



BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
COLEGIO DE INGENIERÍA AMBIENTAL

“APLICACIÓN DE NANOMATERIALES DEL TIPO M/TiO_2 ,
PARA LA ELIMINACIÓN DE COV'S POR MEDIO DE
TÉCNICAS DE OXIDACIÓN AVANZADA”

TESIS PROFESIONAL
PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIATURA EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTA

CONCEPCION TOXTLE SALAZAR

DIRECTOR DE TESIS

M.I. ÁNGEL SILVETI LOEZA

CODIRECTOR DE TESIS

M.C. RICARDO MORALES JUÁREZ



PUEBLA, PUE. DICIEMBRE 2024

Registro de Tema de Tesis



BUAP

Oficio No. FIQ/AC/280/2023
Asunto: Registro de Tema de Tesis.

C. TOXTLE SALAZAR CONCEPCION
PASANTE DE LA LICENCIATURA EN
INGENIERÍA AMBIENTAL
P R E S E N T E:

Por medio del presente me permito informarle, de la aprobación del Registro de Tema de Tesis de la Licenciatura en Ingeniería Ambiental cuyo título es el siguiente:

“APLICACIÓN DE NANOMATERIALES DEL TIPO M/TiO₂, PARA LA ELIMINACIÓN DE COV's POR MEDIO DE TÉCNICAS DE OXIDACIÓN AVANZADA”

Con el siguiente contenido:

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1	ANTECEDENTES
CAPÍTULO 2	METODOLOGÍA
CAPÍTULO 3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CONCLUSIONES
BIBLIOGRAFÍA

Director de Tesis: M.I. Ángel Silveti Loeza.

Lo cual me permito comunicarle para su conocimiento y fines consiguientes aclarando que la vigencia de este tema será **UNICAMENTE POR UN AÑO**.

Atentamente

“Pensar Bien, Para Vivir Mejor”

H. Puebla de Z., a 15 de Diciembre de 2023

Dra. Valeria Jordana González Coronel
Secretaría Académica

C.c.p. Director de Tesis: M.I. Ángel Silveti Loeza
C.c.p. Archivo.



Facultad
de Ingeniería
Química

Av. San Claudio s/n, Col. San
Manuel, Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72590
01 (222) 229 55 00
Exts. 7250 y 7251



Aprobación de Registro de Tesis

- Ingeniería Química ()
- Ingeniería Ambiental (x)
- Ingeniería en Alimentos ()
- Ingeniería en Materiales ()

Al C. Sustentante CONCEPCION TOXTLE SALAZAR

De acuerdo a la presentación y revisión del protocolo de tesis:

"APLICACIÓN DE NANOMATERIALES DEL TIPO M/TiO_2 PARA LA ELIMINACIÓN DE COV's POR MEDIO DE TÉCNICAS DE OXIDACIÓN AVANZADA"

se aprueba el trámite oficial para el registro de tema correspondiente.

Comisión revisora

	Firma
Catedrático: <u>MIA. Miriam Vega Hernández</u>	<u></u>
Catedrático: <u>Dr. Marco Antonio Marín Castro</u>	<u></u>
Catedrático: <u>MI. Ángel Silveti Loeza</u>	<u></u>
Catedrático: <u>M.C. Ricardo Morales Juárez</u>	<u></u>

H. Puebla de Zaragoza a 04 de Diciembre de 2023.



PRESENTACIONES EN EVENTOS CIENTÍFICOS

Morales Santiago D. O., Gómez Uribe I., Viveros Ramos V., Toxtle Salazar C., Silveti Loeza A. Soriano Moro J.G., Vega Hernández M., Percepción de estudiantes de Facultad de Ingeniería Química de la BUAP en la implementación de los ODS de la agenda 2030. En el XX Congreso Internacional y XXVI Congreso Nacional de Ciencias Ambientales, realizado del 14 al 16 de junio de 2023

Toxtle Salazar C., Silveti Loeza A., Morales Juárez L. R., Meraz Melo M. A., Vázquez-Cuchillo O. UTILIZACIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE Au y Pd EN LA FOTO REDUCCIÓN DE VOC's. En el 4° Congreso Internacional de Estudiantes de Posgrado en Ingeniería Química (CIEPIQ 4), realizado el 14 de noviembre de 2024.

Dedicatoria

*A mi querida madre, **Alberta Salazar**, quien ha sido mi más ferviente aliento y apoyo moral en la búsqueda constante de superación. Su inquebrantable apoyo ha sido mi refugio en la adversidad, demostrando que su amor y su capacidad de adaptación es la fuerza que impulsa cada logro.*

*A mi querido padre, **Francisco Toxtle**, guía de mis pasos en el crecimiento de mi persona, siendo un norte de sabiduría y constancia. Su ejemplo diario, cumpliendo con su trabajo, me demuestra que la perseverancia y la fuerza de voluntad son las claves de cada éxito.*

La resiliencia demostrada de ambos sin importar la dificultad del desafío ha sido mi fuerza motriz. Su apoyo incondicional ha sido el cimiento sobre el cual he construido gran parte de mis logros, sin ustedes nada hubiese sido posible.

*A mis queridos hermanos, **Carlos, Víctor, Eduardo y Yazmin**, por estar siempre a mi lado, por ser parte de mi vida. Cada uno de ustedes a diario, de manera única, me enseñan valiosas lecciones, las cuales aprecio y considero esenciales para mi crecimiento personal. Su influencia y cariño ha dejado una marca indeleble en mi camino.*

Gracias por todo y, por tanto. Me siento muy afortunada de tenerlos como familia.

Este hito también les pertenece.

AGRADECIMIENTOS

A la **MIA. Miriam Vega Hernández** por darme catedra e impulsar mi desarrollo como estudiante siendo fuente fundamental de motivación, permitiéndome ampliar mi horizonte académico y alcanzar nuevas metas.

Al **MI. Ángel Silveti Loeza** por ser un pilar de inspiración, un ejemplo de ética y moral, una fuente de conocimiento, un faro que ilumino mi camino e impulso fundamentalmente la realización de esta tesis.

Al **Dr. Marco Antonio Marín Castro** por su compromiso y dedicación al compartir su conocimiento como catedrático, siempre con paciencia y sabiduría. Inspirándome a superar mis propios límites.

Al **Dr. Odilón Vázquez Cuchillo** por su dedicación constante y su disposición para colaborar han marcado una diferencia significativa en mi desarrollo, brindándome herramientas para enfrentar con éxito nuevos desafíos y avanzar hacia mis objetivos con seguridad.

Al **Dr. Ricardo Morales Juárez** Por su guía experta, sus valiosos comentarios y su orientación perspicaz, que han enriquecido mi aprendizaje y han impulsado significativamente mi crecimiento, siendo un soporte fundamental en cada etapa del desarrollo de esta tesis.

A la **Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP)** por brindarme el espacio y los recursos necesarios para desarrollar mi formación académica.

Al **Instituto Tecnológico de Puebla (ITP) y al Laboratorio de Posgrados** por el apoyo otorgado, el uso de sus instalaciones y por permitirme ser parte de su equipo de trabajo para el desarrollo de esta tesis.

A mi **Familia y amigos** les dedico un agradecimiento especial. Que va más allá de las palabras.

A todos los que contribuyeron directa o indirectamente en este trabajo. *Muchas gracias.*

Tabla de Contenido

Registro de Tema de Tesis	i
Aprobación de Registro de Tesis CPO3	ii
PRESENTACIONES EN EVENTOS CIENTÍFICOS	iii
Dedicatoria	iv
AGRADECIMIENTOS	v
Tabla de Contenido	I
Índice de Figuras	III
Índice de Tablas	IV
Índice de Ecuaciones	IV
Glosario	V
Resumen	IX
Abstract	X
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II. ANTECEDENTES	4
2.1. Cambio Climático	4
2.1.1. Cambio Climático en México	6
2.2. Historia y Evolución del Calidad del Aire	7
2.3. Estudio sobre la Calidad del Aire	8
2.3.1. Historia y Evolución del Estudio sobre la Calidad del Aire en México	8
2.3.2. Primeros Estudios y Reconocimiento de la Contaminación Atmosférica en México	9
2.3.3. Historia y Evolución del Estudio sobre la Calidad del Aire en Puebla	12
2.3.4. Redes de Monitoreo	15
2.4. Compuestos Orgánicos Volátiles	20
2.4.1. El benceno: Historia, Estructura y Propiedades	23
2.4.2. La Evolución de la Comprensión Estructural del Benceno	23
2.4.3. La Estructura Molecular y la Deslocalización Electrónica	25
2.4.4. Confirmación Experimental y Reactividad	26
2.5. Ozono troposférico	27
2.5.1. Antecedentes del Ozono Troposférico	27
2.5.2. Historia y Origen del Descubrimiento del Ozono Troposférico	27
2.5.3. Mecanismos de Formación y Descomposición del Ozono Troposférico	30
2.6. Impacto Ambiental y Salud Humana	34
2.7. Antecedentes del Ozono Troposférico en México	34
2.7.1. Historia del Estudio del Ozono Troposférico en México	34

2.7.2.	Mecanismos de Formación y Descomposición del Ozono Troposférico en México _____	35
2.8.	Nanopartículas _____	35
2.8.1.	Nanopartículas Monometálicas. Impregnadas con Óxido de Titanio _____	37
2.9.	Sobre el Método Sol-Gel _____	38
CAPÍTULO III. FUNDAMENTACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN _____		41
3.1.	Planteamiento del Problema _____	41
3.2.	Hipótesis _____	45
3.3.	Objetivos _____	45
3.3.1.	Objetivo General _____	45
3.3.2.	Objetivos Específicos _____	45
3.4.	Justificación _____	46
CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA _____		52
4.1.	Generalidades _____	52
4.2.	Métodos de Preparación _____	53
4.2.1.	Método Sol-Gel _____	53
4.2.2.	Síntesis del TiO ₂ utilizando diferentes catalizadores de hidrólisis. _____	55
4.2.3.	Preparación de los catalizadores. _____	56
4.3.	Condiciones Experimentales, Preparación de Nanopartículas Monometálicas. _____	57
4.3.1.	Preparación de dispersiones coloidales de nanopartículas monometálicas de Au y Pd. ____	58
4.3.2.	Impregnación de Partículas monometálicas de Pd y Au coloidal. _____	58
4.3.3.	Características del sistema de reacción. _____	59
4.4.	Técnicas de Caracterización _____	61
4.4.1.	Caracterización estructural _____	61
4.4.2.	Caracterización óptica de los materiales _____	69
CAPÍTULO V. RESULTADOS Y CONCLUSIONES _____		77
5.1.	Resultados y Discusión _____	77
5.1.1.	Espectroscopia de Ultravioleta-Visible (Uv-Vis) _____	77
5.1.2.	Difracción de Rayos X (XRD) _____	78
5.1.3.	Microscopía Electrónica de Transmisión. (TEM) _____	80
5.1.4.	Microscopia Electrónica de Barrido usado para TiO ₂ , _____	81
5.1.5.	Análisis por Dispersión de Energía de Rayos X _____	82
5.1.6.	Monitoreo de Actividad de Reacción _____	86
5.2.	Conclusiones _____	88
CAPÍTULO VI. BIBLIOGRAFÍA _____		a

Índice de Figuras

Figura 1. Representación estructural del benceno _____	24
Figura 2 Molécula de benceno detallada según sus enlaces . _____	26
Figura 3. Curva de la evolución del ozono superficial (ppbv) en Europa _____	30
Figura 4. Presupuesto anual simplificado para el ozono troposférico _____	33
Figura 5. Estructura atmosférica dividida por capas. _____	46
Figura 6. Esquema del proceso de síntesis de TiO_2 mediante el método sol-gel. _____	56
Figura 7. Esquema preparación de nanopartículas monometálicas, mediante el Método Reflujo De Soluciones Alcohólicas _____	57
Figura 8. Montaje del reactor experimental. _____	59
Figura 9. Diagrama de flujo del sistema de reacción, utilizado en este trabajo _____	60
Figura 10. Difracción de Bragg, producida por un cristal. _____	63
Figura 11. Difractómetro de rayos X _____	64
Figura 12. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) _____	66
Figura 13. Esquema de la configuración de un Microscopio Electrónico De Transmisión (MET). _	68
Figura 14. Espectro de reflectancia difusa. _____	73
Figura 15. Función Kubelka-Munk en función de la energía. _____	74
Figura. 16. Atenuación de un haz de radiación por una disolución absorbente _____	75
Figura 17. Variación en la coloración de la solución áurica _____	77
Figura 18. Formación del plasmón de resonancia superficial (SPR) _____	78
Figura 19. Difractograma de rayos X de las nanopartículas de Au _____	79
Figura 20. Micrografía de microscopia electrónica de Transmisión de las muestras de nanopartículas de Au _____	80
Figura 21. Micrografía de Microscopia electrónica de barrido de TiO_2 sintetizados por la técnica de sol-gel. _____	81
Figura. 22. Análisis elemental (EDS) de TiO_2 , con nanopartículas de Au. _____	82
Figura 23. Análisis elemental (EDS) de TiO_2 , con nanopartículas de Pd. _____	84

Figura 24. Eliminación de COV's en % de desaparición de benceno.....	86
Figura 25. Porcentaje de transformación de Benceno a CO ₂ y CO.	87

Índice de Tablas

Tabla 1. Conceptos básicos de AQI para el ozono y la contaminación por partículas.	16
Tabla 2. Estaciones de Monitoreo Atmosférico	19
Tabla 3. Composición del aire seco a nivel del mar. hasta alturas de unos 80 km.	48
Tabla 4. Emisiones por Fuente Fijas.	50
Tabla 5. EDS análisis elemental de TiO ₂ , con Au.	83
Tabla 6. EDS análisis elemental de TiO ₂ , con Pd.	85

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1. La protonación de un oxoanión	53
Ecuación 2. Desprotonación de un ion.....	54
Ecuación 3. Hidrólisis de precursores orgánicos.....	54
Ecuación 4. Etapa de condensación olación.....	54
Ecuación 5. Etapa de condensación oxolación, salida de una molécula de agua	54
Ecuación 6. Etapa de condensación oxolación, salida de una molécula de alcohol.....	54
Ecuación 7. Porcentaje de conversión	60
Ecuación 8. Ley de Bragg.	62
Ecuación 9. Postulado de De Broglie.	68
Ecuación 10. Función de corrección de Kubelka-Munk Postulado.....	72
Ecuación 11. Ley de Beer.....	76

Glosario

Adsorción. Fenómeno por el cual moléculas de un gas o de un líquido se fijan dentro de una fina capa superficial de determinadas sustancias sólidas (llamadas por esto absorbentes), como el carbón animal, las arcillas activadas, la alúmina, la bauxita activada, etc. La adsorción puede ser de naturaleza física o química.

Aerosol. Suspensión en un medio gaseoso de partículas sólidas, líquidas o ambas con velocidad de caída despreciable.

Antropogénico. Relativo al hombre; de origen humano. Se puede aplicar a las concepciones centradas en la problemática humana, soslayando de los efectos, problemas y daños que causan al ambiente.

Aromáticos, Compuestos. Familia de hidrocarburos de tipo cíclico, de fórmula general $C_6H_nX_m$. Se caracterizan por formar una cadena cerrada en forma hexagonal denominada anillo bencénico y poseer en su estructura tres dobles ligaduras. Estos compuestos, al igual que algunos hidrocarburos parafínicos, se consideran como tóxicos principalmente por su nula solubilidad en el agua, y de ahí su permanencia en el ambiente y su difícil biodegradación.

Atmósfera. Capa de aire que circunda la tierra y que se extiende alrededor de 100 km por encima de la superficie terrestre. Esta estructura física está formada por una mezcla de 78% de nitrógeno, 21% de oxígeno y 1% de varios gases; como el argón, el neón, el bióxido de carbono y vapor de agua entre otros compuestos inorgánicos.

Cancerígeno. Sustancia o energía capaz de inducir crecimientos malignos (cáncer) en los seres vivos.

Compuestos Orgánicos Volátiles. Incluye un amplio grupo de sustancias individuales como los hidrocarburos (alcanos, alquenos y aromáticos), compuestos halogenados (por ejemplo, tricloroetileno) y compuesto oxigenados (alcoholes, aldehídos y cetonas). Todos son compuestos orgánicos de carbono y poseen una volatilidad suficiente para existir como vapores en la atmósfera.

Contaminación. Presencia de materia o energía cuya naturaleza, ubicación o cantidad produce efectos ambientales indeseables. Alteración hecha o inducida por el hombre a la integridad física, biológica, química y radiológica del medio ambiente.

Contaminación atmosférica. Es la presencia en el aire de uno o más contaminantes, o bien la combinación de éstos.

Contaminante. Materia o sustancia, sus combinaciones o compuestos, derivados químicos o biológicos (desechos orgánicos, sedimentos, ácidos, bacterias y virus, nutrientes, aceite y grasa) así como toda forma de energía, radiaciones ionizantes, vibraciones o ruido que, al incorporarse y actuar en la atmósfera, aguas, suelos, flora, fauna o cualquier elemento del ambiente alteran o modifican su composición o afectan a la salud humana.

Contaminante del Aire. Cualquier sustancia en el aire que, en alta concentración, puede dañar al hombre, animales, vegetales o materiales. Puede incluir casi cualquier compuesto natural o artificial de materia flotante susceptible de ser transportado por el aire. Estos contaminantes se encuentran en forma de partículas sólidas, gotas líquidas, gases o combinadas. Generalmente se clasifican en los emitidos directamente por la fuente contaminante o contaminantes primarios y los producidos en el aire por la interacción de dos o más contaminantes primarios, o por la reacción con los compuestos normales de la atmósfera.

Contaminante atmosférico criterio. Contaminantes atmosféricos que afectan el bienestar y la salud humana, los cuales cuentan con criterios para establecer o revisar límites máximos permisibles. Los contaminantes considerados son ozono (O_3), dióxido de azufre (SO_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO_2) y partículas suspendidas menores a 10 micrómetros (PM10) y 2.5 micrómetros (PM2.5).

Emisión. Descarga de contaminantes a la atmósfera provenientes de chimeneas y otros conductos de escape de las áreas industriales, comerciales y residenciales, así como de los vehículos automotores, locomotoras o escapes de aeronaves y barcos.

Estación de Monitoreo. Infraestructura que alberga o resguarda los instrumentos de medición para determinar la concentración de uno o más contaminantes criterio, las variables meteorológicas u otros compuestos atmosféricos, con el fin de evaluar la calidad del aire en un área determinada.

Exposición. Contacto de un ser humano con un agente químico, físico o biológico. Puede incluir la intensidad, frecuencia y duración del contacto, así como la vía de entrada y la dosis.

Fuente fija. Se define como punto fijo de emisión de contaminantes en grandes cantidades, generalmente de origen industrial.

Fuente móvil. Cualquier máquina, aparato o dispositivo emisor de contaminantes a la atmósfera, al agua y al suelo que no tiene un lugar fijo. Se consideran fuentes móviles todos los vehículos como automóviles, barcos, aviones, etcétera.


Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA). Escala adimensional que sirve para calificar la calidad del aire con respecto a los contaminantes atmosféricos considerados criterio.

Impacto ambiental. Es cualquier cambio ocasionado por una actividad en la salud y seguridad humana, flora, fauna, suelo, aire, agua, clima, el uso actual de los suelos y recursos para los propósitos tradicionales de los pueblos indígenas, o estructuras físicas, lugares u objetos que tengan relevancia histórica, arqueológica, paleontológica o arquitectónica, o la interacción entre estos factores. También, incluye los impactos sobre la herencia cultural o las condiciones socioeconómicas que resulten de esos factores, incluye los impactos directos, indirectos o acumulativos.

Mutagénico. Es un agente capaz de provocar cambios en la estructura genética de un organismo, también es carcinogénico.

Norma. Dato numérico adoptado para utilizarse como marco de referencia, con el cual se comparan las mediciones ambientales con el propósito de interpretarlas.

Oxidantes Fotoquímicos. Contaminantes formados por la acción de la luz solar sobre los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos en el aire.



Parámetro. Es una cantidad medida o ponderada sobre un indicador ambiental.

Reactividad. Capacidad de un elemento o sustancia de interactuar químicamente con otras liberando energía.

Reducción Catalítica. Se refiere a la destrucción de contaminantes mediante reacciones químicas de reducción en presencia de catalizadores.

Toxicidad. Capacidad inherente de un agente químico para producir un efecto nocivo sobre los organismos.

Tóxico. Agente químico que, introducido al organismo, dependiendo más de su cantidad que de su calidad, es capaz de producir alteraciones en los sistemas biológicos.

Resumen

La creciente preocupación ambiental en tiempos recientes ha puesto de manifiesto una problemática alarmante: la celeridad del cambio climático. La presencia de contaminantes en el aire fomenta un fenómeno sin límites geográficos, es decir, la alteración de los patrones climáticos causada por la liberación indiscriminada de estos. Además, dichos contaminantes conllevan efectos nocivos no solo para el medio ambiente, sino también graves consecuencias para la salud de los seres vivos.

El aire, como medio natural, ofrece un entorno propicio para la dispersión de partículas y gases debido a su composición. No obstante, las emisiones de contaminantes primarios, como los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV's), la acumulación excesiva de estos elementos, junto con la reactividad de las partículas entre sí o con los componentes del aire y la exposición a las ondas electromagnéticas provenientes del sol, dan lugar a la formación de contaminantes secundarios, como el ozono troposférico.

La naturaleza y acumulación de estos contaminantes interfieren, alterando los ciclos geoquímicos naturales de nuestro medio ambiente. Las consecuencias por la exposición a COV's van desde problemas respiratorios hasta generar enfermedades cardiovasculares y cáncer, así mismo, la susceptibilidad a formar ozono troposférico tiene más consecuencias perjudiciales para el medio ambiente, como el desbalance en el proceso de fotosíntesis y aceleración al cambio climático.

La aplicación de nanomateriales complementada con el uso de métodos de destrucción química surge como una alternativa a la mitigación de estos compuestos. En esta investigación se toma como base dicha alternativa, usando nanomateriales del tipo M/TiO_2 , para la eliminación de COV's siendo el benceno usado en las pruebas fotocatalíticas, teniendo como resultado una disminución significativa en la comparación de concentración inicial y final de este COV. Tomando en cuenta estos resultados se propone esta metodología como una alternativa para reducir el impacto de estos compuestos en el medio ambiente

Abstract

The growing environmental concern in recent times has highlighted an alarming issue: the rapid pace of climate change. The presence of air pollutants promotes a phenomenon without geographical limits, namely the alteration of climatic patterns caused by the indiscriminate release of contaminants. Additionally, these pollutants have harmful effects not only on the environment but also have profound consequences for the health of living beings.

Air, as a natural medium, provides a conducive environment for the dispersion of particles and gases due to its composition. However, the emissions of primary pollutants, such as volatile organic compounds (VOCs), and the excessive accumulation of these elements, along with the reactivity of particles with each other or with the components of the air and the exposure to electromagnetic waves from the sun, give rise to the formation of secondary pollutants, such as tropospheric ozone. The nature and accumulation of these pollutants interfere by altering the natural geochemical cycles of our environment. The consequences of exposure to VOCs range from respiratory problems to causing cardiovascular diseases and cancer. Additionally, the susceptibility to forming tropospheric ozone has more detrimental consequences for the environment, such as the imbalance in the photosynthesis process and the acceleration of climate change.

The application of nanomaterials complemented using chemical destruction methods emerges as an alternative for mitigating these compounds. This research is based on this alternative, using M/TiO₂ type nanomaterials for the elimination of VOCs, with benzene used in the photocatalytic tests, resulting in a significant decrease in the comparison of the initial and final concentration of this VOC. Considering these results, this methodology is proposed as an alternative to reduce the impact of these compounds on the environment.

“APLICACIÓN DE NANOMATERIALES DEL TIPO M/TiO₂, PARA LA
ELIMINACIÓN DE COV's POR MEDIO DE TÉCNICAS DE
OXIDACIÓN AVANZADA”

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

Un contaminante se define como cualquier materia o energía, en cualquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse o interactuar con elementos como la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna, o cualquier componente del entorno natural, altera o modifica su composición y condición natural (SEGOB, 2012). Los compuestos orgánicos volátiles (COV's) representan uno de los grupos más comunes y preocupantes de contaminantes del aire. Estos compuestos se caracterizan por sus puntos de ebullición, que oscilan entre 50 y 260 °C bajo condiciones estándar, y son emitidos principalmente por industrias químicas, petroquímicas, alimentarias, de impresión, entre otras (Yang et al., 2019; Li et al., 2009). Los COV's no solo son responsables de daños a la capa de ozono y de contribuir a la formación de smog fotoquímico mediante reacciones con otros contaminantes como NO_x y SO_x, sino que también representan un grave riesgo para la salud humana, generando efectos tóxicos y cancerígenos con exposiciones prolongadas (Zhang et al., 2016).

La industrialización acelerada y el crecimiento económico han provocado un aumento significativo en las emisiones de COV's, especialmente en países en desarrollo. Por ejemplo, en China, las emisiones de estos compuestos alcanzaron 31.12 millones de toneladas en 2015, donde aproximadamente el 43% provenía de procesos industriales, principalmente petroquímicos y químicos (Zhang et al., 2018; Lei & Ning, 2017). En respuesta a sus impactos ambientales y sanitarios, regiones como la Unión Europea han implementado estrategias para reducir las emisiones de COV's, como el Protocolo de Gotemburgo, que buscó reducirlas a la mitad para el año 2020 respecto a los niveles del 2000 (Lei & Ning, 2017).

Diversos estudios han destacado que más del 40% de los COV's presentes en áreas urbanas provienen de emisiones de vehículos de combustión interna (Watson et al., 2001). Además, en espacios como estacionamientos y cruceros, la concentración de COV's puede ser significativamente mayor que en el aire ambiente, representando un riesgo adicional para grupos como peatones, comerciantes ambulantes y policías (Wang, et al., 2008; Mendoza-Domínguez et al., 2010). Estas problemáticas han llevado a desarrollar tecnologías de tratamiento para la recuperación o destrucción de COV's, entre las que se incluyen la adsorción, absorción, condensación, separación por membranas, incineración térmica y oxidación catalítica (Campesi et al., 2007; Son, 2017).

La adsorción, por ejemplo, se ha posicionado como una tecnología eficiente para tratar concentraciones bajas o medias de COV's, gracias a su bajo costo operativo y su capacidad para evitar la generación de productos secundarios dañinos (Pi et al., 2018). Por otro lado, la oxidación catalítica, en comparación con la incineración térmica, destaca por operar a temperaturas más bajas (200–500 °C) y con una menor formación de productos tóxicos como dioxinas (Tang et al., 2015). Entre las tecnologías emergentes, la fotocatalisis se presenta como una opción prometedora debido a su simplicidad operativa, bajo costo y capacidad para descomponer los COV's en sustancias inofensivas como dióxido de carbono y agua bajo condiciones de luz y presión atmosférica (Kumar et al., 2023).

El dióxido de titanio (TiO₂) es uno de los fotocatalizadores más estudiados debido a su estabilidad química, bajo costo y eficacia en la generación de especies reactivas. Sin embargo, su limitada absorción en el espectro de luz visible ha motivado investigaciones enfocadas en su modificación estructural mediante la

incorporación de metales nobles como oro (Au) y paladio (Pd). Estos metales no solo amplían la absorción hacia la región visible, sino que también mejoran la eficiencia en la separación de cargas, potenciando así su actividad catalítica (Chen et al., 2022; Huang et al., 2022).

En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo estudiar el uso de nanomateriales del tipo M/TiO_2 para la eliminación de COV's mediante técnicas de oxidación avanzada. Esta tesis explora la síntesis, caracterización y evaluación catalítica de nanomateriales dopados con Au y Pd, buscando establecer su efectividad en la remediación de contaminantes atmosféricos. A través de este enfoque, se pretende contribuir al desarrollo de soluciones tecnológicas sostenibles para mitigar los efectos adversos de los COV's en la salud humana y el medio ambiente.

CAPÍTULO II. ANTECEDENTES

2.1. Cambio Climático

El cambio climático se ha convertido en una preocupación central en la investigación científica y política debido a sus profundos impactos ambientales y sociales. La comprensión de este fenómeno ha evolucionado significativamente desde el siglo XIX, cuando Svante Arrhenius (1896) propuso por primera vez la idea del efecto invernadero causado por el dióxido de carbono (CO_2). Su teoría estableció las bases para lo que ahora se entiende como el calentamiento global inducido por la actividad humana. Desde estas primeras teorías, el conocimiento sobre el cambio climático ha avanzado hasta los modelos climáticos actuales y las proyecciones de impacto.

La evidencia científica sugiere que el cambio climático representa un desafío multifacético que afecta a todos los aspectos del medio ambiente y la sociedad. La literatura académica proporciona una base sólida para abordar estos desafíos y desarrollar estrategias efectivas de mitigación y adaptación.

Los modelos climáticos modernos han avanzado considerablemente desde los primeros trabajos de Arrhenius. Según el "Climate Change: The Physical Science Basis" del IPCC (2013), los modelos actuales proyectan un aumento de la temperatura global entre 1.5°C y 4.5°C para el final del siglo XXI si las emisiones de gases de efecto invernadero continúan en las tasas actuales. Estos modelos, basados en principios físicos y observaciones empíricas, muestran que el aumento en las concentraciones de gases como el CO_2 , metano (CH_4) y óxidos de nitrógeno (NO_x) está contribuyendo al calentamiento global.

David Wallace-Wells (2019), en su libro "The Uninhabitable Earth: Life After Warming," describe las graves consecuencias potenciales del cambio climático, tales como el colapso de ecosistemas, la pérdida de biodiversidad y el incremento de eventos meteorológicos extremos. Wallace-Wells argumenta que un aumento de la temperatura global puede tener efectos devastadores sobre la seguridad alimentaria, el suministro de agua y la salud pública, basándose en numerosos estudios científicos que destacan estos riesgos.

El informe "Global Warming of 1.5°C" del IPCC (2018) proporciona una evaluación detallada de las tendencias actuales en el cambio climático. Este informe subraya que, a pesar de los esfuerzos globales para mitigar el cambio climático, las concentraciones de CO₂ han seguido aumentando. La evidencia muestra que es imperativo tomar medidas urgentes para limitar el calentamiento global a 1.5°C por encima de los niveles preindustriales para evitar impactos severos en los sistemas humanos y naturales.

En el informe "Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability" del IPCC (2022), se exploran diversas estrategias para enfrentar los impactos del cambio climático y mitigar sus efectos. Este informe destaca la importancia de mejorar la infraestructura resistente al clima, desarrollar políticas sostenibles y fomentar la cooperación internacional. Además, enfatiza la necesidad de integrar conocimientos locales y científicos en las estrategias de adaptación para abordar eficazmente los desafíos del cambio climático. Robert O. Keohane (2014), en su artículo "The Political Economy of Climate Change" analizan cómo las políticas globales y las relaciones internacionales afectan la capacidad para abordar el cambio climático.

Los autores señalan que, aunque existe un consenso científico sobre el cambio climático, la implementación de políticas efectivas se ve obstaculizada por intereses económicos y políticos diversos, lo que complica los esfuerzos para mitigar sus efectos.

2.1.1. Cambio Climático en México

El cambio climático en México es un fenómeno que ha ganado considerable atención en las últimas décadas debido a su impacto en el medio ambiente, la economía y la sociedad. México, como muchos otros países, enfrenta desafíos significativos derivados del calentamiento global, incluyendo eventos climáticos extremos, alteraciones en patrones de precipitación y aumento de la temperatura. Según el *Tercer Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (2022)* del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), el país ha experimentado un aumento en la temperatura promedio anual y una mayor frecuencia de fenómenos meteorológicos extremos, como huracanes y sequías (INECC, 2020).

Las primeras investigaciones sobre cambio climático en México comenzaron a consolidarse en la década de 1990, en parte impulsadas por los eventos internacionales como la Cumbre de la Tierra en Río de Janeiro en 1992. Have y Neves (1992) en “Rio Declaration on Environment and Development. Environmental Conservation” documentaron los primeros estudios sobre los cambios en los patrones climáticos y sus implicaciones para el país (Have & Neves, 1992).

Este período también marcó el inicio de las políticas nacionales para abordar el cambio climático, culminando en la creación de la Ley General de Cambio Climático en 2012, que estableció un marco para la acción climática en México.

El impacto del cambio climático en México ha sido objeto de numerosos estudios. Hernández-Rodríguez, Romo-Lozano, Barrios-Puente y Cuevas-Alvarado (2023), en su artículo “Climate change and effects on agriculture in Mexico”, analizan cómo el cambio climático ha afectado la agricultura mexicana, incluyendo cambios en los patrones de cultivo y riesgos para la seguridad alimentaria (Hernández-Rodríguez et al., 2023). Estos impactos también se reflejan en la biodiversidad y los recursos hídricos, como se detalla en el *Quinto Informe de Evaluación del IPCC* (2014), que destaca la vulnerabilidad de México a los cambios en la disponibilidad de agua y la pérdida de ecosistemas (IPCC, 2014).

México ha adoptado una serie de medidas para mitigar y adaptarse al cambio climático. El país se comprometió a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero a través de su Contribución Nacional Determinada (NDC) bajo el Acuerdo de París. A. M. Martínez en “*Mexico’s Climate Policy and the Paris Agreement*” (2018) analiza cómo estas políticas han sido diseñadas para cumplir con los compromisos internacionales y promover la sostenibilidad (Martínez, 2018). Además, el *Programa Especial de Cambio Climático 2014-2018* y el *Programa Nacional de Cambio Climático 2020-2024* han sido fundamentales para coordinar las acciones nacionales en este ámbito (SEMARNAT, 2014; SEMARNAT, 2020).

2.2. Historia y Evolución del Calidad del Aire

La calidad del aire es un tema de creciente importancia en la investigación ambiental y de salud pública. El concepto de calidad del aire se refiere a la medida en que el aire es limpio y libre de contaminantes que puedan afectar la salud humana, los ecosistemas y el clima global. La preocupación por la calidad del aire

ha aumentado debido a las evidencias acumuladas sobre sus impactos adversos en la salud y el medio ambiente.

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la calidad del aire se define por la concentración de contaminantes en el aire, como partículas en suspensión (PM10 y PM2.5), dióxido de nitrógeno (NO₂), dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO) y ozono troposférico (O₃) (OMS, 2021). Estos contaminantes pueden tener efectos negativos en la salud respiratoria y cardiovascular, así como contribuir al cambio climático.

2.3. Estudio sobre la Calidad del Aire

El estudio de la calidad del aire comenzó a recibir una mayor atención en el siglo XX, especialmente después de los eventos de smog en ciudades industriales como Londres (1952) y Los Ángeles, lo que llevó al desarrollo de métodos de monitoreo y análisis de contaminantes. En su libro *Air Pollution and Global Warming: History, Science, and Solutions* (2ª ed., 2012), Michael Z. Jacobson destaca cómo estos eventos contribuyeron al reconocimiento de los problemas de contaminación del aire y cómo esto impulsó la implementación de regulaciones ambientales en la segunda mitad del siglo XX (Jacobson, 2012).

2.3.1. *Historia y Evolución del Estudio sobre la Calidad del Aire en México*

La historia y evolución del estudio sobre la calidad del aire en México refleja una progresión desde los primeros estudios y legislaciones hasta el desarrollo de tecnologías avanzadas y políticas integradas. El país ha hecho significativos avances en la gestión de la calidad del aire, aunque aún enfrenta desafíos importantes que requieren una atención continua y una adaptación a las condiciones cambiantes.

2.3.2. Primeros Estudios y Reconocimiento de la Contaminación Atmosférica en México

En 1989, el Instituto Nacional de Ecología (INE) de México publicó el informe *“Contaminación Atmosférica en las Zonas Urbanas”*, que documentó por primera vez de manera sistemática la contaminación atmosférica en ciudades principales como la Ciudad de México (INE, 1989). Este estudio fue fundamental para identificar las principales fuentes de contaminación y sus efectos sobre la salud pública y el medio ambiente.

En 1992, la Ciudad de México vivió una de las crisis más graves de contaminación del aire, conocida como la "Contingencia Ambiental". Este evento generó gran preocupación por la calidad del aire y la salud pública, lo que impulsó la adopción de medidas más estrictas para el control de la contaminación. Si bien la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) ya había sido promulgada en 1988, las reformas más importantes ocurrieron en 1996, en respuesta a esta crisis y otros problemas ambientales que México enfrentaba. Donovan (1992) subraya cómo este suceso en la Ciudad de México impulsó soluciones innovadoras a partir de experiencias compartidas, fomentando un enfoque colaborativo en la lucha contra la contaminación urbana.

Durante la década de 2000, México avanzó significativamente en el desarrollo de tecnologías para el monitoreo y control de la calidad del aire. El Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA), establecido en 2005, fue diseñado por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) como una herramienta clave para recopilar y difundir información en tiempo real sobre contaminantes atmosféricos. A través de SINAICA, se hace posible

acceder a datos históricos y actuales de calidad del aire, permitiendo su consulta y descarga para análisis por parte de la ciudadanía y facilitando el seguimiento de la gestión de calidad del aire por los gobiernos locales y federales (INECC, 2016).

En la década de 2010, México implementó diversas políticas y estrategias para enfrentar la contaminación atmosférica y el cambio climático. El *Programa de Gestión de la Calidad del Aire para la Zona Metropolitana del Valle de México* (PROAIRE 2021-2030) es uno de los principales marcos estratégicos que busca reducir las emisiones de contaminantes y mejorar la calidad del aire en áreas urbanas

México enfrenta desafíos persistentes en el control de la calidad del aire, especialmente en las grandes ciudades con alta densidad de población y actividad industrial. Según Molina, Zhu, Wan, y Gurjar (2020), las megaciudades, al concentrar actividades industriales y un gran volumen de tráfico, enfrentan desafíos críticos para la gestión de la calidad del aire, lo que crea una demanda urgente de enfoques integrados y soluciones adaptativas para mejorar las condiciones ambientales en estos entornos. La urbanización acelerada y los efectos del cambio climático requieren políticas innovadoras y de gestión que puedan adaptarse a las necesidades cambiantes y mitigar los impactos negativos medidas en la salud y el medio ambiente (Molina et al., 2020). La investigación y el desarrollo de políticas continuas serán fundamentales para enfrentar estos desafíos de manera efectiva.

El impacto de la contaminación del aire en la salud humana ha sido ampliamente documentado. El artículo *Air Pollution and Mortality in the Medicare Population* publicado en *The New England Journal of Medicine* por Di et al. (2017) muestra que la exposición a largo plazo a niveles elevados de PM_{2.5} y NO₂ está

asociada con un aumento en la mortalidad por enfermedades cardiovasculares y respiratorias.

Además, estudios como el de David C. Goodwin en *Air Quality and Climate Change* (2020) han demostrado que la contaminación del aire también afecta a los ecosistemas, reduciendo la biodiversidad y alterando los ciclos biogeoquímicos. De manera similar, Manisalidis et al. (2020) en su revisión sobre los impactos ambientales y de salud de la contaminación del aire destacan los efectos negativos de esta sobre la salud humana y el medio ambiente, señalando que los contaminantes atmosféricos contribuyen a la degradación ambiental, con consecuencias significativas tanto a nivel global como local (Manisalidis et al., 2020).

La gestión de la calidad del aire ha evolucionado con la implementación de políticas y regulaciones. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), en su informe *Air Quality Standards and Regulations* (2022), detalla cómo las leyes y normas, como la Ley de Aire Limpio de 1970, han sido fundamentales para reducir las emisiones de contaminantes y mejorar la calidad del aire en muchas regiones (EPA, 2022). Las directrices y estándares de la EPA han servido de modelo para políticas internacionales y nacionales destinadas a controlar la contaminación del aire.

El informe "Air Quality and Health: Challenges and Opportunities" de la Organización Mundial de la Salud (OMS) (2023) discute los desafíos actuales en la gestión de la calidad del aire, incluyendo la necesidad de mejorar las redes de monitoreo y la implementación de políticas más efectivas en países en desarrollo. A

pesar de los avances, la creciente urbanización y el cambio climático presentan desafíos adicionales para mantener y mejorar la calidad del aire (OMS, 2023).

2.3.3. Historia y Evolución del Estudio sobre la Calidad del Aire en Puebla

La primera etapa de estudios sobre la calidad del aire en Puebla se centró en el monitoreo de contaminantes básicos y se consolidó a finales de los años 90 con el establecimiento de la red de monitoreo atmosférico.

“ En 1996 se dieron los primeros pasos para poner en operación un sistema automático de monitoreo al realizar distintas campañas de monitoreo y así determinar la ubicación de las estaciones. El proyecto se concretó en el año 2000 con la puesta en marcha de la Red Estatal de Monitoreo Atmosférico (REMA) conformada por cuatro estaciones para la medición de cinco contaminantes criterio: PM₁₀, O₃, CO, NO_x y SO₂, además de parámetros meteorológicos.”(ProAire, 2012).

Estas redes permitieron recolectar datos de manera más sistemática sobre los niveles de contaminantes y sus variaciones estacionales, así como la identificación de las fuentes principales de emisiones. Sin embargo, fue hasta la implementación del programa ProAire, un esfuerzo federal para mejorar la calidad del aire, que se tomaron medidas de mayor alcance, buscando reducir las emisiones provenientes de fuentes móviles y estacionarias en Puebla y otras ciudades del país (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2017).

La calidad del aire en Puebla ha sido afectada por múltiples factores, entre ellos, su cercanía al volcán Popocatepetl, el incremento de zonas industriales y el crecimiento poblacional acelerado. La actividad volcánica del Popocatepetl, uno de los volcanes activos más cercanos a centros urbanos en México, representa un

factor natural de contaminación que ha impactado el aire de Puebla y sus alrededores desde hace décadas.

Las emisiones de SO₂, CO₂ y partículas finas durante las erupciones volcánicas no solo afectan la calidad del aire, sino que también generan ácidos en la atmósfera, incrementando la acidez de la lluvia en la región (Juárez, Gay, & Flores, 2005). Este fenómeno es una fuente constante de contaminación y contribuye al desafío de mantener estándares de aire limpio en Puebla.

La expansión de zonas industriales en Puebla ha agregado un componente significativo a la contaminación del aire. Desde los años 70, la región ha experimentado un auge industrial en sectores como la automotriz y la manufactura, lo que ha incrementado considerablemente las emisiones de COV's, NO_x, y partículas suspendidas (PM10 y PM2.5).

La actividad industrial ha sido identificada como una de las principales fuentes de contaminantes atmosféricos, que se suman a los precursores del ozono y otros compuestos secundarios, como el smog fotoquímico (Porta et al., 2018). Estos contaminantes no solo deterioran la calidad del aire, sino que también contribuyen al cambio climático y a problemas de salud en la población, como enfermedades respiratorias y cardiovasculares (González et al., 2022).

En mayo de 2019, Puebla activó por primera vez la Fase 1 de Contingencia Ambiental debido a la elevada concentración de partículas PM10 en el aire, las cuales excedieron los 150 puntos en una de las estaciones de monitoreo. Conforme a los datos proporcionados por el Sistema Nacional de Calidad del Aire, tres estaciones de monitoreo reportaron un aumento tanto en PM10 como en PM2.5, lo cual motivó al gobierno a declarar la contingencia en diversos municipios.

Según el entonces gobernador interino, Guillermo Pacheco Pulido, varios factores contribuyeron a este deterioro en la calidad del aire, tales como las emisiones volcánicas del Popocatepetl, los incendios forestales y las temperaturas elevadas. Ante esta situación, la Secretaría de Medio Ambiente recomendó evitar actividades físicas al aire libre para estudiantes y restringir la exposición al sol. Asimismo, Protección Civil implementó la distribución de cubrebocas en el centro de la ciudad de Puebla (SEMARNAT, 2019).

Según el Informe Nacional de Calidad del Aire (INECC), durante el año 2020, Puebla no cumplió con al menos una norma de calidad del aire en el 33% de los días monitoreados, mientras que en Coronango esta situación se presentó en el 16% de los días con datos válidos. En la ciudad de Puebla, las PM10 fueron el contaminante que con mayor frecuencia generó condiciones de mala calidad del aire, mientras que en Coronango el principal contaminante fue el ozono (INECC, 2020,)

El crecimiento poblacional y el desarrollo urbano en Puebla han amplificado los problemas de calidad del aire. La rápida urbanización de la ciudad ha generado un aumento en el número de vehículos y el uso de combustibles fósiles, lo cual contribuye a los altos niveles de emisiones de CO y NO_x. Según estimaciones recientes, Puebla ha experimentado un crecimiento demográfico anual superior al promedio nacional, lo que incrementa la demanda de infraestructura y servicios, pero también agrava los problemas de congestión vehicular y, en consecuencia, de contaminación atmosférica (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI, 2022).

Además, Puebla ha implementado programas de gestión ambiental con el objetivo de mitigar la contaminación atmosférica. Por ejemplo, el Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire (ProAire) ha sido una de las estrategias más relevantes, orientada a reducir las emisiones contaminantes mediante medidas de control en el sector industrial y en el transporte (CPFEUM, 2017). Sin embargo, la efectividad de estos programas ha sido variable, debido a factores como la falta de regulación estricta, el crecimiento urbano no planificado y la falta de conciencia ambiental en ciertos sectores de la población (Molina & Molina, 2004).

2.3.4. Redes de Monitoreo

Los sistemas de redes de monitoreo ambiental del aire son fundamentales para la gestión de la calidad del aire a nivel global. Existen varios sistemas de monitoreo a nivel mundial, tanto públicos como privados, que se utilizan para evaluar la contaminación del aire, la exposición de la población a contaminantes y para tomar decisiones políticas y científicas. A continuación, se mencionan algunos de ellos:

La Red Europea de Información y Observación del Medio Ambiente (EIONET), gestionada por la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA, 2021-2023), coordina la recopilación de datos sobre la calidad del aire en Europa. La EIONET proporciona información precisa sobre los niveles de contaminantes como el NO₂, partículas en suspensión (PM₁₀ y PM_{2.5}), ozono y otros contaminantes atmosféricos.

El AQI de EE. UU. Es el índice de la EPA para informar la calidad del aire. El Índice de Calidad del Aire de EE. UU. (Air Quality Index, AQI) es una herramienta de la EPA para informar sobre la calidad del aire exterior y la salud. El AQI incluye

seis categorías codificadas por colores, cada una corresponde a un rango de los valores del índice.

Cuanto más alto es el valor del AQI, mayor es el nivel de contaminación atmosférica y mayor la preocupación para la salud. Por ejemplo, un valor del AQI de 50 representa buena calidad atmosférica con escaso potencial para afectar a la salud pública, pero un valor del AQI superior a 300 representa una calidad atmosférica peligrosa.

Por lo general, un valor del AQI de 100 se corresponde con la norma nacional de calidad del aire para el contaminante, que es el nivel que la EPA estableció para proteger la salud pública. Por lo general, los valores de AQI inferiores a 100 se consideran satisfactorios. Cuando los valores del AQI son superiores a 100, la calidad del aire se considera insalubre, en primer lugar, para ciertos grupos de personas sensibles, y luego para todos a medida que los valores del AQI aumentan.

A fin de facilitar su interpretación, el AQI se divide en seis categorías Tabla 1 . Cada categoría se corresponde con un nivel diferente de preocupación para la salud. La EPA ha asignado un color específico a cada categoría del AQI para ayudar a las personas a interpretar rápidamente si la contaminación del aire está llegando a niveles insalubres en sus comunidades.

Tabla 1.

Conceptos básicos de AQI para el ozono y la contaminación por partículas.

Niveles del índice	Niveles de preocupación	de	Valor	Significado
de la calidad del aire preocupantes para la salud	preocupación	de	numérico	

Verde	Bueno	0 a 50	La calidad del aire se considera satisfactoria y la contaminación atmosférica presenta un riesgo escaso o nulo.
Amarillo	Moderado	51 a 100	La calidad del aire es aceptable, pero para algunos contaminantes podría existir una preocupación moderada para la salud de un grupo muy pequeño de personas excepcionalmente sensibles a la contaminación ambiental.
Naranja	Insalubre para grupos sensibles	101 a 150	Los miembros de grupos sensibles pueden padecer efectos en la salud. Probablemente no afectará a las personas en general.
Rojo	Insalubres	151 a 200	Todos pueden comenzar a padecer efectos en la salud y los miembros de grupos sensibles pueden padecer efectos más graves.
Morado	Muy insalubre	201 a 300	Advertencias sanitarias de condiciones de emergencia. Son mayores las probabilidades de que toda la población esté afectada.
Maroon	Hazardous	301 y superior	Alerta sanitaria: todos pueden padecer efectos sanitarios más graves.

Nota. Fuente: *airnow guide to Air Quality and Your Health*.

En México, el monitoreo de la calidad del aire es crucial para la salud pública y la formulación de políticas ambientales. Existe una red de monitoreo que recoge datos sobre la contaminación del aire en el país, ayudando tanto a las autoridades gubernamentales como a los investigadores a evaluar y gestionar la calidad del aire en tiempo real.

En México durante el Porfiriato y el periodo posrevolucionario, se experimentaron importantes avances que impulsaron un aumento significativo en las emisiones de contaminantes. Este crecimiento estuvo relacionado con la expansión de las vías ferroviarias, la construcción de fábricas, la modernización urbana y las reformas agrarias de la época. Sin embargo, no fue sino hasta 1958 cuando la Secretaría de Salubridad y Asistencia (SSA) comenzó a realizar las primeras mediciones de calidad del aire. Posteriormente, en 1996, se dio inicio formal a las investigaciones sobre contaminación atmosférica con la instalación de cuatro estaciones de monitoreo en la Ciudad de México.

Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT); El Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) a cargo de la Dirección General de Gestión Ambiental del Aire de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, y tiene como objetivo medir la concentración de contaminantes atmosféricos en la Ciudad de México y su área metropolitana “Está integrado por cuatro subsistemas: a) la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), conformada por 36 estaciones de monitoreo; b) la Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA); c) la Red Meteorológica (REDMET); y d) la Red de Depósito Atmosférico (REDDA).” (Zuk et al., 2007).

En Puebla, existe la “Red Estatal de Monitoreo Atmosférico (REMA)”. Es una herramienta fundamental para el control de la calidad del aire “en la Zona Metropolitana del Valle de Puebla, que se conforma por los municipios de Amozoc, Coronango, Cuautlancingo, Puebla, San Andrés Cholula y San Pedro Cholula. Además de los municipios de Atlixco, San Martín Texmelucan y Tehuacán” (SMADSOT. 2024,). Esta red tiene como objetivo monitorear los niveles de

contaminantes atmosféricos, generar información precisa y oportuna para la toma de decisiones y contribuir a la protección de la salud pública y el medio ambiente. A través de la instalación de estaciones de monitoreo Tabla 2, REMA permite medir los niveles de partículas suspendidas, gases como el NO₂, O₃, CO y SO₂, entre otros, que son responsables de la contaminación del aire y pueden afectar gravemente la salud de las personas, especialmente en áreas urbanas de alta densidad poblacional y actividad industrial. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2020). Informe sobre calidad del aire en México:

Tabla 2.

Estaciones de Monitoreo Atmosférico

No.	Estación	Dirección	Coordenadas (Latitud, Longitud)	Representatividad espacial (*)
1	Agua Santa, (STA)	Prolongación 11 sur y 121 poniente, Col. Agua Santa, Municipio de Puebla, C.P. 72490	18.9874, 98.249666	- Urbana
2	ATLIXCO (ATL)	Prolongación Heliotropo 1201, Col. Vista Hermosa, Municipio de Atlixco, Puebla, C.P. 74218	18.920673, 98.420996	- Urbana
3	Benemérito Instituto Normal del Estado, (BINE)	Blvd. Hermanos Serdán No. 203, Col. Valle del Rey, Municipio Puebla C.P. 72140	19.0673, 98.2245	- Urbana
4	Parque de la Ninfas, (NINFAS)	23 poniente y 15 sur, Col. Santiago, Municipio de Puebla, C.P. 72410	19.0413, 98.21429	- Urbana
5	San Martín Texmelucan, (SMT)	Camino a la Barranca de Pesos s/n San Lucas Atoyatenco, San Martín Texmelucan C.P. 74120	19.3076, 98.416398	- Urbana

6	Tehuacán, (TEH)	Av. Reforma Nte. 614, Villa Granada, Municipio de Tehuacán, Puebla C.P. 75732	18.46992, 97.39328	-	Urbana
7	Universidad Tecnológica de Puebla, (UTP)	Calle Mariano Escobedo s/n esq. Francisco I. Madero Col. Joaquín Colombres C.P. 72300	19.0566, 98.15171	-	Urbana
8	Velódromo, (VELODROMO)	Av. Zaragoza S/N entre Periférico Ecológico y Calle de las Flores, Municipio de Coronango. C.P. 72680	19.1158, 98.277656	-	Urbana

Nota: La cobertura de monitoreo de cada estación es de 3 km de radio. Fuente: (SMADSOT, 2024)

Uno de los roles más importantes de la REMA es la activación de fases de contingencia ambiental. Cuando los niveles de contaminación en el aire superan los límites establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014 (Secretaría de Salud, 2014), el gobierno local puede declarar una Fase 1 o Fase 2 de contingencia, lo que implica la implementación de medidas como la restricción de actividades al aire libre, la suspensión de clases en escuelas públicas y privadas, o el uso de cubrebocas en zonas con alta concentración de partículas contaminantes (González, 2019).

2.4. Compuestos Orgánicos Volátiles

Los compuestos orgánicos volátiles (COV's) son una categoría de sustancias químicas que tienen un impacto significativo tanto en la salud humana como en el medio ambiente. Se caracterizan por su alta volatilidad, lo que les permite evaporarse fácilmente en la atmósfera y afectar la calidad del aire. En los años cincuenta, la importancia de los COV's derivados de actividades humanas en la química atmosférica se evidenció a través de investigaciones centradas en el smog de Los Ángeles (Haagen-Smit et al., 1953).

El monitoreo y estudio de los COV's en México se inició de manera más sistemática a finales de los años 90 y principios de los 2000. L. M. Blanco en su estudio "Volatile Organic Compounds in Urban Air: A Mexican Perspective" (2001) fue uno de los primeros en documentar las concentraciones de estos compuestos en el aire urbano de la Ciudad de México, destacando la importancia de fuentes como el tráfico vehicular y las emisiones industriales (Blanco, 2001). Estos estudios iniciales fueron fundamentales para la comprensión del papel de los COV's en la contaminación atmosférica y su impacto en la salud pública.

En México, el inventario de emisiones para los seis estados fronterizos, con un año base de 1999, indicó que las fuentes móviles aportaron el 72% del CO, el 24% del NOx y el 23% de los COV's (ERG et al., 2004).

Estas cifras incluyen las emisiones de fuentes antropogénicas y biogénicas (Mendoza- Los COV's son definidos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) como compuestos químicos que contienen carbono y tienen una presión de vapor alta a temperatura ambiente, lo que facilita su liberación en el aire (EPA, 2021). Esta categoría incluye una amplia gama de sustancias, desde solventes industriales hasta productos químicos presentes en pinturas, productos de limpieza y combustibles.

El impacto de los COV's en la salud humana y el medio ambiente ha sido ampliamente documentado. El artículo "Health Effects of Volatile Organic Compounds: A Review" de F. P. Perera (2018) en *Environmental Health Perspectives* discute cómo la exposición a COV's puede estar relacionada con una serie de problemas de salud, incluyendo enfermedades respiratorias, cáncer y efectos neurológicos.

Perera enfatiza que ciertos COV's, como el benceno y el formaldehído, son reconocidos carcinógenos que pueden tener efectos adversos significativos en la salud (Perera, 2018). Además, David W. M. Hall y Elizabeth L. Barrett en su libro *Volatile Organic Compounds in the Atmosphere* (2019) abordan cómo los COV's contribuyen a la formación de ozono troposférico y smog fotoquímico, afectando la calidad del aire y el clima (Hall & Barrett, 2019).

La liberación de COV's en la atmósfera puede reaccionar con otros contaminantes para formar ozono a nivel del suelo, un componente clave del smog que tiene impactos negativos en la salud respiratoria y los ecosistemas. Los COV's pueden originarse de diversas fuentes, incluyendo procesos industriales, vehículos, y productos de consumo. En el informe *Compendium of Methods for the Determination of Toxic Organic Compounds in Ambient Air* (2020), la Agencia de Protección Ambiental (EPA) proporciona directrices sobre la medición y control de COV's en el aire, subrayando la importancia de monitorear estas sustancias para proteger la salud pública y el medio ambiente (EPA, 2020).

La investigación sobre COV's ha avanzado con el desarrollo de nuevas técnicas de monitoreo y análisis. El libro *Advanced Techniques for Monitoring Volatile Organic Compounds* de C. E. McCarthy (2021) presenta métodos avanzados para la detección y cuantificación de COV's, que son cruciales para la gestión de la calidad del aire y la evaluación de riesgos (McCarthy, 2021). Estos avances permiten una mejor comprensión de las fuentes y los efectos de los COV's, facilitando la implementación de estrategias de control más efectivas. A pesar de los avances en la investigación y la regulación, la gestión de COV's sigue siendo un desafío.

El informe Volatile Organic Compounds: A Global Perspective (2022) de la Organización Mundial de la Salud (OMS) destaca la necesidad de enfoques integrados para abordar las emisiones de COV's y sus efectos en la salud y el medio ambiente, especialmente en regiones en desarrollo donde las regulaciones pueden ser menos estrictas (OMS, 2022).

2.4.1. El benceno: Historia, Estructura y Propiedades

El benceno es uno de los COV's más importantes y estudiados. El interés en los compuestos aromáticos comenzó en 1825, cuando Michael Faraday descubrió un nuevo hidrocarburo mientras analizaba una mezcla aceitosa condensada del gas utilizado para el alumbrado. Faraday logró aislar un hidrocarburo puro, cuya fórmula empírica era CH, identificando así un compuesto que luego jugaría un papel crucial en la química orgánica (Morrison & Boyd, 1990).

Pocos años después, en 1834, Eilhard Mitscherlich sintetizó el mismo compuesto al calentar ácido benzoico, aislado de la goma benjuí, en presencia de cal. Mitscherlich confirmó que la fórmula molecular del compuesto era C₆H₆, basándose en mediciones de densidad de vapor, que arrojaron un peso molecular cercano a 78. Debido a que este nuevo compuesto se derivaba de la goma benjuí, lo nombró "bencina", aunque actualmente es conocido como benceno (Carey & Sundberg, 2007).

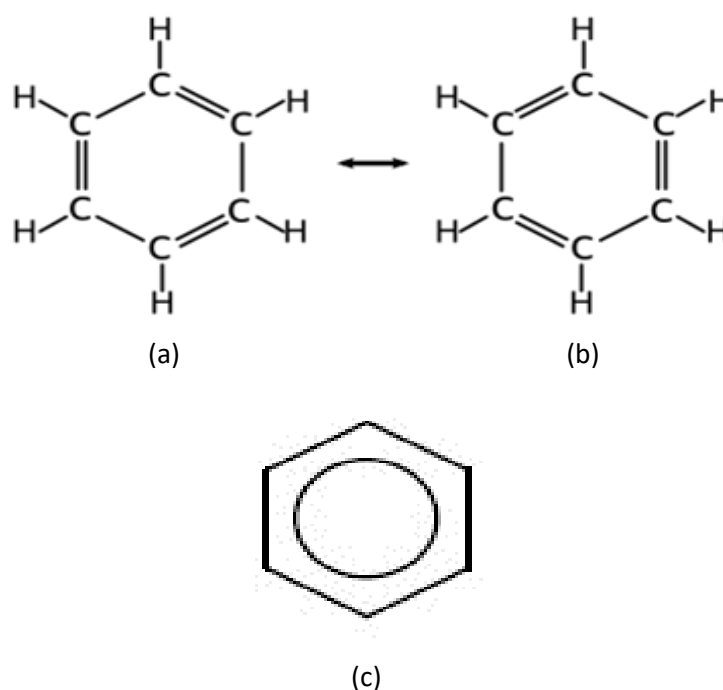
2.4.2. La Evolución de la Comprensión Estructural del Benceno

Al principio, August Kekulé propuso la estructura del benceno en el año 1860. Kekulé visualizó la molécula como un anillo cerrado de seis carbonos con enlaces alternados simples y dobles. Aunque esta representación no satisfacía completamente las propiedades químicas del benceno, fue ampliamente aceptada

durante décadas (March, 1992). La comprensión más profunda de la estructura del benceno surgió en la década de 1920 con el desarrollo de la mecánica cuántica, que permitió desvelar la inusual estabilidad y comportamiento del benceno mediante los conceptos de resonancia y orbitales moleculares (Pauling, 1960).

Figura 1.

Representación estructural del benceno



Nota.(a) y (b) Representación estructural del benceno con doble enlace alternados, (c) Representación de resonancia en híbrido de benceno. Fuente:August Kekulé 1870-1872

El benceno es un ejemplo clásico de un sistema resonante, en el que las estructuras propuestas por Kekulé (conocidas como I y II) Figura 1 (a) y (b). son híbridos de resonancia. Estas estructuras difieren únicamente en la disposición de los electrones, no en la disposición de los átomos, lo que significa que el benceno no es ninguna de las dos estructuras por separado, sino una combinación de ambas. Debido a que las dos estructuras de Kekulé son equivalentes en estabilidad, ambas

contribuyen igualmente al híbrido resonante, lo que resulta en una molécula extraordinariamente estable (Fessenden & Fessenden, 1983).

2.4.3. La Estructura Molecular y la Deslocalización Electrónica

El benceno es una molécula plana y altamente simétrica, donde todos los átomos de carbono e hidrógeno se encuentran en un mismo plano. Cada átomo de carbono en el anillo está hibridizado en sp^2 , formando enlaces sigma (σ) con ángulos de 120° , lo que da lugar a la estructura hexagonal regular del anillo bencénico (Atkins & de Paula, 2010). Estos ángulos se ajustan perfectamente a la geometría de un hexágono regular, lo que contribuye a la planitud del anillo como lo muestra la Figura 2 (a).

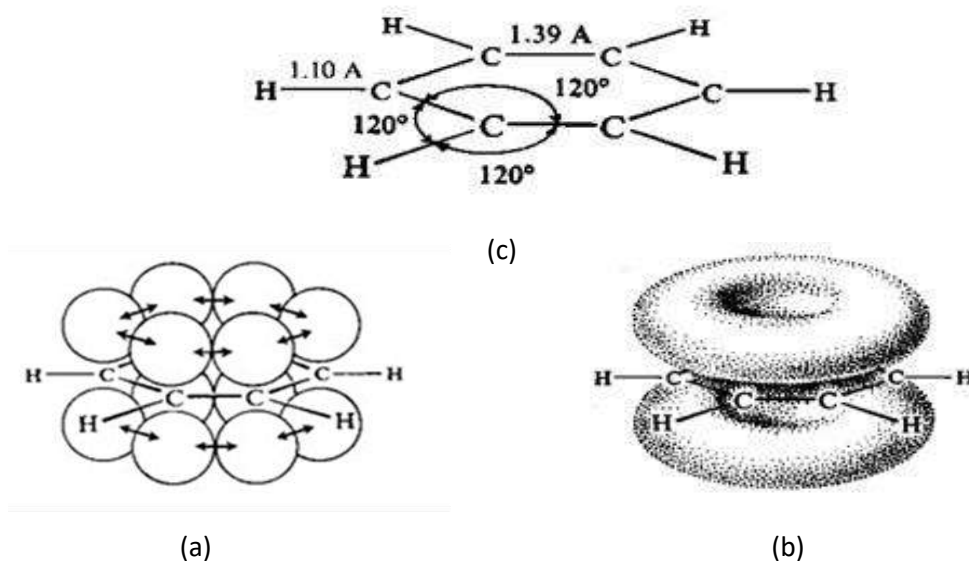
Además de los tres orbitales sp^2 , cada átomo de carbono en el benceno posee un orbital p no hibridizado, que se extiende por encima y por debajo del plano del anillo. Estos orbitales p forman enlaces pi (π) mediante el solapamiento lateral, permitiendo que los electrones π se deslocalicen a lo largo de todo el anillo, como lo muestra la Figura 2 (b). Esta deslocalización electrónica es responsable de la gran estabilidad de la molécula y constituye una característica clave de su comportamiento químico (McMurry, 2012).

A partir de estudios de difracción de rayos X y mediciones espectroscópicas, se ha confirmado que el benceno es una molécula plana, en la que los seis átomos de carbono están separados por una distancia de 1.3901 \AA en un anillo hexagonal. Los seis átomos de hidrógeno, cada uno unido a un átomo de carbono, se

encuentran a una distancia de 1.010 Å de estos carbonos. Todos los ángulos de enlace H-C-C y C-C-C son de 120°, como lo muestra la Figura 2 (c).

Figura 2

Molécula de benceno detallada según sus enlaces .



Nota. (a) Se indican los enlaces σ . (b) Orbitales p solapándose para formar enlaces π . (c) Nube π por encima y debajo del plano del anillo. Morrison and Boyd Organic Chemistry 5 edition Allyn and Bacon Inc. Boston 1973

2.4.4. Confirmación Experimental y Reactividad

La estructura del benceno ha sido confirmada por estudios de difracción de rayos X, que muestran que todos los enlaces carbono-carbono en el anillo son de igual longitud, y todos los ángulos de enlace son exactamente 120°. Esta simetría y planitud confirman la descripción de benceno como un híbrido de resonancia (Fleming, 2010). En términos de reactividad, aunque los electrones π están deslocalizados, están más "suelos" en comparación con los electrones σ , lo que los hace particularmente disponibles para reactivos que buscan electrones, como los reactivos electrofílicos. Sin embargo, debido a la estabilidad conferida por la

resonancia, el benceno tiende a sufrir reacciones de sustitución, en lugar de adición, lo que preserva su carácter aromático (Bruice, 2007). Por razones prácticas, la estructura del benceno suele representarse como un hexágono regular con un círculo inscrito, que simboliza la nube de seis electrones π deslocalizados sobre el anillo (Fessenden & Fessenden, 1983; Morrison & Boyd, 1990).

2.5. Ozono troposférico

2.5.1. Antecedentes del Ozono Troposférico

El ozono troposférico es un componente crucial en la química atmosférica, con implicaciones significativas para la salud humana y el medio ambiente. Su estudio abarca la evolución del conocimiento sobre su formación, sus efectos y los mecanismos detrás de su destrucción.

2.5.2. Historia y Origen del Descubrimiento del Ozono Troposférico

El ozono (O_3), una molécula compuesta por tres átomos de oxígeno fue identificado por primera vez por el químico alemán Christian Friedrich Schönbein en 1840, quien observó su formación durante experimentos con descargas eléctricas. Schönbein notó un olor peculiar en el aire, que luego atribuyó al ozono, y describió sus propiedades oxidantes (Schönbein, 1840). Inicialmente, se pensó que el ozono estaba presente principalmente en la estratosfera, donde desempeña un papel crucial en la absorción de la radiación ultravioleta (Finlayson-Pitts y Pitts, 2000).

Sin embargo, a mediados del siglo XX, el foco de atención se trasladó al ozono troposférico, cuando los investigadores comenzaron a estudiar su presencia en las capas más bajas de la atmósfera. En la década de 1940, durante la investigación sobre daños en cultivos cercanos a Los Ángeles, el químico Arie Haagen-Smit descubrió que estas lesiones en las plantas eran causadas por

concentraciones elevadas de ozono troposférico, producido como subproducto de reacciones fotoquímicas en presencia de contaminantes industriales y emisiones de vehículos. Este fenómeno, denominado "smog fotoquímico", marcó el inicio de la preocupación por el ozono a nivel superficial (Haagen-Smit, 1952).

La formación de ozono troposférico se debe principalmente a la disociación del dióxido de nitrógeno (NO_2) bajo la influencia de la radiación solar de longitudes de onda comprendidas entre 300 y 400 nm, lo que genera oxígeno atómico (O), el cual se combina con moléculas de oxígeno (O_2) para formar ozono (Seinfeld y Pandis, 2016). Durante las décadas de 1950 y 1960, este mecanismo fue ampliamente aceptado como el principal proceso responsable de la producción de ozono en áreas urbanas con altos niveles de contaminación atmosférica.

En las décadas siguientes, el estudio del ozono troposférico se amplió con investigaciones realizadas en Europa. Investigadores como Derwent y Stewart (1973) confirmaron la presencia de smog fotoquímico en regiones europeas, observando fenómenos similares a los reportados por Haagen-Smit en Los Ángeles. Además, Guicherir y Van Dop (1977) señalaron que la radiación solar en regiones con intensa actividad industrial favorecía la formación de ozono troposférico en áreas alejadas de grandes ciudades, lo que evidenciaba la dispersión de contaminantes a gran escala.

Con el desarrollo de la química atmosférica y el avance en las técnicas de medición, los científicos comenzaron a analizar la distribución global del ozono troposférico. Estudios llevados a cabo en observatorios de alta montaña, como Pic du Midi en los Pirineos, registraron un aumento significativo de la concentración de ozono en el hemisferio norte desde finales del siglo XIX, principalmente atribuido a

la creciente industrialización y el uso intensivo de combustibles fósiles (Marenco et al., 1994). Estas mediciones revelaron que la concentración de ozono superficial ha aumentado considerablemente en las últimas décadas, generando preocupación por su impacto en la salud humana y el medio ambiente (Crutzen, 1988).

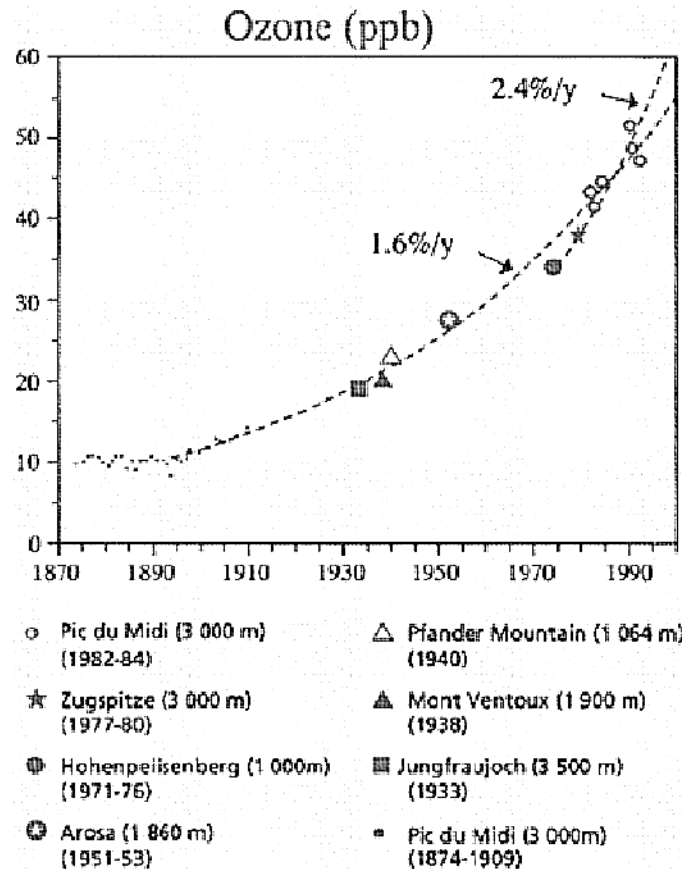
La distribución del ozono troposférico no puede explicarse únicamente por el intercambio entre la estratosfera y la troposfera, lo que ha llevado a un interés creciente por las teorías fotoquímicas que explican su formación y destrucción en la atmósfera inferior. La investigación de Kley et al. (1999) destacó la importancia de las reacciones fotoquímicas en la producción de ozono en áreas urbanas e industriales, subrayando que la radiación solar visible es un factor clave en su formación. Estas reacciones, alimentadas por precursores como los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los compuestos orgánicos volátiles (COV's), son responsables de la producción de ozono en la troposfera y de su impacto negativo en la calidad del aire (Finlayson-Pitts y Pitts, 2000).

A medida que aumentaba el interés por el ozono troposférico, estudios como el de Anfossi et al. (1991) y Sandroni et al. (1992) proporcionaron una visión más clara sobre la evolución de las concentraciones de ozono a nivel mundial. Estos trabajos mostraron que, aunque el ozono es crucial en la estratosfera para proteger la vida en la Tierra, sus niveles elevados en la troposfera representan una amenaza significativa para la salud humana y los ecosistemas. La Figura 3 muestra los niveles de concentración de este contaminante medidos en el observatorio de Pic du Midi, así como en otros sitios europeos ubicados a gran altitud. Los datos obtenidos indican un incremento significativo en las concentraciones a partir de

finales del siglo XIX, especialmente en las latitudes medias del hemisferio norte (Marenco, 1994).

Figura 3.

Curva de la evolución del ozono superficial (ppbv) en Europa



Nota. Desde 1870 hasta nuestros días, obtenida con los datos proporcionados por diferentes estaciones europeas, Fuente: (Marenco, 1995)

2.5.3. Mecanismos de Formación y Descomposición del Ozono Troposférico

El ozono troposférico se forma principalmente a través de reacciones fotocatalíticas que involucran COV's y NO_x bajo la influencia de la luz solar. La formación de ozono troposférico sigue un ciclo fotoquímico complejo:

1. Formación de Radicales Libres: La radiación ultravioleta descompone los NO₂ en NO) y radicales de oxígeno (O) (Finlayson-Pitts & Pitts, 2000).

2. Reacción con Oxígeno Molecular: Los radicales de oxígeno (O) reaccionan con oxígeno molecular (O_2) para formar ozono (O_3) (Seinfeld & Pandis, 2006).

Sin embargo, el ozono troposférico también experimenta procesos de descomposición. La principal vía de eliminación del ozono troposférico es su reacción con COV's y NO_x en presencia de luz solar. Este ciclo de producción y destrucción del ozono está influenciado por la presencia de otros contaminantes atmosféricos, como los hidrocarburos y los compuestos orgánicos volátiles, que pueden catalizar o inhibir su formación (Jacob, 1999).

Las tasas de formación de O_3 dependen sobre la luz solar y las concentraciones relativas de NO_x y moléculas reactivas de carbono; a saber, metano y COV's (Butler et al., 2020). La reacción del NO con el radical peroxi (RO_2) es el proceso central. reacción para la formación de O_3 en la troposfera (Atkinson, 2000). La Los números en verde indican las fuentes de NO_x en millones de toneladas por año (Mton N año⁻¹), mientras que los números en negro muestran las fuentes de carbono reactivo en millones de toneladas por año (Mton C año⁻¹). Los números en naranja representan la producción, el intercambio, la destrucción, la deposición y la carga de O_3 en millones de toneladas por año (Mton O_3 año⁻¹). Abreviaciones: COV's B, compuestos orgánicos volátiles biogénicos no relacionados con el metano; CH₄; CO (incendios), monóxido de carbono producido por la quema de biomasa; CO cf, monóxido de carbono derivado de combustibles fósiles; y COV's , compuestos orgánicos volátiles de origen fósil.

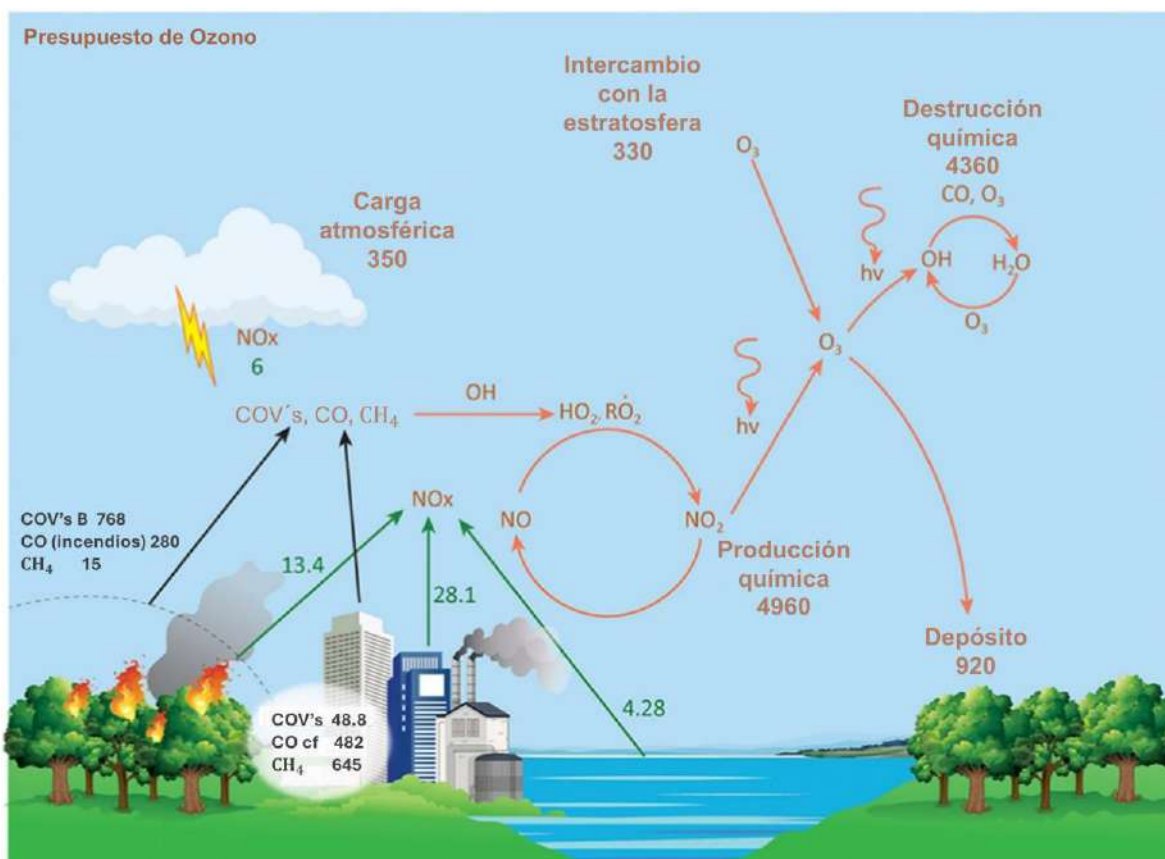
Figura 4. muestra un esquema del balance de O_3 en la atmósfera, destacando las fuentes, reacciones químicas y sumideros que intervienen en su

formación y destrucción, es decir, las emisiones de NO_x y fuentes de carbono reactivo provenientes tanto de la vegetación como de actividades industriales, basado en los estudios de (Butler et al., 2020).y (Wedow et al.,2021).

Los números en verde indican las fuentes de NO_x en millones de toneladas por año (Mton N año^{-1}), mientras que los números en negro muestran las fuentes de carbono reactivo en millones de toneladas por año (Mton C año^{-1}). Los números en naranja representan la producción, el intercambio, la destrucción, la deposición y la carga de O_3 en millones de toneladas por año ($\text{Mton O}_3 \text{ año}^{-1}$). Abreviaciones: COV's B, compuestos orgánicos volátiles biogénicos no relacionados con el metano; CH_4 ; CO (incendios), monóxido de carbono producido por la quema de biomasa; CO cf, monóxido de carbono derivado de combustibles fósiles; y COV's , compuestos orgánicos volátiles de origen fósil.

Figura 4.

Presupuesto anual simplificado para el ozono troposférico



Nota. Fuente: Adaptado. (Wedow et al., 2021).

Se calcula que la producción global de O₃ en la troposfera oscila entre 4960 y 5530 Mton año⁻¹. Siendo su origen mayoritariamente reacciones químicas, con una pequeña fracción que proviene del intercambio con la estratosfera (Hu et al., 2017). A pesar de que la mayor parte del O₃ troposférico se elimina a través de conversiones químicas, cerca del 20% de su eliminación ocurre mediante deposición seca en la biosfera terrestre (Hardacre et al., 2015). La formación de O₃ también está influenciada por la temperatura, con concentraciones más altas observadas durante los meses cálidos de verano, bajo condiciones de calor, sol y aire estancado (Porter et al., 2015). Estas condiciones coinciden con la temporada

de crecimiento en zonas templadas, donde el O₃ se considera uno de los contaminantes más perjudiciales para las plantas (Ainsworth et al., 2012).

2.6. Impacto Ambiental y Salud Humana

El ozono troposférico es un importante contaminante secundario que afecta la salud humana y el medio ambiente. A nivel de la salud, se ha demostrado que la exposición a altos niveles de ozono troposférico puede provocar problemas respiratorios, empeorar enfermedades pulmonares y reducir la función pulmonar (Kleinman et al., 2008). Desde el punto de vista ambiental, el ozono troposférico puede dañar la vegetación, reducir el crecimiento de los cultivos y afectar la biodiversidad (Hogsett et al., 2004).

2.7. Antecedentes del Ozono Troposférico en México

2.7.1. *Historia del Estudio del Ozono Troposférico en México*

El monitoreo y estudio del ozono troposférico en México comenzaron a ganar relevancia en la década de 1980, cuando la urbanización rápida y el crecimiento industrial en ciudades como la Ciudad de México comenzaron a mostrar niveles alarmantes de contaminación del aire. Investigaciones iniciales revelaron que los niveles de ozono en áreas urbanas superaban los límites recomendados por las agencias internacionales de salud (Rosas et al., 1988).

En 1989, el Programa de Monitoreo de la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMV) fue establecido para abordar el problema de la contaminación del aire, incluida la presencia de ozono troposférico. Este programa, liderado por la Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP), y más tarde por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), implementó una red de estaciones de monitoreo para

medir las concentraciones de ozono y otros contaminantes atmosféricos (González et al., 2002).

2.7.2. Mecanismos de Formación y Descomposición del Ozono Troposférico en México

La formación de ozono troposférico en México sigue el mismo mecanismo que en otras partes del mundo, a saber, reacciones fotoquímicas que involucran COV's y óxidos de nitrógeno (NOx) bajo la influencia de la radiación solar. Sin embargo, las condiciones locales, como la altitud y la exposición a la luz solar intensa en áreas urbanas y suburbanas, influyen en los niveles de ozono. En la Ciudad de México, por ejemplo, la alta altitud (2,240 metros sobre el nivel del mar) y las condiciones atmosféricas específicas contribuyen a una mayor acumulación de ozono durante el verano (Vázquez et al., 2004).

2.8. Nanopartículas

Las nanopartículas, partículas con tamaños que van de 1 a 100 nanómetros, han emergido como un área crucial de investigación debido a sus propiedades únicas y aplicaciones potenciales en diversos campos, incluyendo la medicina, la electrónica y la energía. El estudio y desarrollo de nanopartículas han avanzado significativamente en las últimas décadas, gracias a los avances en la nanotecnología.

Las nanopartículas se definen por su tamaño extremadamente pequeño, que les confiere propiedades físicas, químicas y biológicas distintivas en comparación con sus contrapartes en escala mayor. (El-Sayed, 2018), las propiedades ópticas de las nanopartículas, como la absorción y dispersión de la luz, son especialmente relevantes para aplicaciones biomédicas y fotónicas (El-Sayed, 2018).

La síntesis de nanopartículas ha evolucionado desde métodos simples a técnicas más avanzadas. K. S. Wong en el artículo "Nanoparticle Synthesis and Applications" publicado en *Advanced Materials* (2020) describe los métodos contemporáneos para la síntesis de nanopartículas, incluyendo la síntesis química en fase vapor, la síntesis sol-gel y la síntesis por reducción química. Wong también aborda las técnicas avanzadas de caracterización, como la espectroscopía de absorción de rayos X y la microscopía electrónica de transmisión (Wong, 2020).

Las nanopartículas tienen aplicaciones prometedoras en el campo de la medicina, especialmente en el diagnóstico y tratamiento de enfermedades. El artículo de S. M. Weiss en *Nature Reviews Drug Discovery* (2019) explora cómo las nanopartículas pueden ser utilizadas como agentes de contraste en imágenes médicas y como vehículos para la liberación dirigida de fármacos. Weiss destaca que las propiedades únicas de las nanopartículas permiten la entrega precisa de terapias a nivel celular y molecular, mejorando la eficacia de los tratamientos (Weiss, 2019).

El impacto ambiental y la seguridad de las nanopartículas son áreas de creciente preocupación. Según el informe *Nanomaterials: Risk Management and Safety* de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) (2021), las nanopartículas pueden presentar riesgos potenciales para la salud humana y el medio ambiente debido a su alta reactividad y capacidad para atravesar barreras biológicas. El informe enfatiza la necesidad de marcos regulatorios y evaluaciones de riesgo para garantizar un uso seguro de estas tecnologías (OCDE, 2021).

Las tendencias futuras en la investigación de nanopartículas incluyen la integración de nanotecnología en la energía y la sostenibilidad. R. B. Ricks en *Nanotechnology: Principles and Practices* (2022) examina cómo las nanopartículas están siendo exploradas para mejorar la eficiencia de los paneles solares y las baterías, así como para el tratamiento de aguas residuales. Ricks también discute los desafíos asociados con la escala de producción y la estandarización de las nanopartículas para aplicaciones industriales (Ricks, 2022).

2.8.1. Nanopartículas Monometálicas. Impregnadas con Óxido de Titanio

Las nanopartículas Monometálicas. impregnadas con óxido de titanio. han emergido como una combinación altamente prometedora en el campo de la nanotecnología y la fotocatalisis, debido a sus notables propiedades y aplicaciones potenciales. Estas nanopartículas están ganando atención debido a su capacidad para mejorar la eficiencia en la degradación de contaminantes y en procesos de conversión de energía.

El óxido de titanio (TiO_2) es ampliamente conocido por su alta estabilidad química y fotocatalítica, lo que lo hace ideal para aplicaciones en la purificación del aire y el tratamiento de aguas residuales. El TiO_2 es efectivo en la degradación de compuestos orgánicos bajo radiación ultravioleta (UV), pero su uso es limitado debido a su amplio bandgap, que solo le permite absorber la luz en el rango UV del espectro solar (Fujishima & Honda, 1972). Para superar esta limitación, se han investigado diversos métodos para mejorar la actividad fotocatalítica de TiO_2 , entre los cuales la incorporación de nanopartículas Monometálicas. ha demostrado ser particularmente eficaz.

Las nanopartículas Monometálicas. poseen propiedades únicas, como la resonancia plasmónica de superficie, que les permite absorber y dispersar luz en el rango visible del espectro (Harris, 1999). La combinación de nanopartículas Monometálicas. con TiO_2 no solo extiende el rango de absorción a la luz visible, sino que también mejora la separación de pares electrón-hueco, lo que incrementa la eficiencia de la fotocatalisis (Zhou et al., 2014). Este fenómeno es crucial para la degradación de COV's que son contaminantes atmosféricos perjudiciales para la salud y el medio ambiente.

Estudios recientes han demostrado que las nanopartículas de oro o paladio, impregnadas con TiO_2 pueden eficientemente descomponer COV's como el benceno, un contaminante común en la atmósfera urbana (Khan et al., 2015). La sinergia entre nanopartículas de Au, Pd y TiO_2 resulta en una mejora significativa en la actividad fotocatalítica, proporcionando una solución viable para enfrentar problemas ambientales relacionados con la contaminación del aire.

La investigación sobre las propiedades fisicoquímicas y la aplicación de nanopartículas de oro impregnadas con óxido de titanio está en constante evolución, ofreciendo nuevas perspectivas para su uso en tecnologías avanzadas de purificación del aire y energías renovables. Esta revisión explora la base científica y los avances recientes en el desarrollo de estos materiales, destacando su potencial para mejorar la calidad del aire y su relevancia en la mitigación de la contaminación atmosférica.

2.9. Sobre el Método Sol-Gel

El método sol-gel es una técnica ampliamente utilizada para la síntesis de materiales cerámicos, vidrios y recubrimientos, basado en la transición de un

sistema coloidal a una red sólida mediante procesos químicos. Esta técnica es valorada por su capacidad de producir materiales con alta pureza y controlada microestructura a temperaturas relativamente bajas.

El método sol-gel se basa en la conversión de soluciones líquidas (sols) en una red sólida (gel) a través de procesos químicos. Según G. L. Messing y A. T. H. Tang en su artículo “Sol-Gel Processing of Ceramics” publicado en *Journal of the American Ceramic Society* (2017), el proceso comienza con la formación de un sol, una suspensión coloidal de partículas de tamaño nanométrico en un líquido, seguido de la gelificación mediante reacciones de polimerización (Messing & Tang, 2017). Esta técnica permite la fabricación de materiales con estructuras porosas y propiedades ajustables mediante el control de parámetros como el pH y la concentración de reactivos. El método sol-gel ha sido aplicado en la fabricación de diversos materiales, incluyendo recubrimientos, catalizadores y materiales ópticos. L. M. Liz-Marzán en “Nanostructured Materials by Sol-Gel Processing” (2020) discute cómo el método sol-gel ha permitido la producción de nanopartículas y nanocompuestos con aplicaciones en óptica y electrónica. Liz-Marzán destaca la flexibilidad del método para ajustar las propiedades del material a nivel nanométrico (Liz-Marzán, 2020).

El método sol-gel ofrece varias ventajas, como la posibilidad de obtener materiales con alta pureza y homogeneidad a bajas temperaturas. R. J. Somoroff en “Advantages and Limitations of the Sol-Gel Method for Fabrication of Advanced Materials” (2019) señala que, aunque el método es altamente versátil, también enfrenta desafíos, como la tendencia a la formación de defectos durante la gelificación y el secado, que pueden afectar las propiedades finales del material

(Somoroff, 2019). El impacto del método sol-gel en la tecnología de materiales ha sido significativo, especialmente en el desarrollo de nuevos recubrimientos y materiales funcionales. El libro “Sol-Gel Science and Technology” de C. J. Brinker y G. W. Scherer (2021) ofrece una visión comprensiva sobre los principios, técnicas y aplicaciones del método sol-gel. Brinker y Scherer abordan tanto los fundamentos científicos como las aplicaciones industriales del método, subrayando su relevancia en la tecnología de materiales avanzados (Brinker et al., 2021)

CAPÍTULO III. FUNDAMENTACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Planteamiento del Problema

Los COV's son contaminantes atmosféricos críticos debido a su capacidad de reaccionar con óxidos de nitrógeno para formar ozono troposférico, contribuyendo a la contaminación urbana conocida como smog (EPA, 2021). Este término, originado de “smoke” (humo) y “fog” (niebla), describe una forma de contaminación que afecta las áreas urbanas bajo condiciones específicas y se clasifica en smog industrial y fotoquímico (Seinfeld & Pandis, 2016; WHO, 2018).

El smog industrial, común en ciudades como Londres y Chicago, resultó de la quema de carbón y petróleo con alto contenido de azufre, generando una mezcla de dióxido de azufre y partículas suspendidas, con efectos nocivos para la salud humana y el medio ambiente (Wichmann, 2004; Fenger, 1999). Aunque los países desarrollados han reducido este tipo de smog mediante tecnologías avanzadas y regulaciones estrictas, persiste en regiones con alta actividad industrial, como China y Europa del Este (Zhang et al., 2020).

El smog fotoquímico se produce cuando los COV's y los óxidos de nitrógeno reaccionan con la luz solar, una situación común en áreas urbanas con tráfico intenso y condiciones climáticas específicas, como cielos despejados y altas temperaturas (Seinfeld & Pandis, 2016). Este tipo de smog resulta en la formación de ozono troposférico, que afecta la salud humana y la vegetación (WHO, 2018). Durante los meses de verano, el smog fotoquímico alcanza su punto máximo, ya que la alta radiación solar y las temperaturas elevadas favorecen estas reacciones químicas (EPA, 2021).

Las reacciones fotoquímicas desempeñan un papel esencial en la formación de smog. Los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos volátiles emitidos por el tráfico vehicular interactúan con el oxígeno bajo la influencia de la luz solar para producir ozono a nivel del suelo. Este ozono reacciona con otros contaminantes formando compuestos secundarios como peróxido de hidrógeno y formaldehído, con efectos nocivos para la salud y el ambiente (WHO, 2018). Estos efectos incluyen irritación ocular, problemas respiratorios y daños a la vegetación (UNEP, 2022).

El ozono troposférico derivado de los COV's también tiene un impacto directo en la salud y los ecosistemas. Este contaminante puede causar daños respiratorios y afectar la productividad agrícola (EPA, 2022). Estudios recientes confirman que la reducción de las emisiones de COV's puede disminuir estos efectos adversos, lo cual es esencial en regiones con alta exposición a estos compuestos (Atkinson, 2000).

Diversos COV's de alto peso molecular son persistentes en el ambiente debido a su resistencia a la oxidación, permitiendo su transporte a grandes distancias y afectando ecosistemas lejanos (Guo et al., 2004). La exposición a estos compuestos varía en toxicidad, y los efectos pueden manifestarse en el hígado, riñones y sistema nervioso central, o provocar cáncer tras exposiciones prolongadas (EPA, 2021). Los síntomas a corto plazo incluyen irritación ocular, dolores de cabeza y problemas respiratorios (USEPA, 1991; DHS, 1989; Godish, 1990).

La exposición a largo plazo a COV's afecta a poblaciones vulnerables, como los niños, quienes tienen mayor susceptibilidad debido a sus mecanismos de desintoxicación inmaduros. Estudios revelan que los niños presentan concentraciones de COV's en sangre más altas que los adultos, afectando su

desarrollo y aumentando el riesgo de enfermedades respiratorias (Sexton et al., 2005). En España, la red INMA lleva a cabo un estudio longitudinal sobre los efectos de los contaminantes en una cohorte infantil, encontrando impactos significativos en el desarrollo y salud (Ramon et al., 2005).

Los COV's también intensifican el efecto invernadero al absorber radiación infrarroja y aumentar las concentraciones de gases de efecto invernadero, como el metano (IPCC, 2021). Al ser compuestos persistentes y volátiles, su control es prioritario, especialmente en áreas urbanas con alta actividad vehicular e industrial, ya que el tráfico representa una fuente importante de emisiones de estos contaminantes (WHO, 2022).

Los hidrocarburos aromáticos, como el benceno, el tolueno y los xilenos, son particularmente peligrosos. El benceno es un carcinógeno conocido, asociado con un mayor riesgo de leucemia (WHO, 2022). Además, el uso de ciertos COV's en productos químicos domésticos, como cloroformo y diclorometano, plantea riesgos adicionales de toxicidad (IARC, 2021).

El desarrollo de nanomateriales para mitigar la contaminación atmosférica enfrenta varios desafíos significativos. Uno de los principales problemas es el alto costo y la dificultad para producir estos materiales a gran escala sin que el precio se vuelva prohibitivo. La síntesis de nanomateriales, especialmente aquellos basados en óxidos metálicos como el TiO_2 , requiere procesos costosos y energéticamente intensivos, lo que limita su viabilidad en aplicaciones industriales a gran escala (Lu & Astruc, 2020). Además, la introducción de estos materiales en el entorno plantea riesgos potenciales para la salud humana y el medio ambiente. Aunque los nanomateriales pueden ser eficaces en el laboratorio, hay

incertidumbres sobre sus efectos a largo plazo, particularmente sobre su toxicidad si se acumulan en ecosistemas acuáticos o si se inhalan en concentraciones elevadas (European Chemicals Agency, 2019).

Otro desafío importante es la eficiencia de los nanomateriales en la degradación de contaminantes, como los compuestos orgánicos volátiles (COV's), bajo condiciones ambientales reales. Factores como la temperatura, la humedad y la intensidad de la luz solar pueden afectar significativamente la efectividad de la fotocatalisis y otros procesos de tratamiento (Gaya & Abdullah, 2008). Además, aunque los estudios de laboratorio suelen mostrar resultados prometedores, la implementación exitosa de estos materiales en entornos no controlados presenta dificultades adicionales, ya que las condiciones variables de contaminación y clima afectan su rendimiento (Khodakovskaya et al., 2011). Estos desafíos resaltan la necesidad de investigación continua y pruebas rigurosas para asegurar que los nanomateriales sean tanto eficientes como seguros en la mitigación de la contaminación atmosférica.

3.2. Hipótesis

El uso de nanomateriales del tipo M/TiO₂ en reacciones fotocatalíticas, evidenciará una eficiente manera de eliminación de compuestos orgánicos volátiles (COV's), con lo cual se podría implementar en metodologías que permitan disminuir los impactos negativos en la calidad del aire.

3.3. Objetivos

3.3.1. *Objetivo General*

Desarrollar una metodología para la eliminación de COV's utilizando técnicas fotocatalíticas mediante el uso de nanomateriales del tipo M/TiO₂ evidenciando la relación entre tamaño y actividad.

3.3.2. *Objetivos Específicos*

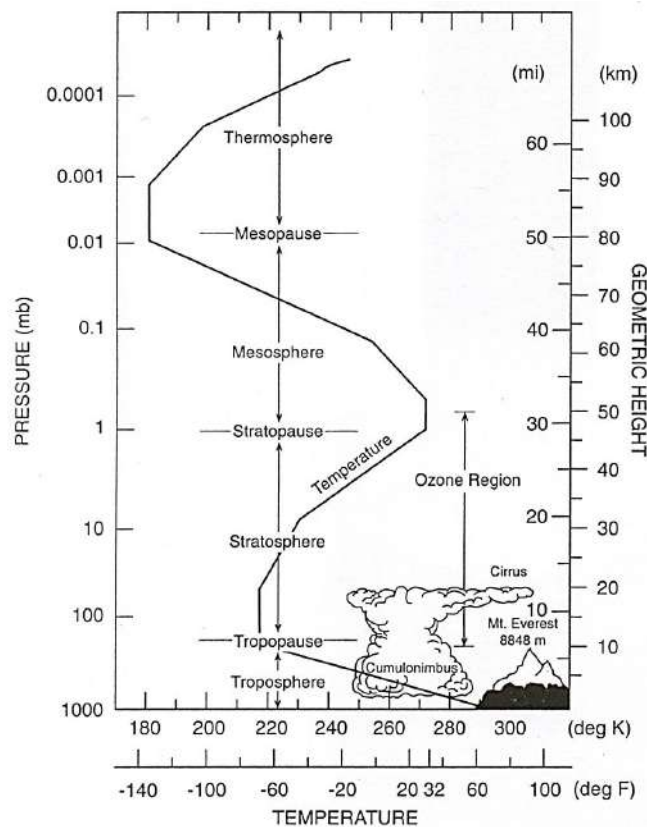
- Sintetizar los fotocatalizadores a utilizar por medio de rutas de química suave
- Realizar la síntesis de nanopartículas metálicas con diferentes tamaños
- Realizar la caracterización óptica de nanopartículas metálicas mediante espectroscopia de UV-Vis de las nanopartículas obtenidas, determinando el tiempo mínimo de reacción.
- Realizar la caracterización morfológica mediante microscopia electrónica de barrido por electrones secundarios y estructural mediante difracción de rayos X de las nanopartículas fabricadas.
- Analizar las reacciones catalíticas, llevadas a cabo en un reactor tipo Bach con fotocatalizadores de diferentes tamaños con finalidad de determinar su efectividad y viabilidad como solución para mitigar la contaminación por COV's

3.4. Justificación

La atmósfera terrestre, organizada en capas con funciones específicas, es crucial para mantener el equilibrio ambiental y proteger la vida, en la Figura 5 se puede observar que, las capas más densas, la troposfera y la estratosfera, se albergan procesos esenciales como la fotosíntesis y el ciclo del carbono, además de contener el ozono estratosférico, que filtra la radiación UV nociva (Caballero et al., 2007; Barry & Chorley, 2009)

Figura 5.

Estructura atmosférica dividida por capas.



Nota. La distribución vertical generalizada de la temperatura y la presión hasta aproximadamente 110 km de altitud. Se destaca especialmente la tropopausa y la zona de mayor concentración de ozono, acompañada de una capa cálida en niveles superiores. También se indican las altitudes típicas de las nubes estratosféricas polares y las nubes noctilucentes. Adaptado de NASA (s.f.), (Barry & Chorley, 2009).

Sin embargo, los efectos de las actividades antropogénicas sobre la atmósfera han intensificado la contaminación y alterado estos ciclos, generando una preocupación global sobre la calidad del aire y la salud pública (Nevers, 1998).

La contaminación atmosférica se manifiesta principalmente en forma de COV's, sustancias altamente reactivas y dañinas. Estos incluyen contaminantes como el benceno y el tolueno, reconocidos por su capacidad para formar ozono troposférico y smog, causando efectos graves en la salud humana y en los ecosistemas (EPA, 2021; WHO, 2018). Los COV's también son mutagénicos y carcinógenos, lo cual aumenta su relevancia en áreas urbanas y zonas con alta densidad industrial, donde sus concentraciones pueden superar los límites de seguridad (European Environmental Agency, 2020).

Además de sus efectos directos en la salud, los COV's contribuyen al cambio climático al interactuar con otros gases de efecto invernadero. La interacción de estos compuestos con la radiación solar potencia el efecto invernadero, incrementando la retención de calor en la troposfera, lo cual intensifica el calentamiento global y provoca alteraciones en los patrones climáticos (IPCC, 2014; Forster et al., 2007). Esta alteración del equilibrio atmosférico, que incluye cambios en la concentración de gases como el metano, agrava la crisis climática y justifica la necesidad de tecnologías de mitigación (IPCC, 2021).

Las fuentes de emisión de los COV's se encuentran tanto en actividades humanas como en procesos naturales. En áreas urbanas e industriales, las principales fuentes son los vehículos automotores, la quema de combustibles fósiles y el uso de solventes. Para controlar estas emisiones sin afectar la actividad económica, muchos países implementan regulaciones y tecnologías avanzadas que

mitigan los niveles de contaminación (Nevers, 1998). En la Tabla 3, se muestra la composición del aire seco a nivel del mar y hasta los 80 km, con las concentraciones de compuestos que mantienen el equilibrio atmosférico (Figuerelo et al., 2019). También, el Índice de Calidad del Aire permite monitorear los niveles de contaminantes y orientar políticas públicas de control, con el fin de proteger la salud pública (SEDEMA, 2016).

Tabla 3.

Composición del aire seco a nivel del mar. hasta alturas de unos 80 km.

Componente	% en volumen	Componente	% en volumen
Nitrógeno (N ₂)	78,085	Kriptón (Kr)	0,00011
Oxígeno (O ₂)	20,946	Hidrógeno (H ₂)	0,000058
Argón (Ar)	0,934	Óxido nitroso (N ₂ O)	0,000031
Dióxido de carbono (CO ₂)	0,0314	Monóxido de carbono (CO)	0,00001
Neón (Ne)	0,00182	Xenón (Xe)	$8,7 \times 10^{-6}$
Helio (He)	0,000524	Ozono (O ₃)	$(1-50) \times 10^{-6}$
Metano (CH ₄)	0,00015	Amoníaco (NH ₃)	$(0,01-1) \times 10^{-7}$

Nota. Fuente: (Figuerelo et al.,2019)

En este contexto, el desarrollo de inventarios nacionales de emisiones constituye una herramienta esencial para identificar y clasificar las fuentes de contaminación en categorías específicas: fijas, móviles y de área. Estos inventarios facilitan la gestión ambiental al proveer información clave para diseñar e implementar políticas de mitigación efectivas (SEMARNAT, 2018). Por ejemplo, en la Tabla 4. se categoriza cada fuente de emisión, subrayando la importancia de reducir las concentraciones de COV's mediante la regulación de sectores críticos,

como el almacenamiento de derivados del petróleo y el uso de solventes (SEDEMA, 2016). Según el Inventario Nacional de Emisiones (INEM), estas actividades son responsables de grandes cantidades de emisiones de COV's, lo que subraya la necesidad de implementar acciones específicas (SEMARNAT, 2024).

La identificación de las principales fuentes emisoras de COV's constituye un paso clave en el diseño de estrategias efectivas para el control de la contaminación atmosférica. De acuerdo con SEMARNAT (2024), actividades industriales, como el almacenamiento y transporte de derivados del petróleo, así como el uso de solventes, representan una proporción significativa de estas emisiones, afectando directamente la calidad del aire y la salud pública. En este contexto, el desarrollo y la aplicación de tecnologías emergentes se han planteado como herramientas prometedoras para abordar de manera directa estas emisiones.

Entre las tecnologías disponibles, destaca la fotocatalisis heterogénea con dióxido de titanio (TiO_2), reconocida por su capacidad para degradar contaminantes orgánicos en condiciones ambientales bajo irradiación de luz ultravioleta. Este proceso, descrito por Bekbölet et al. (1998), transforma los compuestos orgánicos en productos inertes como dióxido de carbono y agua, minimizando la generación de subproductos tóxicos. Sin embargo, la principal limitación de esta tecnología radica en su dependencia de la luz ultravioleta, que representa menos del 5 % de la radiación solar. Esto ha incentivado investigaciones dirigidas a extender su actividad al espectro visible mediante el dopado con metales o modificaciones estructurales (Teh & Mohamed, 2011).

Tabla 4.*Emisiones por Fuente Fijas.*

Fuente de Emisión	Categoría	PM10	PM2.5	SO₂	CO	NO_x	COV's	NH₃
Fuentes Fijas	Federales	137,45 8.84	93,684 .53	1,231, 313.42	255,64 8.52	441,01 2.31	85,919 .66	2,421. 92
Fuentes Fijas	Estatal	94,467 .03	54,285 .31	36,803 .58	54,061 .28	46,616 .43	38,730 .42	248.52
Fuentes de Área	Agropecuarias	234,09 7.39	125,67 2.33	4,649. 62	629,87 6.65	28,841 .63	70,968 .56	671,90 1.85
Fuentes de Área	Almacena miento y Transporte de Derivados del Petróleo	-	-	-	-	-	595,44 2.51	-
Fuentes de Área	Combustión Fuentes Industriales	128,08 3.89	123,35 5.68	5,217. 57	1,082, 544.57	69,937 .32	488,16 0.70	6,984. 55
Fuentes de Área	s Ligeras y Comerciales	23,025 .04	7,209. 98	6.28	14,251 .33	446.10	7,116. 59	0.00
Fuentes de Área	Fuentes Misceláneas	160,80 0.72	86,327 .98	5,822. 46	646,41 4.92	19,521 .53	54,961 .65	179,80 7.22
Fuentes de Área	Residuos	4,089. 33	3,746. 70	109.36	10,004 .02	663.32	132,55 6.83	10.42

Fuentes de Área	Uso de Solventes	-	-	-	-	-	629,35	-
Fuentes Móviles	Carreteras	144,31	110,70	15,039	7,517,	2,106,	1,420,	9,491.
		5.73	0.02	.62	130.78	571.99	543.04	08
Fuentes Móviles	No Carreteras	6,825.	6,537.	4,489.	59,796	134,72	13,645	25.81
Fuentes Naturales	Emisiones Biogénicas	-	-	-	-	1,001,	8,	-
						570.55	266,24	-
							9.18	

Nota. Cantidades en toneladas anuales. Si se muestran espacios vacíos en la posición de cifras, representan valores no reportados o nulos. Datos definitivos Inventario Nacional de Emisiones de México de Contaminantes Criterio año base 2018. Fuente: (SEMARNAT, 2024).

Para superar esta limitación, la adición de nanopartículas monometálicas ha demostrado ser una estrategia efectiva para ampliar la absorción de luz del TiO₂

hacia el espectro visible. Las nanopartículas de Au, Pd tienen propiedades ópticas que permiten la generación de resonancia de plasmón de superficie (LSPR), mejorando la transferencia de energía y la generación de pares electrón-hueco en el TiO₂. Esto potencia la eficiencia de la fotocatalisis en la degradación de COV's en condiciones de luz visible (Lee et al., 2016; Linic et al., 2011).

La combinación de TiO₂ y Au, Pd ofrece una opción avanzada y sostenible para el tratamiento de contaminantes en diversas aplicaciones, desde la industria hasta el ámbito doméstico. Esta tecnología puede implementarse en sistemas de purificación de aire, especialmente en áreas urbanas con altas emisiones de COV's, contribuyendo a la mejora de la calidad del aire y a la protección de la salud pública. *La Figura 5 ilustra* la estructura de la atmósfera y las variaciones de temperatura hasta los 110 km de altitud, destacando las zonas de alta concentración de ozono, donde el uso de esta tecnología podría mitigar los efectos negativos de la contaminación en estas capas atmosféricas (Barry & Chorley, 2009).

CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA

4.1. Generalidades

En este capítulo se describen los fundamentos y metodologías empleadas en la preparación de materiales basados en TiO_2 y nanopartículas de Pd y Au, con el objetivo de determinar sus propiedades fisicoquímicas, estructurales, morfológicas, ópticas y superficiales para su aplicación como fotocatalizadores en la eliminación de COV's.

Además, se presentan las diferentes técnicas analíticas con las que fueron caracterizados los materiales a utilizar, entre ellas se encuentran: la difracción de rayos X en polvos (DRX; para determinar la estructura cristalina y fases presentes), la espectroscopía de ultravioleta – visible (UV – Vis; para evaluar la absorción óptica y calcular la energía de banda prohibida), microscopía electrónica de barrido (MEB-EDX; para analizar la morfología superficial y composición elemental) y microscopía electrónica de transmisión (MET; para observar características estructurales a nivel nanométrico.).

El propósito principal de esta caracterización es obtener información clave sobre las propiedades de los materiales y detectar aspectos que puedan ser optimizados para mejorar su desempeño fotocatalítico. En la última parte de este capítulo se describen las características del sistema experimental empleado en la evaluación de la eliminación de los COV's.

4.2. Métodos de Preparación

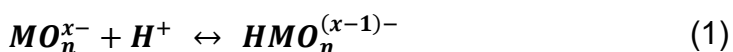
4.2.1. Método Sol-Gel

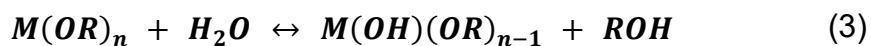
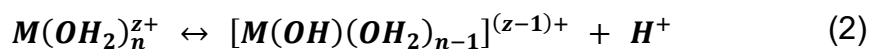
El método sol-gel es un proceso de química suave con una gran versatilidad que ofrece la posibilidad de diseñar la geometría de las cadenas de poros y la viabilidad de obtener distribuciones estrechas de tamaño por medio del control estricto de las condiciones de síntesis (Chen & Mao, 2007; Casado, 2005)

Este método se fundamenta en reacciones de polimerización inorgánica, donde se generan redes inorgánicas a través de la formación de una suspensión coloidal (sol) y su posterior gelación para dar lugar a una red inmersa en una fase líquida (gel). A continuación, se detallan las etapas involucradas en estas reacciones de polimerización.

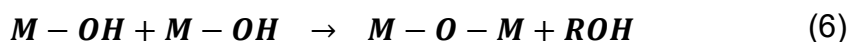
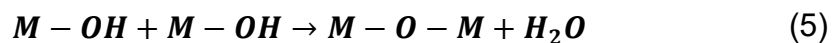
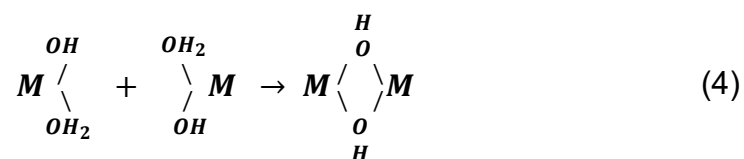
- Hidroxilación del precursor. En esta etapa se lleva a cabo la formación de enlaces M-OH, donde M es el metal. Si el precursor es inorgánico la reacción se lleva a cabo mediante la modificación del pH en solución acuosa. Por el contrario, si el precursor es orgánico (alcóxidos) basta con adicionar agua para dar lugar a la hidrólisis.

En la Ecuación 1 y Ecuación 2 se muestra la hidroxilación de los precursores inorgánicos, en los cuales, se puede llevar a cabo la protonación de un oxoanión, Ecuación 1 o la desprotonación de un ion catiónico, Ecuación 2(2). Por su parte, se muestra la hidrólisis de precursores orgánicos, Ecuación 3





- Condensación. Reacción que sigue a la hidroxilación, donde ocurre la liberación de una molécula de agua y/o una molécula de alcohol.



La etapa de condensación se divide en dos pasos la oxilación, Ecuación 4 y la oxolación donde sale una molécula ya sea de agua, Ecuación 5 o de alcohol, Ecuación 6, (Livage et al., 1989).

La evolución de las etapas de hidroxilación y condensación son fuertemente influenciadas por diversos factores entre los cuales se encuentran (Chen & Mao, 2007; Casado, 2005; Livage et al., 1989; Bokhimi Morales et al., 1995): a) Relación molar H₂O/alcóxido; b) Solvente; c) Relación molar solvente/alcóxido; d) Temperatura de reacción; e) Tiempo de reacción; f) Precursor metálico; g) pH de la reacción; h) Tipo de catalizador; i) Orden de adición de los reactivos; j) Velocidad de adición de los reactivos; k) Agitación; l) Tipo de reactor; m) Aditivos (surfactantes).

Las alteraciones en estos factores de síntesis juegan un papel crucial en las características del producto final, lo que proporciona al método sol-gel una gran flexibilidad. No obstante, esta metodología también presenta retos para controlar y gestionar la morfología de los productos obtenidos, debido a la cantidad de variables que deben ser manejadas de manera rigurosa. Con el fin de cumplir los objetivos de esta tesis, se optó por emplear el método sol-gel para la preparación del TiO_2 .

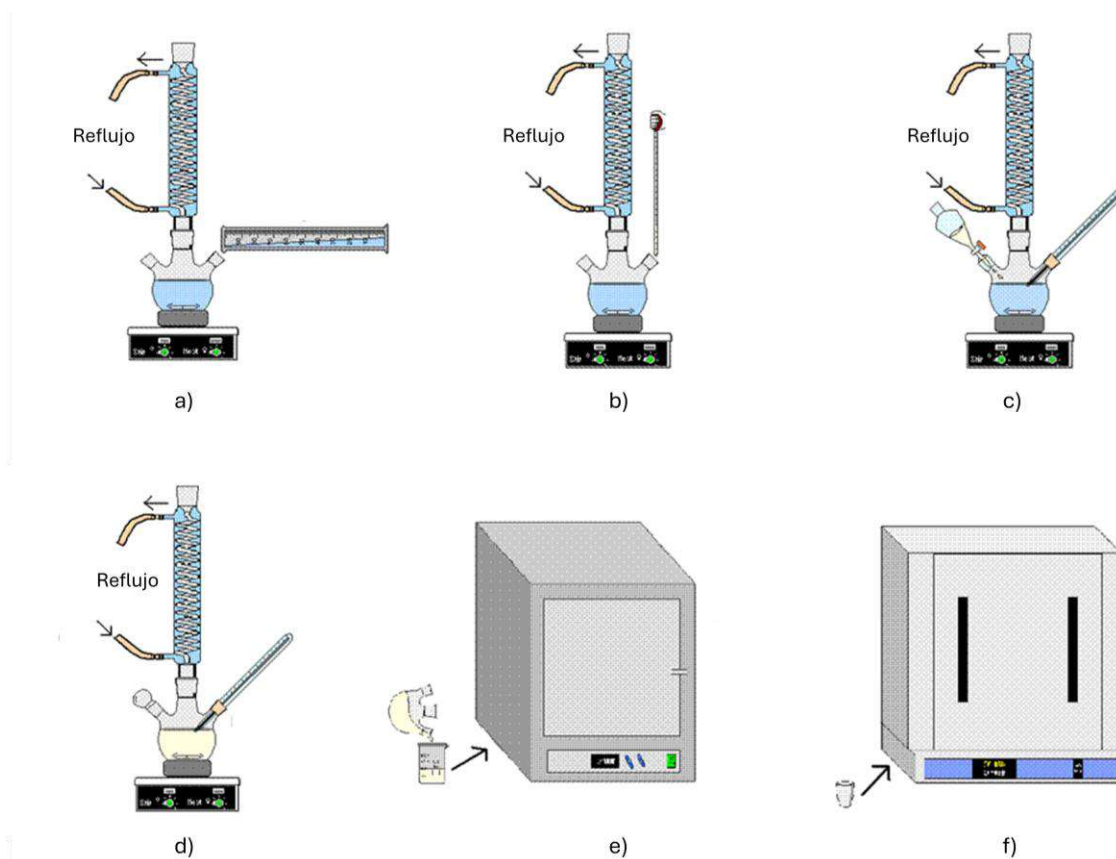
4.2.2. Síntesis del TiO_2 utilizando diferentes catalizadores de hidrólisis.

Para la preparación del TiO_2 por el método sol-gel se emplearon como precursores el butóxido de titanio(IV), $(\text{Ti}[\text{O}(\text{CH}_2)_3\text{CH}_3]_4$, Sigma Aldrich; grado reactivo; 97%), agua desionizada y como catalizador de hidrólisis se empleó ácido acético (CH_3COOH concentrado, Sigma Aldrich). En la **Figura 6**. Esquema del proceso de síntesis de TiO_2 mediante el método sol-gel. Figura 6. se muestra el esquema de preparación del TiO_2 . El procedimiento experimental consistió en colocar un matraz de tres bocas sobre una parrilla de agitación y acoplarlo a un sistema de reflujo y temperatura de 80°C . Enseguida se colocó el agua desionizada y posteriormente se adicionó el ácido, catalizador de la hidrólisis, con una relación ácido: alcóxido, 0.14:1. Posteriormente se incorporó gota a gota el butóxido de titanio.

La relación molar agua: alcóxido de 43:1 y ácido: alcóxido de 0.14:1. A partir de la incorporación de este último reactivo se dejó reaccionar a la mezcla por 2 horas. Una vez finalizado el tiempo de reacción el gel obtenido fue secado en la estufa a 100°C y finalmente fue tratado térmicamente a 400°C durante 4 horas con una rampa de calentamiento de $1^\circ\text{C}/\text{min}$.

Figura 6.

Esquema del proceso de síntesis de TiO_2 mediante el método sol-gel.



Nota. a) y b) Preparación de la solución precursora (Sol): Se lleva a cabo mediante la adición de agua desionizada, seguida de la adición de un ácido catalizador de hidrólisis, manteniendo la mezcla bajo agitación magnética sin aplicar temperatura. c) Hidrólisis: El precursor metálico reacciona con el agua, lo que conduce a la formación de grupos hidroxilo (OH) en el centro del metal, etapa crucial para preparar la base del material. d) Condensación: Se realiza a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 2 horas bajo agitación constante, promoviendo la formación de una red tridimensional de enlaces Ti-O-Ti. e) Secado: El material obtenido se somete a un secado controlado a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 12 horas para facilitar la evaporación de agua y solventes residuales. f) Calcinación: El material seco se calienta a $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 4 horas para eliminar los residuos orgánicos y consolidar la estructura cristalina del TiO_2 .

4.2.3. Preparación de los catalizadores.

Para la preparación de los catalizadores se empleó el método de impregnación (se emplea este procedimiento por la gran facilidad de reproducibilidad de catalizadores en condiciones equivalentes), involucrado primero el acondicionamiento del soporte y segundo la deposición de la fase activa en el soporte.

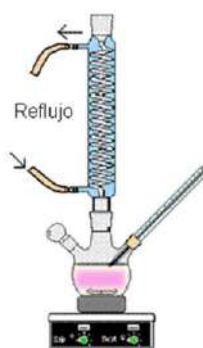
4.3. Condiciones Experimentales, Preparación de Nanopartículas Monometálicas.

El método de reducción química, denominado “Reflujo De Soluciones Alcohólicas”, se utilizó para preparar dispersiones coloidales de nanopartículas metálicas estabilizadas por polímeros. Se reconoció por su bajo costo, ya que no requiere equipos sofisticados, como sistemas de alto vacío o aditamentos especializados. En la **Figura 7** se muestra el esquema de preparación.

Éste consiste en una parrilla de calentamiento, la cual posee un regulador que controla la velocidad de agitación y la temperatura en el reactor. Un matraz de bola con fondo plano es utilizado como reactor. En un extremo, se suspende un termómetro que mide la temperatura alcanzada en el sistema de reacción. En la parte central lleva acoplado un sistema refrigerante para el proceso de reflujo. Los componentes del reactor siempre fueron limpiados tenazmente antes de ser usados. Utilizando este montaje, se prepararon las dispersiones coloidales de nanopartículas monometálicas de Au y Pd.

Figura 7.

Esquema preparación de nanopartículas monometálicas, mediante el Método Reflujo De Soluciones Alcohólicas



Nota. Representación del montaje del equipo para la preparación de nanopartículas monometálicas

4.3.1. Preparación de dispersiones coloidales de nanopartículas monometálicas de Au y Pd.

Para preparar las dispersiones coloidales de las nanopartículas monometálicas de Pd, Au, se utilizó el método anteriormente mencionado de reflujo de soluciones alcohólicas, Para ello se prepararon soluciones de ácido cloroáurico (0.033 mmol en 25 mL de etanol) disolviendo los cristales de HAuCl_4 etanol. Las soluciones de cloruro de paladio (0.033 mmol en 25 mL de etanol). Agitando hasta su disolución total a temperatura ambiente.

La síntesis de NP's Au se realizó mezclando 1 ml de extracto etanolico con 9,5 ml de solución de HAuCl_4 preparada (Sigma-Aldrich 99,9%) y el extracto de *Agave Potatorum*. La mezcla resultante se calentó a reflujo a 60 C, tomando alícuotas en diferentes períodos de tiempo para monitorear el crecimiento Cinética por espectroscopía UV-Vis. Las NP's Au obtenidas se mantuvieron en oscuridad y refrigeración a 4 C hasta su uso. Mismas relaciones se obtuvieron para las NP's Pd.

4.3.2. Impregnación de Partículas monometálicas de Pd y Au coloidal.

La cantidad de partículas de Pd y Au obtenidas a partir del método coloidal es la cantidad necesaria para obtener 1.0 % en peso de Pd o Au del soporte seleccionado (5.0 gr de muestra TiO_2). Los 5.0 gr de muestra TiO_2 son diluidos en 100 mL de metanol y las partículas de Pd y Au también diluidas en 100 mL de metanol son mezclados en un matraz de destilación y se deja en ultrasonido por una hora para posteriormente destilar la solución en el rotovapor por un promedio de 12 horas una vez seco el material ya se tiene listo el catalizador para probarlo en las reacciones seleccionadas (Araujo, 2011).

4.3.3. Características del sistema de reacción.

La oxidación de benceno como molécula tipo de los COV's se realizó a baja presión en un reactor Bach usando una celda de irradiación interna, se purgo con helio, para posteriormente a 200 ml de agua destilada se le agrego 25 mg de material semiconductor se dispersó usando agitación vigorosa; para posteriormente adicionar la cantidad necesaria de benceno para tener una concentración de 50 ppm de benceno molécula que utilizaremos como molécula tipo que representa los COV's.

Para posterior y simultáneamente colocar una bomba de recirculación, alineado al cromatógrafo de gases a una velocidad de 50 ml por minuto y burbujeando en el sistema de reacción. El reactor es de vidrio, Figura 1. (5,5 cm de diámetro y 200 ml de volumen solución), con un tubo de cuarzo concéntrico que contiene una alta presión Lámpara de Hg Pen-Ray ($\lambda = 254 \text{ nm}$, $2,2 \text{ mW cm}^{-2}$) utilizada como fuente de luz.

Figura 8.

Montaje del reactor experimental.



Se realizaron mediciones. Determinados por medio de la concentración la cantidad de benceno convertido.

Se presenta en la Figura 9 un diagrama general del sistema de reacción utilizado en la caracterización de los catalizadores por sus actividades catalíticas.

La conversión de cada reactivo X fue calculada según la Ecuación 7

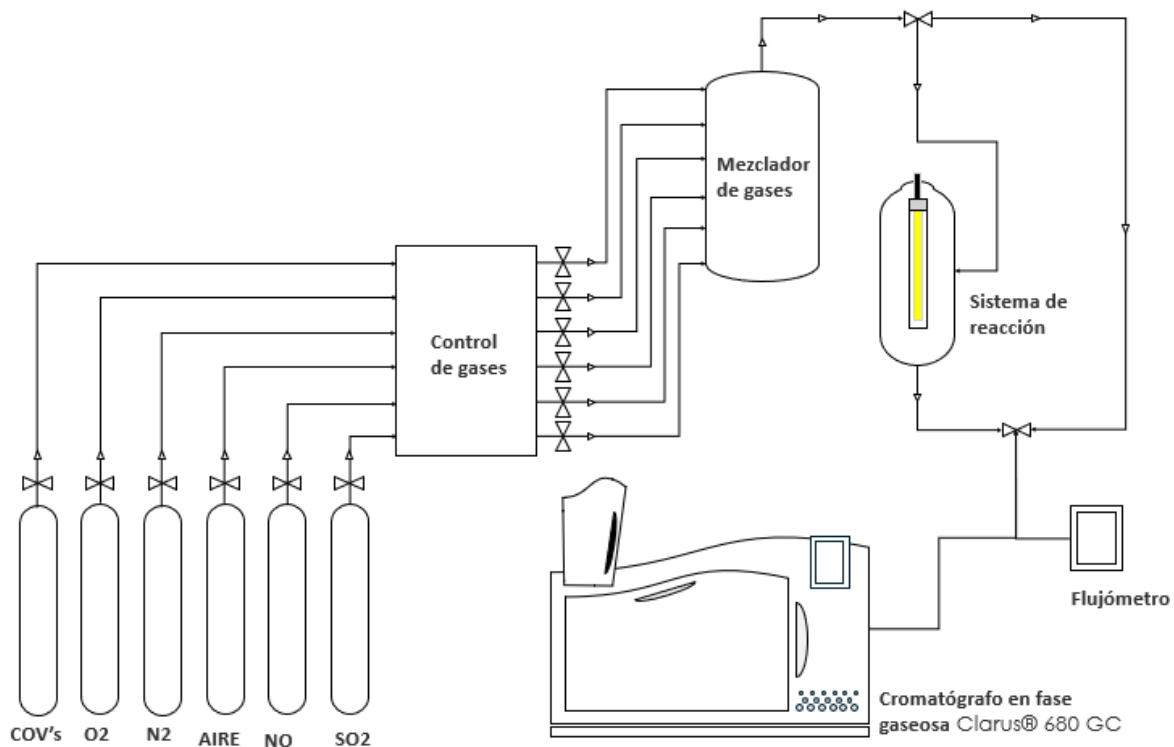
$$\text{conversión}(\%) = \frac{(X_o - X_f)}{X_o} 100 \quad (7)$$

Donde: X_o , es la concentración inicial de X introducido en el experimento. X_f , es la concentración final de X a la temperatura requerida.

Los productos de solución fueron analizados cualitativamente en un cromatógrafo Perkin Elmer Clarus 680 donde se determinó la producción de los productos resultantes.

Figura 9.

Diagrama de flujo del sistema de reacción, utilizado en este trabajo



4.4. Técnicas de Caracterización

4.4.1. *Caracterización estructural*

La evaluación estructural abarca importantes áreas incluyendo la identidad, cristalinidad, la morfología de las partículas, y la composición de las muestras. En esta sección se discuten los conceptos teóricos de las técnicas de caracterización empleadas y los parámetros de medición utilizados en cada una de ellas.

4.4.1.1. Difracción de Rayos X en Polvos (DRX)

Se puede obtener información sobre la estructura cristalina de un material usando Difracción de rayos X. Los rayos X se definen como una radiación electromagnética de longitud de onda aproximada a $0.001 - 1 \text{ \AA}$, y se producen al excitar los electrones de las capas internas de un átomo. Dicho estímulo puede ser producido por electrones de alta energía. Cuando un electrón de alta energía golpea un material, al desacelerarse el electrón, cede energía, que es emitida en forma de fotones.

Cada vez que el electrón golpea un átomo, cede una parte adicional de su energía y cada interacción puede ser más o menos severa, produciendo fotones de longitudes de onda diferentes, dando origen a un espectro continuo. Si el estímulo original del electrón tiene la suficiente energía para excitar un electrón de un nivel inferior de energía, y pasarlo a uno superior. El electrón excitado no es estable y a fin de restaurar el equilibrio, el nivel inferior no ocupado se llena con electrones provenientes de un nivel superior.

Este proceso propicia la emisión de un espectro característico de rayos X que es diferente para cada tipo de átomo, la emisión de fotones con una longitud de onda característica se sobrepone en una serie de picos sobre el espectro continuo;

esta longitud de onda es un tanto menor que los espaciamentos interatómicos típicos de un sólido, los cuales son del orden de 2 – 3 Å. Por lo tanto, para los rayos X, un cristal se comporta como una rejilla de difracción tridimensional. Midiendo la separación de los máximos de Difracción de los rayos X por un cristal, puede encontrarse el tamaño de la celda unitaria y midiendo las intensidades, puede averiguarse algo acerca del arreglo de los átomos dentro de la celda unitaria.

El uso de la difracción de rayos X como técnica para analizar la estructura de los cristales, inicia con el descubrimiento de los efectos de difracción de rayos X en muestras de un monocristal, efectuado por Max Von Laue en 1912. Laue sugirió que los rayos X se podrían difractar al pasar a través de un cristal, Figura 10. La difracción surge como resultado de las interferencias entre ondas. Si las ondas parten de una fuente común, sus fases relativas dependen de sus longitudes de camino.

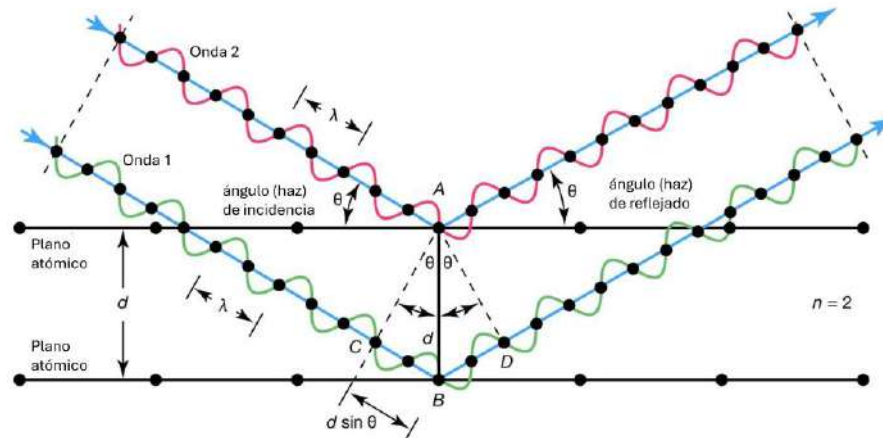
La ubicación de los máximos de difracción fue explicada por W. L. Bragg basándose en un modelo muy simple en el que se supone que la radiación X se refleja especularmente desde los planos sucesivos (hkl) del cristal, y en el que los máximos de difracción sólo se encuentran para direcciones de incidencia y reflexión tales que las reflexiones de los planos adyacentes de un sistema interfieran en forma constructiva, con diferencia de fase de $2\pi n$ radianes, en donde n es un entero. Así, los haces fuertemente difractados deben propagarse fuera del cristal, en direcciones para las que se satisface la condición de Bragg, Ecuación 8

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (8)$$

Donde: λ es la longitud de onda de los rayos X, d es la distancia de separación entre planos atómicos adyacentes y θ es el ángulo de incidencia entre el plano atómico y el haz incidente (Análisis instrumental, 2008; Skoog et al., 2002)

Figura 10.

Difracción de Bragg, producida por un cristal.



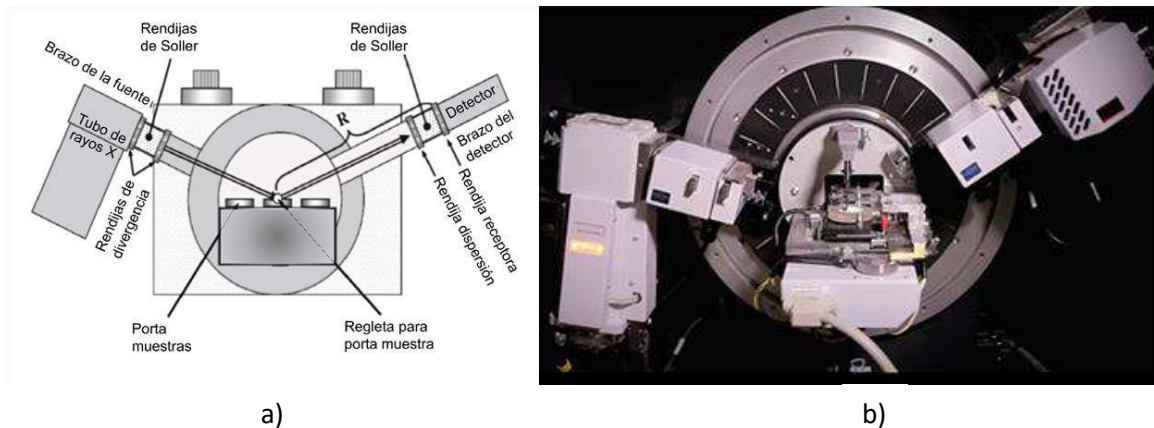
Nota. Las ondas 1 y 2, en fase entre sí, chocan con los átomos A y B de un cristal que tiene una distancia de separación d entre sus planos atómicos o reticulares. El ángulo reflejado (de choque) θ , como se muestra experimentalmente, es igual al ángulo incidente θ . La condición para que las dos ondas permanezcan en fase después de que ambas se reflejen es que la longitud del camino CBD sea un número entero (n) de longitudes de onda (λ), o $n\lambda$. Pero, desde el punto de vista geométrico, CB y BD son iguales entre sí y a la distancia d por el seno del ángulo reflejado θ , o $d \sin \theta$. Fuente: *adaptado Encyclopædia Britannica, Inc.*

Por lo tanto, al ser irradiada la muestra a analizar, los Rayos X se difractan con ángulos que dependen de las distancias interatómicas. El método analítico de polvos consiste en irradiar con Rayos X sobre una muestra formada por multitud de cristales colocados al azar en todas las direcciones posibles.

En este trabajo de investigación los análisis por difracción de rayos X (DRX) de los semiconductores se llevaron a cabo en un Difractómetro D8 Advance de Bruker, con radiación $\text{CuK}\alpha$, $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$, con óptica primaria de haces paralelos y detector de centelleo como se muestra en la Figura 11. Las condiciones de análisis utilizadas para la caracterización de los materiales fueron corridas de 5° a 90° con incrementos de 0.05° y un tiempo de paso de 1 segundo.

Figura 11.

Difractómetro de rayos X



Nota: a) Descripción del esquema de Difractómetro de rayos X; b) Difractómetro de rayos X. (SGM-GCEO).
Fuente: (Pecharsky & Zavalij, 2003), SGM. (2017).

La preparación de la muestra en polvo para su análisis por DRX consistió en moler finamente la muestra en un mortero de ágata y humedecerlo con acetona para asegurar una completa homogenización del semiconductor. Posteriormente, la muestra fue colocada en un portamuestras y este a su vez fue posicionado sobre la regleta del equipo para dar inicio al barrido. El equipo de DRX se encuentra en interfase con una computadora en donde se encuentra instalado el software *Diffraact Plus Evaluation* en el cual son establecidas las condiciones a las que se desea analizar la muestra.

El haz de difracción generado durante el análisis es detectado por el equipo y transformado en pulsos eléctricos (picos de difracción) de diferentes intensidades de acuerdo con la naturaleza de cada muestra, generando así el difractograma correspondiente. Por último, las series de difractogramas generados son interpretados por medio de la comparación entre los picos de difracción obtenidos y

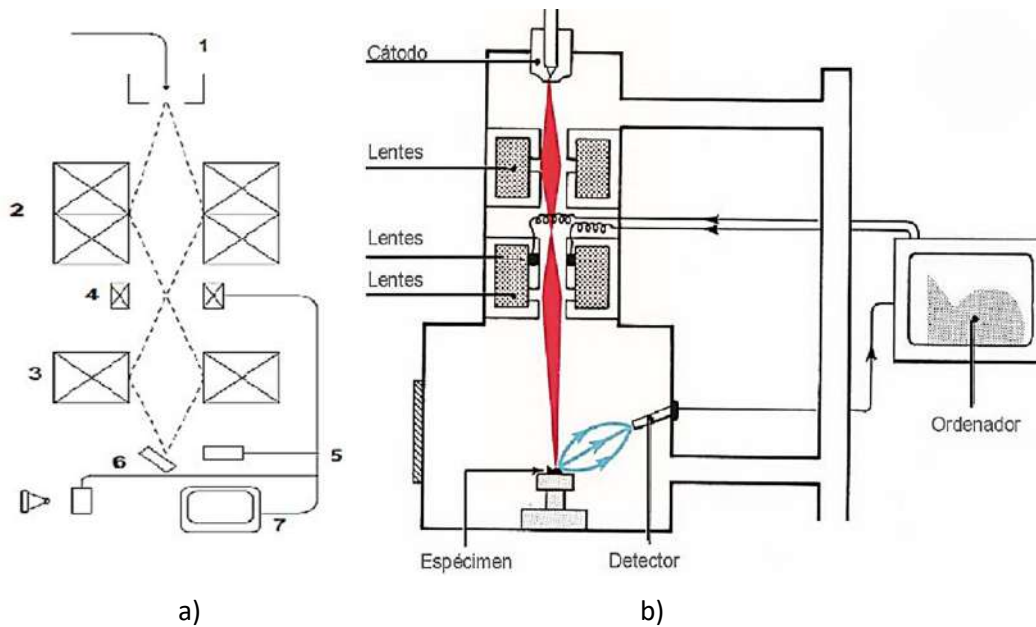
patrones de difracción de rayos X (de categoría estrella, indexados y calculados) de la base de datos “PDF Maint 2005”.

4.4.1.2. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

El principio del análisis de la microscopia electrónica de barrido MEB, se fundamenta en el bombardeo mediante un haz de electrones de la superficie de la muestra a analizar. A nivel general, un microscopio electrónico difiere de un óptico en que el bombardeo de electrones reemplaza a los rayos de luz y las lentes electromagnéticas a las ópticas.

Esto mejora mucho la resolución, ya que es proporcional a la longitud de onda λ , de la descarga incidente. Así cuando es menor λ , menor es el tamaño que podemos diferenciar en el microscopio, lo que significa una mayor resolución, cuando el haz entra en contacto con la superficie de la muestra una porción de electrones es reflejada a la superficie, pero otra parte penetra unas pocas capas atómicas, siguiendo una trayectoria complicada muy diferente de una recta, antes de volver a emerger a la superficie.

El empleo de estos electrones conduce a la obtención de la imagen con diferentes características. La señal emitida por los electrones y la radiación resultado del impacto del haz, se recoge a través de un detector y se amplifica para cada posición de la sonda. Las variaciones en la intensidad de las señales resultantes se reproducen conforme la sonda barre la superficie de la muestra y dependen de la composición elemental del material, la concentración, así como la distribución de los elementos. El resultado es una imagen topográfica amplificada de la muestra (Brandon & Kaplan, 1999; Calderón et al., 2020).

Figura 12.*Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)*

Nota. a) 1. Cañón de electrones: Genera el haz de electrones de alta energía; 2. Lente condensadora: Ayuda a converger el haz de electrones y a reducir su tamaño; 3. Lente final: Converge y reduce el haz para que incida correctamente sobre la muestra; 4. Bobinas deflectoras: Permiten el barrido del haz de electrones sobre la muestra; 5. Detector de electrones secundarios: Captura una parte de los electrones secundarios, decodificándolos y amplificándolos para formar la imagen en la pantalla o monitor; 6. Muestra: Es el elemento que se va a analizar. (Urbina et al., 1997). b) Esquema del funcionamiento de un MEB, (Albaladejo, 2007).

En la Figura 12 se presenta un esquema simple de la configuración y funcionamiento de un MEB. Generalmente, estos microscopios emplean cañones termoiónicos convencionales que operan entre 5 y 50 KeV, correspondiendo esta energía a electrones con una longitud de onda entre 0,17 y 0.05 Å. Esta técnica nos permite obtener información directa sobre la morfología y tamaños de las partículas, características que pueden estar relacionados con diferentes tipos de centros activos existentes en el fotocatalizador.

Por otra parte, también puede dar información indirecta sobre el grado de interacción existente entre diferentes fases. La caracterización de la microestructura de los fotocatalizadores preparados en este trabajo de tesis, fueron analizados en

un microscopio electrónico de barrido de bajo vacío JSM-6490LV de JEOL, acoplado a una sonda de microanálisis de dispersión de energía de rayos X (EDS en inglés) INCA X-Sight de OXFORD instruments.

La preparación de la muestra para su análisis consistió en colocar una capa delgada del semiconductor sobre una cinta de carbón adherida al porta-muestras. Posteriormente, la muestra fue introducida en la cámara de vacío dentro del Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) bajo las siguientes condiciones de operación: voltaje de aceleración de 20 kV, y una distancia de 12 mm entre la muestra y el filamento (distancia de trabajo) además de un haz de 50 (spot size). Bajo estas condiciones y de acuerdo con la morfología y tamaños de partícula encontrados en las muestras se profundizó en el relieve empleando las diferentes opciones bajo el modo de electrones secundarios y/o retrodispersados.

Los resultados más interesantes fueron registrados por medio de micrografías y su correspondiente análisis elemental vía EDX o EDS recubriendo previamente las muestras con oro para hacerlas conductoras por medio de un equipo de recubrimiento Denton Vacuum Desk IV.

4.4.1.3. Microscopia Electrónica de Transmisión (MET)

Cuando nos interesa saber sobre las propiedades de un material cristalino como la geometría de la celda unitaria, el sistema cristalino, la dimensión de los parámetros de red, la dirección del crecimiento de cristal, el tamaño de grano, etc., se hace uso de un microscopio electrónico de transmisión, en el cual se aprovecha el postulado de Broglie, Ecuación 11 el cual dice que puede asociarse una longitud de onda λ a todo flujo de partículas, según la relación:

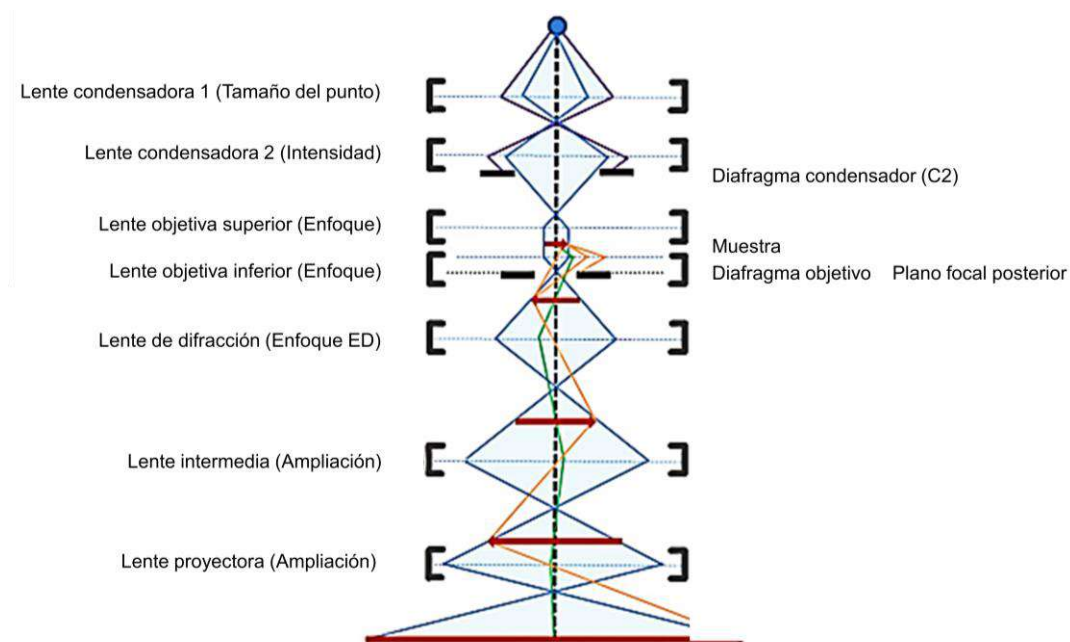
$$\lambda = h/p \quad (9)$$

Donde p es el momento de dichas partículas, desde entonces se pensó, que el flujo continuo de electrones debía comportarse como un frente de ondas, lo cual se demostró en los años siguientes con la interferencia de dos fuentes coherentes de electrones.

Posteriormente se descubre que el flujo continuo de electrones funciona como un lente, un campo magnético simétrico inhomogéneo con simetría axial respecto al haz, Figura 13. La idea de que un haz de electrones produjera imágenes aumentadas se materializa en 1932.

Figura 13.

Esquema de la configuración de un Microscopio Electrónico De Transmisión (MET).



Nota. El rayo se muestra en azul; los paréntesis grises representan lentes, etiquetadas con sus nombres y la función del microscopio que las controla; las barras negras son aberturas; y la flecha roja es el espécimen y sus imágenes (intermedias). Los caminos de los electrones dispersos están dibujados en naranja y verde.
Fuente: Adaptado (Franken et al., 2020)

El principio del MET consiste en irradiar una capa delgada de la muestra con el haz de electrones de una densidad de corriente uniforme en el intervalo de 100 hasta varios cientos de KeV. De acuerdo con la naturaleza de cada muestra, la cantidad total de los electrones emitidos se dividirá en 3 formas.

La primera corresponderá a los electrones transmitidos por el material en estudio, otra cantidad de electrones será dispersada. La tercera parte dará lugar a interacciones que con llevan a distintos fenómenos como emisión de luz, electrones secundarios y Auger, rayos X, etc. Todas estas señales se pueden emplear para obtener información sobre la naturaleza de la muestra (morfología, composición, estructura cristalina, estructura electrónica, etc.). (Brandon & Kaplan, 1999; Urbina et al., 1997)

Para el análisis de los materiales obtenidos por la ruta coloidal en MET se utilizó el microscopio electrónico de transmisión (MET) JEOL 2010 equipado con una sonda analizador de dispersión de energía de rayos X, en el cual se colocó la muestra en una rejilla de cobre de 400 mesh (marca Electron Microscopy Science modelo 400 C-FC).

La preparación de la muestra consistió en agregar una gota de la solución coloidal en una rejilla de cobre y dejarla en evaporación por 24 hras para posteriomete guardarla y colocarla para su análisis en la cámara del microscopio y se procedió a realizar el análisis con una energía de 200 KeV.

4.4.2. Caracterización óptica de los materiales

Muchos de los efectos ocasionados en un material por impurificación del material puro o por los efectos de confinamiento cuántico en los cristales nanométricos son evidentes en sus propiedades ópticas. En esta sección, se

plasman los conceptos básicos para utilizar la espectroscopia de absorción UV/VIS en la determinación del ancho de banda de los materiales semiconductores propuestos en este trabajo de tesis, así como para la determinación de la concentración de los contaminantes a degradar.

4.4.2.1. Espectroscopia de Absorción Ultravioleta/Visible

La espectroscopia de absorción es una técnica donde se realiza la medición e interpretación del cambio en la radiación electromagnética absorbida o emitida, por las moléculas o iones de una muestra, debido al cambio del estado energético. La interacción de la radiación con el material se efectúa en la totalidad del espectro electromagnético, y solo difieren en los efectos que pueda producir, cuando interactúa con el material. Los cambios en la región visible y ultravioleta involucran a las energías electrónicas de los átomos o moléculas.

Estos cambios de energías electrónicas se presentan en los electrones menos firmemente unidos, también llamados electrones externos. Las aplicaciones de la espectroscopia de absorción, depende de la especie molecular ya que cada especie absorbe luz en regiones específicas del espectro y en grados variables característicos de dicha especie en particular.

4.4.2.1.1 Sólidos

Como se ha comentado anteriormente, el proceso de fotocatalisis consiste en la aceleración de una reacción de oxidación, utilizando radiación para excitar a un semiconductor y éste, en presencia de oxígeno y agua se comporta como catalizador de la reacción.

Estos fotones de energía para excitar al semiconductor deben tener un valor superior al valor de su ancho de banda (diferencia energética entre las bandas de conducción y de valencia) y son absorbidos por el mismo.

Con una probabilidad bastante alta, estos fotones ceden su energía a los electrones situados en la banda de valencia (BV) y éstos, una vez excitados, tienen energía cinética suficiente como para ocupar un estado energético de la banda de conducción (BC). De esta forma se crean pares de electrón (e^-) y hueco (h^+) sobre la superficie del semiconductor, hallándose los primeros en la banda de conducción y los segundos en la banda de valencia. Por lo tanto, una propiedad fundamental de los semiconductores es la determinación del valor del ancho de banda prohibida (E_g), (Kittel, 1970). Este valor de E_g puede ser evaluable a partir de medidas del espectro de absorción para películas semitransparentes y de reflectancia para sólidos, (Essick & Mather, 1993).

En general para un material, semiconductor no transparente en polvo la mejor técnica para determinar el ancho de banda es por medio de mediciones de reflectancia ya que cuando la radiación electromagnética incide sobre una superficie, esta puede extraer una porción de energía de esta onda incidente, mientras que el resto permanece inalterable.

La porción de energía tomada puede ser reemitida en cualquier dirección. A este fenómeno se le conoce como dispersión, difusión o scattering. En estos materiales la rugosidad es un factor importante y en una superficie suave la reflexión es especular, con lo que la energía retro dispersada es pequeña, mientras que en superficies rugosas la reflexión es difusa en todas direcciones, con lo que la energía

retro dispersada es mayor y corresponde a radiación que es absorbida por el material y emerge tras dispersión múltiple.

Para lograr la mayor recuperación de las diversas reflexiones a la longitud de onda incidente del haz emergido y cuando la penetración de la radiación es grande, en comparación con la longitud de onda se coloca una esfera integradora recubierta en su interior por una capa de material con alta reflexión como MgO o BaSO₄ la cual aumenta la fracción de reflexión difusa que alcanza el detector (30-50%), y el espectro se evalúa por relación a una muestra sin absorción significativa.

Debido a su complejidad se han propuesto tratamientos semi-empíricos de los datos, tales como la función de corrección de Kubelka-Munk ($F(R'_{\infty})$) como se muestra en la Ecuación 10. (Wendlandt & Hecht, 1966; Kottim, 1969; Tandon & Gupta, 1970)

$$F(R'_{\infty}) = \frac{(1 - R'_{\infty})^2}{2R'_{\infty}} = \frac{\alpha}{S} \quad (10)$$

$$\text{donde; } R'_{\infty} = \frac{R_{\infty}(\text{muestra})}{R_{\infty}(\text{estandar})}$$

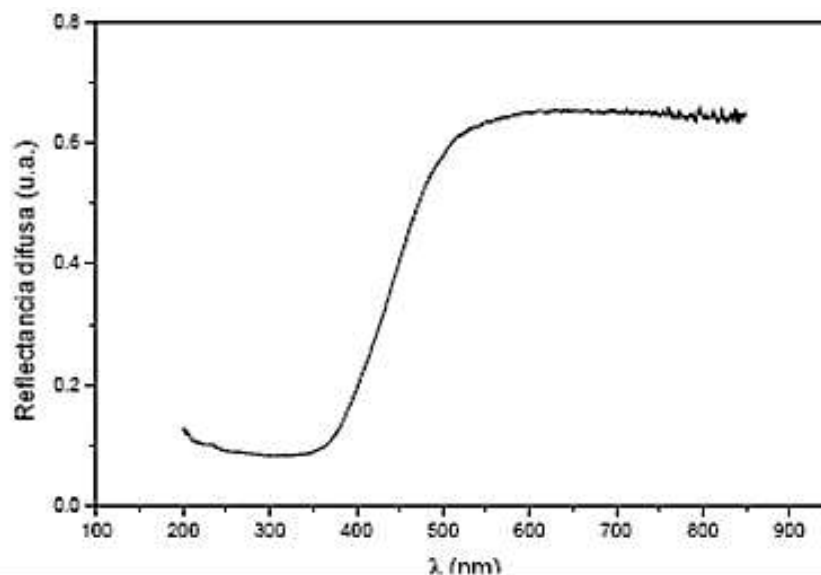
Donde: $R_{\infty} = (I/I_0)$ es la reflectancia difusa a una longitud de onda dada, de una capa de espesor infinito (> 2 mm) de material no transparente, y $0 < R_{\infty} < 1$, α es la absorbanza en unidades cm^{-1} y S , el factor de dispersión, (Wendlandt & Hecht, 1966; Kottim, 1969)

En un espectro de reflectancia, la excitación óptica de los electrones desde la banda de valencia a la de conducción, se evidencia por un incremento abrupto de la absorbanza en el espectro, a la longitud de onda correspondiente a la energía de la banda prohibida, esto es conocido como borde de absorción óptico, entonces la espectroscopía de reflectancia difusa puede emplearse para obtener valores del

ancho de banda prohibida, concordantes en general con los valores obtenidos por medidas de absorción en películas.

Figura 14.

Espectro de reflectancia difusa.



Espectro de reflectancia uv-vis de los TiO₂, la radiación UV con una $\lambda \leq 387\text{nm}$ posee una energía igual o superior a este valor (Blanco & Malato, 1996). (Livraghi et al., 2006).

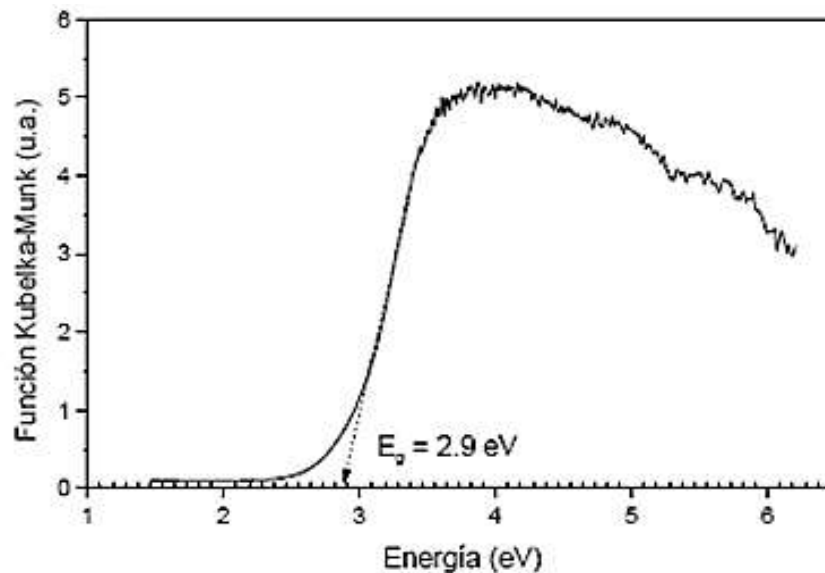
En un espectro de reflectancia Figura 14, la excitación óptica de los electrones desde la banda de valencia a la de conducción, se evidencia por un incremento abrupto de la absorbancia en el espectro, a la longitud de onda correspondiente a la energía de la banda prohibida, esto es conocido como borde de absorción óptico, entonces la espectroscopía de reflectancia difusa puede emplearse para obtener valores del ancho de banda prohibida, concordantes en general con los valores obtenidos por medidas de absorción en películas.

Con los datos de reflectancia difusa obtenidos a cierta longitud de onda, se calculó la función de corrección de Kubelka- Munk (K-M), representada en función de la energía de la luz incidente en la, Figura 15. El ancho de la banda prohibida E_g

se obtiene extrapolando la parte lineal de la gráfica de la función K-M al eje de abscisas. Para llevar a cabo la medición del E_g en este trabajo se utilizó un espectrómetro Ultravioleta – Visible Perkin – Elmer Lambda 35, el cual cuenta con esfera de integración de reflectancia difusa para el análisis de sólidos.

Figura 15.

Función Kubelka-Munk en función de la energía.



Nota. Extrapolación al eje de abscisas permite obtener la energía de la banda prohibida.

Las mediciones se realizaron colocando el material calcinado a una temperatura definida en un porta-muestras de teflón con cubierta de cuarzo (éste se coloca frente a la fuente del haz de incidencia, debido a que es transparente a la misma), enseguida se hace incidir el haz de luz en el intervalo de 500 a 250nm. Las señales generadas durante el análisis fueron enviadas a una computadora conectada en línea para su tratamiento a través del Software OMNIC.

La serie de análisis se programó en modo de operación de % de reflectancia con una velocidad de barrido de 120 nm/min, una apertura del haz de 4, el tamaño

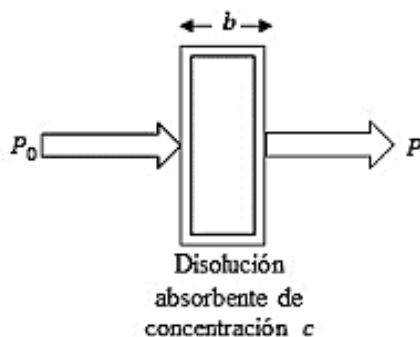
de paso de 0.1 y la atenuación de 2. Una vez obtenidos los datos de porcentaje de reflectancia, éstos fueron transformados a la función Kubelka-Munk (K-M). Posteriormente se realizó la conversión de longitud de onda (nm) a energía de la luz incidente (eV) en el eje "X" para finalmente obtener la E_g extrapolando la parte lineal de la gráfica de la función K-M en unidades arbitrarias al eje de las abscisas.

4.4.2.1.2 Líquidos

Cuando una onda electromagnética de longitud conocida incide sobre una sustancia líquida, la fracción de la radiación absorbida, ignorando las pérdidas debido a reflexiones y disipación, depende de su naturaleza y espesor. En la siguiente. Figura. 16 se muestra el cambio del haz cuando incide sobre una película o líquido de un material

Figura. 16.

Atenuación de un haz de radiación por una disolución absorbente



Nota. Se muestra un haz de radiación paralela antes y después de atravesar un medio que tiene un espesor de b cm y una concentración c de una especie absorbente. Como consecuencia de las interacciones entre los fotones y los átomos o moléculas absorbentes, la potencia del haz disminuye de P_0 y P . Fuente: (Ramírez, 2018).

La Absorción (A) de la muestra o densidad óptica (D.O) del material se define como la Ecuación 11. De acuerdo a la Ley de Beer que dice que la Absorción de la muestra es directamente proporcional a la concentración de la misma si el tamaño

de paso (ancho de la muestra b) y la absorptividad molar de la muestra es la misma. Cabe mencionar que la Ley de Beer solo es válida a concentraciones por debajo de 0.01 M.

$$A = D.O. = \text{Log}\left(\frac{P_0}{P}\right) = \epsilon bc \quad (11)$$

Para monitorear las pruebas de degradación que se mencionan más adelante se recolectaron alícuotas periódicamente las cuales fueron analizadas en un espectrofotómetro de UV – Vis, donde las condiciones de operación fueron las siguientes: barridos espectrales de longitud de onda de 500 a 200 nm, una velocidad de barrido de 240 nm/min, apertura del haz de 1, un intervalo de datos de 1 y sin suavizar. Todos los análisis se realizaron en modo de absorbancia.

Los datos de absorbancia generados en el equipo de UV/Vis y extraídos por el software “Lambda 35” fueron tratados (se graficaron las curvas de degradación de donde se tomó el cambio de absorbancia a una longitud de onda de 229, máxima absorción del 2,4-D) para determinar los parámetros cinéticos de la reacción: constante de velocidad de reacción (k) y tiempo de vida media ($t_{1/2}$). Para ello se consideró que las reacciones son de pseudo primer orden.

CAPÍTULO V. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

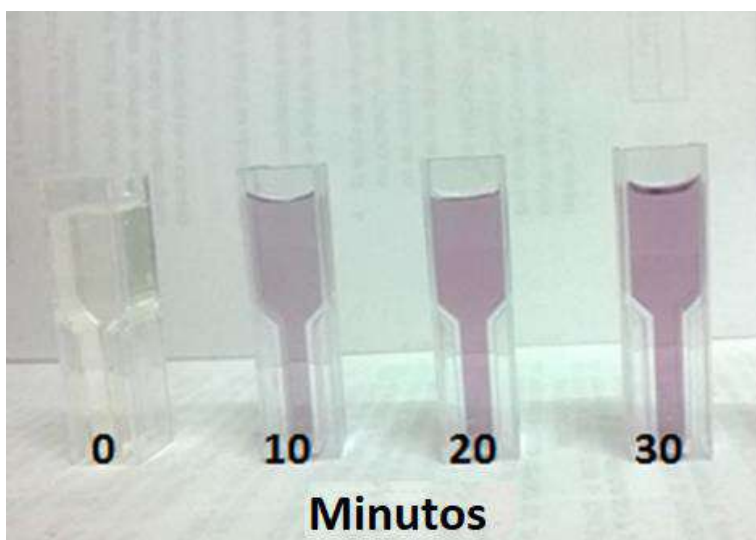
5.1. Resultados y Discusión

5.1.1. Espectroscopia de Ultravioleta-Visible (Uv-Vis)

La síntesis de nanopartículas de oro (NP's Au) se realizó mediante el método propuesto. La formación de NP's Au se evidenció inicialmente mediante el cambio de coloración de la solución de Ácido tetracloroáurico (HAuCl_4) virando de color amarillo claro a violeta, iniciando este cambio en tiempos de aproximadamente dos minutos, lo cual nos indica la reducción rápida de los iones Au^+ a su forma metálica elemental, con su posterior agregación para formar NP's Au, Figura 17.

Figura 17.

Variación en la coloración de la solución áurica



Nota. Variación en la coloración de la solución áurica con el tiempo de reacción, en tiempo de 0, 10, 20 y 30 minutos. Este fenómeno de cambio tonal se debe a la formación de nanopartículas de oro (Au), teniendo una coloración más notoria en a los 30 min.

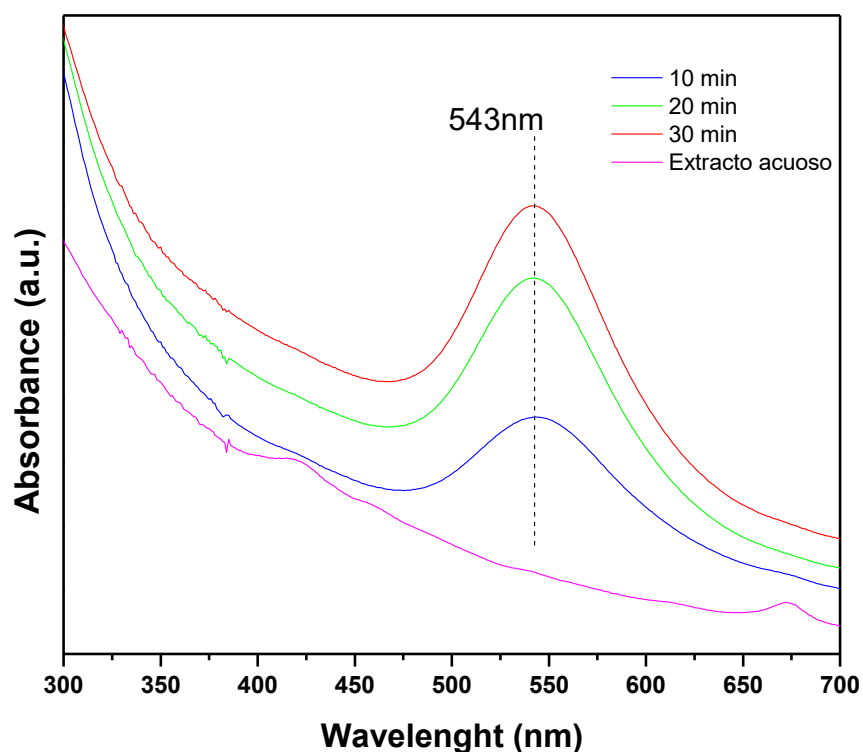
Posteriormente al presentarse el cambio de coloración, se procedió a realizar el seguimiento de la formación de NP's Au mediante análisis espectrofotométrico UV-Vis extrayendo alícuotas cada minuto hasta 30 min de reacción

Mediante la espectroscopia de UV-Vis observamos la formación de la curva correspondiente a la resonancia del plasmón superficial (RPS) atribuida a la síntesis de nanopartículas de oro a una longitud de onda de 540 nm, (Horta et al., 2023; Anand et al., 2015)

Como se observa en la Figura 18, esta señal se va intensificando conforme avanza el tiempo; a los 10 min de reacción la señal se presenta como una curva amplia que se incrementa conforme va avanzando el tiempo de reacción, hasta los 30 minutos de reacción.

Figura 18.

Formación del plasmón de resonancia superficial (SPR)



Nota. Tendencia correspondiente a las nanopartículas de oro a diferentes tiempos de síntesis; 10, 20 y 30 minutos.

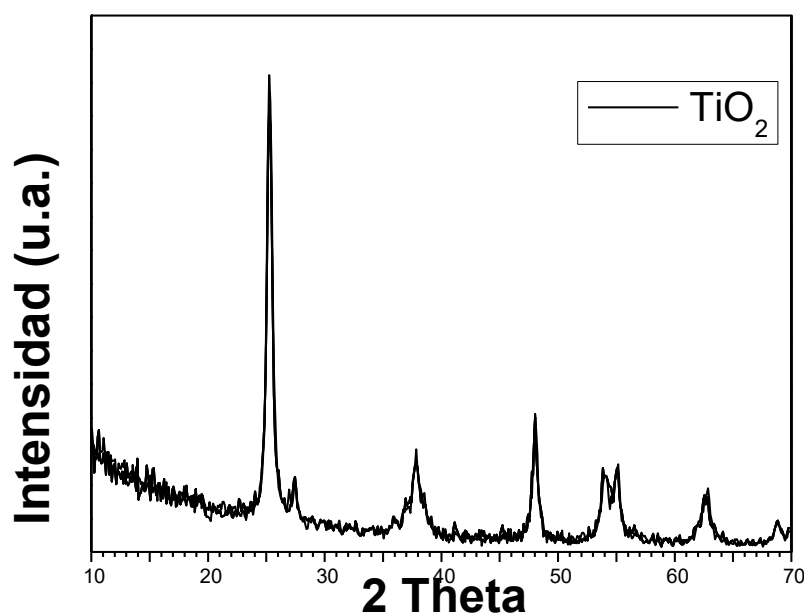
Para las partículas de Pd no se observa ninguna banda característica.

5.1.2. Difracción de Rayos X (XRD)

En los difractogramas correspondientes a las síntesis de TiO_2 por el método sol-gel, Figura 19. Se observan materiales policristalinos que revelan la presencia de los picos característicos de la estructura cristalina del polimorfo tetragonal, anatasa, como fase principal en la muestra calcinada a 400°C . Esto se puede identificar mediante los índices de Miller correspondientes a los planos cristalográficos (101), (004), (200), (211), (204), (220), (215) y (312). PDF maint 2005, No. de Tarjeta 01-070-6826.

Figura 19.

Difractograma de rayos X del TiO_2 tratado térmicamente a 400°C .



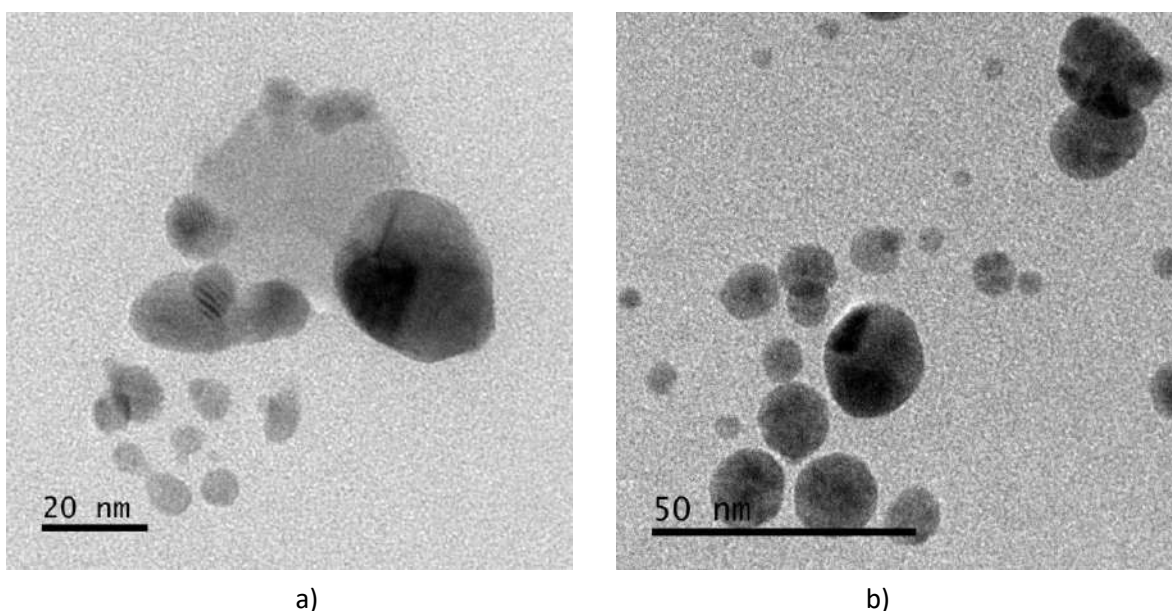
Sin embargo, al impregnar las nanopartículas de Au o Pd al ser el 1% de la muestra total, al realizar los análisis de XRD de las muestras Au/TiO_2 y Pd/TiO_2 , no se aprecian señales características al metal impregnado (espectrogramas no mostrados).

5.1.3. Microscopía Electrónica de Transmisión. (TEM)

Los análisis de microscopía electrónica de transmisión realizados a las muestras sintetizadas a 10 minutos y 30 minutos son mostrados en la Figura 20. Mediante un análisis de tamaño a partir de las micrografías de TEM (no mostrado) se determinó tamaños promedio cercanos a las 8 nm para la muestra sintetizadas a los 10 minutos y de 14 nanómetros para la muestra sintetizadas a los 30 minutos, la muestra sintetizada a 20 minutos mostro un tamaño promedio de 11 nm. Este efecto puede ser atribuido al mayor tiempo de síntesis provocando un crecimiento en el tamaño promedio de las nanopartículas debido a la nucleación y coalescencia de los iones reducidos por el extracto.

Figura 20.

Micrografía de microscopia electrónica de Transmisión de las muestras de nanopartículas de Au



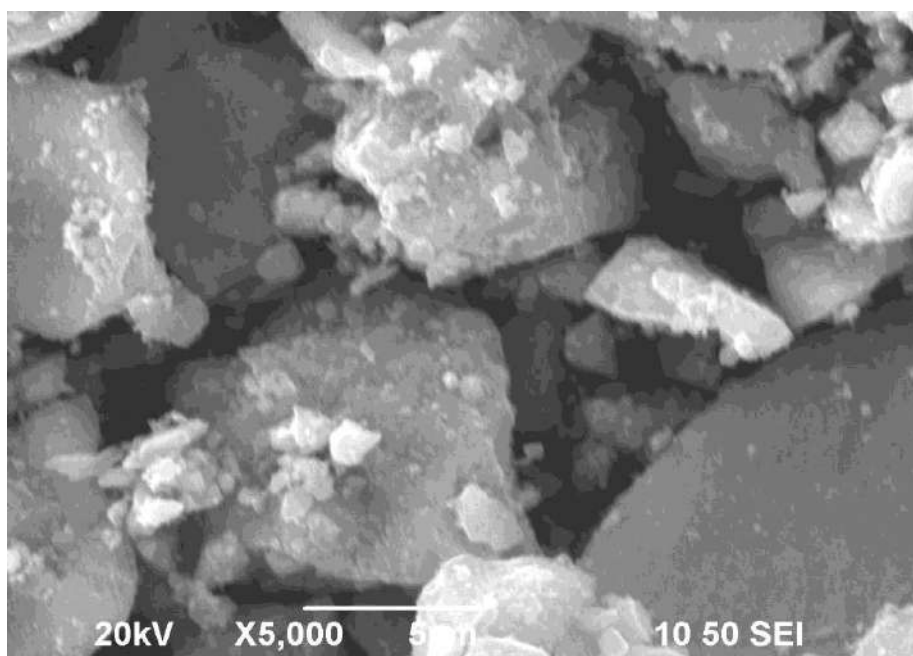
Nota. Micrografía de microscopia electrónica de Transmisión de las muestras de Nanopartículas de Au sintetizadas a partir de extractos acuosos de Agave Potatorum a diferente tiempo de síntesis, a) 10 minutos y b) 30 minutos.

5.1.4. Microscopia Electrónica de Barrido usado para TiO_2 ,

Las muestras sintetizadas de nanopartículas de Au fueron impregnadas con TiO_2 , utilizado como el sustrato semiconductor como fue reportado anteriormente, tiene un área superficial de cercana a los $125 \text{ m}^2/\text{gr}$ un ancho de banda de 3.1 eV y la fase anatasa después de haber sido calcinado a $400 \text{ }^\circ\text{C}$. Estos valores no cambiaron debido a la impregnación con las nanopartículas metálicas de Pd y Au. La imagen de SEM correspondientes es mostrada en la Figura 21, para el TiO_2 sin nanopartículas.

Figura 21.

Micrografía de Microscopia electrónica de barrido de TiO_2 sintetizados por la técnica de sol-gel.



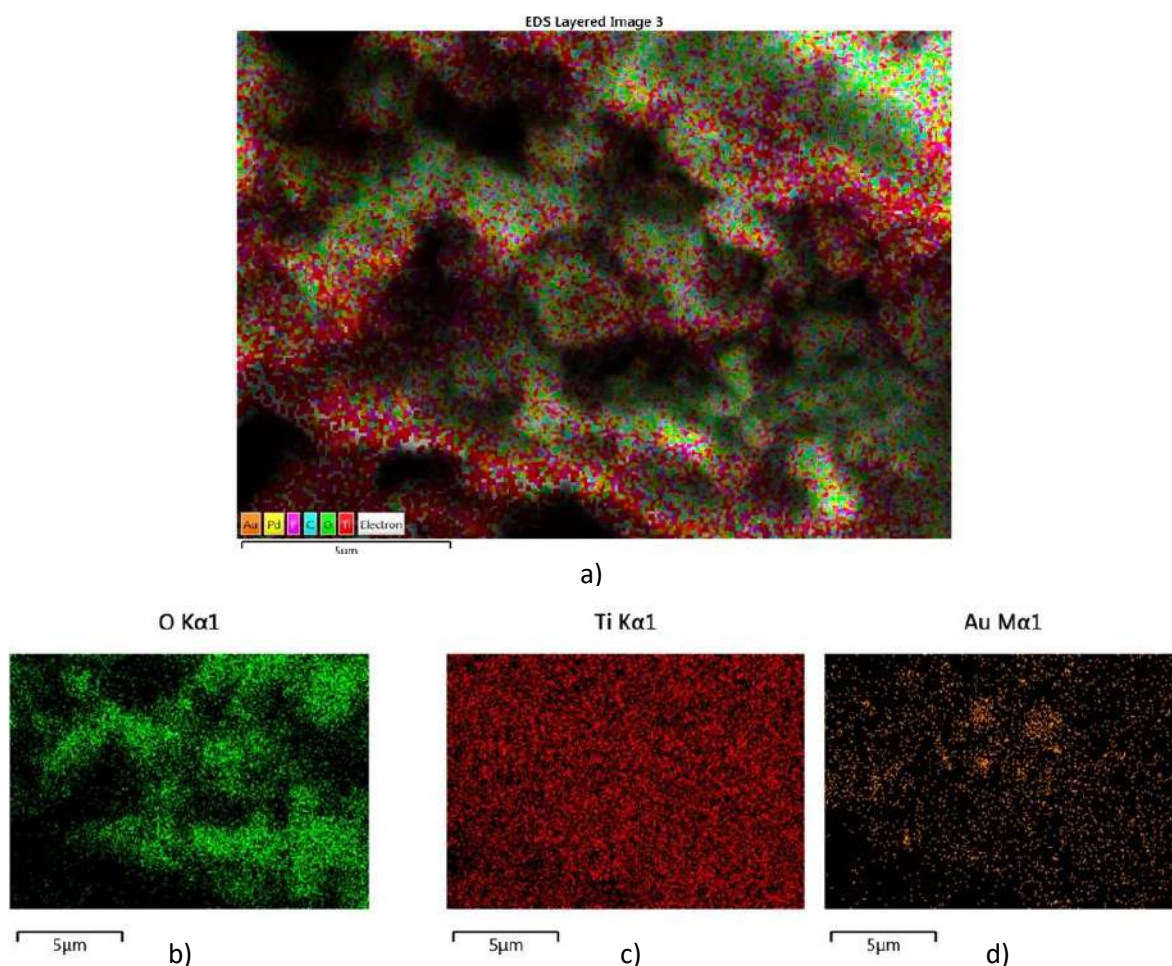
Nota. Magnificación: $\times 5000$, lo que permite observar características morfológicas a nivel de micras ; Escala, La barra representa $5 \mu\text{m}$, lo que indica que las partículas observadas tienen tamaños de micrómetros. Aunque hay variaciones en el tamaño de las partículas, la morfología general parece consistente en todo el campo de visión, lo que sugiere una síntesis controlada; Voltaje de aceleración: 20 kV, típico para análisis SEM de materiales inorgánicos, proporciona una buena resolución para observar detalles morfológicos; Detección (SEI): Imágenes generadas por electrones secundarios, adecuadas para resaltar topografía superficial.

5.1.5. Análisis por Dispersión de Energía de Rayos X

Para mostrar la impregnación de las nanopartículas de Au se realizaron análisis utilizando EDS (análisis por dispersión de energía de rayos X, Figura. 22.) En esta se muestra una composición en falso color que superpone los mapas de distribución de diferentes elementos detectados en la muestra: Au (oro; naranja), Pd (paladio; amarillo), P (fósforo; morado), C (carbono; azul), O (oxígeno; verde), Ti (titanio; rojo), y Electro (blanco).

Figura. 22.

Análisis elemental (EDS) de TiO_2 , con nanopartículas de Au.



Nota. a) EDS layered image, superposición general de los mapas de distribución Au, Pd, P, C, O, Ti, y Electro; b) O Kα1, Mapa de Oxígeno, representado en verde; c) Ti Kα1, Mapa de Titanio, representado en rojo; d) Au Mα1, Mapa de oro, representado en amarillo.

La distribución, es decir, el colorido indica que los elementos están distribuidos de manera homogénea parcial en la superficie analizada. En algunas zonas específicas, se observan áreas más concentradas de algunos elementos (como Au o Ti), lo cual podría estar relacionado con la variación de la impregnación de las nanopartículas de oro sobre el TiO₂.

En a) El oxígeno se distribuye de manera homogénea, lo cual es característico de la matriz de TiO₂, ya que el oxígeno forma parte de la estructura cristalina del dióxido de titanio, en b) El titanio también muestra una distribución uniforme, correspondiente a la base de la muestra, confirmando que el TiO₂ es el material predominante en el análisis, en c) Las nanopartículas de oro aparecen como puntos dispersos. Esto indica que el Au está distribuido parcialmente de manera uniforme, por la formación de agrupamientos en ciertas regiones, posiblemente debido al método de impregnación o síntesis.

Tabla 5.

EDS análisis elemental de TiO₂, con Au.

Elemento	% Peso	% Peso	% Peso
Ti	58.878	60.153	59.119
O	41.009	39.758	40.732
Au	0.113	0.089	0.149
Total	100	100	100

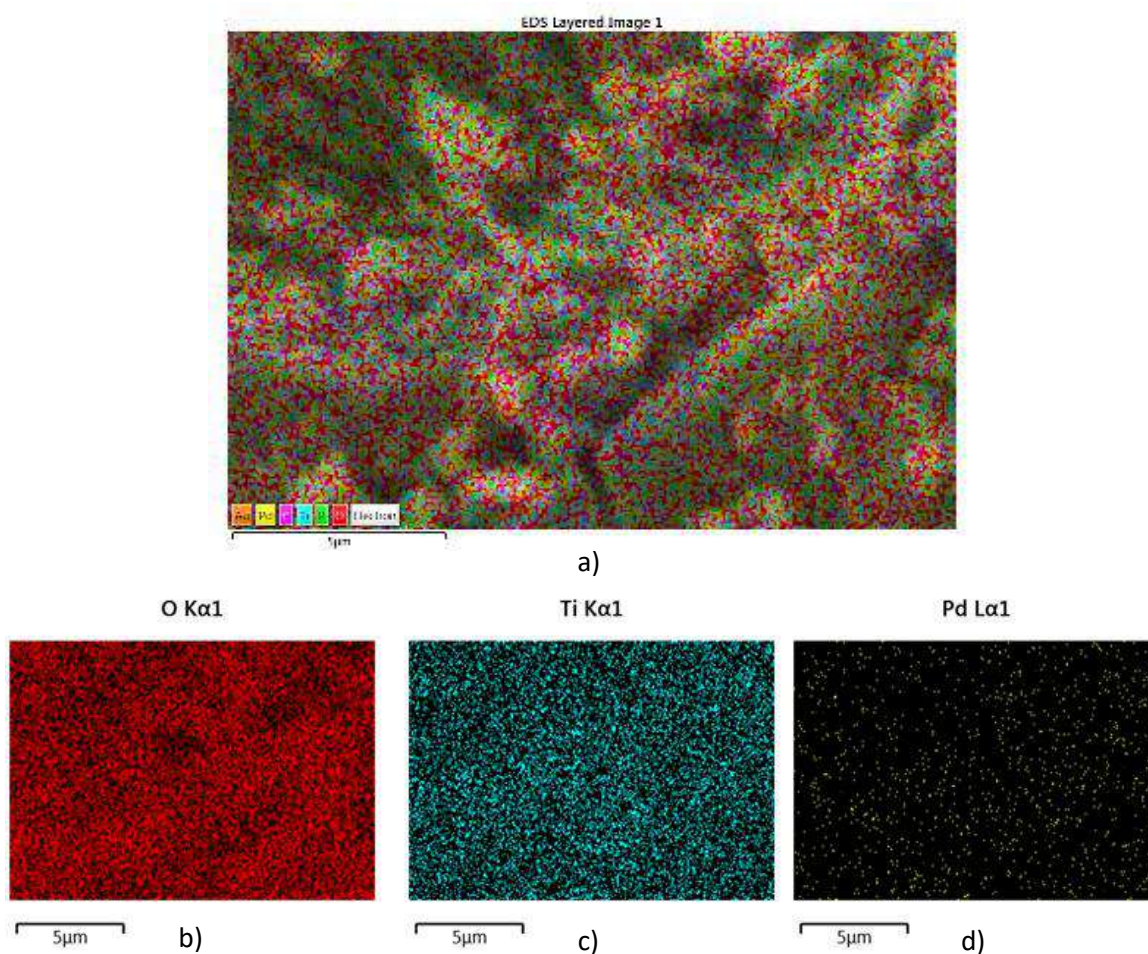
Nota. Composición nominal en peso; Ti: 59.884% y O: 40.116%

En la Tabla 5 se muestra el resumen hecho a diferentes puntos de esta muestra, con lo cual podemos concluir que la impregnación fue realizada en la superficie del semiconductor de manera homogénea.

El análisis por dispersión de energía de rayos X para Pd, se muestra en la **Figura 23**, donde se aprecia una composición en falso color que superpone los mapas de distribución de diferentes elementos detectados en la muestra: Au (oro; naranja), Pd (paladio; amarillo), C (carbono; morado), Ti (titanio; azul), (fósforo; verde), O (oxígeno; rojo).

Figura 23.

Análisis elemental (EDS) de TiO_2 , con nanopartículas de Pd.



Nota. a) EDS layered image, superposición general de los mapas de distribución Au, Pd, C, Ti, P, O; b) O Kα1, Mapa de Oxígeno, representado en rojo; c) Ti Kα1, Mapa de Titanio, representado en azul; d) Pd Lα1, Mapa de paladio, representado en amarillo.

Los mapas de dispersión de los elementos muestran la distribución homogénea de Ti, O y Pd en la superficie del material.

Para, a) La imagen combinada utiliza colores para representar cada elemento (Ti, O y Pd), esto visualiza la integración uniforme de los componentes, destacando que el Pd, aunque minoritario, está bien distribuido en la matriz del material; para b) O K α 1 (Rojo), indica la presencia uniforme de oxígeno en el material. Para c) Ti K α 1 (Azul), refleja la distribución uniforme de titanio, lo que confirma la matriz de TiO₂. Para d) Pd L α 1 (Amarillo), aunque el contenido de Pd es bajo, su distribución es homogénea, lo que indica una buena impregnación de las nanopartículas sobre la superficie de TiO₂.

La Tabla 6 muestra los porcentajes en peso de los elementos presentes en la muestra analizada para las nanopartículas con Pd.

Tabla 6.

EDS análisis elemental de TiO₂., con Pd.

Elemento	% Peso	% Peso	% Peso
Ti	58.278	61.127	59.925
O	41.619	38.781	39.916
Au	0.113	0.092	0.159
Total	100	100	100

Nota. Composición nominal en peso; Ti:= 59.77% , O= 40.11% Y Pd= 0.118 %

Ambas Figura. 22 y Figura 23, muestran los análisis elementales mostrando la impregnación de las nanopartículas de Pd y Au en el soporte de TiO₂.

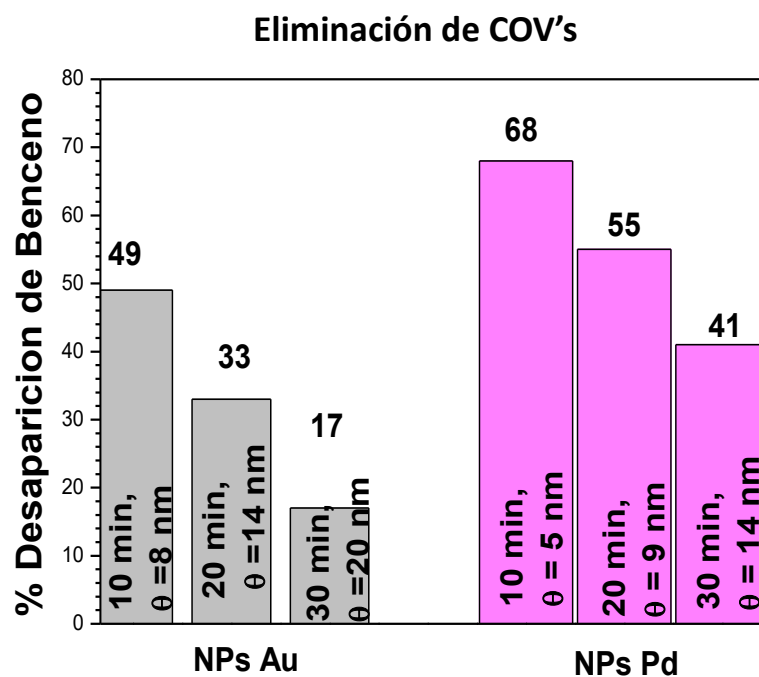
5.1.6. Monitoreo de Actividad de Reacción, eliminación de COV's.

Al realizar las pruebas de foto conversión de Benceno, con los semiconductores preparados como son el 0.1% Au/TiO₂ y 0.1%Pd/TiO₂ son mostrados en la Figura 24, donde podemos observar que a medida que el tiempo de síntesis es más prolongado, el tamaño de partícula se incrementa. En el caso de las nanopartículas de Au, estas tienen un tamaño de 8, 14 y 20 nm para los tiempos de síntesis de 10, 20 y 30 minutos respectivamente.

Los resultados muestran que para el tamaño de 8 nm una desaparición del 49% de benceno de la muestra (10min). En cambio, para la muestra de 14 nm se tiene una desaparición de 33% (20 min) y para la muestra de 20 nm una desaparición de 17 nm (30min), lo cual se muestra que a menor tamaño mayor actividad en las muestras con nanopartículas de Au.

Figura 24.

Eliminación de COV's en % de desaparición de benceno



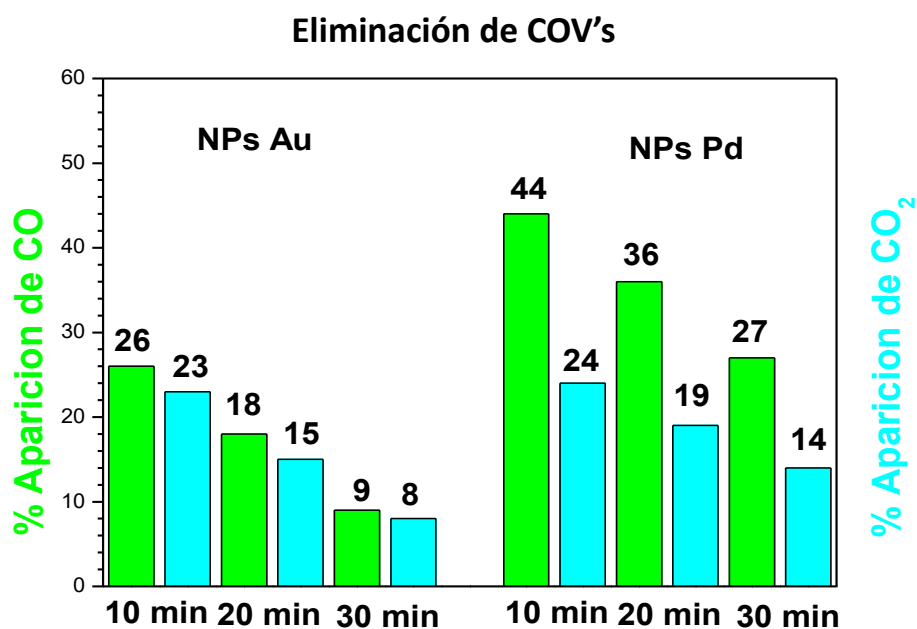
Por otro lado, el comportamiento es similar para las muestras con nanopartículas de Pd, donde a menor tamaño mayor actividad, Figura 24 **Figura 25**. Observándose que, para las muestras de 5, 8 y 14 nm se tiene una desaparición de benceno de 68, 55 y 41 % respectivamente.

Con lo cual podemos afirmar que las muestras con Pd tienen una mayor afinidad para la foto conversión de Benceno como molécula prueba de COV's hacia otros compuestos como CO y CO₂.

De manera complementaria, se realizaron mediciones de la cantidad de benceno transformado en CO y CO₂. Los resultados, mostrados en la Figura 25, indican que los materiales con Pd generan una mayor conversión a estos productos en comparación con los materiales preparados con Au.

Figura 25.

Porcentaje de transformación de Benceno a CO₂ y CO.



Nota. porcentaje de transformación según el tamaño de partícula de las nanopartículas de Au y Pd.

Estos resultados pueden ser debido al cambio de densidad electrónica de un metal con otro, este cambio puede provocar una mayor absorción del Benceno en la superficie del fotocatalizador con lo cual se incrementaría su actividad fotocatalítica.

5.2. Conclusiones

La presente tesis demuestra que la aplicación de nanomateriales del tipo M/TiO₂ constituye una solución innovadora y efectiva para la eliminación de COV's mediante técnicas de oxidación avanzada. Los resultados obtenidos validan que los nanomateriales del tipo M/TiO₂ con Au y Pd, presentan una mejora significativa en las tasas de conversión y degradación de COV's

Los resultados de SEM, nos permite observar las NP's Au de forma aproximadamente esférica con un tamaño promedio de 8, 14 y 17 nm. aproximadamente respectivamente para las muestras sintetizadas durante 10, 20 y 30 minutos respectivamente y de NP's Pd tamaños de 5, 8 y 14 nm

Se muestra la sinergia entre las propiedades catalíticas de los metales y las características cristalinas del TiO₂.

En términos catalíticos, las NP's Pd demostraron un desempeño superior, con una conversión de COV's del 68% con un tamaño de 5 nm , superando el 49% alcanzado por las NP's Au Este resultado puede atribuirse a la capacidad del Pd, subrayando la importancia de seleccionar metales con propiedades catalíticas específicas para maximizar la eficiencia de los procesos de oxidación avanzada.

Desde una perspectiva ambiental, este estudio confirma el impacto positivo de los nanomateriales M/TiO₂ en la mitigación de contaminantes atmosféricos, con énfasis en compuestos altamente tóxicos como el benceno, cuyas emisiones

representan un riesgo significativo para la salud pública. Además, la implementación de estos nanocatalizadores podría contribuir al cumplimiento de normativas y mejorar la calidad de vida de los seres vivos

A pesar de los resultados prometedores, se identifican áreas de oportunidad para futuras investigaciones, como la optimización de combinaciones bi-metálicas que potencien la actividad catalítica y el desarrollo de estrategias de síntesis sostenibles que reduzcan costos y faciliten el escalamiento industrial. Asimismo, será crucial evaluar el impacto ambiental y económico asociado al uso extendido de estos nanomateriales para garantizar su viabilidad a largo plazo.

CAPÍTULO VI. BIBLIOGRAFÍA

- Albaladejo, A. (2007). *Método de preparación del espécimen para evaluar la micromorfología de la interfase adhesiva resina-dentina con un microscopio electrónico de barrido. Avances en odontoestomatología*, 23(4), 197-206.
- Ambient air quality standards regulations (2022) (S.I. No. 739 of 2022).
<https://faolex.fao.org/docs/pdf/ire221147.pdf>
- Análisis Instrumental Servicios técnicos de Investigación, (2008).
http://www.ua.es/es/investigacion/sti/servicios/analisis_instrumental/microscopia/tem.html
- Análisis Instrumental-Servicios técnicos de Investigación, (2008).
<https://ssti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-rayos-x/analisis-elemental.html>
- Anand, K., Gengan, R., Phulukdaree, A., & Chuturgoon, A. (2015). *Agroforestry waste Moringa oleifera petals mediated green synthesis of gold nanoparticles and their anti-cancer and catalytic activity. Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 21, 1105-1111.
<https://doi.org/10.1016/J.JIEC.2014.05.021>.
- Arrhenius, S. (1896). XXXI. *On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 41(251), 237-276.
- Barry, R., y Chorley, R. (1968). *Atmósfera, tiempo y clima*.
<https://doi.org/10.2307/1796429>.
- Barry, R.G., & Chorley, R.J. (2009). *Atmosphere, Weather and Climate (1st ed.)*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203871027>
- Bekbolet, M., Araz, C., & Catalkaya, E. (1998). *Photocatalytic degradation of humic acid in water. Water Science and Technology*, 38(7), 155-160.
- Bokhimi Morales, A., Novaro, O., López, T., Sánchez, E. y Gómez, R. (1995) "Effect of hydrolysis catalyst on the Ti deficiency and crystallite size of sol-gel TiO₂ crystalline phases" *J. Mater. Res.*, vol. 10.

- Britannica, The Editors of Encyclopaedia. "Ley de Bragg". Encyclopedia Britannica, 24 de octubre de 2024, <https://www.britannica.com/science/Bragg-law> Consultado el de noviembre de 2024.*
- Calderón, Héctor A. (2020). Microscopía electrónica de transmisión para observar átomos: principios y desarrollo. Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología, 13(25), 133-156. Epub 25 de noviembre de 2020. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2020.25.69649>*
- Campesi, M. A., Mariani, N. J., Martínez, O. M., & Barreto, G. F. (2007). Eliminación de VOCs mediante un proceso de oxidación catalítica con recuperación térmica. Ingeniería Mecánica. Tecnología y Desarrollo, 2(4), 111-119.*
- Caracterización de partículas finas. <http://www.siemex.com.mx/BOLETINES/TecMicromeritics.pdf>.*
- Casado, C. (2005), "Comportamiento de membranas cerámicas de pervaporación en la deshidratación de disolventes orgánicos industriales" Tesis para obtener el grado de Doctora en Ingeniería Química, Universidad de Cantabria, Santander, España, p. 63-65.*
- Chávez Aguirre, M. y Hernández Ramírez, A. (2007) "Efecto de las condiciones de síntesis sol-gel, en la actividad fotocatalítica de un óxido semiconductor" Memorias en extenso del Congreso Regional de Q.F.B., Facultad de Ciencias Químicas, Monterrey, Nuevo León, México.*
- Chen, J., Yang, Y., Zhao, S., Bi, F., Song, L., Liu, N., Xu, J., Wang, Y., & Zhang, X. (2022). ACS Catal. 12, 8069–8081.*
- Chen, X. and Mao, S. S. (2007), "Titanium Dioxide Nanomaterials: Synthesis, Properties, Modifications, and Applications" Chemical Reviews, xxxx American Chemical Society.*
- CPFEUM, (2017) Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios. Programas de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire Recuperado de <https://www.gob.mx/cofepris/acciones-y-programas/8-programas-de-gestion-para-mejorar-la-calidad-del->*

[aire#:~:text=Los%20Programas%20de%20Gesti%C3%B3n%20para,las%20principales%20ciudades%20de%20M%C3%A9xico.](#)

David Brandon y Wayne D. Kaplan (1999), *Microstructural Characterization of Materials*, Inglaterra, John Wiley & Sons.

Di, Q., Wang, Y., Zanobetti, A., Wang, Y., Koutrakis, P., Choirat, C., ... & Schwartz, J. D. (2017). Air pollution and mortality in the Medicare population. *New England Journal of Medicine*, 376(26), 2513-2522.

Donovan, W. (1992). Abordar la contaminación urbana: crear soluciones innovadoras mediante experiencias compartidas. *The Journal of Environment & Development*, 1, 187-190.

<https://doi.org/10.1177/107049659200100112>.

EEA-Eionet Strate (2021-2030). European Environment Agency. Corporate document No 1/2021. <https://www.eea.europa.eu/publications/eea-eionet-strategy-2021-2030>.

Essick, J.M., Mather, R.T. (1993) Characterization of a bulk semiconductor's band gap via near-absorption edge optical transmission experiment, *Am. J. Phys.* 61 (7) 646-649.

European Chemicals Agency. (2019). *Guidance on the safety of nanomaterials*. ECHA.

European Environmental Agency (2020). *Air pollution sources and emissions*. <https://www.eea.europa.eu/>

Eyre, S. R. (1968). [Review of *Atmosphere, Weather and Climate*, by R. G. Barry & R. J. Chorley]. *The Geographical Journal*, 134(4), 591–592.

<https://doi.org/10.2307/1796429>

Figueruelo, J. E., & Dávila, M. M. (2019). *Química física del ambiente y de los procesos medioambientales*. Reverté.

Figueruelo, J. E., & Dávila, M. M. (2019). *Química física del ambiente y de los procesos medioambientales*. Reverté.

Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Berntsen, T., Betts, R., Fahey, D. W., ... & Nakajima, T. (2007). *Changes in atmospheric constituents and in radiative*

- forcing. In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis* (pp. 129-234). Cambridge University Press.
- Franken, L., Grünewald, K., Boekema, E., & Stuart, M. (2020). *A Technical Introduction to Transmission Electron Microscopy for Soft-Matter: Imaging, Possibilities, Choices, and Technical Developments*. *Small*, e1906198 .
<https://doi.org/10.1002/sml.201906198>.
- Fukuoka, M. y Makishima, A. (2003) "Effects of the Type of Alcoholic Solvent on the Formation of SiO₂ Wet Gels in Sol-Gel Process" *Journal of the Ceramic Society of Japan*, vol. 111.
- Gaya, U. I., & Abdullah, A. H. (2008). Heterogeneous photocatalytic degradation of organic contaminants over titanium dioxide: A review of fundamentals, progress and problems. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 9(1), 1-12.
- Gobierno de México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2022). México: Tercer Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (2022).
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/747507/158_2022_Mexico_3er_BUR.pdf.
- González-Díaz, Sandra Nora, Lira-Quezada, Cindy Elizabeth de, Villarreal-González, Rosalaura Virginia, & Canseco-Villarreal, José Ignacio. (2022). Contaminación ambiental y alergia. *Revista alergia México*, 69(Supl. 1), 4-30. Publicación electrónica del 21 de marzo de 2022.
<https://doi.org/10.29262/ram.v69isupl1.1010>.
- González-Hernández, J. y Pérez-Robles, J. F. (2000) "Vidrios SiO₂ nanocompuestos preparados por sol-gel: revisión" *Superficies y Vacío*, vol. 11.
- Ham, H. H., Lee, J. H., & Kim, Y. J. (2018). Gold Nanoparticles Supported on TiO₂: Synthesis, Characterization, and Photocatalytic Applications. *Journal of Catalysis*, 367, 262-272.

- Have, H., & Neves, M. (1992). Rio Declaration on Environment and Development. *Environmental Conservation*, 19, 366 - 368.
<https://doi.org/10.1017/s037689290003157x>.
- Hernández-Rodríguez, M., Romo-Lozano, J. L., Barrios-Puente, G., & Cuevas-Alvarado, C. M. (2023). Climate change and its effects on agriculture in Mexico. *Agrociencia*. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v57i2.2523>.
- Horta-Piñeres, S., Cortez-Valadez, M., Avila, D., Leal-Pérez, J., Leyva-Porras, C., Flores-Acosta, M., & Torres, C. (2023). Influence of Carboxymethyl Cellulose on the Green Synthesis of Gold Nanoparticles Using *Gliricidia sepium* and *Petiveria alliacea* Extracts: Surface-Enhanced Raman Scattering Effect Evaluation. *ACS Omega*, 8, 46466 - 46474. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c03813>.
- Huang, G., Liu, L., Chen, L., Gao, L., Zhu, J., & Fu, H. (2022). *J. Hazard Mater.* 423, 127134.
- IARC (2021). *Agentes clasificados por las monografías de la IARC, volúmenes 1-129*. Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer. <https://publications.iarc.fr/Book-And-Report-Series/Iarc-Biennial-Reports/IARC-Biennial-Report-2020-2021tp://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/index.php>
- INE. (1989). *Contaminación Atmosférica en las Zonas Urbanas*. Instituto Nacional de Ecología, México.
- INECC. (2016). Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático El INECC presenta el nuevo Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire, SINAICA . Recuperado de <https://www.gob.mx/inecc>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2020). *Informe Nacional de Calidad del Aire 2020*. Recuperado de <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/informes/Informe2020.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2022). *Parque vehicular por entidad federativa*. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx>
- IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental*

- Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, y B. Zhou (Eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp.*
- IPCC, (2018): Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 616 pp. [https://doi.org/ 10.1017/9781009157940](https://doi.org/10.1017/9781009157940).*
- IPCC, (2022): Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.*
- IPCC, 2014: Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 157 págs.*
- https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf
- IPCC, 2021: Climate Change (2021): The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental*

- Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.*
- IPCC, 2021: Resumen para responsables de políticas. En: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu y B. Zhou (editores)]. Cambridge University Press.*
- IPCC. (2014). Fifth Assessment Report: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Intergovernmental Panel on Climate Change.*
- Jacobson, M. Z. (2012). Air Pollution and Global Warming: History, Science, and Solutions (2nd ed.). Cambridge: Cambridge University Press.*
- Juárez, A., GAY, C., & Flores, Y. (2005). Impact of the Popocatepetl's volcanic activity on the air quality of Puebla City, México. *Atmósfera*, 18(1), 57-69.*
- K. Del Angel-Sanchez, O. Vazquez-Cuchillo, M. Salazar-Villanueva, J. F. Sanchez-Ramirez, A. Cruz-Lopez, A. Aguilar-Elguezabal, "Preparation, characterization and photocatalytic properties of TiO₂ nanostructured spheres synthesized by the Sol-Gel method modified with ethylene glycol", *J Sol-Gel Sci Technol*, vol. 58, pp. 360-365, 2011*
- Keohane, R. (2014). The Global Politics of Climate Change: Challenge for Political Science. *PS: Political Science & Politics*, 48, 19 - 26. <https://doi.org/10.1017/S1049096514001541>.*
- Khodakovskaya, MV, de Silva, K., Biris, AS, Dervishi, E. y Villagarcia, H. (2012) Los nanotubos de carbono inducen una mejora del crecimiento de las células de tabaco. *ACS Nano*, 6, 2128–2135. <https://doi.org/10.1021/nn204643g>*

- Kittel, C. (1970), *Introduction to Solid State Physics*, 4th ed., John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Kottim, G. (1969), *Reflectance Spectroscopy*, Springer Verlag, New York.
- Kumar, N., Kumari, M., Ismael, M., Tahir, M., Sharma, R.K., Kumari, K., Koduru, J.R., & Singh, P. (2023). Environ. Res. 231, 116149.
- Lei, Y., & Ning, M. (2017). Thoughts on control path of the volatile organic compounds pollution during the period of "13th Five-Year". *Environmental Protection*, 45(4), 14-17.
- Livage, J., Sanchez, C., Henry, M. y Doeuff, S. (1989), "The Chemistry of the Sol-Gel Process" *Solid State Ionics*, vol. 32/33.
- Livraghi, S., Paganini, M. C., Giamello, E., Selloni, A., Di Valentin, C., & Pacchioni, G. (2006). Origin of photoactivity of nitrogen-doped titanium dioxide under visible light. *Journal of the American Chemical Society*, 128(49), 15666-15671.
- Lu, A.-H., & Astruc, D. (2020). *Nanomaterials for environmental remediation*. *Chemical Society Reviews*, 49(1), 1233-1272.
- M. Salazar-Villanueva, L.R. Morales-Juarez, O. Flores Sanchez, A. Cruz-Lopez, A. Tovar-Corona, O. Vazquez-Cuchillo, "Enhanced photocatalytic water splitting hydrogen production on TiO₂ nanospheres: A theoretical- experimental approach", *Journal of Photochemistry & Photobiology, A: Chemistry* 434 (2023) 114212-144221
- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A. y Bezirtzoglou, E. (2020). *Impactos ambientales y de salud de la contaminación del aire: una revisión*. *Frontiers in Public Health*, 8. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>.
- Manual del equipo de fisisorción de nitrógeno, N₂, NOVA 2000e Quantachrome Instruments.
- Marengo, A., (1995) *Evolución de l'Ozone Tropospitéñque au Cours du XX-me Si cle*, CNRS-France, Laboratoire d'Aérologie, *Lettre pigb-pmrc*, 10-11. 1995
- Martínez, A. M. (2018). *Mexico's Climate Policy and the Paris Agreement*. *International Environmental Law Review*, 22(4), 389-403.

- Mendoza-Domínguez, A., León-Romero, M. A., & Caballero-Mata, P. (2010). Volatile Organic Compound Emissions from Light-Duty Vehicles During Cold-Starts. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 11(3), 333–347.
- Microscopía Electrónica* <<http://www.uv.es/vsanz/microscopia%20electronica.ppt>
- Molina, L. T., & Molina, M. J. (2004). Improving air quality in megacities: Mexico City case study. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1023(1), 142-158.
- Molina, L., Zhu, T., Wan, W., y Gurjar, B. (27 de agosto de 2020). Impactos de las megaciudades en la calidad del aire: desafíos y oportunidades. *Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science*. Recuperado el 10 de noviembre de 2024, de <https://oxfordre.com/environmentalscience/view/10.1093/acrefore/9780199389414.001.0001/acrefore-9780199389414-e-5>
- OMS (2023). WHO ambient air quality database- Air Quality and Health: Challenges and Opportunities (update 2023). [https://www.who.int/publications/m/item/who-ambient-air-quality-database-\(update-2023\)](https://www.who.int/publications/m/item/who-ambient-air-quality-database-(update-2023))
- OMS. (2021): World Health Organization. global air quality guidelines: Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Executive summary. Geneva: World Health Organization; Licence: CCBY-NC-SA3.0 IGO. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
- Ostro, B. and L. Chestnut (1998). Assessing the health benefits of reducing particulate matter air pollution in the United States. *Environ Res*, 76(2): p. 94-106. EPA. (2021). Shah, Jitendra J. Environmental Protection Agency, Atmospheric Sciences Research Laboratory. National ambient volatile organic compounds (VOCs) 2021.
- Pal, M., García Serrano, J., Santiago, P. y Pal, U. (2007) "Size-Controlled Síntesis of Spherical TiO₂ Nanoparticles: Morphology, Crystallization and Phase Transition" *J. Phys. Chem. C.*, vol. 111.

- Pecharsky, V. K., & Zavalij, P. Y. (2003). *Fundamentals of diffraction* (pp. 99-260). Springer US.
- Pi, Y., Li, X., Xia, Q., Wu, J., Li, Y., Xiao, J., & Li, Z. (2018). Adsorptive and photocatalytic removal of Persistent Organic Pollutants (POPs) in water by metal-organic frameworks (MOFs). *Chemical Engineering Journal*, 337, 351-371.
- Porta, A., Sanchez, E. Y., & Colman Lerner, J. E. (2018). *Calidad del aire. Series: Libros de Cátedra*.
- ProAire (2012). *Programa de Gestión de la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de Puebla 2006-2011. En Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire y Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes. Recuperado 11 de septiembre de 2023, de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/311641/Informe_ProAire_Puebla_E11.pdf*
- ProAire (2012). *Programa de Gestión de la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de Puebla 2006-2011. En Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire y Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes. Recuperado 11 de septiembre de 2023,*
- Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México (ProAire ZMVM 2021- 2030). SEDEMA, SMAGEM, SEMARNATH y SEMARNAT. Ciudad de México. Diciembre, 2021. 177-188.*
- RAMÍREZ, O. M. (2018). *DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES (Doctoral dissertation, Instituto Tecnológico de Oaxaca).*
- Ramón, R., Ballester, F., Rebagliato, M., Ribas, N., Torrent, M., Fernández, M., ... & Sunyer, J. (2005). La red de investigación " infancia y medio ambiente"(red INMA): Protocolo de estudio. *Revista española de salud pública*, 79, 203-220.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME) & Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2019, mayo). *Boletín informativo Trabaja CAME en protocolo de contingencias para partículas finas. Recuperado de*

<https://www.gob.mx/semarnat/prensa/trabaja-came-en-protocolo-de-contingencias-para-particulas-finas?idiom=es>

Sedema. (2016). *Inventario de Residuos Sólidos. Ciudad de México 2016. Ciudad de México: Sedema.*

SEGOB. (1998). PROYECTO de Norma Oficial Mexicana NOM-123-ECOL-1998. Que establece el contenido máximo permisible de compuestos orgánicos volátiles (COVs), en la fabricación de pinturas de secado al aire base solvente para uso doméstico y los procedimientos para la determinación del contenido de los mismos en pinturas y recubrimientos. Diario Oficial de la Federación. SEMARNAT. Recuperado de https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4866278&fecha=17/02/1998#gs.tab=0

SEMARNAT (2017). *Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire (ProAire) en el Estado de Puebla.*

SEMARNAT (2024). *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, S. Documentos del Inventario Nacional de Emisiones.*

<https://www.gob.mx/semarnat/documentos/documentos-del-inventario-nacional-de-emisiones>

Semarnat. (2014). *Versión de difusión del Programa Especial de Cambio Climático, 2014-2018 (PECC 2014-2018).*

https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5342492&fecha=28/04/2014#gs.tab=0

Semarnat. (2021). *Versión de difusión del Programa Nacional de Cambio Climático, 2014-2018 (PECC 2021-2024).*

https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5634786&fecha=08/11/2021#gs.tab=0

Sexton, K., Adgate, J. L., Church, T. R., Ashley, D. L., Needham, L. L., Ramachandran, G., ... & Ryan, A. D. (2005). *Children's exposure to volatile organic compounds as determined by longitudinal measurements in blood. Environmental health perspectives, 113(3), 342-349.*

- SGM. (2017). Servicio Geológico Mexicano. Difracción de rayos X. sgm.gob.mx. Recuperado 3 de octubre de 2024, de <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Minerales/Difraccion-de-rayos-X.html#:~:text=La%20difracci%C3%B3n%20en%20polvo%20es,del%20difract%C3%B3metro%20de%20rayos%20X>.
- Skoog, Holler y Nieman. (2002), *Principios de Análisis Instrumental*, España, Mc Graw Hill, 5ª edición.
- SMADSOT. (2024,). Secretaria De Medio Ambiente Desarrollo Sustentable Y Ordenamiento Territorial. Red Estatal de Monitoreo Atmosférico (REMA). CALIDAD DEL AIRE PUEBLA. Recuperado 2 de noviembre de 2024, de https://calidaddelaire.puebla.gob.mx/views/principal_monitoreo.php#section_monitoreo
- Tandon, S.P., Gupta, J.P. (1970), *Measurement of forbidden energy gap of semiconductors by diffuse reflectance technique*, *Phys. Stat. Sol.* 38 363-367.
- Teh, C., & Mohamed, A. (2011). *Roles of titanium dioxide on photocatalytic reduction of carbon dioxide*. *Journal of Nanomaterials*, 2011(5), 1-17.
- Wallace-Wells, D. (2018). *The uninhabitable earth*. In *The Best American Magazine Writing 2018* (pp. 271-294). Columbia University Press.
- Wang, P., & Zhao, W. (2008). Assessment of ambient volatile organic compounds (VOCs) near major roads in urban Nanjing, China. *Atmospheric Research*, 89, 289-297. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSRES.2008.03.013>.
- Watson J.G., Chow J.C. y Fujita E.M. (2001) Review of Volatile Organic Compound Source Apportionment by Chemical Mass Balance. *Atmos. Environ.*, (35):1567–1584.
- Wendlandt, W.W., Hecht, H.G. (1966), *Reflectance Spectroscopy*, Wiley Interscience, New cork.
- WHO (2022). *monitoring health for the SDGs, sustainable development goals*. Geneva: World Health Organization.
- WHO (2022). *monitoring health for the SDGs, sustainable development goals*. Geneva: World Health Organization.

- WMO (World Meteorological Organization) (2018). *Scientific assessment of ozone depletion: 2018. Global Ozone Research and Monitoring Project-Report No. 58.*
- Yang, C., Miao, G., Pi, Y., Xi, Q., Wu, J., Li, Z., & Xiao, J. (2019). Abatement of various types of VOCs by adsorption/catalytic oxidation. *Chemical Engineering Journal*, 370, 1128-1153.
- Zhang, S., You, J., Kennes, C., Cheng, Z., Ye, J., Chen, D., Chen, J., & Wang, L. (2018). Current advances of VOCs degradation by bioelectrochemical systems: a review. *Chemical Engineering Journal*, 334, 2625-2637.
- Zhang, Z., Jiang, Z., & Shangguan, W. (2016). Low-temperature catalysis for VOCs removal in technology and application: a state-of-the-art review. *Catalysis Today*, 264(1-2), 270-278.
- Zhou, L., & Tang, L. (2021). *Environmental regulation and the growth of the total-factor carbon productivity of China's industries: Evidence from the implementation of action plan of air pollution prevention and control. Journal of environmental management*, 296, 113078.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113078>.
- Zuk, M., Tzintzun Cervantes, M. G., & Rojas Bracho, L. (2007). *Tercer almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en nueve ciudades mexicanas. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología (INE-Semarnat).* <https://www.ine.gob.mx>