



# BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

“Síntesis y optimización de  
fotocatalizadores utilizando la  
espectrofotometría UV-Vis como  
método de caracterización para la  
eliminación de fenol”

**TESIS**

Para obtener el grado de:  
Licenciatura en Ingeniería Ambiental

Presenta:

Josué Flores Hernández

Asesor:

Dr. Fortino Bañuelos Romero

Puebla, Pue. Abril 2024

A mis abuelos que ya no están, que sus enseñanzas me acompañan cada día y su luz brilla iluminando mi camino, a ustedes va dedicado este esfuerzo.

A mi abuela Lola, por su grata compañía y por cada momento compartido, por ser una gran persona.

A mi hijo, porque aún sin haber nacido te has convertido en mi mayor felicidad, un gran motivo por el cuál seguir luchando.

A Dios, por la vida, la salud y permitirme seguir adelante  
en todo momento.

A mi asesor, por brindarme la oportunidad de realizar este trabajo,  
por el apoyo, comprensión y paciencia.

Agradezco a mis padres por su infinito apoyo, este logro también  
es de ustedes, gracias por acompañarme en el camino.

A mi hermana, por acompañarme y apoyarme las veces  
que lo he necesitado.

Al amor de mi vida, por todo su apoyo y por dar el mejor  
regalo de nuestras vidas.

A mi universidad, por brindarme los conocimientos y habilidades  
necesarias para desarrollarme profesionalmente.

## ÍNDICE

CAPÍTULO 1.....	8
1. INTRODUCCIÓN .....	8
1.2 JUSTIFICACIÓN .....	9
CAPÍTULO 2.....	10
MARCO TEÓRICO.....	10
2.1 IMPORTANCIA DEL AGUA .....	10
2.2 PERSPECTIVA DEL AGUA A NIVEL MUNDIAL .....	10
2.3 PERSPECTIVA DEL AGUA EN MÉXICO.....	11
2.4 CONTAMINACIÓN DEL AGUA.....	12
2.5 CONSECUENCIAS DE LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA .....	13
2.6 CONTAMINANTES EMERGENTES .....	13
2.7 FENOL .....	14
2.8 DERIVADOS FENÓLICOS .....	14
2.9 BISFENOL-A.....	15
2.10 BISFENOL-A AL ALCANCE DE TODOS.....	15
2.11 COMPUESTOS FENÓLICOS EN AGUAS RESIDUALES.....	16
2.12 FENOL Y SUS AFECTACIONES A LA SALUD .....	17
2.13 EFECTOS SOBRE LA SALUD HUMANA DEL BISFENOL-A.....	17
2.14 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES .....	19
2.15 PLANTAS DE TRATAMIENTO DE SISTEMAS BIOLÓGICOS.....	19
2.16 MÉTODOS DE TRATAMIENTO DE FENOL EN AGUAS RESIDUALES.....	20
2.17 ANTECEDENTES .....	20
2.18 OXIDACIÓN AVANZADA.....	20
2.19 FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA .....	21
2.20 CATALIZADORES .....	22
2.21 CATALIZADORES HOMOGÉNEOS.....	22
2.22 CATALIZADORES HETEROGÉNEOS .....	23
2.23 MÉTODOS PARA LA FABRICACIÓN DE CATALIZADORES.....	23
2.24 MÉTODO DE SOL- GEL.....	23
2.25 MÉTODO HIDROTERMAL .....	23
2.26 MÉTODO DE IMPREGNACIÓN .....	24
2.27 SEMICONDUCTORES .....	24
2.28 SEMICONDUCTOR INTRÍNSECO .....	25
2.29 SEMICONDUCTOR EXTRÍNSECO.....	25

2.30 ESPECTROSCOPIA.....	25
2.31 ESPECTROSCOPIA UV-VIS .....	26
2.32 HISTORIA DE LA ESPECTROSCOPIA UV-VIS.....	27
2.33 APLICACIONES DE LA ESPECTROFOTOMETRÍA UV-VIS .....	28
CAPÍTULO 3.....	29
METODOLOGÍA.....	29
3.1 PREPARACIÓN DE SOLUCIÓN DE FENOL.....	29
3.2 PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN DE BISFENOL-A.....	29
3.3 PREPARACIÓN DE LOS FOTOCATALIZADORES .....	32
3.4 DETERMINACIÓN DE ABSORBANCIA DE FOTOCATALIZADORES.....	34
3.5 CATALIZADORES DE Zn SOPORTADOS EN CARBÓN MINERAL.....	35
3.6 CATALIZADORES CON DIFERENTES IMPUREZAS METÁLICAS SOPORTADOS EN SiO <sub>2</sub> .....	37
3.7 CATALIZADORES DE BARIO SOPORTADOS EN TiO <sub>2</sub> .....	38
3.8 SELECCIÓN DEL FOTOCATALIZADOR.....	39
3.9 PROCESO DE FOTOCATÁLISIS .....	39
3.10 SISTEMA DE REACCIÓN FOTOCATALÍTICA .....	41
3.11 ANÁLISIS ESPECTROSCOPICO PARA DETERMINAR LA DEGRADACIÓN DE COMPUESTOS FENÓLICOS .....	42
CAPÍTULO 4.....	44
RESULTADOS Y DISCUSIONES .....	44
4.1 FOTOLISIS DEL FENOL.....	44
4.2 FOTOLISIS DE BISFENOL-A .....	45
4.3 DEGRADACIÓN DE BISFENOL-A EN PRESENCIA DE TiO <sub>2</sub> .....	46
4.4 DEGRADACIÓN DEL BISFENOL-A EN PRESENCIA DE BaSO <sub>4</sub> .....	47
4.5 DEGRADACIÓN DEL BISFENOL-A UTILIZANDO AL CATALIZADOR 3% BaSO <sub>4</sub> / TiO <sub>2</sub> .....	47
4.6 DEGRADACIÓN DEL BISFENOL-A UTILIZANDO AL CATALIZADOR 10% BaSO <sub>4</sub> / TiO <sub>2</sub> .....	48
CAPÍTULO 5.....	50
CONCLUSIONES.....	50
REFERENCIAS.....	51

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Panorama mundial de la situación del agua. Fuente: Merca 2.0 .....	11
Figura 2 Situación de las presas en México. Fuente: El Financiero.....	12
Figura 3 Forma estructural del ácido fénico. Fuente: Sitio web .....	14
Figura 4 Estructura química del bisfenol-A. Fuente: Sitio web.....	15
Figura 5 Tickets térmicos contienen bisfenol-A. Fuente: Primero Editores .....	16
Figura 6 Efectos tóxicos causados por el BPA. Fuente: Toxicidad del Bisfenol-A: Revisión.....	18
Figura 7 Diferentes técnicas de oxidación Avanzada. Fuente: iagua.....	21
Figura 8 Diagrama del proceso de fotocatalisis heterogénea .....	22
Figura 9 Algunos semiconductores y su banda de absorción. Fuente: El fotocatalizador: síntesis, propiedades y limitaciones.....	25
Figura 10 Distintas técnicas de espectroscopia. Fuente: Academia .....	26
Figura 11 Espectrofotómetro UV-Vis. Fuente: Sitio web.....	27
Figura 12 Componentes de un espectrofotómetro UV-Vis. Fuente: Maldonado-Cubas (2018) .....	27
Figura 13 Fenol empleado para obtener la solución a 50 ppm. Fuente: Autor. 29	
Figura 14 Pesaje de 5 gramos de tickets térmicos. Fuente: Autor .....	30
Figura 15 Inmersión de tickets térmicos en agua destilada. Fuente: Autor .....	30
Figura 16 Sellado para obtención de compuesto fenólico. Fuente: Autor .....	31
Figura 17 Se obtiene solución de 1 L a 50 ppm de Bisfenol-A. Fuente: Autor. 31	
Figura 18 Carbón mineral empleado como soporte para la fabricación de fotocatalizadores. Fuente: Autor .....	32
Figura 19 Dióxido de silicio empleado como soporte para la fabricación de fotocatalizadores. Fuente: Sitio web .....	32
Figura 20 Dióxido de Titanio empleado como soporte para la fabricación de fotocatalizadores. Fuente: Sitio web .....	32
Figura 21 Mufla Thermolyne empleada en la fabricación de fotocatalizadores. Fuente: Autor .....	34
Figura 22 Espectrofotómetro UV-Vis empleado en las pruebas de absorbancia. Fuente: Autor .....	35
Figura 23 Reactor fotocatalítico de doble capa sometido a agitación magnética. Fuente: Autor .....	40
Figura 24 Sistema de refrigeración del reactor fotocatalítico. Fuente: Autor....	40
Figura 25 Sistema fotocatalítico en funcionamiento. Fuente: Autor .....	41
Figura 26 Jeringa empleada para toma de muestra líquida. Fuente: Autor .....	42
Figura 27 Filtro empleado para separar la fase sólida de la muestra. Fuente: Autor .....	43
Figura 28 Cubetas de cuarzo para análisis espectroscópico UV-Vis, muestras líquidas. Fuente: Autor. ....	43

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Absorbancia de fotocatalizadores de Zn/Carbón mineral .....	36
Gráfica 2 Catalizadores de Pd, Pb, Zn y Cd sintetizados y soportados en SiO <sub>2</sub> .....	37
Gráfica 3 Catalizadores de BaSO <sub>4</sub> soportados en TiO <sub>2</sub> .....	38
Gráfica 4 Fotólisis del Fenol después de 6 horas de reacción.....	44
Gráfica 5 Degradación de Bisfenol-A en ausencia de catalizadores.....	45
Gráfica 6 Degradación de bisfenol-A en presencia de TiO <sub>2</sub> tras 6 horas de reacción .....	46
Gráfica 7 Degradación del Bisfenol-A en presencia del catalizador de BaSO <sub>4</sub> por el método de fotocátalisis, después de 6 horas de reacción.....	47
Gráfica 8 Degradación de Bisfe-A en presencia del catalizador 3% BaSO <sub>4</sub> /TiO <sub>2</sub> en un período.....	48
Gráfica 9 Degradación de Bisfenol-A en presencia del catalizador 10% BaSO <sub>4</sub> /TiO <sub>2</sub> en un período.....	49

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Fotocatalizadores elaborados en laboratorio por método de impregnación.....	34
Tabla 2 Fotocatalizadores de Zn soportados en carbón mineral .....	36
Tabla 3 Preparación de fotocatalizadores preparados con diferentes metales de transición.....	37
Tabla 4 Catalizadores impregnados con BaSO <sub>4</sub> y soportados en TiO <sub>2</sub> . .....	38
Tabla 5 Diferentes pruebas de fotocátalisis realizadas en presencia y ausencia de fotocatalizadores. ....	42

---

---

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

Los derivados fenólicos son precursores en la fabricación de una gran cantidad de plásticos, resinas, desinfectantes e incluso medicamentos. Sin embargo, cuando este tipo de compuestos son desechados a través de la descarga de aguas residuales, estos suelen representar un riesgo tanto para la salud humana y el medio ambiente.

Debido a su resistencia a la degradación por métodos biológicos y la ineficiente regulación normativa han surgido tecnologías que prometen encontrar soluciones a una serie de contaminantes con los que la sociedad convive cotidianamente, como son: hormonas, medicamentos, cosméticos, pesticidas, etc.

En el presente trabajo se investiga y exponen las razones del porque la presencia de los compuestos fenólicos representa un problema, y se plantea una posible solución para permitir la degradación de compuestos fenólicos empleando la tecnología de oxidación avanzada.

Se propone la síntesis de fotocatalizadores por método de impregnación y la utilización de la espectroscopia UV-Vis como método para la selección del catalizador que será sometido al estudio.

La degradación de compuestos fenólicos es un reto en la actualidad, se han desarrollado investigaciones con el empleo de cepas aisladas, oxidación por foto fenton y catálisis heterogénea utilizando catalizadores distintos a los estudiados a continuación.

Por lo que se espera encontrar un sistema eficaz que prometa ser una posible solución ante la problemática que los compuestos fenólicos han causado.



## 1.2 JUSTIFICACIÓN

La escasez de agua se ha convertido en un problema mundial, el impacto que ha causado la falta de recurso por las sequías, baja disponibilidad y el aumento en la contaminación de las fuentes hídricas se refleja en varios sectores de la sociedad. Sin agua, tanto la agricultura como la ganadería se ven afectadas, reflejando la problemática en el alza de los precios de productos de básica necesidad (Esparza, 2013).

Considerando el aumento poblacional, el esfuerzo por cubrir todas las exigencias de una sociedad consumista, ha causado estragos en los recursos hídricos. En Aguascalientes de acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), el 100% de la demanda industrial u doméstica, se abastece con agua extraída de cinco pozos localizados en la entidad (Guzmán *et al.*, 2011).

El fenol es relevante industrialmente, pues es un químico que permite fabricar resinas, plaguicidas, desinfectantes, etc. Pero su desecho en las aguas residuales es un problema por sus cualidades tóxicas. (Santiago, 2003).

La presencia de compuestos fenólicos en las aguas residuales representa un problema, los compuestos fenólicos presentan un bajo índice de biodegradabilidad, esto resulta un impedimento para su tratamiento por métodos biológicos. (Abreu, 2016).

Debido a los avances en la investigación y desarrollo de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales con compuestos orgánicos resistentes a métodos biológicos. Se buscan alternativas para la degradación de estos compuestos mediante oxidación avanzada.

---

---

## **CAPÍTULO 2**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 IMPORTANCIA DEL AGUA**

El agua desempeña un rol esencial en la vida humana, la composición del cuerpo es un 70% agua. Por este motivo, el recurso se ha convertido en la principal limitante de desarrollo y a su vez este determina la calidad de vida de la sociedad. Las estimaciones auguran escasez de agua en 66 países para el año 2050, porque, aunque el 71% de la superficie del planeta es agua, sólo se encuentra disponible el 0.022% (Zapata, 2002).

No es posible la sustentabilidad de la vida sin la conciencia necesaria para regular la utilización y distribución eficiente del recurso hídrico. Además, es indispensable la salvaguarda de los cuerpos de agua disponibles y el tratamiento de aguas residuales posterior al consumo (Fernández, 2012).

A lo largo de la historia el agua ha propiciado el desarrollo de civilizaciones. La perspectiva de disponibilidad ha ido en descenso durante los últimos años, debido al aumento poblacional y el crecimiento industrial que aumentaron la demanda del recurso. Además, la urbanización de zonas alejadas de fuentes de agua ha disminuido la dotación de sitios que poseen el recurso y causado un aumento en la infraestructura para poder suministrarlo (Molina, 2021).

#### **2.2 PERSPECTIVA DEL AGUA A NIVEL MUNDIAL**

La sobre explotación de los acuíferos a nivel mundial, aunado a las sequías ha causado un panorama desfavorecedor.

En la actualidad existen en el mundo por lo menos 25 países que se encuentran sometidos a un alto estrés hídrico, como se muestra en la figura 1.

A continuación, se mencionan países que están explotando al menos el 80% de sus cuerpos de agua, estos países son: Bahrein, Chipre, Kuwait, Líbano, Omán y Qatar.

Además, otros países se encuentran bajo un alto estrés hídrico y aunque los números son más bajos que los antes mencionados, el panorama para estos países es desalentador. Esta situación la viven países como: Emiratos Árabes Unidos, Arabia Saudita, Israel, Egipto, Libia, Yemen, Bostwana, Irán, Jordania, Chile, San Marino, Bélgica, Grecia, Túnez, Namibia, Sudáfrica, Irak e India. (Excelsior, 2024).

### ¿QUÉ PAÍSES CORREN MAYOR RIESGO DE QUEDARSE SIN AGUA?

Nivel de vulnerabilidad al estrés hídrico en el mundo\*

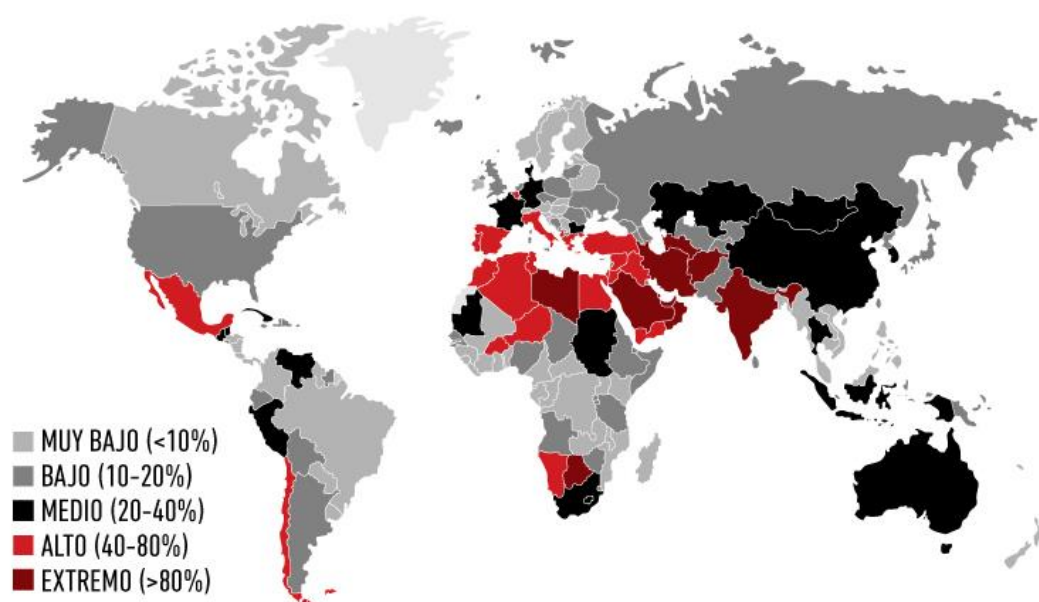


Figura 1 Panorama mundial de la situación del agua. Fuente: Merca 2.0

## 2.3 PERSPECTIVA DEL AGUA EN MÉXICO

En un congreso realizado por el Senado de la República se realizó una revisión a la perspectiva del agua en México, un panorama enfocado en el período 2019-2024.

En el foro se destaca la reducción de disponibilidad del agua por habitante al año. En 1910 cada habitante disponía de 31,000 metros cúbicos por año, para el año 1950 esta cifra disminuyó a 18,000 metros cúbicos y en la actualidad la cifra ronda en 3,600 metros cúbicos por habitante al año. Aunado al crecimiento

poblacional se espera que la disponibilidad del recurso disminuya con el paso de los años (Senado de la República, 2020).

El efecto de la falta de agua en el país puede ser observada en la CDMX y el Estado de México, esto se debe a que el sistema Cutzamala se encuentra en niveles críticos.

El sistema Cutzamala provee el 25% del agua en la CDMX y Edomex, sin embargo, el nivel actual es de aproximadamente el 39.8% de capacidad.

Debido a la sequía en el país, las 210 presas que suministran el 92% de agua total, se encuentran en un nivel que ronda el 50% de su capacidad (Figura 2).

Ante la crisis hídrica que se vive, de continuar la sequía, el Organismo de Cuenca de Aguas pronostica que el Día Cero podría llegar en junio del año en curso (El Financiero, 2024).

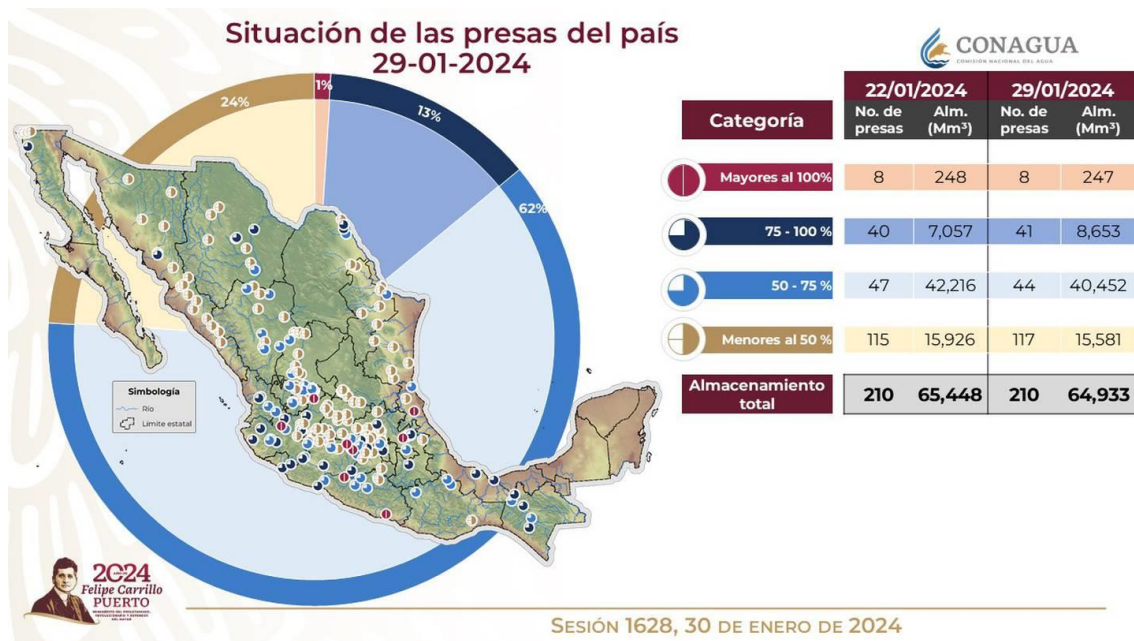


Figura 2 Situación de las presas en México. Fuente: El Financiero

## 2.4 CONTAMINACIÓN DEL AGUA

El papel que desempeña el agua en las actividades antropogénicas es de alto valor, esta es indispensable para la generación de productos indispensables, también es empleada como recurso auxiliar en los procesos industriales. Si bien

el planeta está cubierto por agua en un 71% de su extensión, el agua dulce solo corresponde al 2.5%.

El impacto causado por el avance industrial se ha notado directamente en los sistemas acuáticos, debido a que las principales fuentes de contaminación son los efluentes industriales y sus aguas residuales.

Muchos contaminantes se vierten directamente en cuerpos de agua. Entre estos se encuentran los hidrocarburos, fármacos, hormonas, pesticidas, desechos de minas, agrícolas, veterinarios, etc.

Países con altos niveles de producción agrícola han optado por verter aguas residuales sin ningún tipo de tratamiento en sus cultivos, estas acciones afectan directamente a la salud humana, animal y vegetal. (Velázquez, *et al.* 2022).

## **2.5 CONSECUENCIAS DE LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA**

Los contaminantes que se hayan en aguas contaminadas impactan negativamente en los organismos biológicos que entran en contacto con estas. El enfoque principal es cuidar la salud humana, puesto que la exposición a las aguas contaminadas supone un riesgo debido a que los compuestos del agua pueden poseer propiedades carcinógenas, neurotóxicas, teratogénicas, mutagénicas, etc. (Guadarrama-Tejas, 2016).

## **2.6 CONTAMINANTES EMERGENTES**

El desarrollo tecnológico ha permitido una creciente capacidad de crear bienes y servicios para mejorar la calidad de vida de la población. Sin embargo, el progreso conlleva a un aumento de la emisión de residuos contaminantes.

Los contaminantes emergentes son compuestos químicos complejos, generalmente de origen antropogénico y que no son foco de estudio en los análisis de contaminantes en las aguas residuales. Entre estos compuestos se hallan: residuos de medicamentos, productos de cuidado personal, hormonas, pesticidas, aditivos alimentarios, entre otros (Pinos, 2019).

Los contaminantes emergentes (CE), cuya presencia en aguas residuales no resultaba significativa en términos de concentración, causó que durante un largo período pasaran inadvertidos a la regulación ambiental. Debido a esto, ha surgido la necesidad de implementar tecnologías que permitan controlar la presencia de estos contaminantes en el agua. (M. Gil *et al*, 2012).

## 2.7 FENOL

Los fenoles son compuestos químicos aromáticos, constituidos por uno o más grupos OH ligados a un anillo bencénico por sustitución de hidrógenos. El compuesto más sencillo del conjunto de derivados fenólicos es el fenol o ácido fénico ( $C_6H_5-OH$ ). (Figura 3).

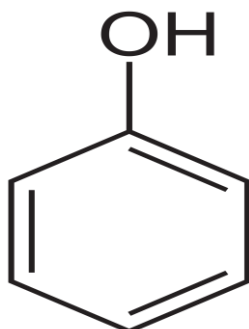


Figura 3 Forma estructural del ácido fénico. Fuente: Sitio web

El fenol se encuentra en estado sólido, en forma de cristales de fácil oxidación al contacto con el aire y la luz. El fenol es muy soluble en agua, alcohol y éter.

## 2.8 DERIVADOS FENÓLICOS

Los fenoles son un grupo de compuestos químicos caracterizados por tener uno o más grupos hidroxilo (OH) ligados a un anillo bencénico. Algunos ejemplos de derivados fenólicos son:

- Bisfenol-A
- Alquilofenoles
- Xilenoles

- Resinas fenólicas
- Anilinas

## 2.9 BISFENOL-A

El bisfenol-A (BPA), es un compuesto bencénico que posee dos grupos funcionales fenol en su estructura (Figura 4), el compuesto se sintetiza a partir de la condensación de dos moléculas de fenol y una molécula de acetona en presencia de ácido clorhídrico.

El bisfenol-A es un importante recurso para la fabricación de plásticos, como ejemplo más destacado es la fabricación de resinas epoxi.

Las resinas epoxi son empleadas para los recubrimientos de latas contenedoras de bebidas y alimentos procesados.

La demanda de BPA es tan alta que para el año 2006 se registró una producción de alrededor de 3.8 millones de toneladas a nivel mundial (García *et al.*, 2015).

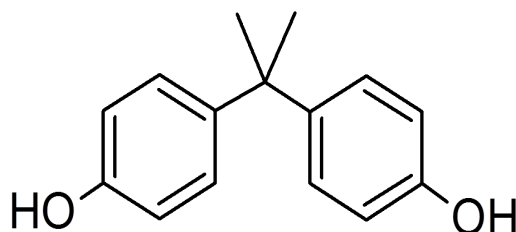


Figura 4 Estructura química del bisfenol-A. Fuente: Sitio web

## 2.10 BISFENOL-A AL ALCANCE DE TODOS

El BPA está incluido dentro de la lista de sustancias preocupantes de la ECHA, (Agencia Europea de Sustancias y Mezclas Químicas). La exposición al Bisfenol-A es más común de lo que se puede imaginar.

La mayoría de productos plásticos están fabricados con BPA, en los que se incluyen los recipientes destinados para el envasado de alimentos y bebidas.

El nivel de exposición al BPA es muy alto, debido a que se encuentra presente en muchos de los objetos de uso común:

- Gafas de seguridad debido a su resistencia, de igual manera en productos destinados a la protección del cuerpo utilizados en deportes.
- CD's ya que están elaborados con policarbonato y resinas epoxi fabricadas a base de BPA.
- Recipientes alimentarios por su resistencia a los golpes.
- Recubrimientos de un gran campo de aplicación.
- Equipos electrónicos debido a su durabilidad.

En 2012, la administración de alimentos y medicamentos (FDA) de Estados Unidos restringió el uso de BPA para la producción de biberones y productos para recién nacidos y lactantes (Facts About BPA).

Diversos estudios a nivel mundial han demostrado que el BPA se encuentra presente en alrededor del 90% de los tickets de compra (Figura 5). (González, 2019).



*Figura 5 Tickets térmicos contienen bisfenol-A. Fuente: Primero Editores*

## 2.11 COMPUESTOS FENÓLICOS EN AGUAS RESIDUALES

El fenol es considerado un precursor en la fabricación de diversos compuestos, como son: el nylon, fibras sintéticas, lubricantes, adhesivos en la industria maderera y zapatera, para la fabricación de ácido acetilsalicílico.



La presencia de fenoles en el agua altera sus características organolépticas, como el sabor. Estos tienen generalmente un origen industrial y posteriormente pasan a ser desechados mediante la descarga de aguas residuales. (Jiménez, 2001).

Han sido detectados compuestos fenólicos en efluentes de la Ciudad de México. Ante esta problemática la legislación mexicana ha establecido un límite máximo permisible de 0.001 ppm o mg/L de concentración de fenol en aguas residuales según NOM-127-SSA-1994.

Sin embargo, la presencia de los compuestos fenólicos en la vida cotidiana ha causado una controversia en la regulación de estos compuestos y su presencia en las aguas destinadas al consumo humano. Debido a esto, se puede observar que en la actualización de la NOM-127-SSA-2021 han eliminado a los compuestos fenólicos de las sustancias reguladas y solo se encuentran aquellos que tienen moléculas de cloro ligadas a su anillo bencénico.

## **2.12 FENOL Y SUS AFECTACIONES A LA SALUD**

El fenol y sus compuestos derivados pueden estar presentes en sustancias de uso común, tales como, desinfectantes, antisépticos, fungicidas e insecticidas y a pesar de que las intoxicaciones por fenoles sean escasas, una ingestión accidental puede causar severos daños a la salud.

La ingestión de fenol causa quemaduras a través del tracto gastrointestinal. Además, causa a los minutos de ser ingerido el aumento de la frecuencia respiratoria e hiperventilación. Las afectaciones son observadas en el sistema nervioso central, daño hepático, en riñones y páncreas, en casos severos puede causar la muerte (Islas *et al.*, 1987).

## **2.13 EFECTOS SOBRE LA SALUD HUMANA DEL BISFENOL-A**

El bisfenol-A puede llegar a los alimentos enlatados, el bisfenol-A presenta lixiviación por el aumento de temperatura a la que se someten los envases. Debido a esto, la ingestión es la principal fuente de contacto.

Diversos estudios han demostrado que la exposición prolongada al bisfenol-A, puede causar daños nocivos a la salud, a nivel celular interfiere con el metabolismo, llegando a desarrollar procesos como carcinogénesis, toxicidad reproductiva, deficiencia inmunitaria y afectaciones al cerebro y sistema nervioso. (Tamayo *et al.* 2022).

El BPA es un compuesto catalogado como disruptor endocrino, el cual interfiere en la biosíntesis hormonal, en el metabolismo.

El mayor impacto del BPA se ha observado en infantes que han sido expuestos durante el embarazo y la lactancia. (García *et al.*, 2015).

Los efectos relacionados con la exposición al Bisfenol-A se muestran en la Figura 6.

REPRODUCCIÓN	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Fertilidad</li> <li>➤ Función sexual masculina</li> <li>➤ Reducción calidad espermatozoides</li> <li>➤ Concentración de hormonas sexuales</li> <li>➤ Síndrome de ovario poliquístico</li> <li>➤ Alteraciones del endometrio</li> <li>➤ Cáncer de mama</li> <li>➤ Aborto involuntario</li> <li>➤ Nacimiento prematuro</li> </ul>
DESAROLLO	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Peso de nacimiento</li> <li>➤ Anormalidades en los genitales masculinos</li> <li>➤ Anormalidades en comportamiento/neurodesarrollo en la infancia</li> <li>➤ Asma y problemas respiratorios en la infancia</li> </ul>
METABOLISMO	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Diabetes tipo 2</li> <li>➤ Alteraciones cardiovasculares, hipertensión y niveles de colesterol.</li> <li>➤ Función del hígado</li> <li>➤ Obesidad</li> </ul>
OTROS	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Función tiroidea</li> <li>➤ Función inmunológica</li> <li>➤ Albuminuria</li> <li>➤ Estrés oxidativo e inflamación</li> <li>➤ Expresión genética</li> </ul>

**Figura 6 Efectos tóxicos causados por el BPA. Fuente: Toxicidad del Bisfenol-A: Revisión**

## **2.14 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

El tratamiento de aguas residuales consiste en un conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos que permiten reducir, disminuir o eliminar la carga de contaminantes presentes en las aguas residuales provenientes de: la industria, la agricultura, ganadería, uso urbano, etc.

El diseño de las plantas de tratamiento basa sus procesos de acuerdo al estudio de los contaminantes que se deseen remover.

## **2.15 PLANTAS DE TRATAMIENTO DE SISTEMAS BIOLÓGICOS**

El objetivo del tratamiento de aguas no es la inocuidad del efluente dispuesto, se tiene la misión de mitigar la carga contaminante y llevarlo a límites que se encuentren dentro de un rango seguro ante su exposición con el ser humano y el medio ambiente. El diseño de una planta de tratamiento debe obtener un equilibrio entre los costos operativos, la practicidad de su funcionamiento y la eficacia de sus procesos.

Las aguas residuales se constituyen por dos fases, la fase líquida y la fase sólida. Un método general de tratamiento es permitir la sedimentación de la fracción sólida, para posteriormente, realizar el tratamiento de la fase líquida por métodos químicos.

Sin embargo, el tipo de tratamiento más usado es el biológico, ya que permite reducir la contaminación empleando microorganismos que permiten la degradación de materia orgánica (Reynolds, 2002).

Cuando los procesos biológicos no logran remover compuestos con baja biodegradabilidad como los compuestos fenólicos es necesario aplicar otras técnicas como la oxidación avanzada.

## **2.16 MÉTODOS DE TRATAMIENTO DE FENOL EN AGUAS RESIDUALES**

El fenol es un compuesto de difícil remoción en las aguas residuales, por ello, plantas de tratamiento convencionales, que suelen operar bajo sistemas biológicos aerobios o anaerobios resultan ineficaces.

Por esta razón se ha estudiado el campo de la oxidación avanzada, específicamente la fotocatalisis heterogénea. Con esta práctica se busca la degradación de compuestos químicos complejos y su posterior transformación de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O (Moctezuma *et al.*, 2016).

## **2.17 ANTECEDENTES**

En el año 2009 se realizó la fotocatalisis de BPA empleando TiO<sub>2</sub> como fotocatalizador. Obteniendo resultados prometedores para concentraciones de hasta 0.05 mM de bisfenol-A y 100 mg/L de TiO<sub>2</sub>, logrando remover hasta el 83% de contaminante en un período de 240 min (Gómez, Sarria, 2009).

En el año 2011 Santiago y colaboradores evaluaron la degradación de fenol por oxidación húmeda con catalizadores soportados en paligorsquita, obteniendo resultados favorables para un catalizador de hierro soportado en paligorsquita, logrando degradar casi todo el fenol en un tiempo de reacción de 80 minutos.

En 2017 Pardo- Díaz y colaboradores realizaron un estudio para evaluar la degradación de fenol proveniente de aguas tratadas de la industria petrolera. Emplearon cepas aisladas, pertenecientes principalmente a la familia *pseudomonas* y obtuvieron que la degradación de fenol no era la suficiente, aun cuando se proporcionaron los nutrientes y las condiciones favorables.

## **2.18 OXIDACIÓN AVANZADA**

La escasez de agua ha llevado a desarrollar tecnologías que permitan degradar, transformar o eliminar contaminantes de las aguas residuales. Sin embargo,

cuando las propiedades físicas o químicas del contaminante impiden su degradación por medio de plantas de tratamiento que operan bajo sistemas convencionales, es necesario recurrir a métodos específicos para su descomposición. (Ainhoa *et al.*, 2014)

Los procesos de oxidación avanzada son métodos desarrollados con el fin de degradar materia orgánica con baja biodegradabilidad. Pueden ser aplicados de manera directa o combinada y sus indicadores de remoción se basan en la determinación de los parámetros de DQO, DBO y COT. (Vázquez *et al.*, 2022). En la figura 7 se destaca una lista de técnicas de oxidación avanzada.

<i>Procesos no fotoquímicos</i>	<i>Procesos fotoquímicos</i>
- Ozonización en medio alcalino	• Oxidación en agua sub y supercrítica
- Ozonización con peróxido de hidrógeno	• Fotólisis de agua ultravioleta de vacío
- Procesos Fenton	• UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
- Oxidación electroquímica	• UV/O <sub>3</sub>
- Radiólisis y tratamiento con haces de electrones	• Foto-Fenton y relacionados
- Plasma no térmico	• <b>Fotocatálisis heterogénea</b>
- Descarga electrohidráulica y ultrasonidos	• Fotocatálisis homogénea

*Figura 7 Diferentes técnicas de oxidación Avanzada. Fuente: iagua*

## 2.19 FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA

El proceso de fotocatalisis se inicia al irradiar un semiconductor bajo un halo de energía luminosa con un valor igual o superior al requerido para que un electrón cambie su posición en la banda prohibida, generando un hueco de carga positiva que posteriormente reaccionara con el medio acuoso para formar radicales hidroxilos que serán los encargados de oxidar los compuestos orgánicos. (Figura 8).

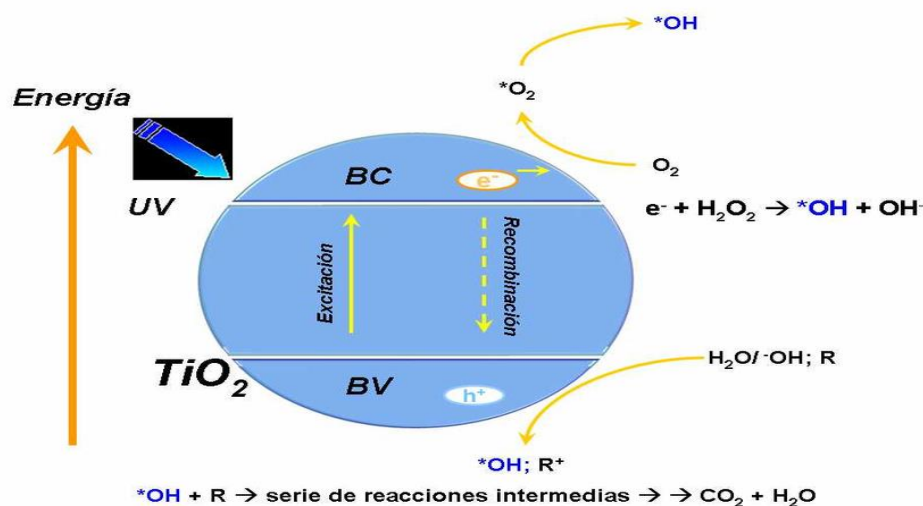


Figura 8 Diagrama del proceso de fotocatalisis heterogenea

Es necesario considerar que los huecos positivos reaccionan fácilmente, por lo cual es necesario la adición de oxígeno para incrementar el nivel de producción de los radicales hidroxilos.

## 2.20 CATALIZADORES

Los catalizadores son sustancias químicas obtenidas para mejorar la velocidad de reacción química. Estas sustancias son foco de estudio debido al amplio interés dentro de la industria petroquímica, disminución de emisiones de contaminantes atmosféricos, producción de fármacos, polímeros, fertilizantes, entre muchas otras aplicaciones.

## 2.21 CATALIZADORES HOMOGÉNEOS

Cuando el catalizador y la fase en que se emplea son las mismas, se denomina catálisis homogénea. Estos catalizadores suelen ser ácidos y bases inorgánicas. El empleo de la catálisis homogénea conlleva desventajas, siendo principalmente el sobrecosto para la separación y purificación del producto final. (Mazo, 2008).

## **2.22 CATALIZADORES HETEROGÉNEOS**

Cuando un catalizador se encuentra en distinta fase a los reactivos, se obtiene un catalizador heterogéneo. En la catálisis heterogénea el compuesto catalítico suele presentarse en estado sólido, esto permitirá su posterior recuperación de forma más sencilla. (Fierro, 2021).

La preparación de catalizadores en estado sólida representa un verdadero reto para la ciencia, estos compuestos pueden alcanzar una complejidad en la que hasta 10 sustancias diferentes pueden estar asociadas en el mismo compuesto. (Rodríguez, Ramos, 2011).

## **2.23 MÉTODOS PARA LA FABRICACIÓN DE CATALIZADORES**

La obtención de catalizadores puede darse bajo distintos métodos, se describen a continuación algunos de ellos.

### **2.24 MÉTODO DE SOL- GEL**

Este método se lleva a cabo mediante el proceso de hidrólisis y posterior condensación de un alcóxido metálico. En la reacción del alcóxido en agua y en presencia de alcohol es empleado como solvente. Además, es necesaria la adición de una solución que contenga al metal activo y un catalizador ácido o básico. El metal activo interactuará con la mezcla de reacción, provocando que parte de este se adhiera a la red polimérica del soporte y otra parte se adhiera en la superficie del sólido final. (García, 1991).

### **2.25 MÉTODO HIDROTERMAL**

Este método se desarrolla con el propósito de aprovechar el equilibrio líquido-vapor del agua, en condiciones en las que la presión y temperatura son superiores a 1 atm y 100 °C, respectivamente. Las condiciones a las que se

somete la reacción permiten que, compuestos con baja solubilidad en condiciones ambientales, puedan ser solubilizados en medios acuosos. (Guzmán, 2018).

## 2.26 MÉTODO DE IMPREGNACIÓN

El catalizador obtenido por impregnación es la combinación de dos componentes estructurales; El componente catalíticamente activo y el soporte. El soporte determinará la forma y tamaño del catalizador, la impureza metálica quedará distribuido de manera homogénea en el soporte y será el componente activo. El proceso se realiza añadiendo una sal metálica y se adiciona un volumen conocido de agua. El agua se evapora a temperaturas bajas y se calcina para su activación, posteriormente se determinará el volumen del poro del soporte. (Cortés, Guerrero, 2021).

## 2.27 SEMICONDUCTORES

Cuando un compuesto o elemento presenta la capacidad de comportarse como un conductor o un aislante, es denominado semiconductor. Los factores que influyen para que se comporten como uno u otro son principalmente la temperatura y los campos eléctricos.

Los semiconductores cuentan con una banda de valencia (BV) y una banda de conducción (BC), separadas por una banda de prohibición *bandgap* (Figura 9). Cuando la banda de valencia (BV) se encuentra llena de electrones se comportará como aislante, en cambio, si los electrones entran en estado de excitación pasarán a la banda de conducción (BC) y el compuesto será un conductor. (Zamora, 2020).



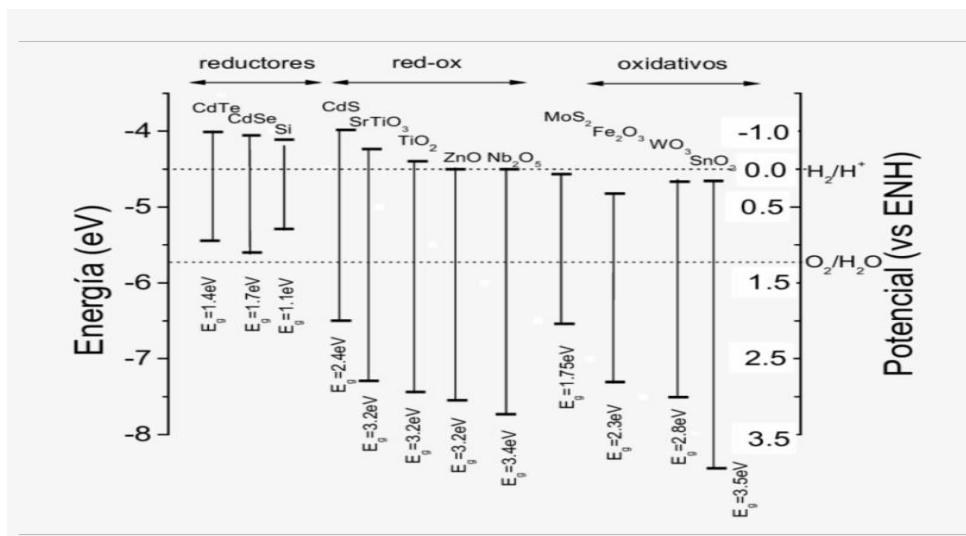


Figura 9 Algunos semiconductores y su banda de absorción. Fuente: El fotocatalizador: síntesis, propiedades y limitaciones.

## 2.28 SEMICONDUCTOR INTRÍNSECO

Un semiconductor intrínseco tiene un *bandgap* pequeño y a temperatura ambiente se lleva a cabo la transición de los electrones de la BV a la BC. Los semiconductores intrínsecos presentan mejor conducción que algunos metales en condiciones de temperatura ambiente y a medida que se eleva la temperatura también se eleva la conductividad.

## 2.29 SEMICONDUCTOR EXTRÍNSECO

El semiconductor extrínseco es un elemento contaminado con impurezas con la finalidad de mejorar su capacidad conductiva a temperatura ambiente. A este proceso se le denomina dopamiento. (Jaime, 2010).

## 2.30 ESPECTROSCOPIA

La espectroscopia se basa en el análisis y medición del espectro luminoso de un cuerpo. El espectro es la distribución que ocupa determinado cuerpo y se puede

determinar mediante la medición de la intensidad de la radiación que emite. El principio que sigue la medición es a través de la relación de radiación electromagnética absorbida y emitida, relacionando la radiación incidente y la energía para realizar una transición cuántica (Valcárcel *et al*, 2008).

En la figura 10 se observa una comparación de distintas técnicas de análisis espectroscópicos.

Nombre: Berenice Valdes Bernal  
Análisis Instrumental  
Unidad II

CUADRO COMPARATIVO DE TÉCNICAS DE ESPECTROSCOPIA

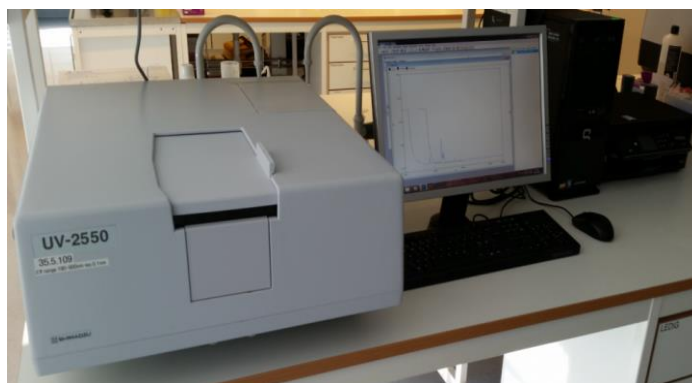
TÉCNICA	INTERVALO DE LONGITUD DE ONDA	FUNDAMENTO DE LA TÉCNICA	INSTRUMENTACIÓN
UV-VIS	190-750 nm UV: 190-340 nm VIS: 340-750 nm	Cuando un haz de luz proveniente de una fuente de luz actúa sobre los $e^-$ , estos absorben energía, es decir hay un proceso de absorción de energía para	1. <b>Lámpara o fuente:</b> ✓ Lámpara de Deuterio: señal para la longitud de onda de UV ✓ Lámpara de Tungsteno: señal para la longitud de onda
Infrarrojo	Lejano: 400-10 $cm^{-1}$ Medio: 4000-400 $cm^{-1}$ Cercano: 14000-4000 $cm^{-1}$	Una molécula orgánica (grupo funcional orgánico) expuesta a un haz de luz, absorbe la radiación infrarroja y la convierte en energía de rotación molecular, es decir un tipo de vibración o	1. <b>Lámpara o fuente:</b> ✓ Lámpara Ners: cilindro delgado fabricado con óxidos de tierras raras, sirve para IR medio ✓ Fuente Global: barra de carburo de silicio, sirve para
Absorción atómica	Depende de la longitud de onda característica del metal a analizar	Se lleva a cabo un proceso de radiación electromagnética de absorción o de emisión que es caracterizada mediante espectros	1. <b>Fuente</b> ✓ Lámparas de cátodo hueco con filamento del metal a analizar 2. <b>Divisor Periódico</b>
Masas	Depende de la relación m/z de cada fragmentación de la molécula	Se basa en la obtención de iones a partir de moléculas orgánicas en fase gaseosa, una vez obtenidos estos iones, se separan de acuerdo con su masa $m$ carga $(m/z)$ y finalmente se detectan por	1. <b>Sistema de introducción de muestras</b> ✓ Introducción indirecta: balón de vidrio para g, l o s ✓ Introducción directa: por medio de varilla metálica, aplica para muestras líquidas
Resonancia	Depende del desplazamiento químico de la molécula		1. <b>Fuente:</b> ✓ <b>Imán estable</b> , con un controlador que produce un campo magnético estable de fuerza $B_0$ 2. <b>Transmisor de radiofrecuencias:</b> capaz de emitir

Figura 10 Distintas técnicas de espectroscopia. Fuente: Academia

## 2.31 ESPECTROSCOPIA UV-VIS

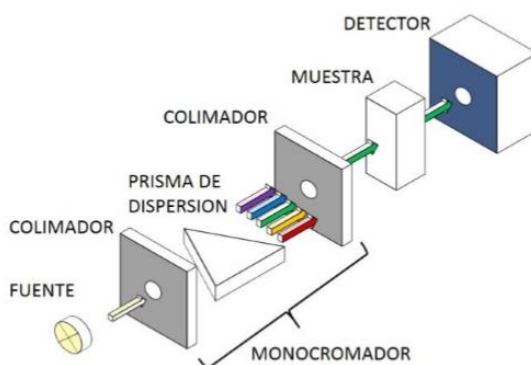
La técnica de espectroscopia UV-Vis consiste en la medición de la energía UV o visible que ha sido absorbida por las moléculas presentes en una sustancia. El espectro medido por esta técnica corresponde al intervalo que comprende los 200 a 800 nm y proporciona información sobre los estados energéticos de la muestra analizada (Maldonado *et al*, 2018).

Para realizar un análisis de espectroscopia UV-Vis, se emplea un espectrofotómetro (Figura 11).



*Figura 11 Espectrofotómetro UV-Vis. Fuente: Sitio web*

El equipo cuenta con una fuente que emite radiación UV y visible, esta es emitida generalmente por lámparas de deuterio, xenón o wolframio. Posee un monocromador que se compone por un colimador de entrada, también contiene un elemento dispersante y un colimador de salida, cuya función es seleccionar la longitud de onda, por último, puede contener uno o más detectores para determinar la radiación de la muestra que posteriormente emitirá un espectro de absorción. La estructura de un espectrofotómetro se muestra en la figura 12.



*Figura 12 Componentes de un espectrofotómetro UV-Vis. Fuente: Maldonado- Cubas (2018)*

## 2.32 HISTORIA DE LA ESPECTROSCOPIA UV-VIS

Se tiene registro que el primer prototipo de espectrofotómetro fue en el año 1859, durante la caracterización de gases. Fue en el año de 1935, cuando Arthur C. Hardy patentó el equipo.

A lo largo de la historia, se desarrollaron varios espectrofotómetros, como el 1940 empleando un medidor de pH amplificado, un prisma de vidrio y una fotocélula. Fue hasta el año 1953 cuando Bausch & Lomb desarrolló el que sería el espectrofotómetro más empleado debido a su alta precisión y bajo costo. Actualmente continúan las investigaciones y desarrollo con el objetivo de perfeccionar el equipo y ampliar su uso (García, 2018).

### **2.33 APLICACIONES DE LA ESPECTROFOTOMETRÍA UV-VIS**

El avance tecnológico ha permitido fabricar espectrofotómetros con la capacidad de realizar mediciones sobre diversos materiales como; plásticos, papel, metales, líquidos, etc.), es por ello que se ha empleado en diversos campos como: determinación de concentraciones de compuestos específicos en una solución; evaluar la concentración de hierro en la sangre, etc.

En el área ambiental ha cobrado relevancia debido a que permite determinar niveles de concentración de una variedad de contaminantes en muestras de suelo y agua (García, 2018).

---

---

## CAPÍTULO 3

# METODOLOGÍA

### 3.1 PREPARACIÓN DE SOLUCIÓN DE FENOL

Se prepara 1 litro de solución de fenol a 50 ppm. El compuesto químico empleado es Phenol, Crystal de la marca J.T.Baker con una pureza de 99.6% (Figura 13).



*Figura 13 Fenol empleado para obtener la solución a 50 ppm. Fuente: Autor*

Considerando la pureza del reactivo, se puede considerar al 100% para fines prácticos. Por este motivo, se obtiene la equivalencia ppm a mg/L y obtenemos:

$$50 \text{ ppm} = 50 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

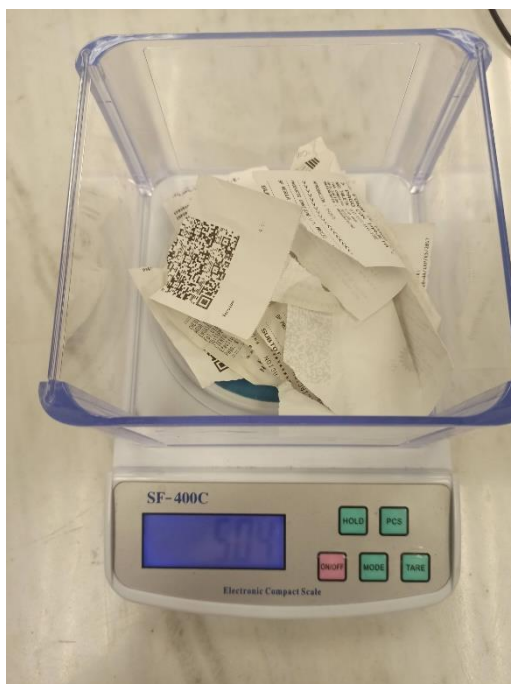
Una vez determinada la equivalencia en masa, se procede a realizar la medición del reactivo en balanza analítica. Posteriormente, los 50 mg de fenol serán diluidos en 1 L de agua destilada para obtener la solución a 50 ppm.

### 3.2 PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN DE BISFENOL-A

A partir de la información disponible, en la que estudios han demostrado la presencia de BPA en tickets térmicos, se consideró la posibilidad de obtener una

solución contaminante a partir de una cantidad de tickets y determinar su concentración de Bisfenol-A.

Se pesaron 5 gramos de tickets térmicos (Figura 14), de los cuales será obtenida la solución que contiene Bisfenol-A.



**Figura 14** Pesaje de 5 gramos de tickets térmicos. Fuente: Autor

Posteriormente los tickets fueron cortados y sumergidos en agua destilada (Figura 15) y sellados (Figura 16) para la liberación de bisfenol-A en el medio acuoso.

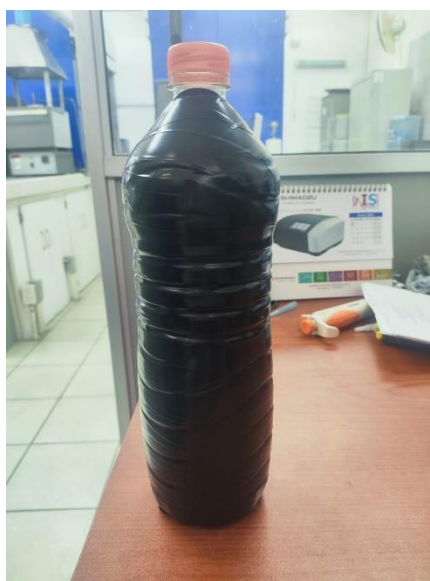


**Figura 15** Inmersión de tickets térmicos en agua destilada. Fuente: Autor



*Figura 16 Sellado para obtención de compuesto fenólico. Fuente: Autor*

Después del sellado, el sistema se dejó reposar por dos días y posteriormente se analizó la concentración de BPA, obteniendo una solución de 150 ppm. Mediante la ecuación de dilución y a partir de la sustancia patrón se realizó el cálculo para obtener finalmente una solución de 1 L a 50 ppm (Figura 17).



*Figura 17 Se obtiene solución de 1 L a 50 ppm de Bisfenol-A. Fuente: Autor.*

La solución obtenida se aisló de la irradiación lumínica para evitar la reacción o evaporación del BPA.

### 3.3 PREPARACIÓN DE LOS FOTOCATALIZADORES

Los fotocatalizadores fabricados en el laboratorio fueron desarrollados por el método de impregnación en una base de carbón mineral (Figura 18) o dióxido de silicio (SiO<sub>2</sub>) (Figura 19) y dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) (Figura 20).



*Figura 18 Carbón mineral empleado como soporte para la fabricación de fotocatalizadores. Fuente: Autor*



*Figura 19 Dióxido de silicio empleado como soporte para la fabricación de fotocatalizadores. Fuente: Sitio web*



*Figura 20 Dióxido de Titanio empleado como soporte para la fabricación de fotocatalizadores. Fuente: Sitio web*

Para la fabricación de 10 g del fotocatalizador 2% Cd/SiO<sub>2</sub>. Se utilizó como fuente de Cadmio el compuesto Nitrato de Cadmio tetra hidratado (Cd(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>•4H<sub>2</sub>O) cuyo peso molecular es 308.47 se obtuvo el cálculo mediante los siguientes cálculos.



$$10 \text{ gr catalizador} = 100\%$$

$$x = 2\%$$

Donde x representa los gramos requeridos de Cd para fabricar 10 gramos de fotocatalizador al 2%. Realizando la operación se obtiene que x es igual a 0.2 g de Cd. Posteriormente se realiza el cálculo del total de reactivo necesario para obtener los 0.2 g de Cd, el cálculo se muestra a continuación.

$$\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \bullet 4\text{H}_2\text{O} = 308.47 \text{ g}$$

$$\text{Cd} = 112.412 \text{ g}$$

Las fórmulas indican que en 308.47 g del compuesto nitrato de cadmio se encuentran presentes 112.412 g de cadmio puro. Por lo tanto.

$$\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \bullet 4\text{H}_2\text{O} \ 308.47 \text{ g} = 112.412 \text{ g Cd}$$

$$x = 0.2 \text{ g Cd}$$

Donde x representa los gramos requeridos del compuesto químico en el que 0.2 g correspondan a Cd puro. Realizando el cálculo se obtiene que.

$$x = 0.5488204 \text{ g de Cd}(\text{NO}_3)_2 \bullet 4\text{H}_2\text{O}$$

Una vez determinado la cantidad del compuesto requerido para obtener 10 g del fotocatalizador se procede a realizar la medición del compuesto.

Posteriormente el compuesto químico es vertido en un vaso de precipitado junto con el soporte ( $\text{SiO}_2$ ) y  $\text{H}_2\text{O}$  como precursor. El vaso es llevado a parrilla eléctrica y sometido a 200 °C y agitación constante hasta la total evaporación del medio acuoso.

Completada la evaporación, el contenido se lleva a calcinar a la mufla (Figura 21) a 600 °C.



Figura 21 Mufla Thermolyne empleada en la fabricación de fotocatalizadores. Fuente: Autor

El sólido obtenido tras la calcinación es el fotocatalizador obtenido dopado con el metal de interés.

Bajo el mismo procedimiento, se crearon los siguientes fotocatalizadores (Tabla 1).

METAL	PORCENTAJE	SOPORTE	ÁCIDO PRECURSOR
Zn	5%	Carbón mineral	HNO <sub>3</sub>
Zn	5%	Carbón mineral	HF
Zn	3%	Carbón mineral	HNO <sub>3</sub>
Pd	2%	SiO <sub>2</sub>	HNO <sub>3</sub>
Pb	3%	SiO <sub>2</sub>	HF
Zn	3%	SiO <sub>2</sub>	
Cd	2%	SiO <sub>2</sub>	
BaSO <sub>4</sub>	3%	TiO <sub>2</sub>	
BaSO <sub>4</sub>	10%	TiO <sub>2</sub>	

Tabla 1 Fotocatalizadores elaborados en laboratorio por método de impregnación

### 3.4 DETERMINACIÓN DE ABSORBANCIA DE FOTOCATALIZADORES

Para determinar los fotocatalizadores con mejor desempeño se realizó la evaluación de su capacidad de absorción por espectrofotometría UV-Vis. Los fotocatalizadores fueron sometidos a la medición en un espectrofotómetro UV-2450 SHIMADZU (Figura 22).



*Figura 22 Espectrofotómetro UV-Vis empleado en las pruebas de absorbancia. Fuente: Autor*

Los fotocatalizadores obtenidos por el método de impregnación se sometieron a una prueba de absorbancia de radiación UV-Vis, los resultados nos permiten inferir el potencial de degradación de los compuestos fenólicos. Además, muestran la energía necesaria para activar el fotocatalizador, los resultados de las mediciones se muestran a continuación.

### **3.5 CATALIZADORES DE Zn SOPORTADOS EN CARBÓN MINERAL**

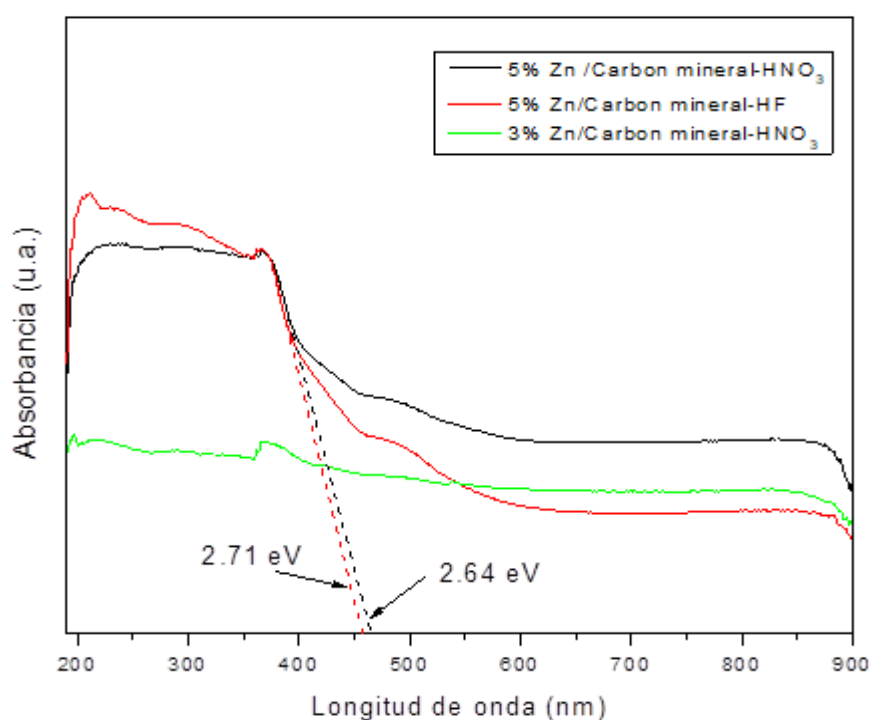
Se prepararon fotocatalizadores de Zn soportados en carbón mineral. El carbón mineral es conocido como absorbente para la eliminación de algunos contaminantes presentes en agua. Se impregnaron impurezas de Zn en la superficie del carbón mineral, se adiciona  $\text{HNO}_3$  y HF como se muestra en la tabla 2.

Fotocatalizadores preparados por el método de impregnación, utilizando Zn al 5 % y 3% de Zn, se compara la absorbancia de los fotocatalizadores con el efecto de la acidez durante su preparación.

CATALIZADOR	ÁCIDO
5% Zn / carbón mineral	HNO <sub>3</sub>
5% Zn / carbón mineral	HF
3% Zn / carbón mineral	HNO <sub>3</sub>

Tabla 2 Fotocatalizadores de Zn soportados en carbón mineral

Se utilizó ácido durante la preparación de los, para observar el comportamiento del catalizador, es conocido que la adición del ácido mejora la accesibilidad de los sitios activos en el catalizador, como se muestra en la gráfica 1. El catalizador que es tratado con HNO<sub>3</sub> mejora la absorción en la región visible comparado con el catalizador tratado con HF.



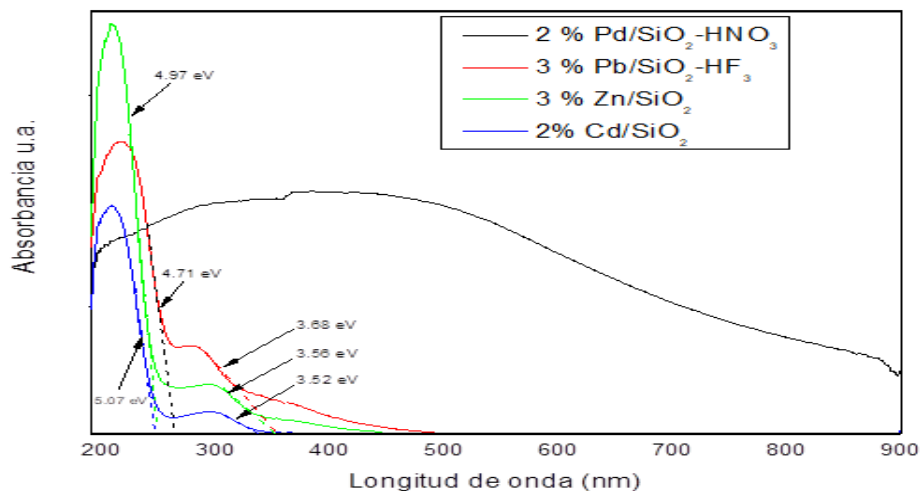
Gráfica 1 Absorbancia de fotocatalizadores de Zn/Carbón mineral

### 3.6 CATALIZADORES CON DIFERENTES IMPUREZAS METÁLICAS SOPORTADOS EN SiO<sub>2</sub>

Se prepararon una serie de catalizadores dopados con impurezas metálicas de transición soportados en SiO<sub>2</sub>, por el método de impregnación, como se muestra en la tabla 3, su utiliza SiO<sub>2</sub> como soporte debido a que potencia el fenómeno de absorción y por lo tanto puede mejorar la reacción catalítica. Los resultados se muestran en la gráfica 2. Se observa que el catalizador de Pd tiene una gran absorbancia en toda la región visible y ultravioleta, lo cual nos permite proponer una buena degradación de compuestos fenólicos, en toda la regio Visible Ultravioleta del espectro solar. Además, los fotocatalizadores de Pb, Zn y Cd muestran que tienen dos bandas de absorción de alta energía fotónica Ultravioleta en las regiones tipo C y B.

CATALIZADOR	ÁCIDO
2% Pd / SiO <sub>2</sub>	HNO <sub>3</sub>
3% Pb / SiO <sub>2</sub>	HF
3% Zn / SiO <sub>2</sub>	Sin ácido
2% Cd / SiO <sub>2</sub>	Sin ácido

Tabla 3 Preparación de fotocatalizadores preparados con diferentes metales de transición



Gráfica 2 Catalizadores de Pd, Pb, Zn y Cd sintetizados y soportados en SiO<sub>2</sub>

### 3.7 CATALIZADORES DE BARIO SOPORTADOS EN TiO<sub>2</sub>

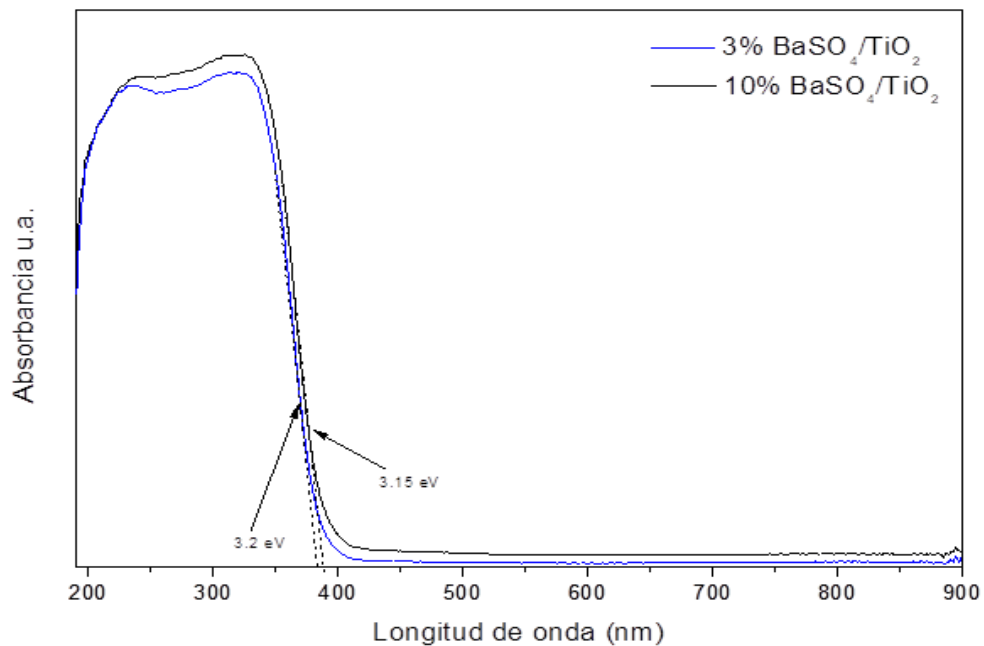
Se prepararon dos catalizadores de BaSO<sub>4</sub> soportados en TiO<sub>2</sub> por el método de impregnación, como se muestra en la tabla 4.

CATALIZADOR
3% BaSO <sub>4</sub> / TiO <sub>2</sub>
10% BaSO <sub>4</sub> / TiO <sub>2</sub>

Tabla 4 Catalizadores impregnados con BaSO<sub>4</sub> y soportados en TiO<sub>2</sub>.

En la Gráfica 3, se observa que, al incrementar la concentración de Bario, se produce un desplazamiento de la banda de energía de absorción hacia el rojo, esto es significativo que se puede mejorar la degradación del fenol y del Bisfenol-A con el uso del nuevo proceso de oxidación avanzada la fotocatalisis.

Cabe destacar que no existen hasta el momento estudios en la literatura utilizando estos fotocatalizadores. Se utiliza TiO<sub>2</sub> como soporte debido a lo económico, lo noble y sobre todo porque no causa daño al ser humano.



Gráfica 3 Catalizadores de BaSO<sub>4</sub> soportados en TiO<sub>2</sub>

### **3.8 SELECCIÓN DEL FOTOCATALIZADOR**

Para la selección del catalizador empleando la espectroscopia UV-Vis, se tomaron en cuenta diversos factores, que resultan determinantes a la hora de seleccionar un catalizador. Los catalizadores de Zn soportados en Carbón mineral muestran una buena absorción en la región visible. Sin embargo, al estar soportados en carbón mineral, este se comporta como absorbente, siendo posible que sea la absorción del contaminante el motivo de la desaparición del contaminante en los espectros UV-Vis y no un efecto de la degradación.

Por otra parte, se prepararon una serie de catalizadores de Pd, Pb, Zn y Cd soportados en SiO<sub>2</sub>. Los resultados muestran que los catalizadores de Pb, Zn y Cd tienen bandas de absorción en la región ultravioleta, esto hace que sean descartados por la gran cantidad de energía requerida para su activación.

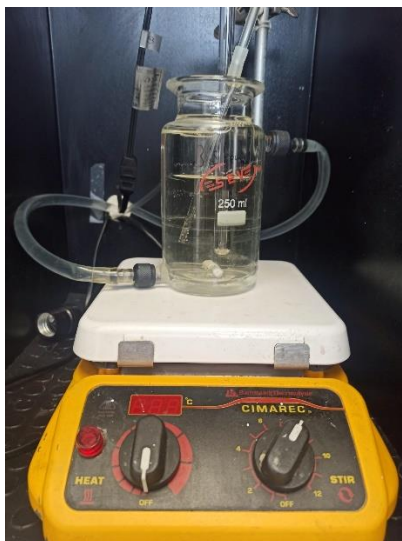
El catalizador de Pd muestra una interesante curva de absorción de energía en la región visible y ultravioleta, sin embargo, debido a su difícil disolución durante la preparación del catalizador y su elevado costo, es descartado, aunque muestra una interesante curva de absorción, que bien merece realizar un estudio posterior.

Es conocido que a través del tiempo el TiO<sub>2</sub>, está ganando mayor importancia debido a sus propiedades fisicoquímicas, bajo costo, estabilidad química y baja toxicidad. Se ha aplicado para la degradación o eliminación de diversos contaminantes orgánicos, incluidos tintes, textiles y medicamentos, Por tal razón, fue seleccionado el TiO<sub>2</sub> como soporte y será dopado con impurezas de BaSO<sub>4</sub> ya que el Bario no ha sido estudiado en este tipo de reacciones, que bien se pueden encontrar resultados interesantes, durante la realización de este proyecto.

### **3.9 PROCESO DE FOTOCATÁLISIS**

Para realizar el proceso de degradación se montó un reactor fotocatalítico. El cual consiste en un reactor fotocatalítico de doble capa. En el reactor se vierte el

medio acuoso al cual se le aplicará la reacción. El sistema es sometido a agitación constante mediante el empleo de un agitador magnético y una parrilla eléctrica (Figura 23).



**Figura 23** Reactor fotocatalítico de doble capa sometido a agitación magnética. Fuente: Autor

El reactor fotocatalítico se sometió a un sistema de recirculación de agua fría (Figura 24), con el objetivo de mantener una temperatura estable en 20 °C y de esta manera obtener resultados que varíen solo en función de la irradiación UV y no por efecto de temperatura.



**Figura 24** Sistema de refrigeración del reactor fotocatalítico. Fuente: Autor

Una vez montado el sistema del reactor fotocatalítico se comenzó la irradiación de luz UV, por medio de una lámpara tipo pluma de alta energía, esta emite



energía en el orden de los 254 nm. También es necesario la adición de O<sub>2</sub> al sistema reactivo, el cual se suministró a través de una bomba a una tasa de 50 ml/min (Figura 25).



*Figura 25 Sistema fotocatalítico en funcionamiento. Fuente: Autor*

Los fotocatalizadores seleccionados fueron agregados y sometidos al sistema en conjunto con las soluciones de compuestos fenólicos en diferentes tiempos de reacción para su posterior análisis espectroscópico y determinar su eficacia en la degradación de los contaminantes.

### **3.10 SISTEMA DE REACCIÓN FOTOCATALÍTICA**

La tabla 5 muestra los distintos procesos que se realizaron por separado para determinar la eficacia de la degradación de compuestos fenólicos en presencia o ausencia de fotocatalizadores.

Compuesto	Catalizador	Tiempo de reacción
Fenol	Ausente	1 h-6h
Bisfenol-A	Ausente	1 h-6h
Bisfenol-A	TiO <sub>2</sub>	1 h-6h
Bisfenol-A	BaSO <sub>4</sub>	1 h-6h
Bisfenol-A	3% BaSO <sub>4</sub> / TiO <sub>2</sub>	1 h-6h
Bisfenol-A	10% BaSO <sub>4</sub> / TiO <sub>2</sub>	1 h-6h

**Tabla 5** Diferentes pruebas de fotocátalisis realizadas en presencia y ausencia de fotocatalizadores.

### 3.11 ANÁLISIS ESPECTROSCOPICO PARA DETERMINAR LA DEGRADACIÓN DE COMPUESTOS FENÓLICOS

Todas las corridas en el reactor fotocatalítico se realizaron con tiempos de reacción de 1, 2, 3, 4, 5 y 6 horas, posteriormente, la muestra líquida fue extraída mediante una jeringa (Figura 26) y se pasó a través de un filtro de nylon Whatman de 0.45  $\mu\text{m}$  (Figura 27), para separar el catalizador sólido y evitar interferencias en el análisis espectroscópico.



**Figura 26** Jeringa empleada para toma de muestra líquida. Fuente: Autor



**Figura 27 Filtro empleado para separar la fase sólida de la muestra. Fuente: Autor**

La muestra líquida filtrada se llevó al espectrofotómetro UV-Vis, vertiendo las soluciones en cubetas de cuarzo (Figura 28) para realizar el análisis del espectro y determinar la concentración de compuestos fenólicos presente.



**Figura 28 Cubetas de cuarzo para análisis espectroscópico UV-Vis, muestras líquidas. Fuente: Autor.**

Se realizó el estudio de cada sistema reactivo. Los resultados se muestran e interpretan en la siguiente sección

---

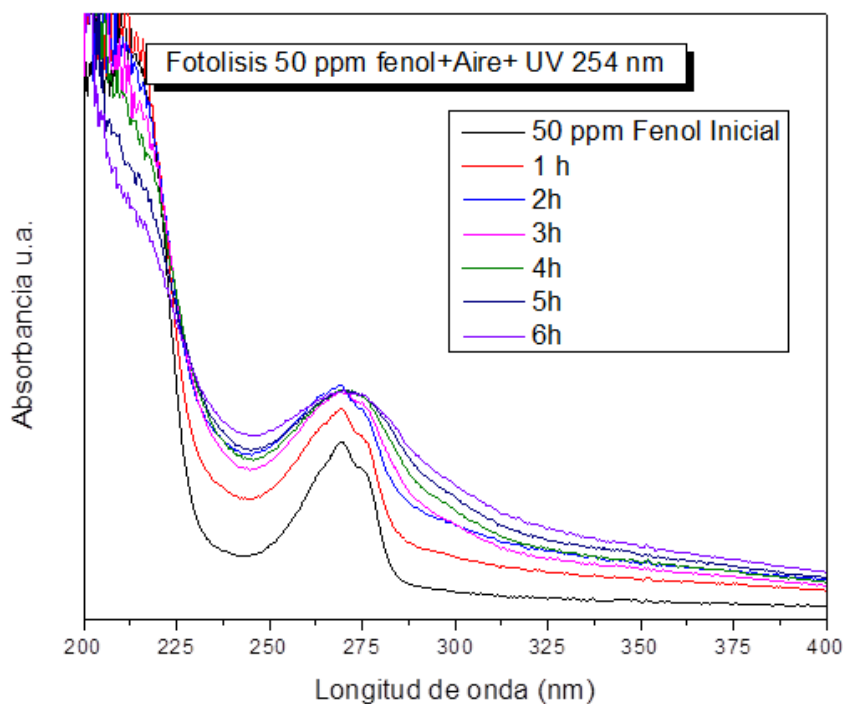
---

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS Y DISCUSIONES

#### 4.1 FOTOLISIS DEL FENOL

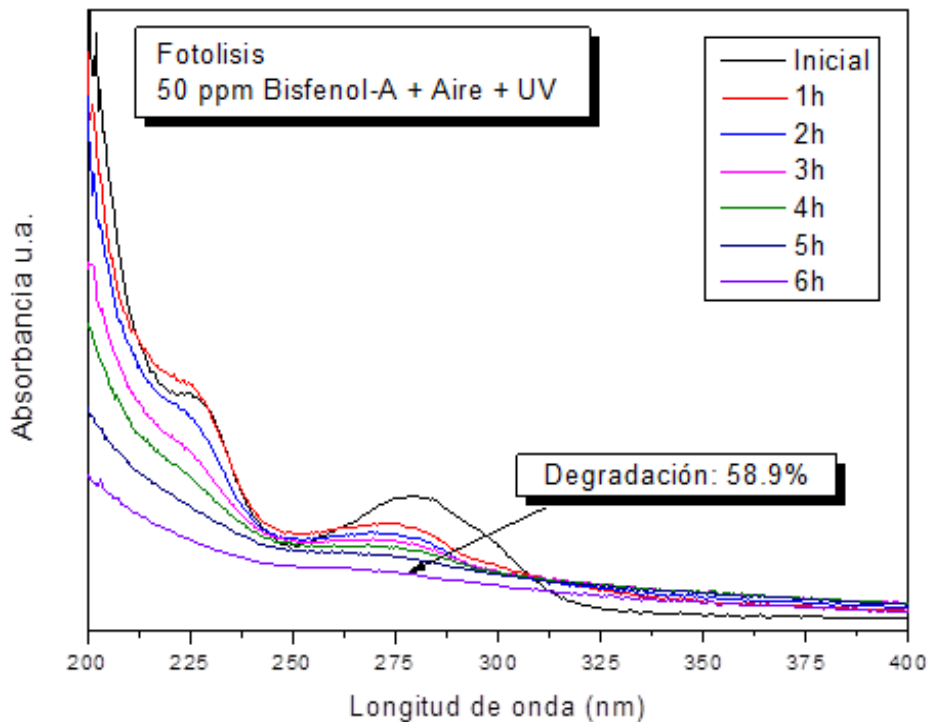
Para el proceso de degradación del Fenol se adicionan 200 mL de una disolución preparada a 50 ppm de Fenol en un reactor fotocatalítico, en presencia de 50 mL de Aire atmosférico como fuente oxidante y radiación UV como fuente de energía fotónica. Los resultados muestran que después de 6 horas de reacción, en la fotolisis de Fenol, se van generando subproductos los cuales son conocidos como: Hidroquinona 288 nm, Pirogalol 265 nm y Resorcinol 272 nm, al irse generando estos subproductos en la degradación del fenol hacen que se vaya incrementando los espectros y no sea apreciable una concentración menor. Los resultados se muestran en la gráfica 4.



**Gráfica 4 Fotolisis del Fenol después de 6 horas de reacción.**

## 4.2 FOTOLISIS DE BISFENOL-A

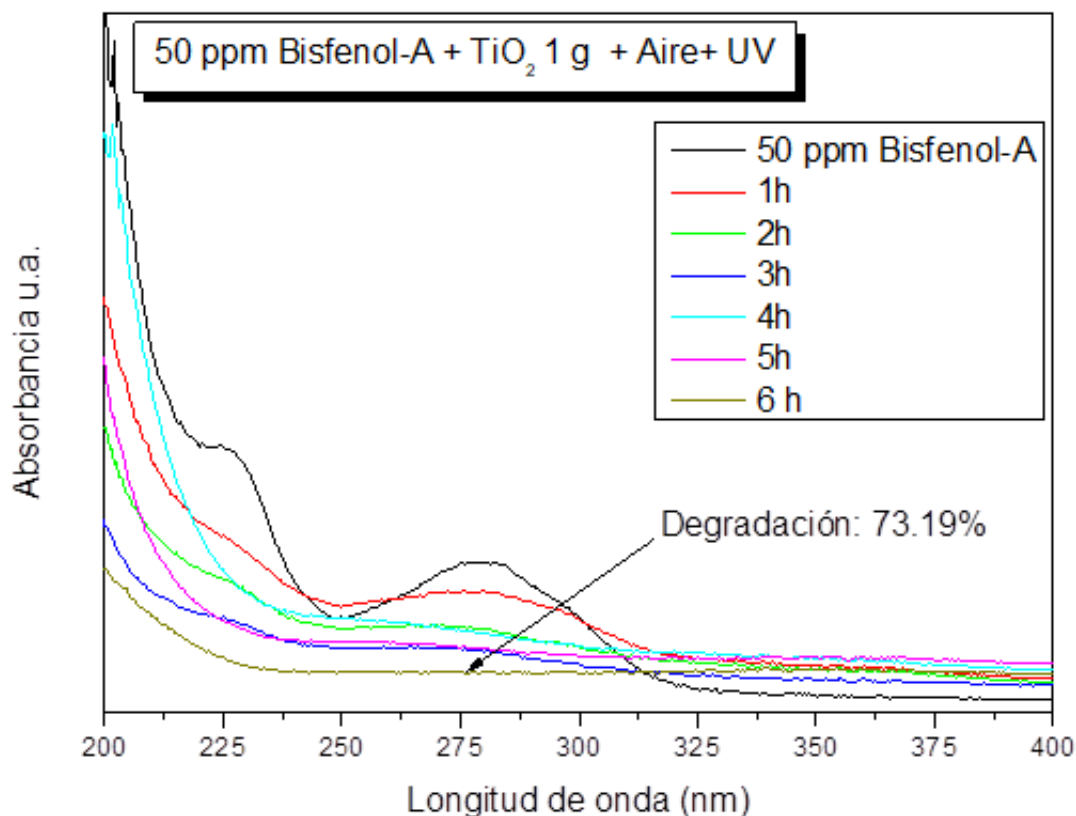
Se realizó el estudio de degradación de 50 ppm de fenol y 50 ppm bisfenol-A mediante la nueva Tecnología de Oxidación Avanzada. La fotólisis, en ausencia de catalizador, en presencia de oxígeno y radiación UV, este análisis se tomará de referencia o prueba blanco, para ello es sometido al proceso fotocatalítico en presencia de 50 mL de aire atmosférico, el cual es introducido al reactor mediante una bomba de pecera con un flujo regulado de 50 mL/min, el oxígeno inyectado al medio se utilizará como fuente oxidante. La radiación UV como fuente de energía fotónica. Los resultados muestran que después de 6 horas de reacción, se degradó el 58.9 % del Bisfenol-A (Gráfica 5).



Gráfica 5 Degradación de Bisfenol-A en ausencia de catalizadores.

### 4.3 DEGRADACIÓN DE BISFENOL-A EN PRESENCIA DE TiO<sub>2</sub>

Para el proceso de degradación del Bisfenol-A se adicionan 200 mL de una disolución preparada a 50 ppm de Bisfenol-A en un reactor fotocatalítico, utilizando 1 g de TiO<sub>2</sub>, en presencia de 50 mL de Aire atmosférico como fuente oxidante y radiación UV como fuente de energía fotónica. Los resultados muestran que después de 6 horas de reacción se lleva a cabo la degradación del Bisfenol-A en 73.19 %, producido únicamente por el semiconductor de TiO<sub>2</sub>. Los resultados se muestran en la gráfica 6.

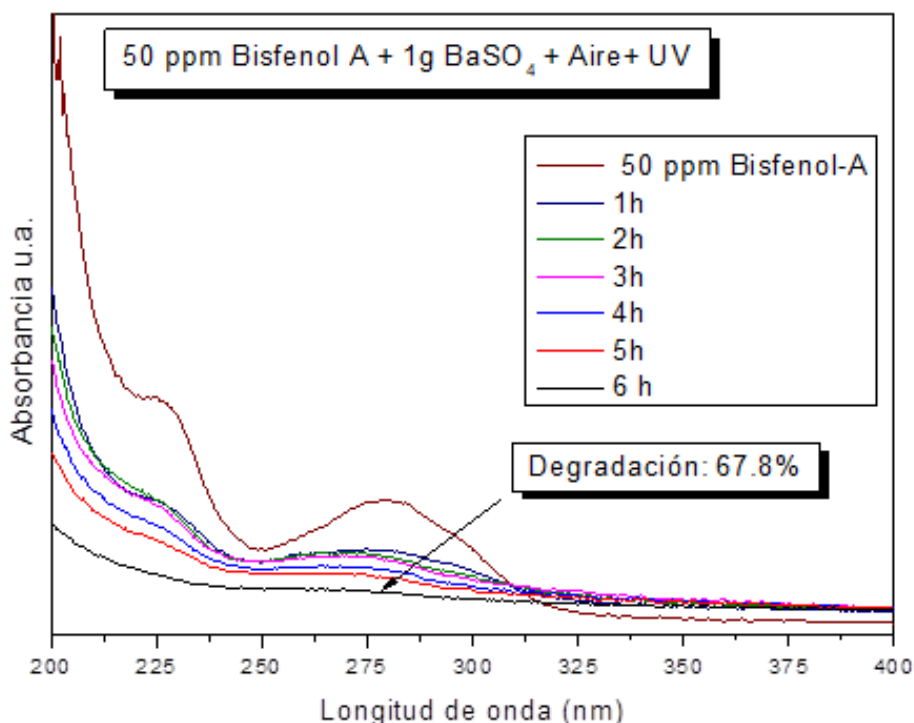


Gráfica 6 Degradación de bisfenol-A en presencia de TiO<sub>2</sub> tras 6 horas de reacción

#### 4.4 DEGRADACIÓN DEL BISFENOL-A EN PRESENCIA DE BaSO<sub>4</sub>

Para el proceso de degradación del Bisfenol-A se adicionan 200 mL de una disolución preparada a 50 ppm de Bisfenol-A en un reactor fotocatalítico, utilizando 1 g de BaSO<sub>4</sub>, en presencia de 50 mL de Aire atmosférico como fuente oxidante y radiación UV como fuente de energía fotónica. Los resultados muestran que después de 6 horas de reacción se desmineraliza el Bisfenol-A en un 67.8 %.

Los resultados se muestran en la gráfica 7.

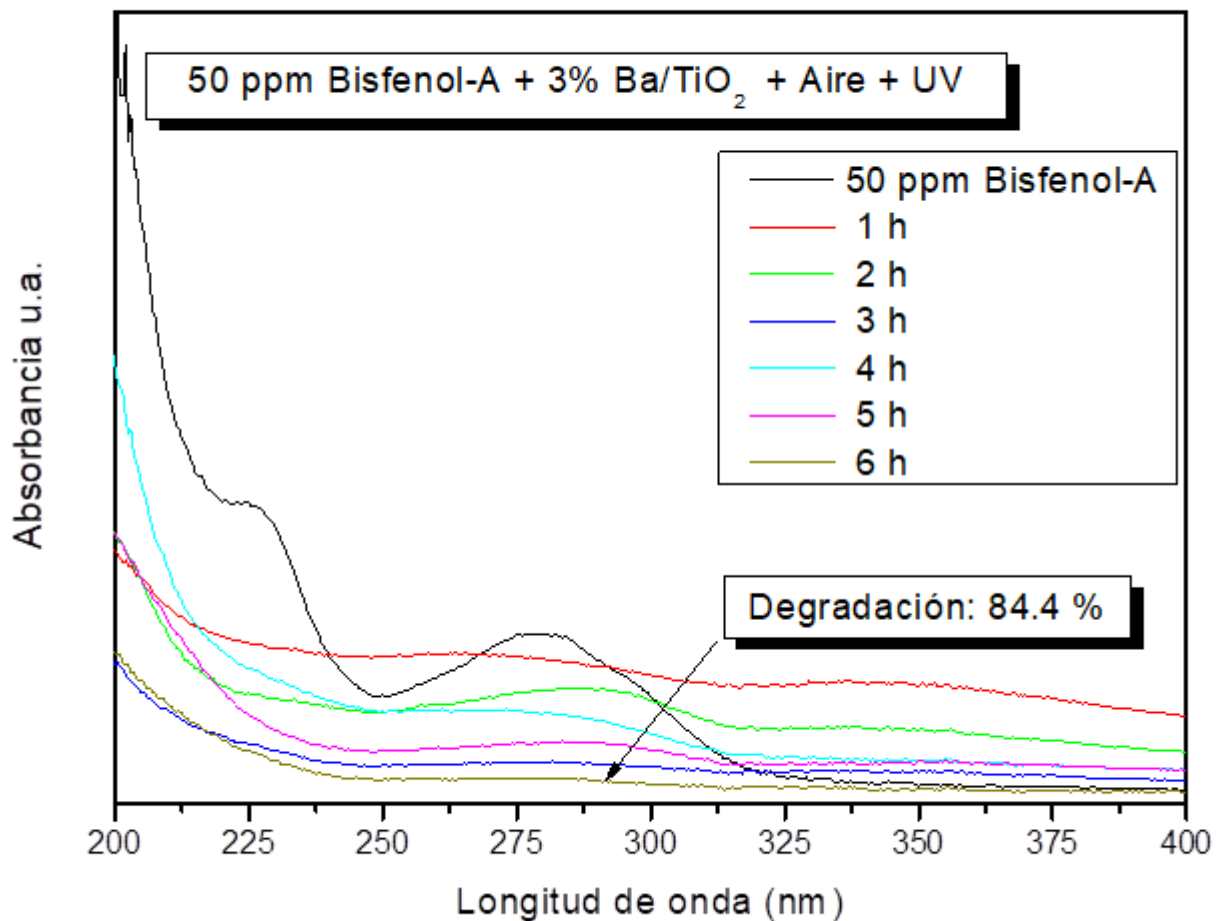


Gráfica 7 Degradación del Bisfenol-A en presencia del catalizador de BaSO<sub>4</sub> por el método de fotocatalisis, después de 6 horas de reacción

#### 4.5 DEGRADACIÓN DEL BISFENOL-A UTILIZANDO AL CATALIZADOR 3% BaSO<sub>4</sub> / TiO<sub>2</sub>

Para el proceso de degradación del Bisfenol-A se adicionan 200 mL de una disolución preparada a 50 ppm de Bisfenol-A en un reactor fotocatalítico,

utilizando 1 g de 3% BaSO<sub>4</sub> / TiO<sub>2</sub>, en presencia de 50 mL de Aire atmosférico como fuente oxidante y radiación UV como fuente de energía fotónica. Los resultados muestran que después de 6 horas de reacción se desmineraliza el Bisfenol-A en un 84.4 %. Los resultados se muestran en la gráfica 8.



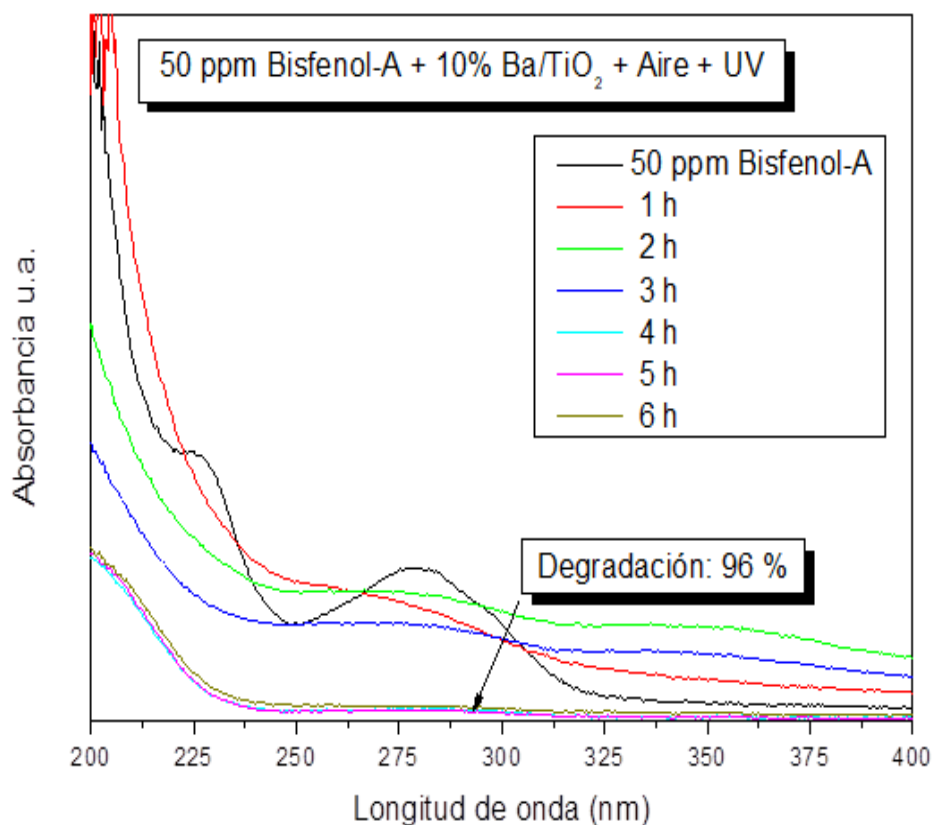
Gráfica 8 Degradación de Bisfe-A en presencia del catalizador 3% BaSO<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub> en un período

#### 4.6 DEGRADACIÓN DEL BISFENOL-A UTILIZANDO AL CATALIZADOR 10% BaSO<sub>4</sub> / TiO<sub>2</sub>

Para el proceso de degradación del Bisfenol-A se adicionan 200 mL de una disolución preparada a 50 ppm de Bisfenol-A en un reactor fotocatalítico, utilizando 1 g de 10% BaSO<sub>4</sub> / TiO<sub>2</sub>, en presencia de 50 mL de Aire atmosférico



como fuente oxidante y radiación UV como fuente de energía fotónica. Los resultados muestran que después de 6 horas de reacción se desmineraliza el Bisfenol-A en un 96.4 %. Los resultados del proceso de degradación se muestran en la gráfica 9.



**Gráfica 9** Degradación de Bisfenol-A en presencia del catalizador 10% BaSO<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub> en un período

---

---

## **CAPÍTULO 5**

### **CONCLUSIONES**

1. El desarrollo del experimento permite identificar potenciales fotocatalizadores que promueven la degradación de compuestos fenólicos, como lo son aquellos impregnados con Pd, que, por la inviabilidad de los costos, fue imposible realizar el estudio pertinente. Sin embargo, cabe resaltar su potencial para posibles estudios futuros.
  
2. El experimento permite concluir que la impregnación de diferentes materiales potencia la capacidad oxidativa del catalizador obtenido, esto se observa en el fotocatalizador desarrollado de BaSO<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub> en el que ambos compuestos por separado mostraron un margen de degradación de los compuestos fenólicos en menor grado, sin embargo, al impregnar ambos catalizadores, se obtuvo un catalizador que facilita la degradación del contaminante cerca de su totalidad.
  
3. Por otra parte, al proveer al sistema con las características necesarias se puede promover una alta eficiencia para la generación de pares electrón huecos, los que son cruciales en la oxidación de la materia orgánica.
  
4. Durante la experimentación y síntesis de fotocatalizadores se obtuvo un compuesto prometedor, económicamente viable, amigable con el medio ambiente y no repercute en la salud humana, resulta eficaz en la degradación de Bisfenol-A, será cuestión de experimentar a mayor escala, aumentando la concentración del contaminante o el volumen de reacción debido a los resultados obtenidos los cuales prometen ser una posible solución a una de las mayores problemáticas que invaden la vida cotidiana de la sociedad.

## REFERENCIAS

Lepe-Zapata, A. (2002). El planeta, la vida, el agua y la ciudad. *Urbano*. Vol.5, No. 6, pp 21-27

Fernández-Cirelli, A. (2012). El agua: un recurso esencial. *Química Viva*. Vol. 11, No. 3, pp. 147-170

Molina-Salgado, R. (2021). Importancia del agua y las problemáticas socio-ambientales. Gobierno de México. Disponible en: <https://www.gob.mx/semarnat/educacionambiental/es/articulos/importancia-del-agua-y-las-problematicas-socio-ambientales?idiom=es#:~:text=El%20agua%20es%20un%20bien,esencial%20para%20toda%20la%20biosfera>. Consultado el 21 de febrero de 2024

Rojas, O. (2024). ¿Escasez global? Estos son los países que se están quedando sin agua. *Excelsior*. Disponible en: <https://www.excelsior.com.mx/global/escasez-global-paises-estan-quedando-sin-agua/1634492> Consultado el 21 de febrero de 2024

Zamora, I. & Sánchez, D. (2020). Panorama y perspectivas del agua en México, 2019-2024. *Cuaderno de Investigación No. 62*. Instituto Belisario Domínguez Senado de la República. pp 40-42.

"Día Cero" de agua para CDMX y Edomex. Cutzamala podría quedar vacío esta fecha, según CONAGUA. (2024). *El Financiero*. Disponible en: <https://www.elfinanciero.com.mx/cdmx/2024/02/01/llego-el-dia-cero-a-cdmx-y-edomex-presas-del-cutzamala-se-estan-quedando-sin-agua/> Consultado el 21 de febrero de 2024

Esparza, M. (2014). La sequía y la escasez de agua en México. Situación actual y perspectivas futuras. *Secuencia*. No.89

Guzmán-Colis, G., Ramírez-López, E., Thalasso, F., Rodríguez-Narciso, S., Guerrero-Barrera, A. & Avelar-González, F. (2011). Evaluación de contaminantes en agua y sedimentos del río San Pedro en el Estado de Aguascalientes.

Gómez, L. & Sarria, V. (2009). Fotodegradación heterogénea de bisfenol A en agua con dióxido de titanio. *Quím. Nova*. Vol. 32, no. 5.

Santiago. (2003). Contaminación por agentes químicos. *Anales del Sistema Sanitario de Navarra*. Vol. 26, Supl. 1

Abreu-Cuadra, R., Perozo-Cuicas, J., Martínez-Bracho, C. & Morán-Guillen, H. (2016). Tratamiento de aguas residuales fenólicas de refinería por métodos electroquímicos. *Multiciencias*. Vol. 16, No. 3, pp. 239-247

Velázquez-Chávez, L., Ortiz-Sánchez, I., Chávez-Simental, J., Pámanes-Carrasco, G., Carrilo-Parra, A. & Pereda-Solís, M. (2022). Influencia de la contaminación del agua y el suelo en el desarrollo agrícola nacional e internacional.

Guadarrama-Tejas, R., Kido-Miranda, J., Roldan-Antunez, G. & Salas-Salgado, M. (2016). Contaminación del agua. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*. 2-5:1-10.

Pinos-Vélez, V., Esquivel- Hernández, G., Cipriani- Avila, I., Mora- Abril, E., Cisneros, J., Alvarado, A. & Abril- Ulloa, V. (2019). Emerging Contaminants in Trans- American Waters. *Ambiente & Agua- An Interdisciplinary Journal of Applied Science*. doi:10.4136/ambi-agua.2436

Gil, M., Soto, M., Usma, J. & Gutiérrez, O. (2012). Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. *Producción + Limpia*. Vol. 7. No. 2. pp. 52-73

Juan-García, A., Gallego, C., & Font, G. (2015). Toxicidad del Bisfenol A: Revisión. *Revista de Toxicología*, Vol. 32, No. 2, pp.144-160.

Lista de Productos con BPA. *Facts About BPA*. Disponible en: <https://es.factsaboutbpa.org/bpa-overview/products-bpa/> Consultado el 20 de febrero de 2024

González, V. (2019). El 90% de los tickets de la compra contienen bisfenol A. Muy Interesante. Consultado el 01 de febrero de 2024. Disponible en: <https://www.muyinteresante.es/salud/27729.html>

Jiménez-Cisneros, B.E. La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada. *México: Limusa. Colegio de Ingenieros Ambientales de México, A.C., Instituto de Ingeniería de la UNAM y FEMISCA, 2001.*

NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. Disponible en: [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022#gsc.tab=0)

NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. Disponible en: [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022#gsc.tab=0)

Islas, P., Valenzuela, J., Jerardino, M. & Mayer, H. (1987). Intoxicación aguda por fenoles. *Revista Chilena de Pediatría*. Vol. 58 No. 5 pp. 402-404

Tamayo, F., Agaméz, J., Aparicio, D. & Márquez, J. (2022). Bisfenol A y efectos de disrupción endocrina en humanos y animales: Revisión sistemática. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*. Vol 13, No. 2 pp: 175-200.

DOI: <https://doi.org/10.22490/21456453.4691>

Reynolds, K.A. (2001). Tratamiento de aguas residuales en Latinoamérica. *Latinoamérica*, 48-49

Moctezuma, E., López-Barragán, M. & Zermeño-Resendiz, B. (2016). Rutas de reacción para la degradación fotocatalítica de soluciones de fenol bajo diferentes condiciones experimentales. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. Vol.15 No.1 pp. 129-137

Santiago-Junior, A., de Sousa, J., Benanchour, M. & Rojas, L. (2011). Oxidación Húmeda de Fenoles con Catalizadores Fe-CeO<sub>2</sub>, K-MnO<sub>2</sub>/CeO<sub>2</sub>/Paligorsquita y Fe/Paligorsquita. *Información Tecnológica*. Vol. 22, no. 3, pp. 55-68

Pardo-Díaz, S., Rojas-Tapias, D., Roldan, F., Brandao, P. & Almansa-Manrique, E. (2017). Biodegradación de fenol en aguas tratadas de la industria petrolera para re-uso en cultivos agrícolas.

Ainhoa, R. C., Chica, E. L. & Peñuela, G. A. (2014). Aplicación del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de origen petroquímico. *Ingeniería y Competitividad*. Vol. 16, no. 2 pp. 211-233.

Vázquez- Aranda, A., Iannacone, J., Peña, A. & Romero- Echeverría, L. (2022). Tratamiento de lixiviados por oxidación avanzada: Una revisión. *Campus*. Vol. 27 no. 33 pp. 55-74. <https://doi.org/10.24265/campus.2022.v27n33.04>

Mazo, Paula C., Restrepo, Gloria M., Ríos, Luis A. & Marín, Juan M. (2008). Optimización de la Producción de Alquil Ésteres a partir de Aceite de Palma, empleando la Metodología de Superficie de Respuesta. *Información Tecnológica*, Vol. 19(5), pp. 37-48. <https://doi:10.1612/inf.tecnol.3954it.07>

Fierro-González, Juan C. (2021). Entre la comprensión y la predicción del funcionamiento de catalizadores sólidos. *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, 14(26), 00004. pub 03 de marzo de 2021. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2021.26.69645>

Rodríguez-Gregorich, Alicia, & Ramos-Sánchez, Luis B. (2011). CATÁLISIS HETEROGÉNEA: PREPARACIÓN DE CATALIZADORES SÓLIDOS (PARTE I). *Tecnología Química*, 31(2), 226-232. Recuperado en 22 de junio de 2023, de [http://scielo.sld.cu/scielo.phpscript=sci\\_arttext&pid=S222461852011000200009&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.phpscript=sci_arttext&pid=S222461852011000200009&lng=es&tlng=es).

García- Cruz, I. (1991). Síntesis y caracterización de catalizadores Pt/MgO por el proceso de sol- gel. [Tesis de Maestría en Química]. U.A.M

Guzmán- Jiménez, M. H. (2018). Síntesis de nanorreactores yolk- shell asistida mediante el método hidrotermal. [Tesis Doctoral en Ciencias en Física de Materiales]. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.

Cortés- Ortiz, W. G., Guerrero- Fajardo, C. A. (2021). Preguntas orientadoras para la síntesis de catalizadores y su uso en reacciones de oxidación catalítica selectiva. *Revista UIS Ingenierías*. Vol. 20, núm. 1, pp. 177-196.

Zamora, L. E. (2020). Estudio del semiconductor magnético ZnO dopado con Fe obtenido por aleamiento mecánico. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* 44(172), pp. 716-728 doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1130>

Jaime- Acuña, O. E. (2010). Obtención y caracterización de nanopartículas semiconductoras y/o catiónicas en zeolitas sintéticas tipo mor

para aplicaciones fotocatalíticas. [Tesis de Maestría en Ciencias]. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.

Valcárcel, J., González, H. & Valcárcel, D. Espectroscopia. Fundamento de la resonancia magnética nuclear. (2008). *Entornos*. No. 21. Universidad Surcolombiana. Vicerrectoría de Investigación y Proyección Social. Pp. 89-94.

Maldonado-Cubas, J., Castañas-Pimentel, R., Martínez-Merlín, I. & Martín-Martínez, E. (2018). La espectroscopia UV-Vis en la evaluación de la viabilidad de células de cáncer de mama. *Latin American Journal of Physics Education*. Vol. 12, no. 2

García, R. (2018). Instrumentos que revolucionaron la química: la historia del espectrofotómetro. *Avances en Química*. Vol. 13, no. 3, pp. 79-82