudios, cuando se irradia con luz solar, los fotones se absorben y se crean pares electrón-hueco en la superficie del ZnO (Hoffmann, 1995). Estos pares electrón-hueco se utilizan para generar radicales libres reactivos, como el radical hidroxilo (OH), que reaccionan con los contaminantes orgánicos, como el ácido metil salicílico (AMS), para degradarlos (Ebrahimi, 2019). Se destaca por su capacidad para absorber luz visible y generar radicales libres reactivos, además de ser un material económico y fácilmente disponible en comparación con otros materiales fotocatalíticos, como el TiO₂ (Ali, 2012).

La capacidad fotocatalítica del ZnO se ha evaluado mediante la degradación de AMS en presencia de luz solar. Estudios han demostrado que el ZnO es capaz de degradar el AMS en un 80% en solo 3 horas, lo que es significativamente más eficiente que otros materiales fotocatalíticos. Además, la eficiencia del ZnO en la reducción del CO₂ se ha evaluado mediante la mineralización de los productos de degradación. Los resultados indican que el ZnO puede mineralizar los productos de degradación en CO₂, lo cual evidencia un proceso eficiente y sostenible.

El TiO₂ es un material fotocatalítico ampliamente utilizado para la degradación de contaminantes orgánicos. Sin embargo, presenta limitaciones en su eficiencia debido

a su gran banda prohibida y la rápida recombinación de pares electrón-hueco (X. Chen & Mao, 2007). En contraste, el ZnO tiene una banda prohibida más pequeña y es capaz de absorber luz visible, lo que lo hace más eficiente en la degradación de contaminantes.

Diversos procesos se han llevado a cabo para evaluar la eficiencia del ZnO como fotocatalizador. Estos incluyen la caracterización estructural y óptica de los materiales fotocatalíticos, la evaluación de la actividad fotocatalítica mediante la descomposición de H₂O₂, y la evaluación de la eficiencia en la reducción del CO₂ mediante la mineralización de los productos de degradación (Van Dijken et al., 1998). El H₂O₂, que se forma durante la degradación fotocatalítica, puede actuar como promotor o inhibidor de la reacción. Estudios indican que, a bajas concentraciones, el H₂O₂ mejora la degradación del AMS, mientras que, a concentraciones más altas, actúa como inhibidor, reduciendo la eficiencia de degradación (Xu, 2010).

En pocas palabras, el ZnO es un material fotocatalítico eficiente y sostenible para la degradación de contaminantes orgánicos y la reducción del CO₂. La anexión del ZnO al TiO₂ puede mejorar significativamente la eficiencia fotocatalítica del TiO₂. Tanto el H₂O₂ como el ácido húmico pueden influir en la eficiencia de la degradación fotocatalítica, y el reciclado del ZnO, con el tratamiento adecuado, puede mantener su actividad a lo largo del tiempo. Toda la información presentada ha sido extraída de diversos artículos científicos que sustentan y validan estos hallazgos.

6. MATERIALES Y MÉTODOS:

6.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁMBITO DE ESTUDIO:

La razón por la que se escogió este lugar de estudio es para poder tener el dato de concentración de CO₂ generado por el ser humano. Ya que así podemos realizar el análisis estadístico y tener el porcentaje de eficiencia de los fotocatalizadores propuestos en el prototipo presentado.

6.1.1. LUGAR DE ESTUDIO:

El lugar de estudio es dentro de las instalaciones de la Universidad Peruana Unión, Carretera Central Km 19.5 Ñaña, Chosica. El punto específico del estudio es en los laboratorios de cómputo las cuales estarán cerrado y sin ventilación para poder medir la concentración de CO₂ producido por el ser humano. Ya que un ser humano promedio exhala alrededor de 2,3 libras de dióxido de carbono en un día normal, pero aumenta ocho veces más de CO₂ mientras se realiza actividad física. Esto puede ocasionar un aumento de concentración de este gas en el espacio (Palmer, 2015).



Figura 1 Universidad Peruana Unión

La investigación en un espacio cerrado permitirá una mayor presencia de CO₂ debido a la presencia de estudiantes y docentes en el área de investigación. Esto permitirá medir la concentración de CO₂ producido para evaluar la eficiencia de los componentes del fotocatalizador TiO₂ con el prototipo que desarrollará (Andrés, 2012). La reducción del CO₂ en la atmósfera y el ambiente es crucial para prevenir consecuencias devastadoras para la salud humana, el planeta y el ecosistema.

La investigación verificará la eficiencia de los componentes para mejorar la calidad del aire y cuidar el medio ambiente. Además, evitará que el planeta se sobrecaliente y pueda mejorar a gran escala (Xu, 2024). El proyecto no solo reducirá el CO₂ en áreas cerradas, sino también en áreas urbanas con mayor presencia de CO₂ y en industrias relacionadas con el medio ambiente ya que el propósito de esta investigación es desarrollar tecnologías fotocatalizadores que reduzcan este contaminante a mayor escala.

6.2. OBTENCIÓN DE DATOS:

6.2.1. DATOS DE LA CONCENTRACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN:

Obtener los datos de concentración de CO₂ con un instrumento de monitoreo, es importante para controlar la calidad del aire detectando este contaminante específico, por lo que es crucial utilizarlo en esta investigación para poder analizar el porcentaje de eficiencia de los dos componentes foto-catalíticos del TiO₂, además permite monitorear no solo en espacios cerrados si no en lugares abiertos donde se encuentra más cargado la concentración del CO₂, lo que es crucial para prevenir problemas de salud y ambiente.

6.2.1.1. *Detector de CO₂ RH AZ7755*

El detector de CO₂ RH AZ7755 es un instrumento de alta precisión diseñado para medir la concentración de dióxido de carbono (CO₂). Este dispositivo será fundamental en diversas aplicaciones, incluyendo la monitorización del aire en edificios, la gestión de la calidad del aire en espacios confinados (Rossel, 2024).



Figura 2 Detector de CO₂ RH AZ7755

6.2.1.1.1. *Uso del Detector de CO₂ RH AZ7755 en Espacios Cerrados*

El detector de CO₂ RH AZ7755 será ideal para la medición del CO₂ en espacios cerrados, como:

Edificios: El instrumento será útil para monitorizar la calidad del aire en edificios, detectar posibles fugas de CO₂ y garantizar un ambiente saludable para los ocupantes.

Laboratorios: El detector de CO₂ RH AZ7755 será fundamental en laboratorios, donde se requiere medir la concentración de CO₂.

Vehículos: El instrumento será adecuado para medir la concentración de CO₂ en vehículos, lo que es crucial para garantizar una buena calidad del aire.

Entonces se puede decir que el detector de CO₂ RH AZ7755 es un instrumento de alta precisión diseñado para medir la concentración de CO₂. Su precisión, resolución y estabilidad lo hacen adecuado para una amplia variedad de aplicaciones, incluyendo la

monitorización del aire en edificios, la gestión de la calidad del aire en espacios confinados, esto nos será útil al momento de poder medir la eficiencia de las metodologías empleadas en el fotocatalizador TiO₂.

6.2.2. DATOS DE LOS REACTORES FOTOCATALÍTICOS:

El prototipo que se desarrollara en la investigación se utilizara para poder verificar la eficiencia de cada componente del fotocatalizador del TiO₂, por lo tanto, tenemos de referencia a este proyecto:

6.2.2.1. *Reactor foto-catalítico de radiación solar simulada del fotocatalizador TiO₂ con los dos componentes:*

Para obtener los datos de la reducción de CO₂ en el reactor foto-catalítico de radiación solar simulada del fotocatalizador TiO₂ con los dos componentes, se debe diseñar y construir un reactor a escala de laboratorio que permite estudiar la actividad foto-catalítica de materiales semiconductores como el dióxido de titanio (TiO₂) impulsados por radiación solar simulada (Luz de LED) (Andrés, 2012). Ya que el reactor permite hacer un análisis cualitativo y cuantitativo de la cantidad de oxígeno liberado en la descomposición de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) en solución acuosa, medido de manera indirecta a través de un método adaptado de un sistema de medición de volumen por desplazamiento de líquido, con una probeta invertida (Yañez et al., 2022).

Se obtiene los siguientes diagramas en la Figura 2 y Figura 3 que explican el proceso de armado de este reactor foto-catalítico:

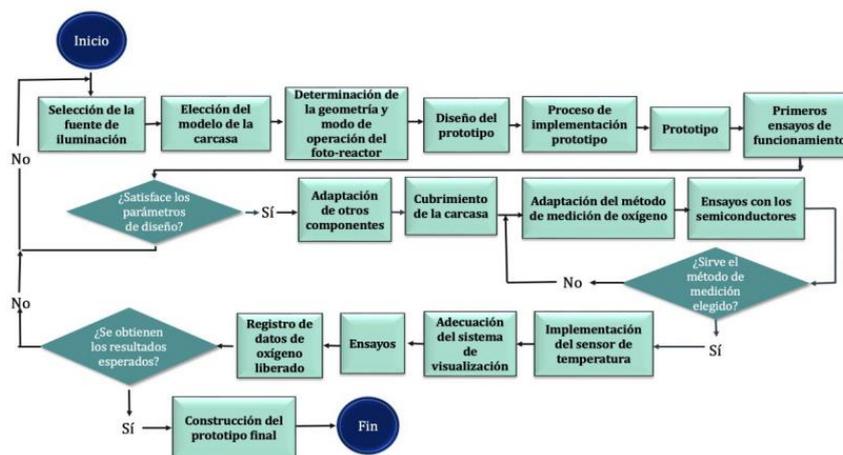


Figura 3 Diagrama de Proceso del diseño y construcción del reactor

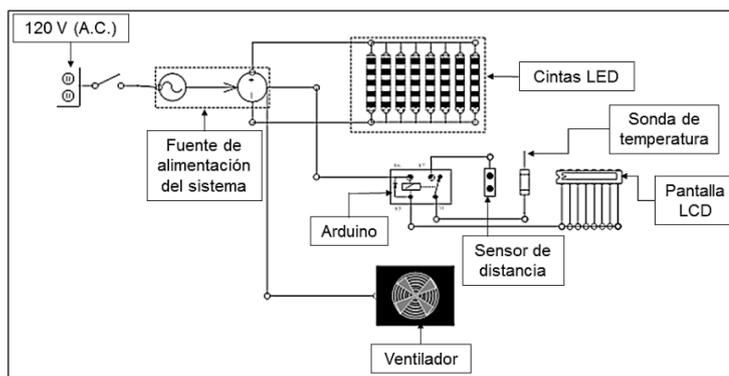


Figura 4 Diagrama de flujo - Esquema del Prototipo en componentes electrónicos

El reactor foto-catalítico diseñado y construido para este proyecto consta de varios componentes:

Tabla 1 MATERIALES DEL REACTOR FOTOCATALITICO:

MATERIALES	
Sistema de iluminación	Cintas compuestas por bombillos de diodos LED
Foto-reactor	Tubo de cuarzo (diámetro de 2,0 cm)
Carcasa del reactor	Carcasa cilíndrica de aluminio
Modo de operación	Configuración tipo batch
Medición de oxígeno	Sensor ultrasónico HC-SR04
Medición de Temperatura	Sonda de temperatura DS18B20
Registro de Datos	Placa Arduino Mega 2560 (mediante pantalla LCD)
Catalizador principal	○ Dióxido de titanio TiO ₂ (Aeroxide P25, Evonik)
Catalizadores secundarios:	○ Opcional
Muestra y Concentraciones	Muestra 5ml de H ₂ O ₂ (Peróxido de Hidrógeno (42% y 25%, estabilizados en agua y suministrados por la compañía Smartcol)

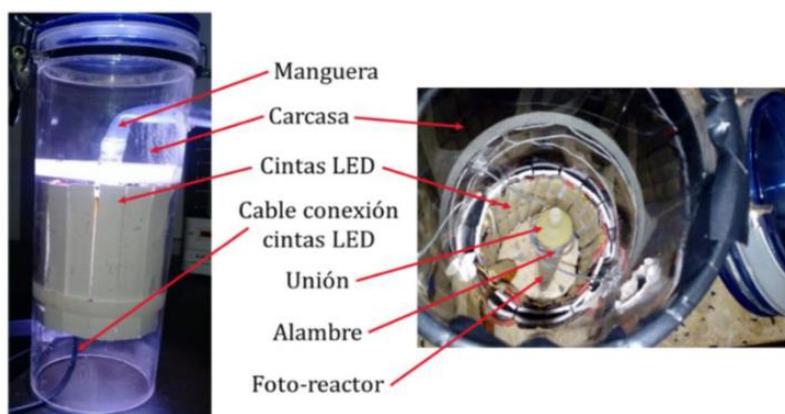


Figura 5 Prototipo del Reactor

6.2.2.2. *Sistemas del Reactor Foto-catalítico*

En el sistema de iluminación del reactor foto catalítico utiliza cintas compuestas por bombillos de diodos LED que proporcionan una radiación UV-A homogénea y eficiente (López Niño, 2021). Estas cintas están diseñadas para adaptarse a cualquier espacio y ofrecen iluminación en todas las direcciones, lo que mejora la eficiencia lumínica (Kohen, 2010). El foto-reactor es un tubo de cuarzo transparente a la radiación UV-A, con un diámetro de 2,0 cm, es el corazón del reactor y donde se produce la reacción foto catalítica (Andrés, 2012).

El sistema de medición utiliza un sensor ultrasónico HC-SR04 para medir la cantidad de oxígeno producido en la reacción foto catalítica (Al-Ekabi, 2014). Este sensor se conecta a un sistema de adquisición y registro de datos que incluye un Arduino para adquirir y registrar los datos. El catalizador utilizado es el dióxido de titanio (TiO₂), conocido por su alta actividad foto-catalítica. Se utiliza una cantidad específica de 0,050 g en las pruebas del reactor (Lorena & Arias, 2013).

El sistema de adquisición y registro de datos utiliza un Arduino para adquirir y registrar los datos de la cantidad de oxígeno producido. Este sistema incluye un software de análisis para procesar y visualizar los datos recopilados (Morrall, 2021). El sistema de visualización utiliza una pantalla LCD para mostrar los resultados obtenidos (Solvay, 2017). El sistema de control utiliza un Arduino para controlar el funcionamiento del reactor foto catalítico (WatElectronics, 2021).

6.2.2.3. *Mecanismo de Acción del Reactor Foto-catalítico:*

El reactor funcionará mediante la adición de 5 ml de peróxido de hidrógeno con concentraciones iniciales de 42% y 25%, seguida de la iluminación con luz UV-A utilizando las cintas LED (Daniel & Zabaleta, 2012). El catalizador de TiO₂ se activará y descompondrá el peróxido de hidrógeno en oxígeno y agua mediante la reacción foto catalítica, la cual será medida por el sensor ultrasónico HC-SR04 (Carbajo Olleros, 2013). Los datos recopilados serán adquiridos y registrados por el sistema de adquisición y registro de datos, y posteriormente procesados y visualizados por el sistema de análisis (Chapa Carreón, 1990). En el reactor se evaluará en diferentes condiciones, incluyendo la presencia o ausencia de semiconductor y la iluminación, para determinar la influencia de los diferentes parámetros en el proceso de fotocatalisis. Los resultados obtenidos se analizarán para evaluar la eficiencia del reactor en la producción de oxígeno y se tomarán medidas para optimizar su rendimiento (Yañez, 2022).

6.2.3. DATOS DE LOS FOTOCATALIZADORES:

6.2.3.1. *Hetero-uni3n de Cu-porfirina/TiO₂ para la Reducci3n Foto-catalítica de CO₂*

6.2.3.1.1. *M3todo:*

El tema o campo de estudio que pertenecen las t3cnicas de obtenci3n de datos en la b3squeda es la fotocatalisis en la reducci3n del CO₂. La b3squeda proporciona detalles sobre la s3ntesis y caracterizaci3n de materiales foto-catal3ticos, as3 como la s3ntesis de

Cu-porfirina (tetrakis-carboxifenil porfirina de cobre, CuTCPP) y su combinación con TS (tetrakis-carboxifenil porfirina de cobre, CuTCPP) para crear compuestos foto-catalíticos.

6.2.3.1.2. *Materiales – reactivos:*

Para la obtención de datos, se emplearon técnicas y procedimientos específicos para la síntesis y caracterización de los materiales. Estos incluyen:

6.2.3.1.2.1. *Síntesis de nano-hojas ultrafinas (TS) de anatasa TiO₂:*

El método solvotérmico fue utilizado para sintetizar las nanohojas ultrafinas de TiO₂. Se agregaron 5 ml de TBOT, 2 ml de HF y 5 ml de etanol a una autoclave de 50 ml, que se calentó a 180 °C durante 16 h. Luego, las muestras se sometieron a múltiples lavados con etanol, solución de NaOH 0,1 M y agua para eliminar sustancias restantes y fluoruro, y se secaron durante la noche a 70 °C (C. Wang, 2016).

6.2.3.1.2.2. *Síntesis de Cu-porfirina (tetrakis-carboxifenil porfirina de cobre, CuTCPP):*

Se disolvió TCPP (0,261 g, 0,33 mmol) y CuCl₂·2H₂O (0,31 g, 1,82 mmol) en 15 ml de DMF y se sometieron a reflujo a 120 °C durante 5 h. Luego, se enfrió a 25 °C, lo que dio lugar a la formación de un sólido precipitado. El sólido se separó mediante centrifugación y se lavó con agua varias veces. Después del lavado, el compuesto se secó al vacío a 60 °C para producir un producto sólido rojo (L. Wang, 2018).

6.2.3.1.2.3. *Metodología para la preparación del CuTCPP/TS (CTTS):*

Se sintetizó mediante un método solvotérmico simple de un solo paso. Se agregaron 1 g de TS, una cierta cantidad de TCPP (15 %) y C₄H₆CuO₄·H₂O (0,0756 g) a una autoclave de 100 ml. Después de agitar completamente durante 30 min con la adición de 60 ml de DMF, la autoclave se cerró y se calentó en un horno eléctrico a 150 °C durante 12 h (L. Wang, 2018). Finalmente, los materiales se lavaron varias veces con DMF y etanol para eliminar las sustancias residuales, antes de secarlos durante la noche en una estufa de secado al vacío a 60 °C para lograr el compuesto objetivo.

6.2.3.2. ***El componente ZnO en el fotocatalizador TiO₂ para la Reducción Foto-catalítica de CO₂***

El óxido de zinc (ZnO) se preparó mediante la síntesis de Zn(NO₃)₂ y Zn(OH)₂ utilizando procedimientos estándar bien conocidos. La caracterización fisicoquímica del ZnO incluyó la adsorción, área de superficie BET, XRD y SEM, mostrando que los materiales sintetizados eran idénticos al ZnO comercial (Rajeev, 2015).

6.2.3.2.1. *Método:*

El método que se emplea para este componente fotocatalizador se desarrolla en laboratorios químicos por ende se debe tener en cuenta:

6.2.3.2.1.1. Preparación

A. Síntesis de $Zn(NO_3)_2$ y $Zn(OH)_2$:

Se preparó una solución de $Zn(NO_3)_2$ 0,1 M en agua destilada, a la cual se le adicionó una solución de $Zn(OH)_2$ 0,1 M. La mezcla se agitó continuamente durante 2 horas y luego se centrifugó a 3000 rpm durante 10 minutos para separar los sólidos del líquido. Posteriormente, se eliminó el sobrenadante y el residuo sólido obtenido se secó a temperatura ambiente ($\sim 30^\circ C$) durante 2 horas.

6.2.3.2.1.2. Caracterización del ZnO:

B. Adsorción:

Se suspendió una cantidad fija del catalizador en una solución de AMS y se ajustó el pH según fuera necesario. La suspensión se agitó continuamente a una temperatura constante de $29 \pm 1^\circ C$ durante 2 h para lograr el equilibrio y luego se mantuvo sin perturbaciones durante 2 h. Luego se centrifugó a 3000 rpm durante 10 min y se determinó colorimétricamente la concentración de AMS en el sobrenadante.

C. Área de superficie BET:

Se determinó utilizando el analizador de porosidad y área de superficie Micrometrics Tristar, mostrando que más del 70% de los poros eran $< 250 \text{ \AA}$.

D. XRD:

Se realizó para confirmar la coherencia del ZnO con las muestras comerciales utilizadas en diversos estudios.

E. SEM:

Se realizó para confirmar la coherencia del ZnO con las muestras comerciales utilizadas en diversos estudios.

6.2.3.2.2. Resultados de la caracterización

Los resultados de la caracterización mostraron que el ZnO sintetizado tenía una superficie BET de aproximadamente $10 \text{ m}^2/\text{g}$, un tamaño medio de partícula de $3,2 \mu\text{m}$ y un ancho promedio de los poros de 123 \AA . La distribución de tamaños de los poros fue aproximadamente $< 250 \text{ \AA}$ (70,1%), $250-500 \text{ \AA}$ (11,3%) y $> 500 \text{ \AA}$ (17,8%).

En general se puede decir que la preparación del ZnO se realizó mediante la síntesis de $Zn(NO_3)_2$ y $Zn(OH)_2$ utilizando procedimientos estándar bien conocidos. La caracterización fisicoquímica del ZnO incluyó la adsorción, área de superficie BET, XRD y SEM, mostrando que los materiales sintetizados eran idénticos al ZnO comercial.

6.3. DISEÑO ESTADÍSTICO:

Emplear estos diseños estadísticos nos permitirá evaluar de manera eficiente y confiable el efecto que tiene cada componente del fotocatalizador TiO₂ en la reducción del CO₂:

6.3.1. Análisis de varianza ANOVA

El diseño estadístico del ANOVA (Análisis de Varianza) se centra en la comparación de las medias de tres o más grupos para determinar si existen diferencias significativas entre ellos (Rodrigo, 2016). Este método se utiliza para analizar la variabilidad en los datos y establecer si dicha variabilidad se debe a diferencias reales entre los grupos o simplemente al azar. ANOVA descompone la variabilidad total en diferentes fuentes, como la variación entre los grupos y la variación dentro de los grupos, permitiendo identificar si las diferencias observadas son estadísticamente significativas (Dagnino, 2014).

Aplicando en el experimento de fotocatalisis TiO₂ con dos variables para reducir el CO₂, el diseño estadístico ANOVA evaluaría si existen diferencias significativas en la reducción de CO₂, determinando el promedio de reducción estadísticamente. Este análisis es crucial para entender el impacto de la fotocatalisis en la reducción de CO₂ e identificar las condiciones más efectivas para reducir las emisiones de CO₂.

6.3.2. Diseño en bloque al azar – ANOVA:

El DBA es una técnica experimental que divide las unidades experimentales en bloques homogéneos antes de asignar aleatoriamente los tratamientos, esto se hace para controlar la variabilidad adicional y aumentar la precisión de las comparaciones entre tratamientos (Martínez & González, 2020). El DBA con ANOVA permite evaluar los efectos de los tratamientos mientras se controla la variabilidad entre bloques, mejorando así la validez y precisión de los resultados experimentales (GUTIÉRREZ, 2015).

En este experimento, el diseño analizará los efectos de cada variable, permitiendo identificar cuál de las dos tiene la condición óptima para maximizar su eficiencia en la reducción de CO₂. Los resultados del ANOVA guiarán la optimización del proceso y la identificación de factores clave para reducir las emisiones de CO₂ eficazmente.

6.4. ANÁLISIS DE DATO:

A esta investigación se emplea el diseño experimental factorial aleatoria de tratamiento (fotocatalizadores) ya que se requiere saber la eficiencia de los dos fotocatalizadores con el TiO₂ en la reducción del CO₂ en un lugar determinado, asegurando la validez y precisión de los resultados obtenidos (Fujishima & Zhang, 2008)

El diseño de experimento a emplear será de factorial 2x3 con tres repeticiones considerando los dos tratamientos (fotocatalizadores). Se debe asegurar que cada fotocatalizador se aplique tres veces manteniendo constante otras condiciones experimentales. Así se podrá medir la cantidad de CO₂ reducido en cada unidad experimental (He & Zhu, 2020).

Tabla 2 Diseño experimental Factorial 3X3 de los Tratamientos

Fotocatalizadores	Repetición		
	1 MES	2 MES	3 MES
Hetero-uni3n de Cu-porfirina/TiO ₂	R1	R2	R3
ZnO	R1	R2	R3

6.4.1. Prueba estadística:

Los diseos estadísticos utilizan el modelo ANOVA ya que se evaluará el efecto de los fotocatalizadores y la variabilidad dentro de las repeticiones (Rodrigo, 2016). Por lo que se obtendrá el resultado de diferencia de los dos tratamientos en la reducci3n del CO₂ estadísticamente significativa. Determinando así cuál de los dos fotocatalizadores es eficaz en reducir una concentraci3n mayor de CO₂ a diferencia del otro.

Para poder mostrar estos resultados y tomar una decisi3n, se debe reflejar en los gráfcos de análisis de varianzas (Fujishima, 2008).



Figura 6 ANOVA (He & Zhu, 2020)

Estos gráfcos son herramientas visuales que ayudan a comprender mejor los resultados de un análisis de varianza (ANOVA). Estos gráfcos pueden ser utilizados para visualizar la distribuci3n de los datos y comparar las medias de los tratamientos.

6.4.1.1. Gráfico de caja

Este gráfico muestra la distribuci3n de los datos y permite comparar las medias de los tratamientos. Se observará la distribuci3n de los datos de CO₂ para cada tratamiento y permitirá comparar estos resultados, para así identificar cuál de los dos es más eficiente estadísticamente (Santana & Nieves Hernández, 2020).

6.4.1.2. Gráfico de histograma:

Es una representaci3n gráfica de la distribuci3n de frecuencias de una variable continua. Consiste en una sucesi3n de rectángulos levantados sobre un eje que representa los valores de la variable. Cada rectángulo tiene un área proporcional a la frecuencia de valores observada en el intervalo sobre el que se levanta. Su objetivo de este gráfico es

visualizar la distribución de los valores de CO₂ antes y después de un tratamiento, lo que permite evaluar el efecto del tratamiento en la reducción del CO₂ (Santana & Nieves Hernández, 2020).

También se debe reflejar mediante técnicas espectroscópicas que proporcionan información sobre la estructura y composición (Fujishima, 2008; He & Zhu, 2020; Padmanabhan, 2021).

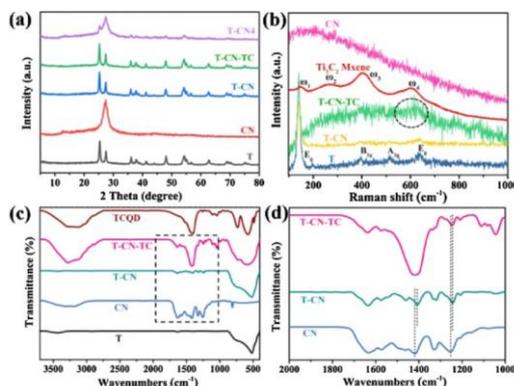


Figura 7 Espectro XRD XRD, Raman, y FTIR (He & Zhu, 2020)

6.4.1.3. Espectros XRD (La difracción de rayos X)

Determina e identifica la estructura cristalina y las fases de los fotocatalizadores, permitiendo una mejor comprensión en como estos tratamientos tienen un buen rendimiento en minimizar la reducción del CO₂ (Padmanabhan, 2021). Ya que los picos (desviación de rayos X) observados en el espectro XRD corresponden a las distancias Interplanares (planos paralelos) específicas de cada fotocatalizador, permitiendo su caracterización de acuerdo con la ley de Bragg (Ao & Lee, 2004).

6.4.1.4. Espectro Raman

Proporciona información sobre los modos de vibraciones de los enlaces en los fotocatalizadores así pudiendo identificar los grupos funcionales y defectos que puede influir en la actividad foto catalítica (SCANCO,2022). Detecta cambios estructurares antes y después de la reacción en la reducción del CO₂ (Fujishima & Zhang, 2008).

6.4.1.5. Espectro FTIR

Identifica grupos funcionales que pueden actuar activamente en la reducción del CO₂, monitoreando la presencia de intermedios adsorbido (Ao & Lee, 2004). Así compara la densidad de grupos funcionales para así obtener la información de la estructura(He & Zhu, 2020).

6.4.2. Software Rstudio:

Para el análisis de datos se utilizará el software Rstudio, debido a que es una herramienta que facilita el análisis de los datos mediante el modelo ANOVA y los espectros, permitiendo analizar de manera eficiente por medio de gráficos para poder tomar la elección adecuada y obtener de ello las conclusiones (RPubs, 2016).

8. Presupuesto y financiamiento:

8.1. Presupuesto- Aporte Monetario:

Presupuesto- Aporte Monetario				
Equipos de Protección Personal				
Item	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total
Guardapolvo	Und	2	S/ 45.00	90.00
Protector Nazobucal	Und	10	S/ 1.00	10.00
Guantes Quirurgicos	Pares	10	S/ 2.00	20.00
Tocas	Und	10	S/ 1.00	10.00
Materiales y Equipos de Laboratorio				
Materiales	Unidad	Cantidad	Costo Total	Proveedor
Cintas compuestas por bombillos de diodos LED	1	1	199.00	
Tubo de cuarzo (diámetro de 2,0 cm)	1	1	43.17	
Placa Arduino Mega 2560	1	1	85.00	
Sensor ultrasónico HC-SR04	1	1	16.00	
Carcasa cilíndrica de aluminio	1	1	17.00	
TOTAL			360.17	
Reactivos	Unidad	Cantidad	Costo Total	Proveedor
Óxido de titanio (IV), anatasa (TiO ₂ , 99.9%)	40 g	2	500.00	Shanghai Aladdin
Butóxido de titanio (TBOT, C ₁₆ H ₃₆ O ₄ Ti, 99%)	41 g	1	300.00	Shanghai Aladdin
Ácido fluorhídrico (HF, AR)	42 g	1	150.00	Tianjin Fuyu
Dimetilformamida (DMF, HCON(CH ₃) ₂ , AR)	43 g	1	120.00	Tianjin Fuyu
Etanol (C ₂ H ₆ O, AR)	44 g	1	80.00	Sinopharm
Hidróxido de sodio (NaOH, AR)	45 g	1	50.00	Sinopharm
Amoníaco (NH ₃ ·H ₂ O, 28% en peso)	46 g	1	90.00	Sinopharm
Acetonitrilo (CH ₃ CN, AR)	47 g	1	100.00	Shanghai Macklin
Acetato de cobre monohidrato (C ₄ H ₆ CuO ₄ ·H ₂ O, AR)	48 g	1	180.00	Shanghai Macklin
Cloruro de cobre (II) dihidrato (CuCl ₂ ·2H ₂ O, AR)	49 g	1	150.00	Shanghai Macklin
Tetrakis (4-carboxifenil) porfirina (TCPP, C ₄₈ H ₃₀ N ₄ O ₈ , 97%)	50 g	1	450.00	Shanghai Aladdin
Clorhidrato de hidroxilamina (NH ₂ OH·HCl)	51 g	1	250.00	Shanghai Aladdin
Rodamina B (RhB)	52 g	1	200.00	Shanghai Macklin
Cloruro de cobre (II) dihidrato (CuCl ₂ ·2H ₂ O)	53 g	1	150.00	Shanghai Macklin
Cloruro de níquel (NiCl ₂)	54 g	1	180.00	Shanghai Macklin
Titanato de tetrabutilo (TBOT)	55 g	1	300.00	Shanghai Aladdin
Nitrato de Zinc (Zn(NO ₃) ₂)	100 g	1	189.67	Alfa Aesar
Óxido de Zinc (Zn(OH) ₂)	100 g	1	151.74	Alfa Aesar
H ₂ O ₂ (Peróxido de Hidrógeno (42%))	42%	1	8.00	
H ₂ O ₂ (Peróxido de Hidrógeno (25%))	25%	1	8.00	
TOTAL			3607.41	

Equipos	Unidad	Cantidad	Costo Total- por Análisis	Laboratorio
Detector de CO2 RH AZ7755	1	1	199.00	4000
Autoclave	1	1	2404.00	
Bomba de Vacío	1	1	760.00	
Horno Eléctrico		1	399.00	
Horno Mufla	1	1	3000.00	
Centrifugadora	1	1	1700.00	
TOTAL	S/		7,967.58	

Figura 5 Presupuesto - Aporte Monetario

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- 2023: un año récord de eventos climáticos extremos - ES | Greenpeace España. (n.d.). Retrieved April 7, 2024, from <https://es.greenpeace.org/es/sala-de-prensa/comunicados/2023-un-ano-record-de-eventos-climaticos-extremos-y-de-emisiones-de-co2/>
- Al-Ekabi, H., Safarzadeh-Amiri, A., Sifton, W., & Story, J. (2014). Advanced technology for water purification by heterogeneous photocatalysis. *International Journal of Environment and Pollution*.
- Ali, A. M., Muhammad, A., Shafeeq, A., Asghar, H. A., Hussain, N., & Sattar, H. (2012). Doped Metal Oxide (ZnO) and Photocatalysis: A Review. *Journal of the Pakistan Institute of Chemical Engineers*.
- Álvarez-Lires, M. M., Arias-Correa, A., Lorenzo-Rial, M. A., & Serrallé-Marzoa, Y. F. (2017). Educación para la Sustentabilidad: Cambio Global y Acidificación Oceánica. *Formación Universitaria*, 10(2), 89–102. <https://doi.org/10.4067/S0718-50062017000200010>
- Andrés, M., Morocho, R., & Vargas Hernández, C. (n.d.). Agosto de 2012. Universidad Tecnológica de Pereira. *Scientia et Technica Año XVII*, 51.
- ANOVA análisis de varianza para comparar múltiples medias. (n.d.). Retrieved May 24, 2024, from https://cienciadedatos.net/documentos/19_anova
- Anwar, M. A., Nasreen, S., & Tiwari, A. K. (2021). Forestation, renewable energy and environmental quality: Empirical evidence from Belt and Road Initiative economies. *Journal of Environmental Management*, 291, 112684. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2021.112684>
- Ao, C. H., & Lee, S. C. (2004). Combination effect of activated carbon with TiO₂ for the photodegradation of binary pollutants at typical indoor air level. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 161(2–3), 131–140. [https://doi.org/10.1016/S1010-6030\(03\)00276-4](https://doi.org/10.1016/S1010-6030(03)00276-4)
- Bi, X., Du, G., Kalam, A., Sun, D., Yu, Y., Su, Q., Xu, B., & Al-Sehemi, A. G. (2021). Tuning oxygen vacancy content in TiO₂ nanoparticles to enhance the photocatalytic performance. *Chemical Engineering Science*, 234, 116440. <https://doi.org/10.1016/J.CES.2021.116440>
- Canadell, J. G., Le Quéré, C., Raupach, M. R., Field, C. B., Buitenhuis, E. T., Ciais, P., Conway, T. J., Gillett, N. P., Houghton, R. A., & Marland, G. (2007). Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(47), 18866–18870. https://doi.org/10.1073/PNAS.0702737104/SUPPL_FILE/02737SUPPTXT.PDF
- Carbajo Olleros, J. (2013). *Aplicación de la fotocatalisis solar a la degradación de contaminantes orgánicos con catalizadores nanoestructurados de TiO₂*. <https://repositorio.uam.es/handle/10486/14229>

- Chapa Carreón, Jorge. (1990). *Manual de instalaciones de alumbrado y fotometría*. 273.
<https://latam.casadellibro.com/libro-manual-de-instalaciones-de-alumbrado-y-fotometria/9789681829728/179630>
- Chen, C., Park, T., Wang, X., Piao, S., Xu, B., Chaturvedi, R. K., Fuchs, R., Brovkin, V., Ciais, P., Fensholt, R., Tømmervik, H., Bala, G., Zhu, Z., Nemani, R. R., & Myneni, R. B. (2019). China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nature Sustainability* 2019 2:2, 2(2), 122–129. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0220-7>
- Chen, X., & Mao, S. S. (2007). Titanium dioxide nanomaterials: synthesis, properties, modifications, and applications. *Chemical Reviews*, 107(7), 2891–2959.
<https://doi.org/10.1021/CR0500535>
- Dagnino, J. (n.d.). *ANÁLISIS DE VARIANZA*.
- D'Amato, G., Holgate, S. T., Pawankar, R., Ledford, D. K., Cecchi, L., Al-Ahmad, M., Al-Enezi, F., Al-Muhsen, S., Ansotegui, I., Baena-Cagnani, C. E., Baker, D. J., Bayram, H., Bergmann, K. C., Boulet, L. P., Buters, J. T. M., D'Amato, M., Dorsano, S., Douwes, J., Finlay, S. E., ... Annesi-Maesano, I. (2015). Meteorological conditions, climate change, new emerging factors, and asthma and related allergic disorders. A statement of the World Allergy Organization. *World Allergy Organization Journal*, 8(1), 25.
<https://doi.org/10.1186/S40413-015-0073-0>
- Daniel, J., & Zabaleta, A. (2012). *PROCESO FOTOCATALÍTICO COMO ALTERNATIVA PARA LA POTABILIZACIÓN DE AGUA*.
- Detector de CO2 RH AZ7755 - Tech Perú Industrial SAC. (n.d.). Retrieved June 9, 2024, from <https://techperuindustrial.com/producto/detector-de-co2-rh/>
- DISEÑO DE BLOQUES AL AZAR PRESENTA. (n.d.).
- Do We Exhale Carbon? (n.d.). Retrieved June 9, 2024, from <https://www.nrdc.org/stories/do-we-exhale-carbon>
- Ebrahimi, R., Hossienzadeh, K., Maleki, A., Ghanbari, R., Rezaee, R., Safari, M., Shahmoradi, B., Daraei, H., Jafari, A., Yetilmezsoy, K., & Puttaiah, S. H. (2019). Effects of doping zinc oxide nanoparticles with transition metals (Ag, Cu, Mn) on photocatalytic degradation of Direct Blue 15 dye under UV and visible light irradiation. *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 17(1), 479–492. <https://doi.org/10.1007/S40201-019-00366-X>
- El uso de las tiras de LEDs | Iluminet revista de iluminación. (n.d.). Retrieved June 10, 2024, from <https://iluminet.com/tiras-led/>
- Figueroa Clemente, M. E., & Universidad de Sevilla, S. de P. (2007). Los sumideros naturales de CO2 :una estrategia sostenible entre el Cambio Climático y el Protocolo de Kyoto desde las perspectivas urbana y territorial. *Ciencias / Universidad de Sevilla*, 77, 218.
https://books.google.com/books/about/Los_sumideros_naturales_de_CO2.html?hl=es&id=feddlyn-TP8C

- Fujishima, A., Zhang, X., & Tryk, D. A. (2008a). TiO₂ photocatalysis and related surface phenomena. *Surface Science Reports*, 63(12), 515–582. <https://doi.org/10.1016/J.SURFREP.2008.10.001>
- Fujishima, A., Zhang, X., & Tryk, D. A. (2008b). TiO₂ photocatalysis and related surface phenomena. *Surface Science Reports*, 63(12), 515–582. <https://doi.org/10.1016/J.SURFREP.2008.10.001>
- Ganguly, P., Breen, A., Pillai, S. C., Panneri, S., & Hareesh, U. S. (2019). Recent Advances in Photocatalytic Detoxification of Water. *Nanoscale Materials in Water Purification*, 653–688. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813926-4.00029-X>
- Guarino, M., Costa, A., & Porro, M. (2008). Photocatalytic TiO₂ coating-to reduce ammonia and greenhouse gases concentration and emission from animal husbandries. *Bioresource Technology*, 99(7), 2650–2658. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.04.025>
- He, F., Zhu, B., Cheng, B., Yu, J., Ho, W., & Macyk, W. (2020a). 2D/2D/0D TiO₂/C₃N₄/Ti₃C₂ MXene composite S-scheme photocatalyst with enhanced CO₂ reduction activity. *Applied Catalysis B: Environmental*, 272, 119006. <https://doi.org/10.1016/J.APCATB.2020.119006>
- He, F., Zhu, B., Cheng, B., Yu, J., Ho, W., & Macyk, W. (2020b). 2D/2D/0D TiO₂/C₃N₄/Ti₃C₂ MXene composite S-scheme photocatalyst with enhanced CO₂ reduction activity. *Applied Catalysis B: Environmental*, 272, 119006. <https://doi.org/10.1016/J.APCATB.2020.119006>
- He, F., Zhu, B., Cheng, B., Yu, J., Ho, W., & Macyk, W. (2020c). 2D/2D/0D TiO₂/C₃N₄/Ti₃C₂ MXene composite S-scheme photocatalyst with enhanced CO₂ reduction activity. *Applied Catalysis B: Environmental*, 272, 119006. <https://doi.org/10.1016/J.APCATB.2020.119006>
- Hoffmann, M. R., Martin, S. T., Choi, W., & Bahnemann, D. W. (1995). Environmental Applications of Semiconductor Photocatalysis. *Chemical Reviews*, 95(1), 69–96. https://doi.org/10.1021/CR00033A004/ASSET/CR00033A004.FP.PNG_V03
- Huang, Z., Gao, Z., Gao, S., Wang, Q., Wang, Z., Huang, B., & Dai, Y. (2017a). Facile synthesis of S-doped reduced TiO₂-x with enhanced visible-light photocatalytic performance. *Chinese Journal of Catalysis*, 38(5), 821–830. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(17\)62825-0](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(17)62825-0)
- Huang, Z., Gao, Z., Gao, S., Wang, Q., Wang, Z., Huang, B., & Dai, Y. (2017b). Facile synthesis of S-doped reduced TiO₂-x with enhanced visible-light photocatalytic performance. *Chinese Journal of Catalysis*, 38(5), 821–830. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(17\)62825-0](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(17)62825-0)
- LCD 16X2 : Pin Configuration, Commands, Interfacing & Its Applications. (n.d.). Retrieved June 10, 2024, from <https://www.watelectronics.com/lcd-16x2/>
- Lee, D. S., Pitari, G., Grewe, V., Gierens, K., Penner, J. E., Petzold, A., Prather, M. J., Schumann, U., Bais, A., Berntsen, T., Iachetti, D., Lim, L. L., & Sausen, R. (2010). Transport impacts on atmosphere and climate: Aviation. *Atmospheric Environment*, 44(37), 4678–4734. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOENV.2009.06.005>
- Li, D. J., Tian, Y. B., Lin, Q., Zhang, J., & Gu, Z. G. (2022). Optimizing Photodetectors in Two-Dimensional Metal-Metalloporphyrinic Framework Thin Films. *ACS Applied Materials and Interfaces*. <https://doi.org/10.1021/ACSAMI.2C07686>

- Li, Z., Feng, J., Yan, S., & Zou, Z. (2015). Solar fuel production: Strategies and new opportunities with nanostructures. *Nano Today*, *10*(4), 468–486. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2015.06.001>
- Loddo, V., Bellardita, M., Camera-Roda, G., Parrino, F., & Palmisano, L. (2018). Heterogeneous Photocatalysis: A Promising Advanced Oxidation Process. *Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes: Photocatalytic Membranes and Photocatalytic Membrane Reactors*, 1–43. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813549-5.00001-3>
- López Niño, D. A., Gutiérrez Torres, J. L., & Zambrano, M. A. (2021). Diseño de un reactor fotocatalítico (uv-a) para el estudio de la degradación química de 1,2- dihidroxibenceno e inactivación de e. Coli en aguas simuladas. *Publicaciones e Investigación*, *15*(4). <https://doi.org/10.22490/25394088.5611>
- Lorena, Y., & Arias, R. (2013). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un reactor tubular fotocatalítico (UV-A) para la degradación de desechos químicos orgánicos*. Pereira : Universidad Tecnológica de Pereira. <https://hdl.handle.net/11059/3635>
- Low, J., Zhang, L., Tong, T., Shen, B., & Yu, J. (2018). TiO₂/MXene Ti₃C₂ composite with excellent photocatalytic CO₂ reduction activity. *Journal of Catalysis*, *361*, 255–266. <https://doi.org/10.1016/J.JCAT.2018.03.009>
- Ma, Y., Wang, X., Jia, Y., Chen, X., Han, H., & Li, C. (2014a). Titanium dioxide-based nanomaterials for photocatalytic fuel generations. *Volume 114, Issue 19, Pages 9987 - 10043*, *114*(19), 9987–10043. <https://doi.org/10.1021/cr500008u>
- Ma, Y., Wang, X., Jia, Y., Chen, X., Han, H., & Li, C. (2014b). Titanium dioxide-based nanomaterials for photocatalytic fuel generations. *Chemical Reviews*, *114*(19), 9987–10043. <https://doi.org/10.1021/cr500008u>
- Martínez-González, M. A. 1957-, Sánchez-Villegas, A., Toledo Atucha, E., & Faulín, F. J. (2020). *Bioestadística amigable*. *Metalurgia general. I - F. R. Morral, E. Jimeno, P. Molera - Google Libros*. (n.d.). Retrieved June 10, 2024, from https://books.google.com.pe/books/about/Metalurgia_general_I.html?id=VApEAAAQBAJ&redir_esc=y
- Moreira, D., & Pires, J. C. M. (2016). Atmospheric CO₂ capture by algae: Negative carbon dioxide emission path. *Bioresource Technology*, *215*, 371–379. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2016.03.060>
- Nakashima, S., Negishi, R., & Tada, H. (2016). Visible-light-induced water oxidation by a hybrid photocatalyst consisting of bismuth vanadate and copper(ii) meso-tetra(4-carboxyphenyl)porphyrin. *Chemical Communications*, *52*(18), 3665–3668. <https://doi.org/10.1039/C5CC10014C>
- Nozik, A. J. (1975a). Photoelectrolysis of water using semiconducting TiO₂ crystals. *Nature*, *257*(5525), 383–386. <https://doi.org/10.1038/257383a0>

- Nozik, A. J. (1975b). Photoelectrolysis of water using semiconducting TiO₂ crystals. *Nature*, 257(5525), 383–386. <https://doi.org/10.1038/257383a0>
- Ohtani, B. (2011). Photocatalysis by inorganic solid materials: Revisiting its definition, concepts, and experimental procedures. *Advances in Inorganic Chemistry*, 63, 395–430. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385904-4.00001-9>
- Padmanabhan, N. T., Thomas, N., Louis, J., Mathew, D. T., Ganguly, P., John, H., & Pillai, S. C. (2021). Graphene coupled TiO₂ photocatalysts for environmental applications: A review. *Chemosphere*, 271, 129506. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2020.129506>
- Patil, S. R. (2022). Metal oxide-based composites as photocatalysts. *Advances in Metal Oxides and Their Composites for Emerging Applications*, 633–672. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85705-5.00005-1>
- Peróxidos do Brasil makes MyH₂O₂ the world's first satellite hydrogen peroxide plant | Solvay.* (n.d.). Retrieved June 10, 2024, from <https://www.solvay.com/en/press-release/peroxidos-do-brasil-makes-myh2o2-worlds-first-satellite-hydrogen-peroxide-plant>
- Pichat, P. (2014). Photocatalytic Coatings. *Comprehensive Materials Processing: Thirteen Volume Set*, 4, 413–423. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00417-9>
- Qi, K., Cheng, B., Yu, J., & Ho, W. (2017). A review on TiO₂-based Z-scheme photocatalysts. *Chinese Journal of Catalysis*, 38(12), 1936–1955. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(17\)62962-0](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(17)62962-0)
- ¿Qué es la espectroscopia Raman? | Soluciones analíticas.* (n.d.). Retrieved May 25, 2024, from <https://scancotec.com/blog/que-es-la-espectroscopia-raman/>
- Rajeev, B., Yesodharan, S., & Yesodharan, E. P. (2015). Application of solar energy in wastewater treatment: Photocatalytic degradation of α -methylstyrene in water in presence of ZnO. *Journal of Water Process Engineering*, 8, 108–118. <https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2015.09.005>
- RPubs - Ejemplo de Diseño Completamente al Azar (DCA) en R.* (n.d.). Retrieved May 20, 2024, from <https://rpubs.com/jdmaestre/154488>
- Schneider, J., Matsuoka, M., Takeuchi, M., Zhang, J., Horiuchi, Y., Anpo, M., & Bahnemann, D. W. (2014). Understanding TiO₂ photocatalysis: Mechanisms and materials. *Chemical Reviews*, 114(19), 9919–9986. <https://doi.org/10.1021/cr5001892>
- Solarin, S. A., Al-Mulali, U., Musah, I., & Ozturk, I. (2017). Investigating the pollution haven hypothesis in Ghana: An empirical investigation. *Energy*, 124, 706–719. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2017.02.089>
- Tsendzughul, N. T., & Ogwu, A. A. (2020). Visible light activated antimicrobial silver oxide thin films. *Advances in Medical and Surgical Engineering*, 179–239. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819712-7.00012-7>

- Van Dijken, A., Janssen, A. H., Smitsmans, M. H. P., Vanmaekelbergh, D., & Meijerink, A. (1998). Size-Selective Photoetching of Nanocrystalline Semiconductor Particles. *Chemistry of Materials*, 10(11), 3513–3522. <https://doi.org/10.1021/CM980715P>
- Vargas, P. (2009). *El Cambio Climático y Sus Efectos en el Perú*.
- Wang, C., Lin, H., Liu, Z., Wu, J., Xu, Z., & Zhang, C. (2016). Controlled Formation of TiO₂/MoS₂ Core–Shell Heterostructures with Enhanced Visible-Light Photocatalytic Activities. *Particle & Particle Systems Characterization*, 33(4), 221–227. <https://doi.org/10.1002/PPSC.201500222>
- Wang, L., Duan, S., Jin, P., She, H., Huang, J., Lei, Z., Zhang, T., & Wang, Q. (2018). Anchored Cu(II) tetra(4-carboxylphenyl)porphyrin to P25 (TiO₂) for efficient photocatalytic ability in CO₂ reduction. *Applied Catalysis B: Environmental*, 239, 599–608. <https://doi.org/10.1016/J.APCATB.2018.08.007>
- Xu, C., Cao, L., Su, G., Liu, W., Qu, X., & Yu, Y. (2010). Preparation, characterization and photocatalytic activity of Co-doped ZnO powders. *Journal of Alloys and Compounds*, 497(1–2), 373–376. <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2010.03.076>
- Xu, F., Meng, K., Cheng, B., Wang, S., Xu, J., & Yu, J. (2020). Unique S-scheme heterojunctions in self-assembled TiO₂/CsPbBr₃ hybrids for CO₂ photoreduction. *Nature Communications* 2020 11:1, 11(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18350-7>
- Xu, M., Chen, C., Han, X., Hu, W., & Li, B. (2024). Synchronous construction of Cu and Ni single-atom sites in ordered porous TiO₂ for enhanced photo-conversion of CO₂ and H₂O to methane. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 688, 133676. <https://doi.org/10.1016/J.COLSURFA.2024.133676>
- Yañez, A., Quiñónez, M., Ramírez, A., & Gaona, S. (2022a). Diseño, construcción y puesta a prueba de un reactor fotocatalítico de radiación solar simulada. *Revista Ing-Nova*, 1(2), 180–194. <https://doi.org/10.32997/RIN-2022-4003>
- Yañez, A., Quiñónez, M., Ramírez, A., & Gaona, S. (2022b). Diseño, construcción y puesta a prueba de un reactor fotocatalítico de radiación solar simulada. *Revista Ing-Nova*, 1(2), 180–194. <https://doi.org/10.32997/RIN-2022-4003>
- Yue, F., Shi, M., Li, C., Meng, Y., Zhang, S., Wang, L., Song, Y., Li, J., & Zhang, H. (2024). S-scheme heterojunction Cu-porphyrin/TiO₂ nanosheets with highly efficient photocatalytic reduction of CO₂ in ambient air. *Journal of Colloid and Interface Science*, 665, 1079–1090. <https://doi.org/10.1016/J.JCIS.2024.04.007>
- Zapata, P. (n.d.). “Urbanos y rurales En lucha contra la Problemática ambiental.”
- Zhu, Z., Huang, W. R., Chen, C. Y., & Wu, R. J. (2018). Preparation of Pd–Au/TiO₂–WO₃ to enhance photoreduction of CO₂ to CH₄ and CO. *Journal of CO₂ Utilization*, 28, 247–254. <https://doi.org/10.1016/J.JCOU.2018.10.006>

10. ANEXOS:

CEPLAN. (14 de 04 de 2024). *Incremento de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI)*.

Obtenido de Gob.pe: <https://observatorio.ceplan.gob.pe/ficha/t62>

Santana , A., & Nieves Hernández, C. (2020). *Gráficos en R*. Departamento de Matemáticas,

ULPGC. Obtenido de [https://estadistica-dma.ulpgc.es/cursoR4ULPGC/9c-](https://estadistica-dma.ulpgc.es/cursoR4ULPGC/9c-grafHistograma.html#datos)

[grafHistograma.html#datos](https://estadistica-dma.ulpgc.es/cursoR4ULPGC/9c-grafHistograma.html#datos)